

Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, О. П. УСАТИЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ КОНКУРСНОГО РОЗПОДІЛУ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТЕПЕНЮ РАЦІОНАЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ НАЯВНОГО ПЕРЕПАДУ ЕНТАЛЬПІЙ МІЖ СТУПЕНЯМИ ТУРБИНИ

Для задач аналізу і оптимального проєктування проточних частин парових турбін розроблено альтернативний метод розподілу наявного теплового перепаду багатоступеневої турбіни між її ступенями. Розглянута можливість використання теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів для оцінки степеню раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни. Метод використовує залежність для оцінки потужності ступеня турбіни та конкурсні механізми, які були розроблені і використовуються для розв'язання задач розподілу ресурсів в галузі економіки. Проведені порівняльні розрахункові дослідження з оцінки степеню раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями вихідних і оптимальних варіантів проточних частин парових турбін. Підтверджена можливість використання теорії розподілу обмежених ресурсів для задач аналізу і оцінки степеню раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни та в оптимізаційних задачах з метою досягнення максимальної потужності багатоступеневої турбіни. Показано, що у оптимальних варіантів проточних частин розподіл наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни має кращі наближення до значень показників, які відповідають ідеальному варіанту розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями відповідно до розробленого методу ніж у вихідного варіанту проточної частини турбіни.

Ключові слова: багатоступенева парова турбіна, проточна частина, ступень турбіни, наявний перепад ентальпій, розподіл перепаду ентальпій, конкурсний механізм.

R. SHERFEDINOV, O. USATYI

USING THE THEORY OF COMPETITIVE DISTRIBUTION OF LIMITED RESOURCES TO ASSESS THE DEGREE OF RATIONALITY OF DISTRIBUTION OF THE EXISTING THERMAL DIFFERENCE BETWEEN TURBINE STAGES

For the problems of analysis and optimal design of the flow parts of steam turbines, an alternative method has been developed for distributing the existing thermal difference of a multistage turbine between its stages. Consideration was given to the possibility of using the theory of competitive distribution of limited resources to assess the degree of rationality of the distribution of the existing thermal difference between turbine stages. The method uses an appropriate relationship to estimate the power degree of the turbine and competitive mechanisms that were developed and used to solve resource allocation problems in the field of economics. Comparative computational studies have been carried out to assess the degree of rationality of the distribution of the existing thermal difference between the stages for the original and optimal options of the flow parts of steam turbines. The possibility of using the theory of distribution of limited resources for problems of analysis and assessment of the degree of rationality of the distribution of the existing thermal difference between the stages of the turbine and for optimization problems in order to achieve a maximum power of a multi-stage turbine has been confirmed. It is shown that the distribution of the existing thermal difference between the turbine stages for the optimal variants of flow parts has better approximations to the values of the indicators that correspond to the ideal option of the distribution of the existing thermal difference between the stages in accordance with the developed method in comparison to the original option of the turbine flow part. The developed method provides an ideal theoretical solution for assessing the degree of approximation to it, both for the original and approximately optimal flow parts of multi-stage turbines.

Key words: multi-stage steam turbine, flow part, turbine stage, existing thermal difference, distribution of thermal difference, and competitive mechanism.

Вступ

Стратегією розвитку енергетичної галузі України передбачено масштабне оновлення генеруючих потужностей та зниження карбонових викидів при генерації енергії. Досягти цієї мети можливо тільки шляхом упровадження новітніх технологій, інноваційних рішень і інтеграції виробничого та науково-освітнього потенціалу в галузі енергетичного машинобудування. Зрозуміло, що без нових наукових досягнень в області розробки і створенні нових оптимальних конструкцій турбоблоків для теплових і атомних електростанцій неможливе досягнення поставленої мети.

В статті розглянута можливість використання теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів для оцінки степеню раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни, як одного із основних факторів, який має суттєвий вплив на ступінь досконалості та ефективності

конструкції ПЧ турбіни і турбоблоку в цілому. Створення і впровадження інноваційних, високоефективних, оптимальних конструкцій ПЧ турбін і турбоблоків для енергогенеруючих підприємств є запорукою успішного розв'язання складних задач, які стоять перед енергетичною галуззю України.

Як правило, використання методів багатопараметричної оптимізації проточних частин (ПЧ) потужних парових турбін призводить не тільки до підвищення аеродинамічної ефективності ступенів та відсіків турбін, а і до досить суттєвого перерозподілу наявних перепадів ентальпій між ступенями та відсіками [1] – [5]. Очевидно, що в випадку відсутності обмеження на значення параметрів пари в місцях відбору для регенеративного підігріву живильної води, розв'язання задачі оптимального проєктування ПЧ турбіни, або її циліндру призведе до деяких змін значень наявних перепадів ентальпій відсіків і параметрів пари в відборах. Зміна значень цих параметрів веде відповідно до

© Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий, 2023

зміни температури живильної води на вході в парогенератор та термодинамічної ефективності теплового циклу турбоагрегату [1] – [5]. В статті пропонується використати метод механізму конкурсного розподілу обмежених ресурсів для оцінки ступеню раціональності (оптимальності) розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни. Даний метод і механізми його реалізації були розроблені для галузі економіки з метою розв’язання задач розподілу обмежених ресурсів.

