УДК 621.17

М. М. ЧЕПУРНИЙ, канд. техн. наук, доц.; проф. ВНТУ, Вінниця;
С. Й. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. ВНТУ, Вінниця;
Н. В. РЕЗИДЕНТ, канд. техн. наук; доц. ВНТУ, Вінниця

ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ПРОТИТИСКОВОЇ ТУРБІНИ ПР-6-35/5/1,2 В СИСТЕМАХ ТЕПЛОФІКАЦІЇ

Здійснено аналіз і визначено основні показники ефективності роботи турбогенератора з паровою турбіною ПР-6-35/5/1,2 при різних парових і електричних навантаженнях. Визначено питому витрату умовного палива на сумісне виробництво теплової і електричної енергії, коефіцієнт використання теплоти палива та частку теплоти палива, яка витрачена на виробництво теплової енергії. З використанням вище вказаних показників встановлено, що найбільш ефективна робота зазначеної турбоустановки досягається за умови номінальної електричної потужності та допустимої витрати пари через відсік низького тиску, а зменшення тиску в регульованому відборі турбіни зумовлює підвищення ефективності її роботи. Крім того, показано, що недовантаження протитискової турбіни з відбором пари для будь-яких режимів роботи призводить до суттєвого погіршення ефективності роботи паротурбінної установки.

Ключові слова: парогенератор, парова турбіна, електрогенератор, умовне паливо, питома витрата.

Вступ

Ефективність виробництва енергії є важливою характеристикою паливовикористальних установок. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії на теплоелектроцентралях (ТЕЦ) є перспективною технологією, яка значною мірою дозволяє вирішувати задачі енергозбереження. Саме тому вона визнана одним із головних напрямів розвитку енергетики України та відображена на законодавчому рівні [1]. Не дивлячись на значний прогрес у розвитку ТЕЦ в Україні, централізоване теплопостачання великої кількості споживачів здійснюється не від ТЕЦ, а від котелень.

Цілком зрозуміло, що нормальна робота ТЕЦ може бути забезпечена за наявності постійних теплових навантажень. Однак тепер склалась ситуація, коли внаслідок спаду виробництва та зменшення споживання технологічної пари, на промислових ТЕЦ неможливо виробляти проектні електричні потужності. До складу великої кількості промислових підприємств входять ТЕЦ, які оснащені протитисковими турбінами. Такі паротурбінні установки (ПТУ) з проміжним або без проміжного відбору пари не розраховані на автономний режим роботи, оскільки виробництво електроенергії в них здійснюється на базі відпуску теплової енергії. На теперішній час більшість промислових ТЕЦ працює з недовантаженими протитисковими турбінами, що призводить як до зменшення виробництва електроенергії, так і до неефективного використання палива, оскільки зі зменшенням навантаження зменшується коефіцієнт корисної дії (ККД) основного і допоміжного устаткування ПТУ. Зазначимо також, що зменшення виробництва електроенергії на ТЕЦ зумовлює збільшення дефіциту маневрених потужностей в енергосистемі та ускладнює її роботу в пікових режимах. Оцінка ефективності роботи ПТУ з протитисковими турбінами без проміжного відбору пари в умовах змінного навантаження наведена в [2]. На жаль, така оцінка для ПТУ з протитисковими турбінами, які мають проміжний відбір пари, відсутня.

© М.М. Чепурний, С.И. Ткаченко, Н.В. Резидент, 2014

Постановка задачі

Зважаючи на вищевикладене, ставилась задача дати кількісну оцінку ефективності роботи ПТУ з більш складною протитисковою турбіною, яка має проміжний відбір пари та працюватиме для потреб теплофікації.

Основні результати

Схема застосування турбіни ПР-6-35/5/1,2 для покриття теплофікаційних навантажень показана на рис. 1. Турбіна має регульований відбір пари, із якого заживлений так званий «верхній» підігрівник мережної води *4* і підігрівник живильної води *19*.

«Нижній» підігрівник мережної води *6* і деаератор атмосферного тиску *14* заживлені з протитиску турбіни. Додаткова (підживлювальна) вода нагрівається в підігрівниках *9*, *10* і *17* конденсатами пари з відбору та з протитиску. В опалювальний період працюють обидва підігрівники мережної води та підігрівник живильної води. В неопалювальний період, коли працює тільки система гарячого водопостачання, не працюють підігрівники *4* і *19*.

