

УДК 621.643.053

В.О. ДЕРІЙ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
В.Д. БІЛОДІД, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ, 03150. Україна

ГРАНИЧНІ ОБСЯГИ АКУМУЛЯЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Визначено потреби в акумуляції теплової енергії в мережах систем централізованого теплопостачання при використанні електричних теплогенераторів для регулювання навантаження ОЕС України. Проаналізовано процеси акумуляції теплової енергії в мережах в опалювальний та не опалювальний періоди. Оцінено граничні можливості магістральних теплових мереж щодо акумуляції в них теплової енергії при проектному та фактичному температурних графіках.

Ключові слова: ОЕС України, графік електричних навантажень, нічний провал, потужність, електроенергія, електричні теплогенератори, система централізованого теплопостачання, тепла енергія, магістральна мережа.

Одним із серйозних викликів, які стоять перед Об'єднаною енергосистемою (ОЕС) України є дефіцит її маневреної потужності. Ця проблема виникла в зв'язку з об'єктивними факторами, які склалися: структура та стан генеруючих потужностей, зміна структури виробництва, зростання споживання електроенергії населенням та інше [1]. Надалі, в зв'язку з бурхливим впровадженням сонячних та вітрових електростанцій, потужність від яких в даний час в Україні мало прогнозована, ця проблема буде тільки загострюватися. Особливо відчутній дефіцит маневреної потужності в години «нічного провалу» (23^{00} – 7^{00}) графіка електричних навантажень (ГЕН), під час якого різко падає електричне навантаження в енергосистемі. За даними НЕК «Укренерго» для запобігання утворення надлишку електричної енергії в енергосистемі щодоби вимушено зупиняються 7-10 вугільних енергоблоків ТЕС 200–300 МВт, котрі використовуються для регулювання. Циклічна робота цих маневрових блоків призводить до зменшення їх ресурсу, перевитрат палива, збільшення витрат на експлуатацію, поточний та капітальні ремонти. Загалом втрати ОЕС України від дефіциту маневреної потужності за різними оцінками сягають 2,2 млрд грн в рік. Тому дослідження, спрямовані на повне чи часткове вирішення вищезазначеної проблеми, є актуальним.

Одним із можливих варіантів вирішення проблеми зменшення дефіциту маневреної потужності ОЕС України є теплоємнісна акумуляція. Суть метода полягає в тому, що при виникненні надлишку електричної енергії в енергосистемі вона перетворюється в теплову за допомогою електричних теплогенераторів. Далі, тепла енергія за допомогою мереж частково подається споживачам, а частково акумулюється в них для подальшого споживання.

Питання використання теплових мереж для акумуляції теплової енергії висвітлювалося в ряді робіт, наприклад [2–4]. У цих роботах аналізувалися технічні та інституційні фактори акумуляції теплової енергії в мережах, оцінювався її потенціал, розглядалися питання надійності. Але детально не визначалися граничні обсяги акумуляції теплової енергії в мережах, що і є метою даної роботи.

Перед проведенням аналізу з визначення граничних обсягів акумуляції теплової енергії в мережах систем централізованого теплопостачання, визначимо потреби в акумуляції електричної енергії при використанні електричних теплогенераторів для ущільнення графіків електричних навантажень ОЕС України.

У роботі [5] показано, що основним параметром, який обумовлює необхідну максимальну величину маневреної потужності енергосистеми, є глибина її нічного провалу ГЕН. Глибину нічного провалу ΔP можна визначити двома шляхами, згідно виразів (1) та (2):

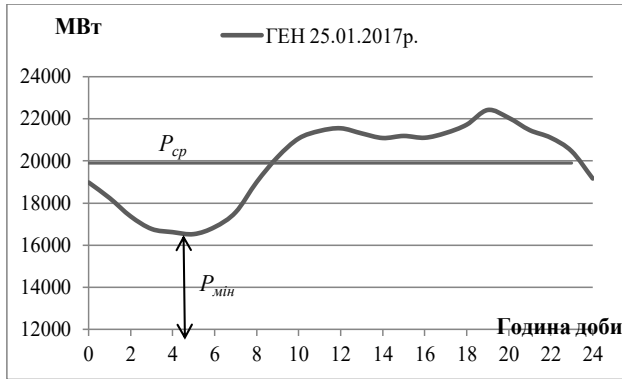
© В.О. ДЕРІЙ, В.Д. БІЛОДІД, 2019

$$\Delta P = P_{cp} - P_{min}, \quad (1)$$

де P_{cp} – середня величина навантаження ОЕС України за добу; P_{min} – мінімальна величина електричного навантаження ОЕС України, як це показано на рис. 1.

$$\Delta P = P_{23} - P_{min}, \quad (2)$$

де P_{23} – величина потужності при 23⁰⁰ попередньої доби.



