УДК 621.31:664.1:005

Енергоефективність експлуатаційних режимів теплоелектроцентралей промислових підприємств

С. В. Барановська[1], В. Н. Філоненко[2]
[1] к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, svetaknuba@gmail.com, ORCID 0000-0003-2611-2687
[2] к.т.н., доц. Національний університет харчових технологій, Київ, Україна, ipren@ukr.net,

Анотація. Підприємства з енергоємним виробництвом мають в своїй структурі теплоелектроцентраль (ТЕЦ). Під час здійснення заходів щодо підвищення енергоефективності можна досягати різних співвідношень між показниками ефективності споживання теплової та електричної енергій підприємствами на вироблення продукції. Певні співвідношення між питомими тепло- та електроспоживанням на виробництво продукції спонукають підприємство купувати певну частку електроенергії в районній енергосистемі (РЕС), для запобігання скидання в атмосферу відпрацьованої пари в турбіні, чи до здачі в РЕС надлишку електроенергії власної генерації. Перед підприємством встає задача вибору режимів експлуатації ТЕЦ. Висвітлена в статті проблема вказує, що вибір визначають ціни на паливо для ТЕЦ, співвідношення між цінами електроенергії, що купують в РЕС і по якій здають в РЕС. Хоча у виробництві цукру електроспоживання не перевищує 11 % від енергії палива, вигідно електроенергію виробляти в надлишку (турбогенератори працюють в максимальному, наближеному до номінального режиму) і продавати в РЕС за ціною вищою за собівартість. Запропонований метод вибору режимів експлуатації турбоустановок ТЕЦ на прикладі цукрового заводу, який може застосовуватись і для будівельної галузі, а також методика визначення витрат на енергопостачання для всіх режимів експлуатації турбоустановки цукрового заводу. Встановлено вплив вартості електроенергії в РЕС на вибір режиму експлуатації турбоустановок ТЕЦ, які забезпечують мінімальні фінансові витрати на енергопостачання підприємства. Наведено метод визначення типорозміру турбоустановки ТЕЦ, яка задовольняє питомим показникам теплового та електричного споживання підприємства.

Ключові слова: Теплоелектроцентраль, ТЕЦ, турбоустановка, ефективність, промислове підприємство, цукровий завод.

Вступ. Одним з критеріїв оцінки економічної потужності країн є енергетична незалежність. У сучасній Україні основними завданнями є посилення енергетичної безпеки та здійснення активних заходів підвищення енергоефективності, особливо в енергоємних виробництвах. За даними «Публічного звіту Держенергоефективності підсумки 2020 р.» енергомісткість валового внутрішнього продукту України залишається однією з найвищих у світі, а саме у 2,7 рази вище ніж у Польщі та в 3,3 рази – ніж у Німеччині [1]. Ця обставина зменшує конкурентність української продукції на світовому ринку. У сучасній Україні стабільно працюють будівельна, харчова, комунальна та транспортна галузі, у технологіях яких використовують первині енергоносії та електричну енергію.

Виробництво залізобетонних виробів потребує теплової обробки, яка здійснюється парою, димовими газами чи з використанням електричного розігріву бетонної суміші. Тому доцільним є будівництво та використання власних теплоелектроцентралей (ТЕЦ). Переваги такого рішення очевидні:

- дозволяє вести виробництво в потрібні терміни;
- відсутні витрати на технологічне приєднання до центральних електричних та теплових мереж;
- виробництво захищено від недостатньої надійності та якості енергопостачання центральними мережами, що критично для високотехнологічного обладнання;
- собівартість власної генерації значно нижча тарифів на енергопостачання.

Харчова промисловість є найбільш енергоємною, особливо виробництво цукру. Співвідношення між показниками теплоспоживання $q_{ц.з}$, МДж/(т. буряку) та електроспоживання $e_{ц.з}$, кВт·год/(т. буряку) є показниками енергоефективності, які визначають режими експлуатації ТЕЦ та енергоспоживання заводу.