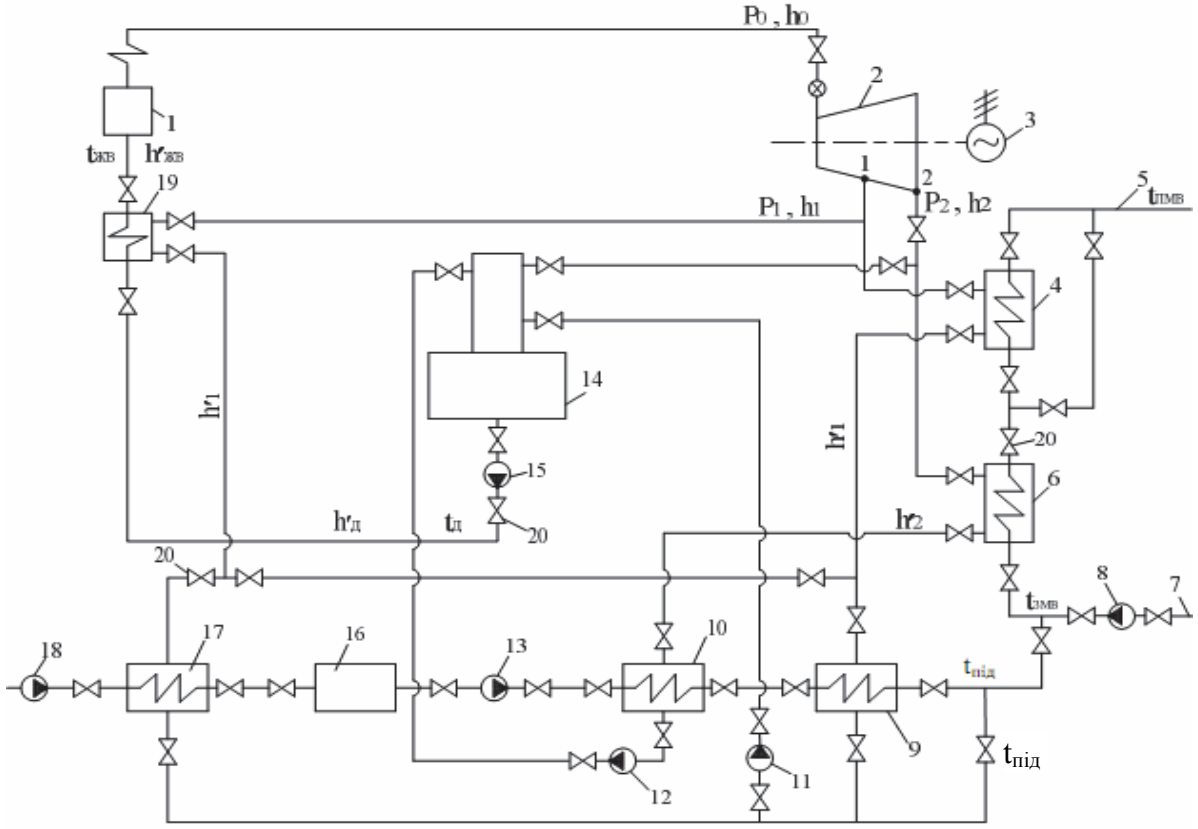

Рис. 1 – Принципова теплова схема парової турбіни ПР-6-35/5/1,2:
1 – парогенератор; *2* – парова турбіна; *3* – електрогенератор; *4* і *6* – підігрівник мережної води більшого і меншого тиску, відповідно; *5* і *7* – магістраль прямої та зворотної мережної води відповідно; *8* – насос мережної води; *9* і *10* – підігрівники підживлювальної води; *11* і *12* – дренажні насоси; *13* – насос хімічно очищеної води; *14* – деаератор атмосферного тиску; *15* – живильний насос; *16* – хімводоочистка; *17* – підігрівник сирої води; *18* – насос сирої води; *19* – підігрівник живильної води; *2* – арматура

За даними [3–5] визначені технічні характеристики турбіни ПР-6-35/5/1,2: номінальна електрична потужність – $N_{\text{н}} = 6$ МВт; тиск і температура пари перед турбіною – $P_0 = 3{,}43$ МПа і $t_0 = 435$ °С, відповідно; параметри пари в регульованому

відборі – $P_1 = 0{,}49$ МПа, $t_1 = 237$ °С; параметри пари за турбіною (в протитиску) – $P_2 = 0{,}12$ МПа, $t_2 = 132$ °С; номінальна витрата пари без відбору – $D_0 = 41{,}5$ т/год (11,527 кг/с), з відбором пари – $D_0' = 54{,}7$ т/год (15,194 кг/с), відповідно. В результаті побудови робочого процесу пари в турбіни на *h–s* діаграмі визначаємо ентальпії в характерних точках, кДж/кг: $h_0 = 3305$; $h_1 = 2935$; $h_2 = 2740$.

