



УДК 621.3.07

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-19

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСПОЖИВАЮЧИХ АГРЕГАТІВ

<b>Толбатов А. В., к. т. н.</b> e-mail: tolbatov@ukr.net	<a href="http://orcid.org/0000-0002-9785-9975">http://orcid.org/0000-0002-9785-9975</a>
<b>Толбатов В. А., к. т. н.</b> e-mail: tolbatov302@gmail.com	<a href="http://orcid.org/0000-0002-6564-9658">http://orcid.org/0000-0002-6564-9658</a>
<b>Яковлєв В. Ф., к. т. н.</b> e-mail: kfizika@ukr.net	<a href="http://orcid.org/0000-0001-5261-4432">http://orcid.org/0000-0001-5261-4432</a>
<b>В'юненко О. Б., к. е. н.</b> e-mail: uarl_ut2ab@yahoo.co.uk	<a href="http://orcid.org/0000-0002-8835-0704">http://orcid.org/0000-0002-8835-0704</a>
<b>Смоляров Г. А., к. е. н.</b> Сумський національний аграрний університет e-mail: smolarovga@gmail.com	<a href="http://orcid.org/0000-0001-6917-6950">http://orcid.org/0000-0001-6917-6950</a>

**Анотація** – аналізуючи енергетичну економічність роботи обладнання безперервної дії, можна стверджувати, що практично доцільними є тільки такі чотири режими: 1) безперервна робота з постійним навантаженням агрегату; 2) безперервна робота зі змінним навантаженням; 3) переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності агрегату з холостими ходами обладнання або роботою з мінімальною годинною продуктивністю; 4) переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній або економічній годинній продуктивності агрегату і перерви в роботі з повним вимкненням обладнання. У всіх розглянутих режимах, окрім безперервної роботи обладнання із змінним навантаженням, питома витрата енергії є сталою величиною при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності агрегату. Таким чином, встановивши конкретний режим роботи обладнання, легко визначити за його енергетичною характеристикою норму питомої витрати енергії, точно відповідну вибраному режиму і заданій середньокалендарній продуктивності агрегату. Якщо за умовами виробництва годинна продуктивність обладнання не може бути зафіксована незмінною, слід передбачити деякий діапазон можливого її коливання щодо встановленої середньої величини. В цьому випадку енергетична характеристика або діаграма агрегату дозволяє встановити відповідний діапазон допустимих коливань середньої питомої витрати енергії. При цьому норму питомої витрати енергії можна задати за його середнім значенням у зазначеному діапазоні.

**Ключові слова:** обладнання безперервної дії, енергетична економічність роботи, продуктивність обладнання.

**Постановка проблеми.** Під обладнанням безперервної дії [1], [2],

[3] зазвичай розуміють такі технологічні агрегати, виробництво продукції на яких пов'язане тільки з витратами часу на корисну роботу (до таких агрегатів належать, наприклад, металообробка обладнання, компресори, насоси). Режим роботи обладнання пов'язаний з характером його навантаження [2], [4], [5] в часі. Агрегат може працювати безперервно або з перервами протягом деякого періоду часу. При цьому його продуктивність (навантаження) під час роботи може бути незмінною або змінюватися в часі. У зв'язку з цим розрізняють такі режими роботи обладнання безперервної дії (рис. 1):

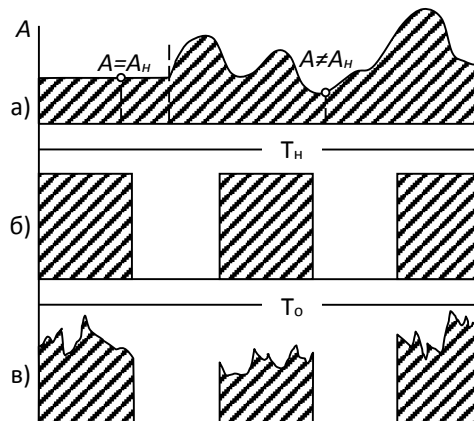


Рис. 1. Режими роботи обладнання:

- а) неперервна робота з постійною і змінною продуктивністю;
- б) переривиста робота з постійною продуктивністю;
- в) переривиста робота зі змінною продуктивністю;

**Основні матеріали дослідження. Аналіз режимів роботи і продуктивності обладнання безперервної дії.** Розглядаючи режим роботи обладнання [1], [2], [3], [4], [5] з перервами, необхідно враховувати, що вони можуть характеризуватися чергуванням періодів корисної роботи з холостими ходами або чергуванням корисної роботи з періодами зупинки (повного вимкнення) обладнання.

Під продуктивністю технологічного обладнання розуміють обсяг випущеної на ньому продукції (або виконаної корисної роботи) за одиницю часу. Для обладнання безперервної дії характерне те, що його продуктивність може бути віднесена до скільки завгодно малих відрізків або навіть моментів часу роботи агрегату. Інакше кажучи, продуктивність такого обладнання має миттєве значення і є синонімом навантаження агрегату [4], [5]. Проте найчастіше при визначенні поточної продуктивності обладнання безперервної дії як елементарний відрізок часу беруть одну годину. Годинна продуктивність обладнання безперервної дії, як і його миттєва продуктивність, є змінною



величиною, яка належить до певних умов виробництва, параметрів технологічного процесу, а також до певного періоду часу.