Актуальність дослідження. Система експлуатаційних параметрів ТЕЦ цукрових заводів, якими оперує енергоменеджмент, містить собівартість трьох видів електричної енергії:

- електроенергії власної генерації, виробленої потоком пари, який направлений на виробництво цукру;
- електроенергії, яка вироблена скидним в атмосферу потоком відпрацьованої в турбіні пари;
- електроенергії, придбаної в районній енергосистемі (РЕС).

Перед підприємством постає актуальне питання вибору режимів експлуатації ТЕЦ.

Останні дослідження та публікації. Собівартість електроенергії власної генерації, яку виробляють турбоустановки ТЕЦ за умови споживання всієї відпрацьованої турбіною пари заводом, тобто виробленої на «тепловому споживанні» заводу, не залежить ні від початкових, ні від кінцевих параметрів пари. Вона є найнижчою, оскільки виробляється в «теплофікаційному» циклі, має найвищий (не нижче 90 %) експлуатаційний коефіцієнт корисної дії (ККД) серед наявних турбоустановок. При ціні палива (природного газу) 14,3 тис.грн / тис.м^3 її заводська собівартість становить не більше 1,7 грн / кВт·год.

Собівартість електроенергії, виробленої «скидним» потоком пари, значно (в 6-8 разів) вища. Ця частина електроенергії виробляється, по суті, в «конденсаційному» циклі. У ньому роль конденсатора для скидної пари виконує навколишнє середовище, а роль конденсату, втраченого в атмосфері «скидної» пари − зворотний конденсат, який повертається заводом в ТЕЦ [2]. Електричний ККД такого циклу, а відповідно, і собівартість виробленої в його рамках електроенергії, значно залежать від параметрів гострої пари і температури конденсату, який повертається.

Для високих (35 бар / 435 °С) параметрів гострої пари ККД цього циклу не перевищує 12,4 %, а собівартість електроенергії, вироблена «скидним» потоком пари, становить не менше 10 грн / (кВт·год).

Для знижених (21 бар / 370 °С) параметрів гострої пари, що має станційний ККД цього циклу не вище 9,7 %, собівартість електроенергії, яка вироблена «скидним» потоком пари становить не менше 12,51 грн / (кВт·год).

Вартість електроенергії, одержуваної від РЕС, як відомо, визначає енергоринок регіону і становить від 3,09 грн / кВт·год. Через скасування Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, з 1.01.2019 р. диференційованого тарифу собівартість продукту зросте, особливо для підприємств з цілодобовим режимом роботи.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є обґрунтування вибору режиму експлуатації ТЕЦ промислового підприємства залежно від вартості палива і електроенергії.

Основна частина. Саме співвідношення між зазначеними цінами електроенергії і вартістю палива для ТЕЦ формують вибір раціонального режиму експлуатації ТЕЦ цукрового заводу.

Редукційно-охолоджувальна установка (РОУ) − індикатор економічної ефективності ТЕЦ. Технологічне призначення РОУ ТЕЦ − компенсація нестачі для технологічних потреб цукрового заводу відпрацьованої пари, виробленої турбоустановкою. Оскільки, після проходження через РОУ паровий потік зберігає незмінним кількість теплової енергії, то РОУ не є енерговитратним елементом теплової схеми ТЕЦ. Однак РОУ, знижуючи питому ентальпію гострої пари до рівня технологічної пари, знецінює її теплову енергію, позбавляючи можливості вироблення нею високовартісної електричної енергії.

Наявність РОУ, що постійно працює, не слід розглядати, як елемент енергетичної недосконалості ТЕЦ. РОУ не створює перевитрату палива. Вона спричиняє недовироблення електроенергії на тепловому споживані заводу, і відповідно, відсутність фінансової вигоди від її продажу в РЕС.