Теплоперепади в турбіні, кДж/кг:

– до відбору

$$H_1 = h_0 - h_1 = 3305 - 2935 = 370; \quad (1)$$

– до протитиску (робочий)

$$H_2 = H_\text{р} = h_0 - h_2 = 3305 - 2740 = 565. \quad (2)$$

Електромеханічний ККД турбогенератора визначаємо за умови, що витрата пари із регульованого відбору відсутня

$$\eta_\text{ем} = \frac{N}{D_0 H_\text{р}} = \frac{6000}{11{,}257 \cdot 565} = 0{,}921. \quad (3)$$

Витрату пари в регульований відбір для номінального навантаження визначаємо із рівняння електричної потужності турбогенератора, кг/с

$$N_\text{н} = \left[D_1 H_1 + (D_0' - D_1) H_\text{р}\right] \eta_\text{ем},$$

тобто

$$6000 = \left[D_1 \cdot 370 + (15{,}194 - D_1) \cdot 565\right] \cdot 0{,}921. \quad (4)$$

Звідки виходить $D_1 = 10{,}6$ кг/с; $D_2 = 4{,}59$ кг/с, де D_1 і D_2 – витрата пари у відбір та в протитиску, відповідно.

Як зазначалось, розрізнюють два принципово різних режими роботи ПТУ в опалювальний і неопалювальний періоди. В опалювальний період змінні режими роботи ПТУ виникають внаслідок зміни витрати пари із регульованого відбору за умови сталої витрати пари із протитиску. При цьому температура живильної води становить 145 °С. В неопалювальний період роботи ПТУ витрати пари із відбору немає, а змінні режими зумовлені зміною витрати пари із протитиску турбіни. При цьому температура живильної води дорівнює температурі води в деаераторі ($t_\text{д} = 104$ ºС). За мінімальне навантаження ПТУ вибрано допустиме навантаження парогенератора, яке дорівнює 30 % від номінальної паровидатності. При цьому враховувалась зміна ККД парогенератора та електромеханічного ККД ПТУ в межах (30–100) % їх завантаження [7, 8]. Розрахунки теплової схеми ПТУ здійснювались за відомими методиками [6, 7]. Обчислювались основні показники, які характеризують ефективність виробництва теплової та електричної енергії на ПТУ без урахування витрат енергії на власні потреби. Результати варіаційних розрахунків наводяться в графічній інтерпретації.

На рис. 2 наведено залежності зміни витрати пари та виробленої теплової потужності за умови зміни витрати пари в регульованому відборі. Ці залежності мають лінійний характер і апроксимуються формулами:

$$D_0 = 4{,}73 + 8{,}412N; \quad \Delta D/\Delta N = 8{,}412; \quad (5)$$

$$Q = 5{,}569N, \quad (6)$$

де $N^* = N_i / N_\text{н}$; $N_i, N_\text{н}$ – поточна і номінальна потужність електрогенератора, відповідно.

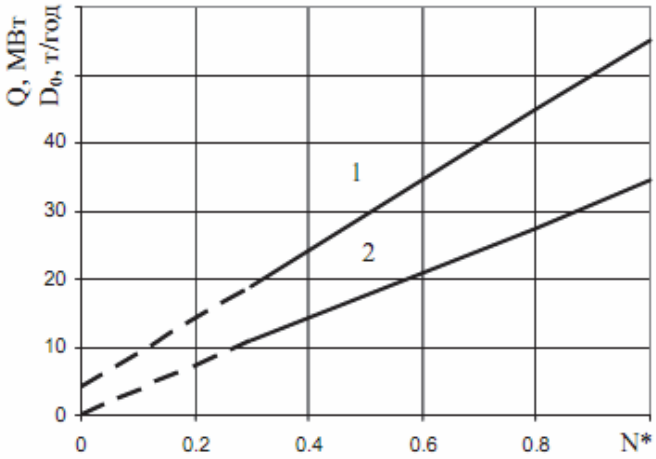

Рис. 2 – Діаграми зміни витрати пари на турбіну та виробленої теплової потужності в залежності від частки завантаження електрогенератора: *1* – $D = f(N^*)$; *2* – $Q = f(N^*)$

Перший доданок в (5) характеризує витрату пари на холостий хід турбогенератора.