Величина миттєвої і годинної продуктивності обладнання збігаються у тому разі, коли агрегат працює безперервно з постійним навантаженням. При безперервній роботі, але зі змінним навантаженням продуктивність обладнання в деякому відрізку часу характеризується її середньогодинною величиною  $A_n$ , що дорівнює

$$A_n = \frac{Q_n}{T_n}, \quad (1)$$

де  $T_n$  - час безперервної роботи обладнання;  
 $Q_n$  - обсяг випуску продукції агрегатом за час  $T_n$ .

Значення годинної (або середньогодинної) продуктивності агрегату при безперервній роботі залежать тільки від навантаження обладнання за потужністю [4], [5]. Як відомо, для характеристики відносного завантаження обладнання за потужністю використовується коефіцієнт навантаження (коефіцієнт використання обладнання за потужністю), визначений як відношення середньогодинної продуктивності агрегату до його максимально можливої продуктивності за той самий відрізок часу  $T_n$  в конкретних умовах виробництва

$$K_n = \frac{A_n}{A_{max}}. \quad (2)$$

Показники годинної продуктивності обладнання належать до часу його безперервної роботи  $T_n$ . Вони є необхідними і достатніми для характеристики режиму роботи обладнання тільки в тому випадку, якщо в деякому календарному періоді часу  $T_o$  відсутні перерви в роботі агрегату.

Загалом же календарний період  $T_o$  містить не тільки час безперервної роботи  $T_n$ , але також і час перерв і простоїв обладнання  $T_c$ . При цьому для характеристики продуктивності обладнання у всьому календарному періоді  $T_e$  застосовують величину, середньокалендарну продуктивності  $A_o$  (за зміну, добу, місяць і тому подібне), яка визначається так

$$A_o = \frac{Q_o}{T_o}, \quad (3)$$

де  $Q_o$  - випуск продукції за час  $T_o$ .

Показник  $A_o$  пов'язаний з величиною  $A_n$  через відносну тривалість безперервної роботи (ввімкнення) обладнання, яка може бути також названа коефіцієнтом використання обладнання в часі і визначається за

такою формулою

$$K_t = \frac{T_n}{T_o} = \frac{T_n}{T_n + T_c}. \quad (4)$$

При цьому величина  $T_e = T_n / K_t$ , звідки

$$A_o = \frac{Q \cdot K_t}{T_n} = A_n \cdot K_t. \quad (5)$$

На підставі (2) і (5) отримуємо залежність

$$A_o = A_n \cdot K_t = A_{max} \cdot K_n \cdot K_t = A_{max} \cdot K_i, \quad (6)$$

де  $K_i$  - інтегральний коефіцієнт, що характеризує використання обладнання як за потужністю, так і в часі.

Таким чином, як буде показано далі, енергетична економічність роботи технологічного обладнання безперервної дії істотно залежить від режиму його роботи, тобто від навантаження обладнання в часі. Причому навантаження на агрегат залежно від режиму його роботи необхідно оцінювати за допомогою різних показників його продуктивності (черговий, середньогодинний або середньокалендарний). Величина навантаження агрегату значною мірою визначається показниками його навантаження за потужністю і використання в часі, які відіграють важливу роль також і для аналізу використання і нормалізації витрат енергії технологічним обладнанням.

**Аналіз енергетичної економічності роботи обладнання безперервної дії.** Як уже було сказано, обладнання безперервної дії може працювати протягом деякого періоду часу як безперервно, так і з перервами. Причому його навантаження під час роботи може бути як постійним, так і змінним. При безперервній роботі обладнання енергетична економічність його роботи є однозначною функцією продуктивності. Для кожного конкретного значення продуктивності енергоекономічність роботи агрегату оцінюється за допомогою його енергетичної характеристики величиною підведеної потужності або питомої витрати енергії.

Під час роботи обладнання з перервами протягом деякого проміжку часу  $T_o$ , при незмінній середньокалендарній продуктивності агрегату  $A_o$  середня підведена потужність  $P_o$  і середня питома витрата енергії  $d_o$  можуть бути різними. Вони можуть мінятися залежно від характеру зміни навантаження агрегату в часі. Проте, при цьому енергетичні характеристики обладнання не втрачають свого значення. На їх основі можна побудувати енергетичні діаграми, що відображають всі практично можливі режими роботи агрегату і відповідні ним

області зміни значення  $P_o$  і  $d_o$ .

Для деякого спрощення спочатку проаналізуємо ефективність використання енергії обладнанням безперервної дії без обліку пускових витрат і додаткових втрат енергії нестационарного процесу (тобто втрат енергії, виникаючих при переході з одного навантаження агрегату на інший). При цьому перш за все потрібно пам'ятати, що енергетична економічність роботи обладнання в різних режимах істотно залежить від форми його характеристики підведеної потужності. Тому розглянемо окремо кожен з відомих нам груп агрегатів, виявлених залежно від форми зазначеної характеристики.