За наявності резерву встановленої потужності ТЕЦ, а також технічної та законодавчої можливостей відпуску турбоустановкою в РЕС надлишку електроенергії власної генерації за ціною, яка перевищує собівартість, її потужність пропонуємо розраховувати за формулою:

$$W_{PEC}^{відп} = D_{POУ}^{o} \cdot 10^3 / d_o^{TV}, \text{ кВт} \qquad (1)$$

де $D_{POУ}^{o}$ − експлуатаційна витрата гострої пари через РОУ, т/год. Її визначають при розрахунку ТЕЦ як різницю між потребою заводу в технологічній парі і охолодженої в РОУ відпрацьованої пари турбіни, витрата якої відповідає потребі заводу в електричній енергії; d_o^{TV} – питома витрата пари, кг/(кВт·год)

Оптимальною в економічному аспекті, слід вважати схему ТЕЦ, у якій високоентальпійний потік гострої пари максимально трансформується у високовартісну електроенергію, а витрата пари через РОУ мінімізована.

Існування зв'язку між параметрами теплой електроспоживання цукрового заводу − гранично-мінімальної питомої витрати теплової енергії на перероблення буряку q_{lim}^{min}, МДж/(т. буряку), і $e_{ц.з}$ кВт·год / (т. буряку), створює специфічний функціональний взаємозв'язок між тепловою й електричною енергіями, відповідно, Q^{TV}, кВт і W^{TV}, кВт, які генеруються турбоустановками на базі парових турбін з протитиском.

Наслідком специфіки організації потоків енергоресурсів в турбоустановках без конденсаторів [3] є балансовий взаємозв'язок між генерацією ними теплової і електричної енергій, який описується рівняннями

$$W^{ТУ}=\frac{Q^{ТУ}\cdot H_{п.а}\cdot \eta_{\Sigma}^{ТУ}}{q_{о.конд}^{п}}\text{, кВт} \qquad (2)$$

$$Q^{ТУ}=\frac{W^{ТУ}\cdot q_{о.конд}^{п}}{H_{п.а}\cdot \eta_{\Sigma}^{ТУ}}\text{, кВт} \qquad (3)$$

де $H_{п.а}$ − адіабатна різниця ентальпій між гострою та відпрацьованою парою парової турбіни, кДж/кг; $q_{о.конд}^{п}$ − різниця ентальпій відпрацьованої пари і конденсату, що повертається від заводу в ТЕЦ, кДж/кг; $\eta_{\Sigma}^{ТУ}$ − об'єднаний (внутрішній відносний, електричний і механічний) ККД турбоустановки.

Зазначений взаємозв'язок у виробничих умовах створює проблему «виходу» турбоустановки за межі зазначених рівнянь у разі незалежної одна від одної зміни споживання теплової та електричної енергій цукровим заводом, тобто навантаження турбоустановки.

Прояв «виходу» турбоустановки з балансового взаємозв'язку є в наступних випадках:

- в нестачі виробленої електричної енергії;
- в нестачі відпрацьованої пари;
- в надлишку відпрацьованої пари;
- в надлишку електроенергії власної генерації.

Саме з метою узгодження потреби заводу й можливості турбоустановки, в структуру ТЕЦ цукрового заводу долучено РОУ і трансформатор зв'язку з РЕС. Призначення цих елементів – підтримання тепло- й електроспоживання цукрового заводу на регламентному рівні за будь-яких змін споживання теплової та електричної енергії. Їх функціювання вносить додаткові економічні складові енергозабезпечення цукрового заводу, які в значній мірі формують економічну ефективність ТЕЦ:

- платню за прийняту або прибуток за відпущену в РЕС електроенергію;
- недоотриманий прибуток від експлуатації РОУ.

Ефективна експлуатація ТЕЦ передбачає наявність типорозміру турбоустановки, який одночасно відповідав би тепловому і електричному навантаженню цукрового заводу. Правильно встановлена номінальна електрична потужність турбоустановки не обмежує ініціативу енергоменеджменту підприємства і дозволить йому ефективно і в технічному і в фінансовому плані реагувати на зміни електричного й теплового навантажень заводу.