В [9] показано, що ефективність роботи ПТУ однозначно визначається за допомогою питомої витрати умовного палива, яка дорівнює, кг/ГДж

$$b = B \cdot 10^3 / (N + Q), \tag{7}$$

де B – витрата умовного палива, яке спалюється в парогенераторі, кг/с.

Величина b зв'язана з величиною коефіцієнта використання теплоти палива співвідношенням

$$K_{\text{ВТП}} = \frac{10^3}{bQ^p_{\text{ну}}}, \tag{8}$$

де $Q^p_{\text{ну}}$ =29,3 МДж/кг – теплота згорання умовного палива.

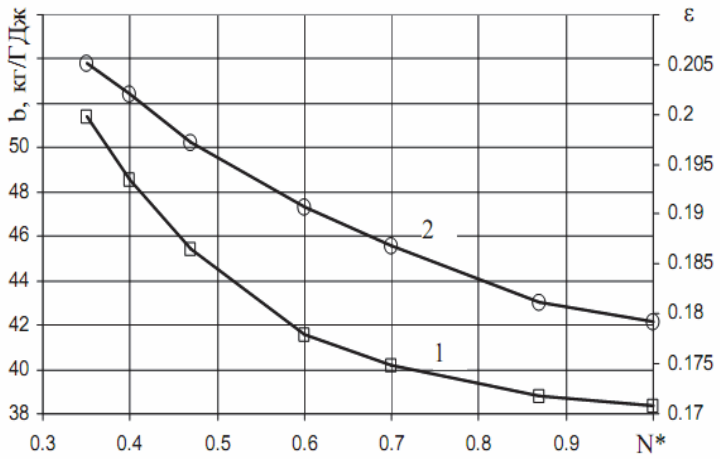

Рис. 3 – Поточні значення питомої витрати умовного палива (лінія *1*) і коефіцієнта виробництва електроенергії на тепловому постачанні (лінія *2*)

Вважалось [7, 8], що ефективність роботи ПТУ характеризує коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні $\varepsilon = N/Q$, зі збільшенням якого ефективність роботи ПТУ зростає. Залежності зміни величин b і ε показані на рис. 3. Із рис. 3. наочно видно, що ефективність роботи ПТУ різко погіршується в разі

розвантаження турбогенератора за рахунок зменшення витрати пари із регульованого відбору турбіни. При цьому більш неефективним режимам роботи відповідають більші значення ε. Останнє підтверджує висновки [9] про те, що величина ε не може однозначно характеризувати ефективність роботи протитискових турбін. Зростання питомої витрати умовного палива в процесі розвантаження турбогенератора пояснюється значним зменшенням електромеханічного ККД турбогенератора і ККД парогенератора.

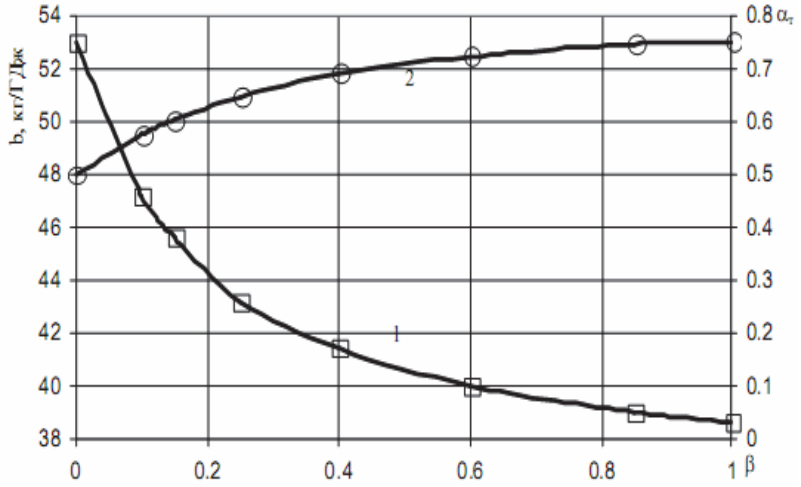

Рис. 4 – Залежності: *1* – $b = f(\beta)$; *2* – $\alpha_{\text{Т}} = f_1(\beta)$