**Аналіз функціонування обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності.** При безперервній роботі такого обладнання [4], [5] з постійним навантаженням величина підведеної до нього потужності при будь-якому значенні продуктивності відповідно до залежності (9) визначається з рівняння

$$P = P_{x.x} + d_q \cdot A. \quad (7)$$

Розділивши обидві частини рівняння (7) на  $A$ , отримаємо рівняння характеристики питомої витрати енергії

$$d = \frac{P_{x.x}}{A} + d_q. \quad (8)$$

У зазначених вище умовах витрата енергії за будь-який проміжок часу безперервної роботи обладнання  $T_n$  дорівнює

$$W_n = P \cdot T_n = P_{x.x} \cdot T_n + d_q \cdot Q_n. \quad (9)$$

Розділивши обидві частини виразу (9) на  $T_n$ , отримаємо

$$P_n = \frac{W_n}{T_n} = P_{x.x} + d_q \cdot A_n. \quad (10)$$

Далі, розділивши обидві частини останнього рівняння на  $A_n$ , отримуємо рівняння характеристики питомої витрати енергії

$$d_n = \frac{P_{x.x}}{A_n} + d_q. \quad (11)$$

У рівняннях (10) і (11), на відміну від залежностей (7) і (8), фігурують вже не поточні (миттєві), а середньогодинні значення продуктивності обладнання і підведеної потужності, визначені за весь період безперервної роботи агрегату. Проте, характер залежності між цими параметрами залишився незмінним, тобто константи в рівняннях підведеної потужності і питомої витрати енергії залишилися

колишніми (рис. 2).

Таким чином, на підставі викладеного можна зробити такі висновки:

1. При безперервній роботі обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності енергетичні характеристики режиму постійного навантаження агрегату одночасно є і характеристиками режиму його роботи зі змінним навантаженням.

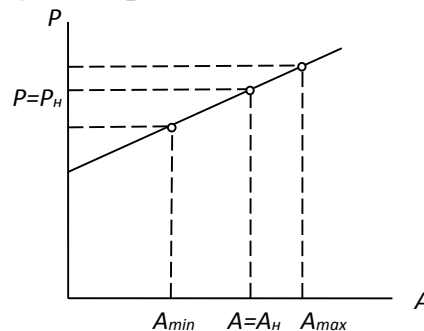


Рис. 2. Збіг поточної і середньої підведеної потужності для агрегатів з прямолінійною характеристикою

2. Робота такого обладнання при однаковій продуктивності (поточної або середньогодинної) енергетично дорівнює економічній як у постійному, так і змінному режимах навантаження, причому в останньому випадку - незалежно від характеру зміни навантаження агрегату за час його роботи (якщо при переході від одного значення навантаження до іншого не виникає додаткових витрат енергії).

Проте, як уже було сказано, режим роботи обладнання в деякому календарному періоді може характеризуватися не тільки часом безперервної роботи, але також перервами і простоями. В цьому випадку оцінка енергетичної економічності роботи агрегату базується на середньокалендарних значеннях підведеної потужності і питомої витрати енергії.

Витрата енергії за час  $T_o$  (без урахування пускових витрат), як і раніше, визначається виразом, аналогічним залежності (9)

$$W_o + P_{x.x} \cdot T_y + d_x \cdot Q, \quad (12)$$

оскільки при простоях і перервах з вимкненням обладнання енергія не витрачається. При цьому характеристика середньокалендарної підведеної потужності і питомої витрати енергії матиме такий вигляд

$$P_o = P_{x.x} \frac{T_n}{T_o} + d_q \frac{Q}{T_o} = K_t \cdot P_{x.x} + d_q \cdot A_o;$$
$$d_o = \frac{P_o}{A_o} = \frac{K_t \cdot P_{x.x}}{A_o} + d_q. \quad (13)$$

Рівняння (13) відрізняються від отриманих раніше тим, що вони містять дві змінні величини:  $A_o$  і  $K_t$ . Отже, вони визначають собою вже не лінії, а області зміни значень  $P_o$  і  $d_o$ . Ці області є енергетичними діаграмами обладнання.

Енергетична діаграма роботи обладнання безперервної дії з прямолінійними характеристиками підведеної потужності має такий вигляд (рис. 3). Пряма  $P_{x.x} - P_{max}$  на діаграмі відповідає випадку, коли  $K_t=1$ , тобто характеризує безперервну роботу обладнання протягом усього періоду часу  $T_o$  і є характеристикою залежності  $P_n=f(A_n)$ . У точці  $P_{max}$  цієї прямої агрегат працює з максимальною годинною продуктивністю. Таким чином, робота агрегату по прямій  $P_{x.x} - P_{max}$  характеризується умовами

$$T_o = T_n; A_o = A_n; K_t = 1; K_n = var. \quad (14)$$

Зазначеній прямій на діаграмі питомої витрати енергії відповідає крива  $d_1 - d_2$ . У точці  $d_2$ , відповідно умові  $A_o - A_{max}$ , питома витрата енергії має найменшу величину. Пряма  $0 - P_{max}$  відповідає переривистому режиму роботи обладнання з постійною годинною продуктивністю, що дорівнює  $A_{max}$ , і з повним вимкненням агрегату на час перерв. Цей режим роботи обладнання характеризується умовами

$$T_o = \frac{T_n}{K_t}; A_o = K_t \cdot A_n = K_t \cdot A_{max}; K_n = 1; K_t = var. \quad (15)$$

На діаграмі (рис. 3) питомої витрати енергії цьому режиму відповідає пряма  $d_3 - d_2$ . Прямі  $P_{x.x} - P_{max}$  і  $0 - P_{max}$  є приміжовими прямими енергетичної діаграми обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності і визначають собою найбільш характерні режими роботи таких агрегатів.

