

УДК 621.311.22

Г. А. Баласанян, к. т. н., доц.

## ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ УСТАНОВОК КОГЕНЕРАЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ Й АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Запропоновано методику визначення номінальних параметрів когенераційних установок, що використовують акумулятори тепла для узгодження графіків теплового і електричного навантаження споживача. Досліджено залежність номінальних параметрів систем когенерації від режимів акумуляції тепла.

### Вступ

Розповсюдження розподілених систем енергопостачання на базі установок когенерації обумовлено можливістю спільного використання різноманітних джерел енергії, адаптованих до змін економічних та екологічних чинників і структури енергоресурсів. Важливою перевагою таких систем енергопостачання є також можливість оптимізації їх роботи інтегруванням з альтернативними джерелами енергії, тепловими насосами, використанням тригенерації тощо.

### Основний текст

Добові графіки електричного і теплового навантажень об'єктів енергопостачання, що використовують когенераційні установки малої потужності, характеризуються значною нерівномірністю, низьким коефіцієнтом заповнення і невідповідністю утилізованої теплової потужності потребі об'єкта в теплі [1], що може істотно знижувати економічну ефективність когенерації.

Одним із способів підвищення ефективності когенераційних технологій і узгодження добових графіків електричного і теплового навантажень установки є акумуляція тепла [2]. Використання теплових акумуляторів дає економію капітальних витрат від зниження номінальної потужності установки, потужності додаткових (пікових) джерел тепла, а також економію палива від зниження тривалості роботи пікових установок.

В значній мірі номінальні параметри когенераційної установки (КУ) і акумулятора тепла залежать від режимів роботи і виду переважаючого навантаження споживача. На рис. 1 показаний типовий для комунально-побутових споживачів добовий графік теплового навантаження, що характеризується значною нерівномірністю і відносно низьким коефіцієнтом заповнення  $K_{\text{зап}} = 0,6$ .

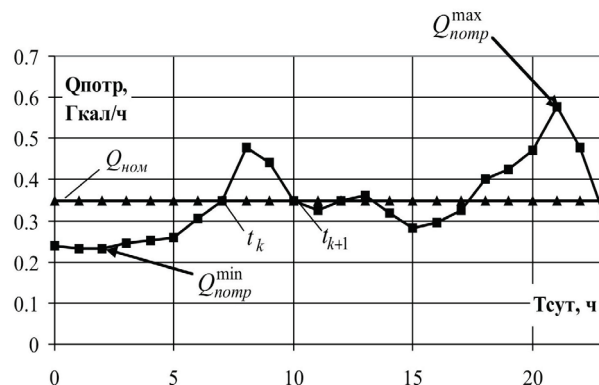


Рис. 1. Добовий графік теплового навантаження споживача

Коефіцієнт заповнення графіка визначається виразом [3]

$$K_{\text{зап}} = \frac{\int_0^T F(t) dt}{Q_{\text{потр}}^{\text{max}} T},$$

де  $F(t)$  – функціональна залежність, що описує динаміку зміни теплового навантаження споживача  $Q_{\text{потр}}(t)$ , яка може задаватися інтерполяційним поліномом, в табличному, графічному вигляді тощо;  $T$  – період часу, що дорівнює добі;  $t$  – поточний момент часу;  $Q_{\text{потр}}^{\text{max}}$  – максимальне значення споживаного теплового навантаження.

В роботі когенераційної установки за графіком електричних навантажень, тобто за відсутності синхронізації установки з мережею, виконується умова рівності миттєвих значень генерованої та споживаної електричних потужностей:  $N_{\text{потр}}(t) = N_{\text{ген}}(t)$ . Графіки теплового навантаження споживача і утилізації тепла від когенераційної установки не співпадають в часі:  $Q_{\text{потр}}(t) \neq Q_{\text{ут}}(t)$ , тому для ефективного використання утилізованого тепла використовується його акумулювання. Якщо  $Q_{\text{ут}}(t) > Q_{\text{потр}}(t)$  – тепловий акумулятор заряджається, якщо  $Q_{\text{ут}}(t) < Q_{\text{потр}}(t)$  – тепловий акумулятор розряджається. При цьому ємність теплового акумулятора залежить від добових графіків утилізації і споживання тепла і визначається виразом

$$E_a^{\text{max}} = \max_{t \in [0; T]} \left( \eta_a \int_0^t (Q_{\text{ут}}(t) - Q_{\text{потр}}(t)) dt \right),$$

де  $0 \leq \eta_a \leq 1$  — коефіцієнт ефективності акумуляції тепла.