В [9] визначено, що ефективність роботи протитискових турбін характеризує також частка теплоти палива $\alpha_{\text{Т}}$, яка витрачена на виробництво теплоти в ПТУ, тобто $\alpha_{\text{Т}} = Q \big/ (BQ^p_{\text{ну}})$. На рис. 4 наведені поточні значення b і $\alpha_{\text{Т}}$ в залежності від частки витрати пари із регульованого відбору турбіни β, яка характеризує відношення поточної витрати пари до номінальної, тобто $\beta = D_{1i} / D_{1\text{н}}$. Із рис. 4 видно, що більш низьким значенням b відповідають більш високі значення $\alpha_{\text{Т}}$. Це доводить, що значення $\alpha_{\text{Т}}$ характеризують ефективність роботи ПТУ. Як і на рис. 3, розвантаження ПТУ за рахунок зменшення витрати пари з відбору суттєво зменшує ефективність роботи ПТУ і призводить до перевитрати палива.

В неопалювальний період робота паротурбінної установки характеризується нульовою витратою пари із відбору турбіни. В цьому випадку витрата пари із протитиску може бути збільшена до досягнення номінальної електричної потужності електрогенератора. За цих умов завантаження ПТУ буде визначатись потужністю теплових споживачів, а регулювання режимів роботи ПТУ буде здійснюватись шляхом зміни витрати пари із протитиску турбіни. Витратна і теплова характеристики ПТУ з виключеним відбором пари наведені на рис. 5.

Залежності на рис. 5 якісно погоджуються з аналітичними залежностями, наведеними на рис. 2, і апроксимуються формулами:

$$D_0 = 3{,}556 + 6{,}324N; \quad \Delta D / \Delta N = 6{,}324; \tag{9}$$

$$Q = 4{,}333N. \tag{10}$$

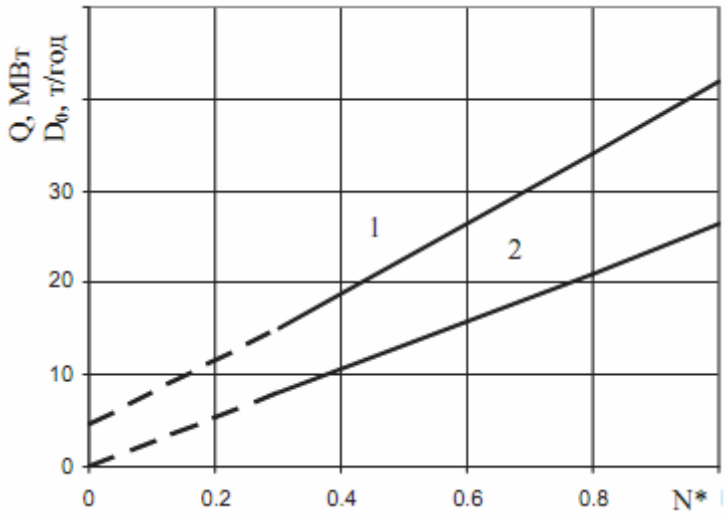

Рис. 5 – Залежність годинної витрати пари на турбіну і виробленої теплової потужності від частини завантаження електрогенератора (позначення див. на рис. 2)

Зрозуміло, що з виключеним відбором пари загальна витрата пари на турбіну та потужність виробленої теплоти зменшується. Показники ефективності роботи ПТУ для різних електричних навантажень показано на рис. 6.

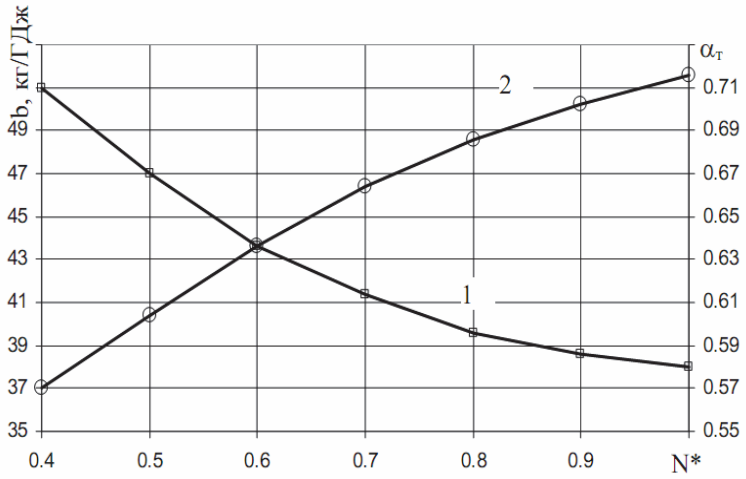

Рис. 6 – Характер зміни питомих витрат умовного палива та коефіцієнтів $\alpha_т$ (позначення див. на рис. 4)