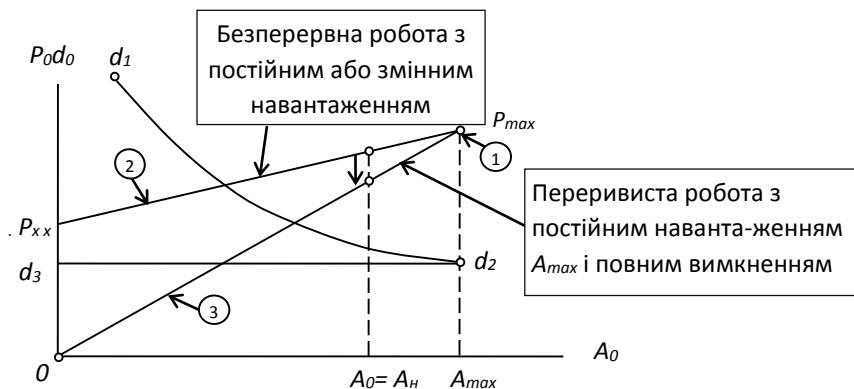


Рис. 3. Енергетична діаграма для обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності





Розглянута енергетична діаграма дозволяє зробити такі висновки щодо режимів роботи обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності:

1. За відсутності обмежень за програмою випуску продукції таке обладнання з погляду витрати енергії найдоцільніше експлуатувати в режимі безперервної роботи з постійним навантаженням, що дорівнює  $A_{max}$ , при якій забезпечується найменша величина питомої витрати енергії.

2. Якщо за умовами програми випуску продукції обладнання не може бути максимально навантажене протягом всього календарного періоду часу  $T_o$  (тобто  $A_o < A_{max}$ ) і в той же час виробництво не допускає переривистого режиму роботи агрегату, то з погляду витрати енергії байдуже, буде обладнання працювати безперервно з постійною пониженою продуктивністю  $A_o$  чи воно працюватиме зі змінним навантаженням, забезпечуючи середньогодинну продуктивність  $A_n = A_o$ . В обох випадках робота агрегату проходить за однією і тією самою характеристикою (пряма  $P_{x,x}-P_{max}$ ). Проте, при нагоді вибору постійного або змінного режиму навантаження перевага завжди повинна віддаватися режиму постійного навантаження. Це пов'язано як із додатковими втратами енергій, що виникають іноді при змінному навантаженні, так і з метою збереження обладнання і зручності його експлуатації.

3. Якщо в тих самих умовах неповного навантаження обладнання випуском продукції виробництво допускає роботу агрегату з перервами, то з погляду витрати енергії доцільно переходити на переривистий режим роботи, чергуючи періоди роботи при максимальній годинній продуктивності з перервами в роботі з повним вимкнення агрегату. В цьому випадку робота обладнання проходить по прямій  $0-P_{max}$  на діаграмі підведеної потужності і по лінії  $d_3-d_2$  на діаграмі питомої витрати енергії.

**Аналіз функціонування обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності.** Енергетична економічність безперервної роботи такого обладнання з постійним навантаженням також однозначно оцінюється за допомогою енергетичних характеристик. Інакше відбувається при змінному режимі навантаження агрегату. Тут при одному і тому самому виробленні продукції показники енергоекономічності роботи обладнання зі змінним і постійним навантаженням не збігаються (рис. 4). На підставі наведеного рисунка видно, що середня величина підведеної потужності  $P_n$  за період безперервної роботи обладнання зі змінним навантаженням не збігатиме з поточним значенням підведеної



потужності  $P$ , відповідним середньогодинному значенню продуктивності агрегату  $A_n$ .

Величина різниці між значеннями  $P_n$  і  $P$  характеризує додаткові втрати енергії змінного режиму навантаження в порівнянні з режимом постійного навантаження, які залежать від ступеня кривизни характеристики підведеної потужності і від діапазону зміни годинної продуктивності агрегату за час його безперервної роботи.

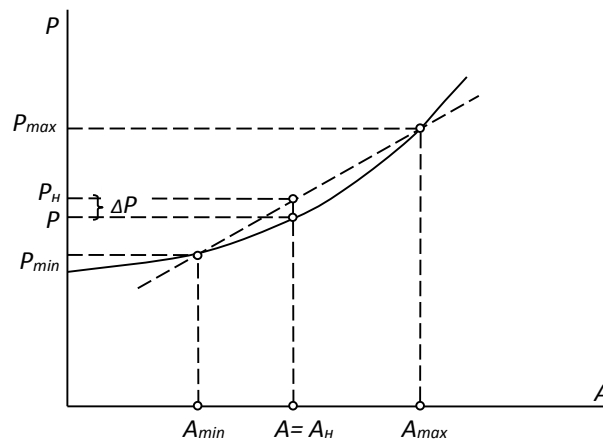


Рис. 4. Незбігання поточної і середньогодинної підведених потужностей для агрегатів з увігнутою характеристикою

Енергетична діаграма обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності може бути подана у вигляді такого графіка (рис. 5). Заштрихована бласть тут відповідає безперервній роботі агрегату з різними режимами навантаження протягом календарного періоду часу  $T_o$ . Точка  $P_{max}$  відповідає роботі обладнання в постійному режимі навантаження при максимальній годинній продуктивності  $A_{max}$ . Проте, найменша питома витрата енергії при безперервній роботі агрегату спостерігається в точці  $b$ , відповідній роботі обладнання в постійному режимі навантаження з так званою економічною продуктивністю  $A_{ек}$ .

Крива  $P_{x,x}-b-P_{max}$  характеризує режим постійного навантаження обладнання, найбільш вигідний в умовах безперервної роботи. Пряма  $P_{x,x}-P_{max}$  відповідає найменш вигідному з енергетичної точки зору режиму безперервної роботи агрегату, характеризується чергуванням періодів роботи при максимальній годинній продуктивності з холостими ходами.