Примітка. Вісь часу τ зміщена вправо на одну годину (за 0 взято 23⁰⁰ 24 січня).

Рис. 1. Графік навантажень ОЕС України в робочий день

Глибина нічного провалу ГЕН, згідно формул (1) та (2), були визначені для кожної доби 2016–2017 рр. І хоча, для кожної конкретної доби вони можуть суттєво відрізнятись, все ж максимальні їх значення за цей період дуже близькі та становлять: згідно формули (1) – 3945 МВт (12.12.2016), а згідно формули (2) – 3850 МВт (01.01.2017). Як видно різниця складає біля 2,4%. Тому для оцінки величини нічного провалу можна використовувати обидві формули, а для вирішення проблем регулювання електричного навантаження доцільно застосовувати вираз (2), що в подальшому і буде зроблено.

У процесі виконання роботи були досліджені глибини нічних провалів за період 2014–2018 рр. Результати досліджень показано на рис. 2.



Рис. 2. Середні та максимальні значення глибин нічних провалів в період 2014–2018 рр.

Як видно із рис. 2 глибини нічних провалів (як максимальні, так і середні значення) мають тенденцію до зменшення. Але зміна у 2018 р. незначна порівняно з 2017 р. (2440 і 2472 МВт – 1,3% для середніх значень та 3779 і 3850 МВт – 1,8% для максимальних). Це говорить про те, що процеси зміни навантаження та режиму роботи споживачів встановилися.

Також досліджено максимальні та середні значення глибин нічних провалів за кожний місяць 2018 р. Результати наведено на рис. 3.

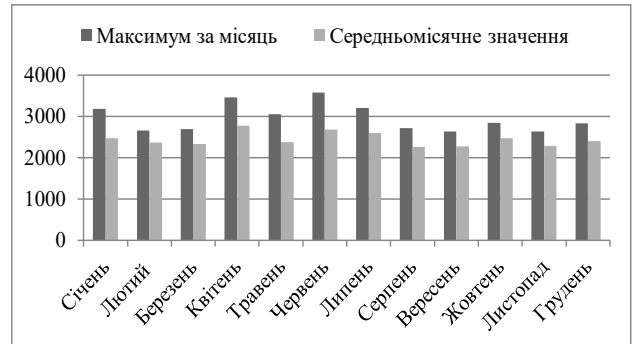


Рис. 3. Глибини нічних провалів по місяцях у 2018 р.

Із рис. 3 видно, що максимальне значення глибини нічного провалу ГЕН було в червні (21.06.2018 р.) і становило 3579 МВт, що і було прийнято для подальшого аналізу.

Оцінимо, яку максимальну кількість теплової енергії необхідно було б акумулювати при впровадженні електричних теплогенераторів для ущільнення ГЕН.

У роботі [6] показано, що кількість теплової енергії $Q_{ак}$, яку необхідно акумулювати, можна визначити виходячи із виразу

$$Q_{ак} = \int_0^{\tau} k(b\tau - a\tau^2) d\tau, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт перетворення електричного теплогенератора;

a, b – коефіцієнти функції апроксимації нічного провалу (параболи згідно [5]);

τ – тривалість нічного провалу ГЕН (8 год).

Значення коефіцієнтів функції апроксимації для нічного провалу 21.06.2018 р. наступні: $a = 157,7$; $b = 1806,4$. Якщо в якості електричних теплогенераторів використовувати електрокотли, то коефіцієнт перетворення $k = 0,98$. Підставляючи значення величин у формулу (3) та провівши інтегрування отримаємо значення теплової енергії, яку необхідно акумулювати в мережах та потім спожити – $Q_{ак} = 30273$ МВт·год або 26030 Гкал.