Порівнюючи ці залежності із залежностями, наведеними на рис. 3 і 4, можна виявити їх ідентичний характер. Однак значення питомої витрати умовного палива за умови роботи турбіни з виключеним відбором пари дещо вище, ніж за умови роботи ПТУ з відбором пари. Це означає, що робота ПТУ з відбором пари за умови однакового завантаження турбогенератора більш ефективна і потребує меншої витрати палива. І в цьому варіанті роботи ПТУ більш ефективна і характеризується більш високими значеннями частки теплоти палива, витраченого на виробництво теплоти.

Розглянемо тепер роботу турбіни ПР-6-35/5/1,2 за умови сталої номінальної електричної потужності та зменшення тиску відбірної пари до 0,4 МПа. За паспортними даними мінімально допустима витрата пари в протитиску має бути не менше 16,5 т/год. для запобігання вентиляційного режиму роботи східців відсіку

малого тиску. За цієї умови вибираємо мінімально допустиму витрату пари в протитиску рівною 16,6 т/год. Зменшення тиску в регульованому відборі турбіни збільшує теплоперепад до відбору з 370 кДж/кг до 390 кДж/кг, внаслідок чого зменшується загальна витрата пари на турбіну на $\Delta D = 54{,}7 - 52{,}6 = 2{,}1$ т/год. Це, в свою чергу, зумовлює зменшення витрати палива та підвищення ефективності роботи паротурбінної установки на 2,35 %. Розрахункові показники роботи турбоустановки для зазначених умов наведені в таблиці.

Таблиця

Показники роботи турбоустановки за умови номінальної електричної потужності та зменшення тиску в регульованому відбору пари до 0,4 МПа

Показники	Витрата відбірної пари, кг/с				
	0	3	6	8	10
Загальна витрата пари, т/год	41,508	44,852	48,196	50,4	52,632
Температура живильної води, °С	104	104	140	140	140
Потужність парогенератора, МВт	33,068	35,732	36,370	38,031	39,722
Витрата умовного палива, т/год.	4,464	4,824	4,901	5,140	5,371
Витрата пари в протитиску, т/год.	41,508	34,052	26,596	21,60	16,632
Потужність протитиску, МВт	26,530	21,755	16,992	13,801	10,626
Потужність відбірної пари, МВт	–	6,840	13,681	18,241	22,80
Загальна вироблена теплова потужність, МВт	26,530	28,595	30,672	32,040	33,426
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	38,78	38,28	38,1	37,83	37,51
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,880	0,891	0,895	0,902	0,910
Частка теплоти палива, яка витрачена на виробництво теплоти	0,717	0,736	0,748	0,760	0,772
Коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні	0,226	0,210	0,195	0,187	0,179

Із наведеної таблиці видно, що зі збільшенням витрати відбірної пари зростає вироблена теплова потужність та ефективність роботи паротурбінної установки. Поряд з величиною питомої витрати умовного палива на виробництво енергії та коефіцієнтом використання теплоти палива індикатором ефективності роботи даної турбоустановки може бути значення частки теплоти палива, яка витрачена на виробництво теплоти α_T.

Наведені дані дають змогу виявити, що за умови змінних теплових навантажень найбільш ефективна робота турбоустановки досягається при сталому номінальному електричному завантаженні турбогенератора. Тому дані, що наведені в таблиці, є необхідною передумовою найбільш ефективної роботи турбоустановки при змінних теплових режимах.

Висновки

1) Паливна ефективність роботи паротурбінної установки однозначно характеризується питомою витратою умовного палива на сумісне виробництво теплової та електричної енергії.

2) Недовантаження протитискової турбіни з відбором пари для будь-яких режимів роботи призводить до суттєвого погіршення ефективності роботи ПТУ.

3) Індикатором ефективності роботи ПТУ з протитисковими турбінами не може бути коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні. Таким індикатором є частка теплоти палива, яка витрачена на виробництво теплової енергії.