Переривисті режими роботи агрегату характеризуються на графіку прямими  $0-P_{max}$  і  $0-b$ . Перша з них відповідає режиму чергування періодів роботи агрегату при максимальній годинній продуктивності  $A_{max}$  з повним вимкненням обладнання на час перерв, а друга - режиму чергування перерв з повним вимкненням агрегату з періодами роботи обладнання при економічній годинній продуктивності  $A_{ек}$ . Останній

режим є найвигіднішим з точки зору витрати енергії, оскільки йому при заданій середньокалендарній продуктивності  $A_o$  відповідає найменша величина середньокалендарної підведеної потужності  $P_o$ , а отже, і найменша величина середньокалендарної питомої витрати енергії  $d_o$ .

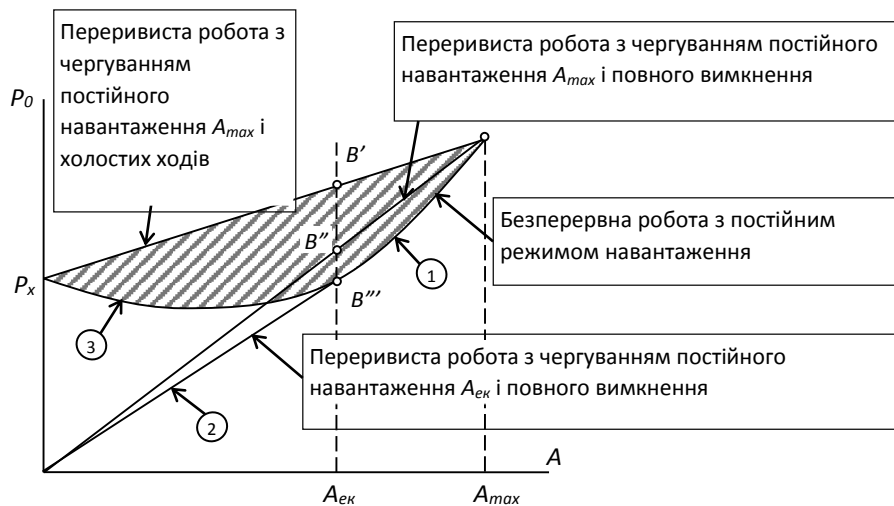


Рис. 5. Енергетична діаграма для обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності

Розглянута енергетична діаграма (рис. 5) дозволяє зробити такі висновки щодо енергетичної економічності роботи обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності:

1. Якщо за умовами виробничої програми такому обладнанню може бути задана середньокалендарна продуктивність, що дорівнює або більша, ніж його економічна продуктивність (тобто  $A_o \geq A_{ек}$ ), то з точки зору витрати енергії обладнання повинно працювати в режимі безперервної роботи з постійною годинною продуктивністю.

2. Якщо виробнича програма не забезпечує середньокалендарного навантаження обладнання за його економічною годинною продуктивністю (тобто  $A_o < A_{ек}$ ), то з точки зору витрати енергії найвигідніше переходити на переривистий режим роботи агрегату з чергуванням періодів роботи при постійному навантаженні, що дорівнює економічній годинній продуктивності  $A_{ек}$ , з повним вимкненням обладнання.

3. Якщо в тих самих умовах навантаження обладнання випуском продукції ( $A_o < A_{ек}$ ) виробництво не допускає переривистого режиму роботи агрегату, то з точки зору витрати енергії обладнання слід експлуатувати в режимі безперервної роботи з постійним

навантаженням, що дорівнює заданій середньокалендарній продуктивності  $A_0$ .

**Аналіз функціонування обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності.** Для обладнання з такими характеристиками під час роботи зі змінним навантаженням середньогодинна величина підведеної потужності і середньогодинна питома витрата енергії при заданій середньогодинній продуктивності  $A_H$  також не дорівнюють підведеній потужності і питомій витраті енергії під час роботи агрегату з постійною годинною продуктивністю  $A=A_H$  (рис. 6). Різниця між вказаними значеннями підведеної потужності характеризує в даному випадку не додаткові витрати, а економію енергії при змінному режимі навантаження в порівнянні з режимом роботи з постійним навантаженням.

Енергетична діаграма роботи обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності може бути подана у вигляді такого графіка (рис. 7). Заштрихована область тут характеризує безперервну роботу агрегату з різними режимами навантаження. Точка  $P_{max}$  відповідає безперервній роботі з постійним навантаженням, що дорівнює максимальній годинній продуктивності обладнання  $A_{max}$ , при якій спостерігається найменше значення питомої витрати енергії.

Крива  $P_{x,x}-P_{max}$  відповідає безперервній роботі обладнання в режимі постійного навантаження, який тут є найменш вигідним з енергетичної точки зору за будь-яких умов, оскільки йому при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності відповідає найбільше значення середньокалендарної підведеної потужності  $P_0$ .