Статистичні дослідження ГЕН за 2018 р. показали, що при виборі сумарної електричної потужності електричних теплогенераторів значенням

3000 МВт дефіцит маневреної потужності ОЕС буде покритий в 90% випадків. Такому значенню відповідає глибина нічного провалу 14.04.2018 р. (3002 МВт). Коефіцієнти функції апроксимації при цьому будуть рівні: $a = 157,8$; $b = 1692,8$. Виконавши дії аналогічно вищесказаному, отримуємо $Q_{ак} = 26694$ МВт·год, або 22953 Гкал. На це значення і будемо орієнтуватися надалі.

Теплові мережі це одна із складових та найбільш вразлива частина систем тепlopостачання. Згідно статистичних даних на кінець 2012 р. протяжність теплових мереж у двотрубному вимірі становила 32400 км [7], але, враховуючи окупацію півострова Крим та частин Донецької і Луганської областей, цей показник дещо зменшився. На кінець 2014 р. протяжність теплових мереж у міських поселеннях України становила 23314,4 км [8]. Термін експлуатації більшості теплових мереж перевищує 20–25 років. За час експлуатації ізоляція теплових мереж за рахунок пошкоджень в інших інженерних мережах міста (водопровід та каналізація), а також за рахунок природних умов значно зносилася. Відбулася інтенсивна корозія металу трубопроводів та порушення їх герметичності. Наслідком чого є збільшення втрат теплової енергії через ізоляцію та витoki теплоносія. На деяких котельнях витрати підживлювальної води теплових мереж значно перевищують нормативне значення. Аналіз статистичних даних [8] показав, що протягом 2005–2014 рр. частка аварійних ділянок теплових мереж невинно зростала. На кінець 2014 р. в системах тепlopостачання частини областей вона становила 40% і більше. Тепlopостачальні підприємства проводять реконструкцію теплових мереж із впровадженням попередньо

ізованих трубопроводів, але темпи заміни трубопроводів теплових мереж менші, ніж темпи їх старіння. У зв'язку із незадовільним станом теплових мереж для забезпечення необхідного рівня надійності ряд тепlopостачальних підприємств великих міст (наприклад Київ, Харків) змінили проектні температурні графіки 150/70 °С на графіки із меншими максимальними температурами (близько 120/70 °С). Для задоволення попиту споживачів ці підприємства змушені були перейти від якісного регулювання подачі теплової енергії (регулюється температура теплоносія) до якісно кількісного (регулюється температура та витрати теплоносія). Але рано чи пізно теплові мережі все ж будуть модернізовані. Тому, подальша оцінка граничних обсягів акумуляції теплової енергії в мережах буде зроблена для фактичних та проектних температурних графіків.

Згідно діючих нормативних документів [9], акумуляція теплової енергії можлива тільки у магістральних мережах. Відповідно до цього для подальшого аналізу необхідно знати об'єм їх заповнення. На жаль, в статистичних показниках наведені сумарні дані по тепловим мережах [8], без розподілу їх на магістральні та кварталні. У роботі [10], на основі проведених енергетичних аудитів та передпроектних техніко-економічних досліджень автори оцінили довжину, середнього діаметру магістральних мереж систем централізованого тепlopостачання ряду міст України. У результаті подальших досліджень ця оцінка була уточнена. Кінцеві результати наведено в табл. 2.

Крім того, там же запропонована методика, яка дає можливість в першому наближенні визначити

Таблиця 2. Характеристики теплових мереж

Місто/підприємство	Протяжність теплових мереж (у двотрубному вимірі), км		Відносна протяжність магістральних мереж, %	Середньозважений діаметр магістральних мереж, мм
	всіх мереж	магістральних мереж		
Київ	2287,9	639,7	28,0	549
Харків	1593	403	25,3	580
Херсон	250,4	64,03	25,6	361
Івано-Франківськ	140	25,9	18,5	422
Чернігів	174,2	41,5	23,8	368
Тернопіль	176,6	28,42	16,1	286
Хмельницький	240,2	56,15	23,4	395
Комунальне підприємство «Лисичанськтепмережа»	70,8	21	29,7	
Державне підприємство «Кіровоградтепло»	150,5	43,9	29,2	
Середнє значення			24,4	423

загальну довжину магістральних теплових мереж, яка згідно цієї методики становить 3496,2 км при середньозваженому діаметрі 423 мм. Об'єм заповнення подавального та зворотного трубопроводів $V_{1,2}$ теплових мереж був врахований у [10], який становить 491076,6 м³.