Досвід проектування та практичного вибору необхідних типорозмірів турбоустановок для ТЕЦ цукрових заводів свідчить про потребу врахування не менше 14 експлуатаційних факторів ТЕЦ і заводу, а саме:

- експлуатаційного, з урахуванням перспективи розвитку заводу, питомого споживання теплової енергії;
- експлуатаційного, з урахуванням перспективи розвитку заводу, питомого споживання електроенергії заводом;
- параметрів гострої пари в ТЕЦ;
- питомої витрати гострої пари в турбоустановці;
- гранично-мінімального питомого теплоспоживання заводу;
- наявності (відсутності) трансформаторів зв'язку ТЕЦ з районною електромережею (РЕМ);
- наявності (відсутності) законодавчої можливості відпускання в РЕМ надлишку електроенергії власної генерації;
- виду палива для ТЕЦ і його вартості;
- внутрішньостанційного парового навантаження турбіни;
- експлуатаційної потужності, споживаної системою власних потреб ТЕЦ;
- заводської собівартості електроенергії власної генерації в ТЕЦ;
- ціни електроенергії в РЕС;
- ціни продажу електроенергії власної генерації в РЕС.

Нами пропонується метод вибору номінальної електричної потужності турбоустановки, що враховує, на нашу думку, максимальне число експлуатаційних параметрів ТЕЦ і цукрового заводу.

Необхідний типорозмір турбоустановки та її номінальну електричну потужність $W_{ТУ}^{ном}$, кВт, встановлюють відповідно номенклатурі обладнання того чи іншого виробника за умови

$$W_{ТУ}^{ном}\geq W_{ТУ}^{експл}\text{, кВт,} \qquad (4)$$

де $W_{ТУ}^{експл}$ − експлуатаційна потужність турбоустановки, що задовольняє всім регламентним режимам експлуатації у виробничих умовах, кВт. Пропонуємо розраховувати її за формулою

$$W_{ТУ}^{експл}=k_{ТУ}^{запас}\,k_{ТУ}^{колив}\,W_{ТУ}^{баз}\text{, кВт,} \qquad (5)$$

де $W_{ТУ}^{баз}$ − базова потужність турбоустановки, сформована макропоказниками енергоспоживання заводу $q_{ц.з}$ і $e_{ц.з}$, кВт; $k_{ТУ}^{колив}$ − коефіцієнт, що враховує експлуатаційні коливання парового (вакуум-апарати періодичної дії) і електричного (центрифуги періодичної дії) навантаження заводу, які сприймаються турбоустановкою. Приймається, за нашою оцінкою від 1,08 до 1,15; $k_{ТУ}^{запас}$ − коефіцієнт технологічного запасу

номінальної електричної потужності. Приймається, за нашою оцінкою, від 1,05 до 1,10. Базова потужність турбоустановки (табл.) приймається меншою з двох значень електричної потужності проєктованої турбоустановки, що

- задовольняє умові її експлуатації за «електричним» графіком, з урахуванням споживання електроенергії агрегатами власних потреб ТЕЦ

$$W^{e}_{ТУ}=\frac{e_{ц.з}\cdot A_{ц.з}\cdot k^{ТЕЦ}_{в.п}}{24}\text{, кВт;} \qquad (6)$$

- задовольняє її експлуатації за «тепловим» графіком

$$W^{q}_{ТУ}=\frac{4{,}2\cdot 10^{3}\,A_{ц.з}\,q_{ц.з}}{24\,\gamma_{оу}\,\Delta h^{ТЕЦ}_{ц.з}\,d^{ТУ}_{0}}\text{, кВт,} \qquad (7)$$

де $A_{ц.з}$ – продуктивність заводу, т. буряку/добу; $k^{ТЕЦ}_{в.п}$ – коефіцієнт використання палива; $q_{ц.з}$ – питоме теплоспоживання цукрового заводу, МДж / (т. буряку); $\Delta h^{ТЕЦ}_{ц.з}$ – перепад ентальпії пари на турбіні, кДж / кг; $\gamma_{оу}$ – коефіцієнт збільшення кількості пари в охолоджувальній установці (ОУ) турбоагрегату, що визначається з теплового балансу ОУ і становить 1,03...1,08; 10^3 – перевідний коефіцієнт МДж у кДж; 24 – перевідний коефіцієнт, год/добу.