4) Зменшення тиску в регульованому відборі турбіни на 0,1 МПа зумовлює підвищення ефективності її роботи на 2,35 %.

5) Найбільш ефективна робота зазначеної турбоустановки досягається за умови номінальної електричної потужності та допустимої витрати пари через відсік низького тиску.

6) Протитискові турбіни з відбором пари за умови їх номінального завантаження працюють більш ефективно, ніж опалювальні котли і можуть бути рекомендовані для покриття теплофікаційних навантажень.

Список літератури: 1. Закон України про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу [Текст] // Відомості Верховної Ради, 2005. – № 20 – С. 275–285. **2.** *Чепурний, М. М.* Аналіз роботи протитискових турбін на теплоелектроцентралях [Текст] / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010 – № 1. – С. 52–54. **3.** ГОСТ 3618-82. Турбины паровые стационарные для приводов турбогенераторов. – Чинний від 1983-01-01. – М.: ИПК Издательствостандартов, 1998. – 7 с. **4.** Номенклатурный каталог. Энергетическое оборудование для тепловых электростанций и промышленной энергетики [Текст]: в 3-х частях / [ред. В. Бутина] – М.: ЦНИИТЭИ–Тяжмаш, 1997. – Ч. 3. – 154 с. **5.** *Кирюхин, В.И.* Паровые турбины малой мощности КТЗ [Текст] / В. И. Кирюхин, Н. М. Тараненко, Б. П. Огурцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 216 с. **6.** *Чепурний, М. М.* Розрахунки теплових схем когенераційних установок [Текст] / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. – Вінниця: ВНТУ, 2003 – 103 с. **7.** Промышленные тепловые электростанции [Текст] / [под ред. Е. Я. Соколова]. – М.: Энергия, 1979. – 299 с. **8.** *Горшков, А. С.* Технико-экономические показатели тепловых электростанции [Текст] / А. С. Горшков. – М.: Энергия, 1975. – 239 с. **9.** *Чепурний, М. М.* Показники ефективності роботи енергетичних установок для сумісного виробництва теплової та електричної енергії [Текст] / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 1. – 2010. – Режим доступу: http://www.arhive.nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.files/uk/10mmccaee_ua.pdf. – 18.02.14.

Bibliography (transliterated): 1. "Zakon Ukrai'ny Pro kombinovane vyrobnyctvo teplovoi' ta elektrychnoi' energii' ta vykorystannja skydnogo potencialu." *Vidomosti Verhovnoi' Rady.* Pub. L. 20. 2005. 275–285. Print. **2.** Chepurnyj, M. M., and S. J. Tkachenko. "Analiz roboty protytyskovyh turbin na teploelektrocentraljah." *Visnyk Vinnyc'kogo politehnichnogo instytutu*. No 1 (2010): 52–54. Print. **3.** *GOST 3618-82. Turbiny parovye stacionarnye dlja privodov turbogeneratorov.* Moscow: IPK Izdatel'stvostandartov, 1998. Print. **4.** *Nomenklaturnyj katalog. Jenergeticheskoe oborudovanie dlja teplovyh jelektrostancij i promyshlennoj jenergetiki.* Vol. 3. Moscow: CNIITJeI–Tjazhmash, 1997. Print. **5.** Kirjuhin, V. I., N. M. Taranenko and B. P. Ogurcova. *Parovye turbiny maloj moshhnosti KTZ*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1987. Print. **6.** Chepurnyj, M. M., S. J. Tkachenko and V. V. Buzhyns'kyj. *Rozrahunky teplovyh shem kogeneracijnyh ustanovok*. Vinnycja: VNTU, 2003. Print. **7.** *Promyshlennye teplovye jelektrostancii*. Ed. E. Ja. Sokolova. Moskow: Jenergija, 1979. Print. **8.** Gorshkov, A. S. *Tehniko-jekonomicheskie pokazateli teplovyh jelektrostancii*. Moskow: Jenergija, 1975. Print. **9.** Chepurnyj, M. M., S. J. Tkachenko and N. V. Pishenina. "Pokaznyky efektyvnosti roboty energetychnyh ustanovok dlja sumisnogo vyrobnyctva teplovoi' ta elektrychnoi' energii'." *Naukovi praci Vinnyc'kogo nacional'nogo tehnichnogo universytetu* 1 (2010). Web. 18 February 2014 <http://www.arhive.nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.files/uk/10mmccaee_ua.pdf>, <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1028 >.

Надійшла (received) 19.02.2014