В опалювальний період акумуляційні можливості теплових мереж залежать від наступних факторів – температури зовнішнього повітря [3], допустимої температури у зворотному трубопроводі [7], температурного графіка та об'єму заповнення магістральних теплових мереж.

Проведені дослідження дозволили авторам сформулювати графіки залежності потужності, яка створює акумуляцію в теплових мережах від температури зовнішнього повітря (на прикладі котельні № 5 системи централізованого теплопостачання м. Харків), і які наведені на рис. 4.

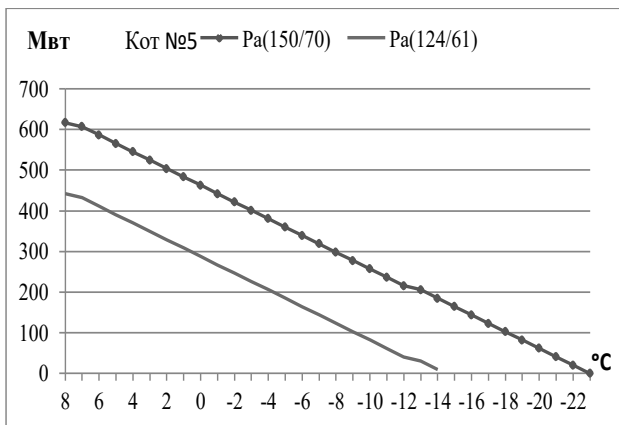


Рис. 4. Потужність, яка створює акумуляцію

Як видно із рис. 4 при проектному температурному графіку (150/70 °C) акумуляція стає неможливою при температурі повітря мінус 23 °C, далі при підвищенні температури потужність акумуляції зростає. Через зношеність теплових мереж в даний час застосовується інший температурний графік – 124/61 °C, при якому акумуляція стає неможливою уже при мінус 14 °C. А враховуючи обмеження по температурі зворотного трубопроводу потужність акумуляції, яка показана на графіку буде меншою на 30–50%.

Із рис. 4 видно, що в опалювальний період величина акумульованої теплової енергії не є постійною. Вона обернено пропорційна температурі зовнішнього повітря. При низьких температурах повітря акумуляція в теплових мережах практично неможлива. Причиною є те, що в мережах знаходиться максимально допустима кількість теплової енергії і подальше її збільшення призведе до втрати надійності та виникнення аварійної ситуації. Але це не означає що в даному випадку електричні теплогенератори

застосовувати неможливо. Теплова енергія, яку вони вироблять, буде замінити теплову енергію штатних котлів теплового джерела. А котли при цьому будуть розвантажені.

Для визначення середньої величини акумульованої теплової енергії протягом опалювального періоду можна використати статистичні дані наведені в [9] (п. 13.6, абзац 2) – середня температура теплоносія в подавальному трубопроводі (за опалювальний сезон для більшості населених пунктів України становить близько 65 °C, а для зворотного – 50 °C. Граничну кількість акумульованої теплової енергії в мережах визначимо виходячи із формули [12]

$$Q_m = k\rho V C \Delta T [(T1_{\max} - T1_t) + (T2_{\max} - T2_t)] \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

де k – коефіцієнт, який враховує акумуляційну здатність теплових мереж, згідно [4] для трубопроводів діаметром 425 мм він дорівнює 1,1;

ρ – густина теплоносія;

V – об'єм заповнення подавального/а зворотного трубопроводу;

C – питома теплоємність теплоносія;

ΔT – температурний потенціал акумуляції.

Температурний потенціал визначається згідно виразу

$$\Delta T = (T1_{\max} - T1_t) + (T2_{\max} - T2_t), \quad (5)$$

де $T1_{\max}$, $T2_{\max}$ – максимальні температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах;

$T1_t$, $T2_t$ – температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах згідно температурного графіка.

Підставляючи дані температур для проектного та фактичного температурних графіків у вираз (5) отримаємо значення температурних потенціалів, які будуть рівними 105 та 75 °C відповідно. Далі, підставивши дані у формулу (4), отримаємо граничні значення середньої акумульованої теплової енергії в магістральних мережах систем централізованого теплопостачання, яка для проектного температурного графіка 150/70 °C становить 56719 Гкал, а для фактичного температурного графіка 120/60 °C – 35112 Гкал.