Таблиця 1

Режими роботи ТЕЦ

Умова	Базова потужність $W^{баз}_{ТУ}$, кВт	Особливості
$W^{q}_{ТУ}>W^{e}_{ТУ}$	$W^{e}_{ТУ}$	Потреба РОУ технологічної пари
$W^{e}_{ТУ}>W^{q}_{ТУ}$	$W^{q}_{ТУ}$	Надлишок електроенергії власної генерації.

Для прикладу розглянемо завод потужністю $A_{ц.з}$ = 3000 т. буряку/добу. Параметри гострої пари в ТЕЦ $d^{ТУ}_{o}$ = 9,3 кг/(кВт·год), $\gamma_{оу}$ = 1,08. Температура конденсату, який повертається в ТЕЦ, становить 1300 °С. Перепад ентальпій $\Delta h^{ТЕЦ}_{ц.з}$ = 2135 кДж/кг. Є перспектива зниження $k^{ТЕЦ}_{в.п}$ від 1,18 до 1,13, також $q_{ц.з.}$ від 58,6 до 52,4 МДж/т буряку. Допустиме зниження $e_{ц.з.}$ від 33,5 до 32,0 кВт·год/(т. буряку).

За цих умов маємо:

- за формулою (6) $W^{e}_{ТУ}$ = 4520 кВт;
- за формулою (7) $W^{q}_{ТУ}$ = 5386 кВт;
- за умови $W^{q}_{ТУ}>W^{e}_{ТУ}$ відповідно до табл. $W^{баз}_{ТУ}$ = 4520 кВт, при цьому виникає потреба РОУ технологічної пари в системі турбоустановки;
- за формулою (5) $W^{експл}_{ТУ}$ = 5360 кВт.

Для встановлення та експлуатації обрано турбоагрегат номінальною електричною потужністю 6000 кВт на базі парової турбіни «Р-6-35/5».

Висновки. Встановлено вплив співвідношення цін палива та електроенергії РЕС на формування системи енергозабезпечення заводу. Вигіднішою є схема при якій електроенергія генерується в надлишку за рахунок максимального (близького до номінального) навантаження турбогенератора та відпускається в РЕС за ціною, що перевищує собівартість. Наведений приклад визначення типорозміру турбоустановки та режими її експлуатації можуть бути корисними також для визначення схем енергопостачання заводів з виробництва залізобетонних виробів.

Перспективи подальших досліджень. У найближчий час будуть змінюватися джерела генерації електроенергії, відповідно і її собівартість. Подібні дослідження набувають більшої актуальності.

Література

1. Публічний звіт т.в.о. Голови Держенергоефективності Костянтина Гура про підсумки 2020 року. 28.01.2021. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/ZVIT_SAEE_2020_0.pdf

2. Филоненко В. Н. К вопросу достижения европейского уровня потребления топлива / В. Н. Филоненко, В. И. Михайлов, А. П. Ветров // САХАР. – 2008. – № 10. – С. 34-37.

3. Щегляев А. В. Паровые турбины / А.В. Щегляев // Москва: Энергия. – 1976. – 357 с.

4. Филоненко В. Н. Электроенергия собственной выработки ТЕЦ сахарных заводов: проблема и решения / В. Н. Филоненко, Д. Н. Цыганков, А. А. Швецов // САХАР. – 2013. – № 6. – С. 81-85.

References

1. Publichnyi zvit t.v.o. Holovy Derzhenerhoefektyvnosti Kostiantyna Hura pro pidsumky 2020 roku. 28.01.2021. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/ZVIT_SAEE_2020_0.pdf

2. Fylonenko V. N., Mykhailov V. Y., Vetrov A. P. “K voprosu dostyzhenyia evropeiskogo urovnia potreblenyia topliva”. *SAKhAR*. 2008. № 10. S. 34-37.

3. Shchegliaev A. V. *Parovye turbiny*. Moskva: Energiia. 1976.

4. Fylonenko V. N., Tsygankov D. N., Shvetsov A. A. “Elektroenergiia sobstvennoi vyrabotki TETs sakharnykh zavodov: problema y resheniia”. *SAKhAR*. 2013. № 6. S. 81-85.