Покриття пікових теплових навантажень на проміжку часу  $[t_k, t_{k+1}] \subset [0, T]$  за рахунок акумуляції тепла можливе з дотриманням умови

$$A(t_k) - D(t_k) \geq 0, \quad (1)$$

де  $A(t_k) = \eta_a \int_0^{t_k} (Q_{\text{ут}}(t) - Q_{\text{потр}}(t)) dt$  – запас тепла в акумуляторі в момент часу  $t_k$ ;

$D(t_k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} (Q_{\text{потр}}(t) - Q_{\text{ут}}(t)) dt$  – дефіцит тепла в системі за умови  $Q_{\text{ут}}(t) < Q_{\text{потр}}(t)$  за проміжок часу  $[t_k, t_{k+1}]$ .

Якщо умова (1) не виконується, то покриття дефіциту тепла здійснюється за рахунок додаткового джерела (водогрійного котла, теплового насоса, відновлювального джерела тощо), номінальна потужність якого

$$Q_{\text{доп}}^{\text{ном}} = \max_{t \in [0; T]} (Q_{\text{потр}}(t) - Q_{\text{ут}}(t)).$$

Застосування акумуляції тепла під час роботи КУ за графіком електричних навантажень не знижує її номінальну потужність, яка визначається піковим значенням потужності графіка електричного навантаження споживача  $N_{\text{потр}}^{\text{max}}$ , але дозволяє знизити номінальну потужність додаткового джерела. Економічна ефективність акумуляції буде вище при низькому коефіцієнті заповнення графіка теплового навантаження.

Під час роботи когенераційної установки за графіком теплових навантажень, тобто при синхронізації установки з енергосистемою, виконується умова рівності значень утилізованої і споживаної теплової потужностей  $Q_{\text{ут}}(t) = Q_{\text{потр}}(t)$ .

Надлишок або дефіцит генерованої електричної потужності  $\Delta N_i = N_i^{\text{ген}} - N_i^{\text{потр}}$ , що виникає при цьому, відповідно продається в мережу або купляється з неї. Номінальна електрична потужність когенераційної установки визначається за піковим навантаженням добового графіка теплового навантаження споживача  $N_{\text{ном}} = N(Q_{\text{потр}}^{\text{max}})$ .

Підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності когенераційної установки і відповідне зниження  $N_{\text{ном}}$  можливе за рахунок заміщення пікових теплових навантажень акумульованим теплом або теплом від альтернативного джерела [4].

При акумуляції тепла номінальна теплова потужність установки  $Q_{\text{ном}}$  визначається з рівняння

балансу зарядки і розрядки теплового акумулятора:

$$\eta_a \sum_{i=0}^n \left( \int_{t_{H_i}}^{t_{K_i}} (Q_{\text{НОМ}} - Q_{\text{ПОТР}}(t)) dt \right) = \sum_{j=0}^m \left( \int_{t_{H_j}}^{t_{K_j}} (Q_{\text{ПОТР}}(t) - Q_{\text{НОМ}}) dt \right), \quad (2)$$

де  $n$  – кількість проміжків часу за добу, в які  $Q_{\text{НОМ}} > Q_{\text{ПОТР}}(t)$ ;  $m$  – кількість проміжків часу за добу, в які  $Q_{\text{НОМ}} < Q_{\text{ПОТР}}(t)$ ;  $i, j$  – порядкові номери проміжків часу, в які відповідно  $Q_{\text{НОМ}} > Q_{\text{ПОТР}}(t)$  і  $Q_{\text{НОМ}} < Q_{\text{ПОТР}}(t)$ ;  $t_{H_i}, t_{K_i}, t_{H_j}, t_{K_j}$  – відповідно початкові та кінцеві моменти проміжків часу  $[t_{H_i}, t_{K_i}]$  і  $[t_{H_j}, t_{K_j}]$ , в які  $Q_{\text{НОМ}} > Q_{\text{ПОТР}}(t)$  і  $Q_{\text{НОМ}} < Q_{\text{ПОТР}}(t)$ .

$$\sum_{i=0}^n \Delta t_i + \sum_{j=0}^m \Delta t_j = T,$$

де  $\Delta t_i = t_{K_i} - t_{H_i}$ ;  $\Delta t_j = t_{K_j} - t_{H_j}$ .

В результаті розв'язання рівняння (2) отримуємо шукане  $Q_{\text{НОМ}}$

$$Q_{\text{НОМ}} = \frac{\eta_a \sum_{i=0}^n \left( \int_{t_{H_i}}^{t_{K_i}} Q_{\text{ПОТР}}(t) dt \right) + \sum_{j=0}^m \left( \int_{t_{H_j}}^{t_{K_j}} Q_{\text{ПОТР}}(t) dt \right)}{\eta_a \sum_{i=0}^n \Delta t_i + \sum_{j=0}^m \Delta t_j}. \quad (3)$$