В неопалювальний період, як правило, гаряча вода подається по стандартному температурному графіку 70/42,5 °C. При акумуляції теплової енергії важливим моментом є не перевищення допустимої температури теплоносія у зворотному трубопроводі. Випробовування зворотного трубопроводу мережі проводять при температурі теплоносія 90 °C. Тому, при акумуляції можна прийняти цю температуру на рівні 80 °C. Провівши розрахунки аналогічні тим, які наведено вище, три-

маємо граничне значення акумульованої теплової енергії в мережах в неопалювальний період, яке дорівнює 25929 Гкал. Результати проведеного аналізу показані в табл. 3.

Таблиця 3. Потреби та можливості акумуляції теплової енергії в мережах

Назва	Період сезону	
	Опалювальний	Не опалювальний
Граничні можливості теплових мереж, щодо акумуляції теплової енергії, Гкал	Проектний темп. графік – 56719 Фактичний темп. графік – 35112	25929
Потреба в акумуляції теплової енергії, Гкал	22953	

Як видно із табл. 3 в опалювальний період середні граничні акумуляційні можливості теплових мереж достатні для акумуляції теплової енергії при проектному та фактичному температурних графіках. У неопалювальний період акумуляційні можливості теплових мереж дещо менші від потреб, але достатні при умові часткового заміщення потужності штатних котлів електричними теплогенераторами.

Безумовно на практиці в якості електричних теплогенераторів будуть використовуватися комплекси електричних котлів та теплових насосів. Частина теплової енергії, яку вони вироблять буде замішувати теплову енергію штатних 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 роботу їх ефективну роботу.

ВИСНОВКИ

1. Станом на 2018 р. потреби в акумуляції теплової енергії в системах централізованого теплопостачання при встановленні в них електричних теплогенераторів для регулювання навантаження ОЕС України становлять:

- для 100% покриття дефіциту маневреної потужності – 26030 Гкал;
- для 90% покриття цього дефіциту – 22953 Гкал.

2. Граничні акумуляційні можливості магістральних теплових мереж систем централізова-

ного теплопостачання в опалювальний період для проектного температурного графіка становлять 56719 Гкал, а для реального – 35112 Гкал, в неопалювальний період – 15929 Гкал.

3. Показано, що існуючі системи централізованого теплопостачання здатні забезпечити ефективно функціонування електричних теплогенераторів при їх використанні як споживачів-регуляторів при покритті графіків електричних навантажень в ОЕС України.

1. Кулик М.М. Співставний аналіз техніко-економічних характеристик Канівської ГАЕС та комплексу споживачів-регуляторів для покриття графіків електричних навантажень. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 4(39). С. 5—10.
2. Подобед В.С. Аккумуляирование тепловой энергии в водяных тепловых сетях. *Энергетическая стратегия*. 2011. № 5(23). С. 22—26.
3. Дерій В.О. Potential of thermal energy accumulation in district heating systems networks. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 4(39). С. 29—33.
4. Білодід В.Д., Дерій В.О. Акумуляційна здатність теплових мереж. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 3(42). С. 31—35. <https://doi.org/10.15407/pge2015.03.031>.
5. Дерій В.О., Згуровець О.В. Дослідження графіків електричних навантажень енергосистеми для визначення можливостей їх ущільнення шляхом використання електричних теплогенераторів. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 4(51). С. 52—60. <https://doi.org/10.15407/pge2017.04.052>.
6. Дерій В.О. Особливості спільної роботи систем централізованого теплопостачання та електричних теплогенераторів при регулюванні ними навантаження ОЕС України. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 3(54). С. 54—59. <https://doi.org/10.15407/pge2018.03.054>.
7. Про основні показники роботи опалювальних котелень і теплових мереж України за 2014 рік: стат. збірник. К.: Державна служба статистики України, 2015. 17 с.
8. Протяжність ветхих та аварійних теплових і парових мереж за 2011–2014 роки. К.: Державна служба статистики України, 2015. URL: https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2013/pr/pvam/pvam_u/pvatpm_u.htm (дата звернення: 22.02.2019).
9. ДБН В.2.5-39:2008. ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
10. Дерій В.О. Аналіз теплових мереж СЦТ України. *Енергетика та електрифікація*. 2016. № 6. С. 21—26.

Надійшла до редколегії: 14.05.2019