УДК 621.31:664.1:005

Энергоэффективность эксплуатационных режимов теплоэлектроцентралей промышленных предприятий

С.В. Барановська[1], В.Н. Філоненко[2]
[1]к. т. н, доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры г . Київ, Украина, svetaknuba@gmail.com, ORCID:0000-0001-5979-1212
[2]к. т. н, доц. Национальный университет пищевых технологий м. Киев, Украина, ipren@ukr.net

Аннотация. Предприятия с энергоёмким производством имеют в своей структуре теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). При осуществлении мер по повышению энергоэффективности можно достигнуть различных соотношений между показателями эффективности потребления тепловой и электрической энергии предприятиями на выработку продукции. Определённые соотношения между удельными тепло- и электропотреблением на производство продукции побуждают предприятие покупать определённую долю электроэнергии в районной энергосистеме (РЭС) для предотвращения сброса в атмосферу отработанного пара в турбине либо продавать в РЭС избыток электроэнергии собственной генерации. Перед предприятием возникает задача выбора режимов эксплуатации ТЭЦ. Освещённая в статье проблема указывает, что выбор определяют цены на топливо для ТЭЦ, соотношение между ценами электроэнергии, покупаемой у РЭС и продаваемой в РЭС. Хотя в производстве сахара электропотребление не превышает 11 % от энергии топлива, электроэнергию выгодно производить в избытке (турбогенераторы работают в максимальном, приближенном к номинальному режиму) и продавать в РЭС по цене выше себестоимости. Предложен метод выбора режимов эксплуатации турбоустановок ТЭЦ на примере сахарного завода, который может применяться и для строительной отрасли, а также методика определения затрат на энергоснабжение всех режимов эксплуатации турбоустановки сахарного завода. Установлено влияние стоимости электроэнергии в РЭС на выбор режима эксплуатации турбоустановок ТЭЦ, обеспечивающих минимальные финансовые затраты на энергоснабжение предприятия. Приведён метод определения типоразмера турбоустановки ТЭЦ, удовлетворяющей удельным показателям теплового и электрического потребления предприятия.

Ключевые слова: теплоэлектроцентраль, ТЭЦ, турбоустановка, эффективность, промышленное предприятие, сахарный завод.

UDC 621.31:664.1:005

Energy efficiency of operational regimes of combined heat and power plants of industrial enterprises

S. Baranovska[1], V. Filonenko[2],
[1] PhD, associate Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, svetaknuba@gmail.com, ORCID:0000-0001-5979-1212
[2] PhD, associate professor. National University of food technologies, Kyiv, Ukraine, ipren@ukr.net

Abstract. Enterprises with energy-intensive production have combined heat and power plants (CHP) in their structure. During the implementation of energy saving measures, it is possible to achieve different ratios between the indicators of the efficiency of consumption of thermal and electrical energy by enterprises for production. With certain ratios between specific heat and electricity consumption in production, the enterprise is forced to buy a certain part of the electricity in the district power system (DPS) to prevent the discharge of steam exhausted by the turbine into the atmosphere or to deliver excess electricity of its own generation to the DPS. The problem cited in the article indicates that the choice is determined by the prices for fuel for CHP and the ratio between the prices for electricity purchased in the DPS and delivered to the DPS. Although electricity consumption in the production of sugar does not exceed 11% of the energy of the fuel, it is profitable to generate it in excess (turbine generators operate at maximum, close to the nominal mode) and deliver it to the distribution zone at a price higher than the cost. The proposed method for selecting operating modes for CHP turbine plants using the example of a sugar plant, which can also be used for the construction industry, as well as a method for determining energy costs for all operating modes of a sugar plant turbine plant. The influence of the cost of electricity in the distribution zone on the choice of the mode of operation of turbine plants of the CHP, which provide the minimum financial costs for the energy supply of the enterprise, has been established. A method for determining the standard size of a CHP turbine plant that satisfies the specific indicators of heat and electricity consumption of an enterprise is presented.

Keywords: combined heat and power plant, CHP, turbine plants, efficiency, industrial enterprise, sugar plant.

Надійшла до редакції / Received 12.01.2022