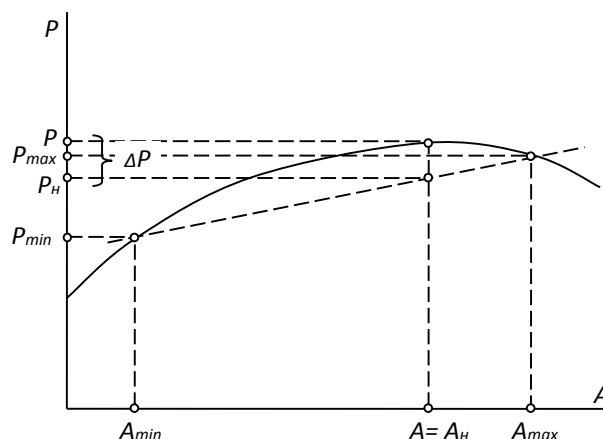


Рис. 6. Не збігання поточної і середньої підведених потужностей для агрегатів з опуклою характеристикою

Пряма  $P_{x,x}-P_{max}$  характеризує безперервну роботу агрегату з чергуванням корисної роботи при максимальній годинній

продуктивності  $A_{max}$  з холостими ходами обладнання. Цей режим в умовах безперервної роботи агрегату при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності з погляду споживання енергії вигідніший, ніж робота з постійним навантаженням, що дорівнює тій самій середньо-календарній продуктивності  $A_o$ .

Пряма  $0-P_{max}$  відповідає переривистому режиму роботи обладнання з чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності  $A_{max}$  і перерв з повним вимкненням агрегату. Цей режим є з енергетичної точки зору найвигіднішим при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності, меншій, ніж його максимальна годинна продуктивність.

На підставі розглянутої енергетичної діаграми можна зробити такі висновки, що належать до роботи обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності [1], [3], [4], [5]:

1. Безперервна робота агрегату з постійним навантаженням з погляду витрати енергії вигідна тільки тоді, коли виробнича програма дозволяє навантажити обладнання на величину його максимальної годинної продуктивності  $A_{max}$  протягом усього календарного періоду часу  $T_o$ .

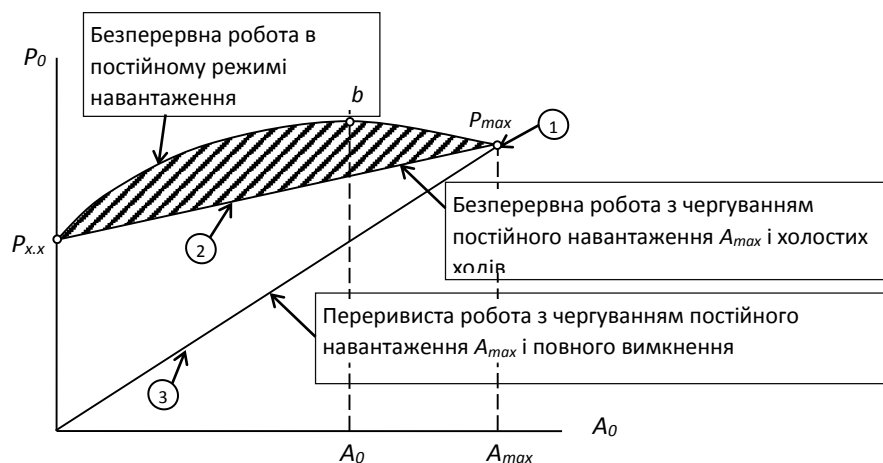


Рис. 7. Енергетична діаграма для обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності

2. При безперервній роботі обладнання, встановленій умовами виробництва, і заданій неповній середньокалендарній продуктивності агрегату  $A_o < A_{max}$ , з погляду витрати енергії найвигідніше експлуатувати його в режимі чергування періодів роботи при максимальній годинній продуктивності з холостими ходами або з роботою при мінімальній годинній продуктивності обладнання.

3. У тих самих умовах неповного завантаження обладнання



випуском продукції ( $A_o < A_{max}$ ), але допустимості переривистої роботи, з енергетичної точки зору найвигідніше переходити на переривистий режим роботи агрегату з чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності і перерв з повним вимкненням обладнання.

**Аналіз продуктивності і енергетичної економічності роботи обладнання циклічної дії.** До обладнання циклічної дії належать, наприклад, металорізальні верстати, прокатні стани, молоти, преси, печі й таке інше. Виробництво продукції на такому обладнанні зв'язане не тільки з часом ефективної (корисної) роботи, але і з допоміжним часом, що є складовою частиною робочого циклу таких агрегатів. Допоміжний час містить, наприклад, час установки і знімання деталей, підведення і відведення різальних інструментів та інші витрати часу, обумовлені технологічними і конструктивними чинниками. У зв'язку із зазначеним обставинами час безперервної роботи обладнання циклічної дії  $T_n$  можна розглядати тільки як якусь подібність того самого часу для обладнання безперервної дії. Час  $T_n$  для агрегатів циклічної дії є сумою тривалості повних циклів його роботи, що здійснюються за даний період

$$T_n = \sum_{i=1}^n T_{p_i} = \sum_{i=1}^n (T_n + T_e)_i = \sum_{i=1}^n (T_n + T_{x.x} + T_c)_i, \quad (16)$$

де  $T_p$  - тривалість одного робочого циклу агрегату;

$n$  - число повних циклів роботи за даний період часу;

$T_n$  - тривалість корисної роботи обладнання;

$T_e$  - допоміжний час, що складається в загальному випадку з часу холостого ходу  $T_{x.x}$  і тривалості перерви в роботі з повним вимкненням агрегату  $T_c$ .

Для обладнання циклічної дії випуск продукції може бути вимірний тільки за повний цикл його роботи або за ряд повних циклів. Тому поточна величина годинної продуктивності  $A$  агрегату циклічної дії є фіктивною величиною, відповідною годинній продуктивності обладнання, допоміжний час для якого становить нескінченно малу величину в порівнянні з часом його корисної роботи.