Обчислення  $Q_{\text{НОМ}}$  безпосередньо за (3) пов'язано зі значною складністю аналітичного визначення компонентів, що входять в нього, оскільки моменти часу  $t_{H_i}, t_{K_i}, t_{H_j}, t_{K_j}$ , в свою чергу, залежать від  $\eta_a$  і  $Q_{\text{ПОТР}}(t)$ . Тому для визначення  $\sum_{i=0}^n \left( \int_{t_{H_i}}^{t_{K_i}} Q_{\text{ПОТР}}(t) dt \right)$  і  $\sum_{j=0}^m \left( \int_{t_{H_j}}^{t_{K_j}} Q_{\text{ПОТР}}(t) dt \right)$  використовується числовий метод [5], відповідно до якого період часу  $[0, T]$  розбивається на  $L$  рівних ділянок. Обчислення вказаних сум і проміжків часу  $\sum_{i=0}^n \Delta t_i, \sum_{j=0}^m \Delta t_j$  числовими методами дозволило однозначно визначити  $Q_{\text{НОМ}}$  при заданому  $\eta_a$ .

В граничному випадку (при  $\eta_a = 1$ )  $Q_{\text{НОМ}}$  приймає мінімальне значення, яке дорівнює

$$Q_{\text{НОМ}}^{\min} = K_{\text{зап}} Q_{\text{ПОТР}}^{\max},$$

а вираз (3) спроститься до вигляду

$$Q_{\text{НОМ}}^{\min} = \frac{\int_0^T Q_{\text{ПОТР}}(t) dt}{T}.$$

В іншому граничному випадку (при  $\eta_a \rightarrow 0$ )  $Q_{\text{НОМ}}$  приймає максимальне значення, яке дорівнює  $Q_{\text{ПОТР}}^{\max}$ .

Якщо існують обмеження ємності акумулятора тепла ( $E_a < E_a^{\max}$ ), то  $Q_{\text{НОМ}}^{\min}$  визначається з виразу

$$Q_{\text{НОМ}}^{\min} = \frac{\sum_{j=0}^m \left( \int_{t_{H_j}}^{t_{K_j}} Q_{\text{ПОТР}}(t) dt \right) - E_a}{\sum_{j=0}^m \Delta t_j}.$$

На рис. 2 показана залежність  $Q_{\text{ном}} / Q_{\text{ном}}^{\text{max}}$  від  $\eta_a$  зі зміною коефіцієнта заповнення  $K_{\text{зап}}$  добового графіка теплового навантаження споживача від 0,5 (піковий режим) до 0,9 (базовий режим), розрахована у відповідності з (3), яка свідчить про високу ефективність застосування акумуляторів тепла для зниження номінальної потужності когенераційних установок, особливо при низьких значеннях коефіцієнта заповнення графіків навантаження.

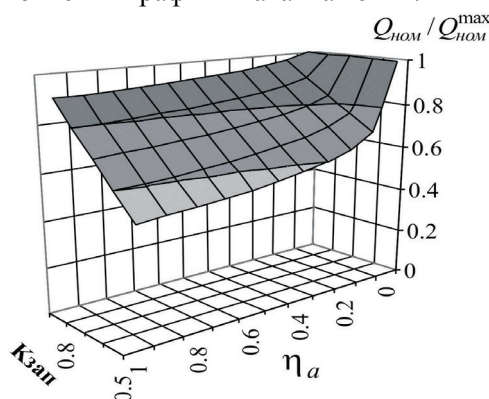


Рис. 2. Залежність відносного значення номінальної потужності когенераційної установки від ефективності акумуляції тепла

### Висновки

1. Запропоновано методику визначення номінальних параметрів когенераційних установок, що використовують акумулятори тепла для узгодження графіків теплового і електричного навантажень об'єкта енергопостачання.
2. Визначені режими, що забезпечують найвищу ефективність застосування акумуляції тепла при експлуатації установок когенерації.
3. Досліджено залежність номінальних параметрів систем когенерації від режимів акумуляції тепла, виконана оцінка ефективності застосування акумуляторів тепла для зниження номінальної потужності когенераційних установок.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баласанян Г. А., Мазуренко А. С. Согласование графиков тепловой и электрической нагрузок для систем когенерации малой мощности // Пром. Теплотехника. — 2005. — № 3. — С. 32—39.
2. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Бекман Г., Гилли П., пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 275 с.
3. Б. Н. Николаев. Электрическая часть электростанций и подстанций. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 640 с.
4. Баласанян Г. А., Мазуренко А. С., Сычова Е. А. Повышение эффективности системы энергоснабжения на базе установки когенерации малой мощности // Новини енергетики. — 2005. — № 3. — С. 34—38.
5. Зварькин В. М. и др. Численные методы: Учеб. пособие. — М.: Просвещение, 1990. — 176 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом Всеукраїнської науково-технічної конференції «Альтернативні екологічно чисті та відновлювальні джерела енергії» (30.05—1.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.06.07  
Рекомендована до друку 02.07.07

**Баласанян Геннадій Альбертович** — доцент кафедри ТЕСЕЗТ.  
Одеський національний політехнічний університет