Середньогодинна продуктивність  $A_n$  обладнання циклічної дії може розглядатися також тільки як якась подібність даного показника для обладнання безперервної дії. При цьому, якщо за кожний робочий цикл проводиться  $Q_p$  одиниць продукції, то середньогодинна продуктивність агрегату циклічної дії за час безперервної його роботи становитиме



$$A_n = \frac{Q_p}{T_p} = \frac{Q_p}{T_n + T_e}, \text{ або } A_n = \frac{n \cdot Q_p}{\sum_{l=1}^n T_{p_l}}. \quad (17)$$

З формул (17) виходить, що середньогодинна продуктивність обладнання циклічної дії залежить не тільки від кількості продукції, що виробляється, але також і від тривалості робочого циклу агрегату. Тому добиватися підвищення середньогодинної продуктивності обладнання циклічної дії потрібно не тільки шляхом збільшення його навантаження за потужністю, але і шляхом поліпшення його використання в часі (подібно до того, як може бути підвищена середньокалендарна продуктивність обладнання безперервної дії). Це може досягатися як шляхом збільшення одночасно оброблюваних виробів (наприклад, на багатошпиндельних верстатах), так і шляхом зменшення часу корисної роботи і скорочення допоміжного часу в робочому циклі агрегату.

Показники середньокалендарної продуктивності  $A_o$  обладнання циклічної дії не відрізняються від аналогічних показників для обладнання безперервної дії, оскільки ця величина як у першому, так і в другому випадках відображає відносну тривалість безперервної роботи, перерв і простоїв агрегату, що виходять за межі їх робочих циклів.

Хоча для відрізків часу  $T_o \leq T_n$  можна говорити про безперервну роботу обладнання циклічної дії, побудувати для нього характеристику підведеної потужності, відповідну цьому режиму, неможливо, оскільки за час  $T_n$  не можна визначити продуктивність агрегату. Отже, енергетична характеристика для такого обладнання може бути побудована тільки на відрізок часу  $T_e \geq T_p$ .

Якщо розглядати роботу агрегату циклічної дії за час  $T_o \leq T_n$  (тобто за час, що не містить тривалість перерв, пов'язаних з режимом роботи підприємства), то, очевидно, можливі два стани обладнання протягом допоміжного часу:

- холостий хід агрегату;
- повне вимкнення обладнання.

Ті ж два стани обладнання, в принципі, можливі і під час перерв, пов'язаних з режимом роботи підприємства (міжзмінні перерви, вихідні, святкові дні та ін.).

Таким чином, енергетична діаграма роботи обладнання циклічної дії (рис. 8) зовні нагадує енергетичну діаграму для обладнання безперервної дії з прямолінійними характеристиками підведеної потужності (рис. 3). Проте енергетична діаграма для обладнання циклічної дії не містить характеристики, відповідної безперервній



роботі агрегату з постійним навантаженням. Отже, можливі тільки два режими, в яких з енергетичної точки зору доцільно використовувати обладнання циклічної дії:

– переривистий режим із чергуванням роботи при максимальній або економічній продуктивності з холостими ходами агрегату протягом допоміжного часу або часу перерв;

– переривистий режим із чергуванням роботи при максимальній або економічній продуктивності з повним вимкненням обладнання протягом допоміжного часу або часу перерв.

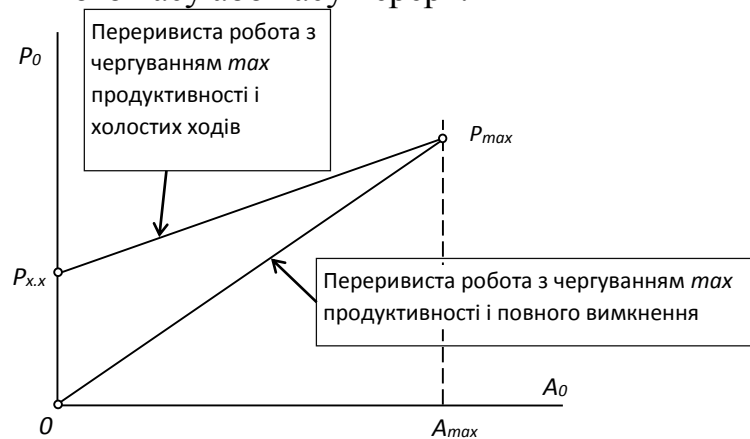


Рис. 8. Енергетична діаграма для обладнання циклічної дії

Якщо не брати до уваги додаткові витрати енергії, пов'язані з вимкненням обладнання і подальшим його включенням у роботу, то з погляду ресурсозбереження, очевидно, перевагу слід віддавати переривистому режиму роботи агрегатів циклічної дії з повним їх вимкненням протягом допоміжного часу або часу перерв. Проте, остаточний вибір між зазначеними двома режимами роботи (як, втім, і для обладнання безперервної дії) необхідно здійснювати з урахуванням додаткових витрат і втрат енергії, що виникали в результаті вимкнення і подальшого включення агрегатів у роботу.

**Висновок.** Таким чином, проаналізувавши енергетичну економічність роботи обладнання безперервної дії, можна стверджувати, що незважаючи на різноманітність можливих режимів його роботи, практично доцільними є тільки такі чотири режими:

1. Безперервна робота з постійним навантаженням агрегату. Цей режим допустимий для обладнання з прямолінійними й увігнутими характеристиками при будь-якому заданому значенні його середньокалендарної продуктивності, а для обладнання з опуклими характеристиками - тільки при постійному навантаженні, що дорівнює



максимальній годинній продуктивності агрегату.

2. Безперервна робота зі змінним навантаженням. Цей режим допустимий тільки для обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності.

3. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності агрегату з холостими ходами обладнання або роботою з мінімальною годинною продуктивністю. Цей режим допустимий в умовах обов'язкової безперервної роботи для обладнання з прямолінійними й опуклими характеристиками підведеної потужності і протипоказаний для агрегатів з увігнутими характеристиками.

4. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній або економічній годинній продуктивності агрегату і перерви в роботі з повним вимкненням обладнання.

У всіх розглянутих режимах, окрім безперервної роботи обладнання із змінним навантаженням, питома витрата енергії є сталою величиною при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності агрегату. Таким чином, встановивши конкретний режим роботи обладнання, легко визначити за його енергетичною характеристикою норму питомої витрати енергії, точно відповідну вибраному режиму і заданій середньокалендарній продуктивності агрегату.

Якщо за умовами виробництва годинна продуктивність обладнання не може бути зафіксована незмінною, слід передбачити деякий діапазон можливого її коливання щодо встановленої середньої величини. В цьому випадку енергетична характеристика або діаграма агрегату дозволяє встановити відповідний діапазон допустимих коливань середньої питомої витрати енергії. При цьому норму питомої витрати енергії можна задати за його середнім значенням у зазначеному діапазоні.

### **Список використаних джерел**

1. Толбатов В. А., Лебединський І. Л., Толбатов А. В. Організація систем енергозбереження на промислових підприємствах: навч. посібник. Суми: СумДУ, 2009. 195 с.
2. Прокопенко В. В., Закладний О. М., Кульбачний П. В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: навч. посібник. Київ: Освіта України, 2008. 438 с.
3. Толбатов В. А. Ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів: звіт про НДР 0113U004133. Суми: СумДУ, 2018. 139 с.



4. Научное окружение современного человека: Техника и технологии: монография / И. Я. Львович и др. Одесса, 2018. 181 с.

5. Инновационная наука, образование, производство и транспорт: Техника и технологии: монография / А. М. Верховлюк и др. Одесса, 2018. 223 с.

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ АГРЕГАТОВ

**Толбатов А. В., Толбатов В. А., Яковлев В. Ф., Вьюненко А. Б.,  
Смоляров Г. А.**

**Аннотация** – анализируя энергетическую экономичность работы оборудования непрерывного действия, можно утверждать, что практически целесообразными являются только следующие четыре режима: 1) непрерывная работа с постоянной нагрузкой агрегата; 2) непрерывная работа с переменной нагрузкой; 3) прерывистый режим, характеризующийся чередованием периодов полезной работы при максимальной часовой производительности агрегата с холостыми ходами оборудования или работой с минимальной часовой производительностью; 4) прерывистый режим, характеризующийся чередованием периодов полезной работы при максимальной или экономической часовой производительности агрегата и перерывы в работе с полным отключением оборудования. Во всех рассмотренных режимах, кроме непрерывной работы оборудования с переменной нагрузкой, удельный расход энергии является постоянной величиной при любой заданной среднекалендарной производительности агрегата. Таким образом, установив конкретный режим работы оборудования, легко определить по его энергетической характеристике норму удельного расхода энергии, которая точно соответствует выбранному режиму и заданной среднекалендарной производительности агрегата. Если по условиям производства часовая производительность оборудования не может быть зафиксирована неизменной, следует предусмотреть некоторый диапазон её возможного колебания по установленной средней величине. В этом случае энергетическая характеристика или диаграмма агрегата позволяет установить соответствующий диапазон допустимых колебаний среднего удельного расхода энергии. При этом норму удельного расхода энергии можно задать с его средним значением в указанном диапазоне.

**Ключевые слова:** оборудование непрерывного действия, энергетическая экономичность работы, производительность оборудования.



## ANALYSIS OF ENERGY ECONOMY OF WORK OF ENERGY-CONSUMERING UNITS

A. Tolbatov, V. Tolbatov, V. Yakovlev, O. Viunenko, G. Smolarov

### *Summary*

By analyzing the energy efficiency of continuous operation equipment, it can be argued that only the following four modes are practically feasible: 1) Continuous work with constant load of the unit; 2) Continuous work with variable load; 3) intermittent mode, characterized by the alternation of periods of useful work at the maximum hourly productivity of the unit with idle equipment or work with a minimum hourly productivity; 4) intermittent mode, characterized by alternating periods of useful work at the maximum or economical hourly productivity of the unit and the break in the work with the complete shutdown of the equipment. In all considered modes, in addition to the continuous operation of equipment with variable load, the specific energy consumption is a constant value for any given average calendar productivity of the unit. Thus, by establishing a specific operating mode of the equipment, it is easy to determine according to its energy characteristic the norm of the specific energy consumption, exactly corresponding to the selected mode and the given average calendar productivity of the unit. If, under the conditions of production, the hourly productivity of the equipment cannot be fixed unchanged, a certain range of its possible fluctuations in relation to the established average value should be foreseen. In this case, the energy characteristic or the diagram of the unit allows to establish the appropriate range of permissible fluctuations of the average specific energy consumption. In this case, the rate of specific energy consumption can be set at its average value in the specified range.

**Keywords:** continuous operation equipment, energy efficiency, equipment performance.