Мета роботи

Метою роботи є розробка нового методу розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни та оцінка можливості використання цього методу для аналізу ступеню оптимальності конструкцій ПЧ турбін та для розрахунку значення критерію якості в задачах оптимального проектування конструкцій ПЧ потужних парових турбін.

Виклад основного матеріалу

Новий метод базується на тому факті, що кожна турбіна має відповідний наявний перепад ентальпій, який спрацьовується в її ступенях. Якщо представити наявний перепад ентальпій турбіни, як обмежений ресурс, а ступені турбіни, як виробники потужності то задачу розподілу наявного теплового перепаду між ступенями турбіни можна сформулювати, як задачу економічної теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів.

На сьогодні існує досить багато економічних теорій щодо розподілу ресурсів, розроблено ряд моделей і механізмів, які спонукають виконавців до максимального використання всіх своїх резервів і максимально ефективної діяльності. Звернемо увагу на один із цих методів [6], який використовує так звані конкурсні механізми. Їхня особливість полягає у тому, що виконавці беруть участь в змаганні за отримання ресурсу, а ресурс розподіляється пропорційно до ефективності використання його виконавцями:

$$\xi_i = \frac{\varphi_i(x_i)}{x_i} \quad (1)$$

Очікуваний ефект для проекту загалом від діяльності i -го виконавця в цьому випадку дорівнює:

$$w_i = \xi_i s_i, \quad (2)$$

де s_i частина загального ресурсу, яка виділяється для i -го виконавця. Ресурс S , що є в наявності, розподіляється так: перший виконавець (виконавець, що має максимальну ефективність ξ_1) отримує ресурс у запрошуваному об’ємі s_1 . Потім ресурс одержує (в об’ємі s_2) виконавець з меншою (другою за величиною ξ_2) ефективністю і так далі, поки не закінчиться весь ресурс.

При проведенні багатопараметричної оптимізації ПЧ в постановці з заданими параметрами в місцях відбору пари для підігріву живильної води такого впливу її результатів на термічний ККД (η_T) турбоблоку не буде. Однак, в цьому випадку буде суттєво обмежена можливість підвищення внутрішнього відносного ККД (η_{oi}^t) проточної частини турбіни. При цьому необхідно враховувати, що одним із найважливіших показників ефективності турбоблоку є його внутрішній абсолютний ККД:

$$\eta_i = \eta_T \eta_{oi}^t, \quad (3)$$

який одночасно враховує термодинамічну ефективність теплової схеми турбоблоку та аеродинамічну ефективність ПЧ турбіни.

Тому, важливо в процесі оптимального проектування турбоблоку не обмежувати можливості багатопараметричної оптимізації аеродинамічних властивостей ПЧ, а досягати максимального значення внутрішнього абсолютного ККД турбоблоку (η_i), який в свою чергу напряму залежить і від розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни.

Під час проектування проточних частин парових турбін завжди розв’язується задача розподілу наявного перепаду ентальпій турбіни або відсіку турбіни між їх ступенями. В обох випадках досить часто використовується проста і загальновідома методика [7].

Недоліком цієї методики є вельми спрощений підхід до оцінки впливу розподілу перепаду ентальпій між ступенями на ефективність ПЧ турбіни (η_{oi}^t). Очевидно, що значення параметрів пари в місцях відбору (між відсіками турбіни) має безпосередній вплив на температуру підігріву живильної води, а відповідно і на термічний ККД теплового циклу турбоблоку (η_T) та на значення масової витрати пари в відборі між відсіками.

З метою досягнення максимально можливих значень термічного ККД теплового циклу та потужності турбоблоку безсумнівно стає актуальність і необхідність розробки методики раціонального вибору параметрів пари в відборах між відсіками турбіни, а саме тиску пари. Зважаючи на те, що значення тиску пари в відборах між відсіками турбіни є функцією від величин наявних перепадів ентальпій відсіків турбіни, задача раціонального вибору параметрів пари в відборах трансформується в задачу конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій між відсіками турбіни та їх ступенями.

Для визначення параметрів пари, що відбирається з проточної частини турбіни для підігріву живильної води може бути використано алгоритм, який базується на забезпеченні необхідного рівня температури живильної води на вході в парогенератор. В цьому випадку, використовуючи балансо-

ві рівняння [8], що дозволяє визначати кількість теплоти, яка необхідна для заданого підвищення температури живильної води, а потім використовуючи властивості водяної пари знайти значення масової витрати пари та її параметрів, які забезпечать необхідний рівень підігріву живильної води в кожному підігрівачеві.

Такий алгоритм є досить простим та надійним, але в ньому відсутній механізм оцінки дійсних значень ефективності ступенів і відсіків (зважається, що вони відомі). Це заважає провести більш раціональний розподіл наявного перепаду ентальпій турбіни між її відсіками та ступенями.

Розглянемо запропоновану методику оцінки раціональності (оптимальності) розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни з метою отримання максимальної потужності турбіни. Методика використовує механізми теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів в галузі економіки.

Запишемо потужність турбіни N_t , як суму потужностей її відсіків

$$N_t = \sum_{j=1}^n N_j, \quad (4)$$

де N_j – потужність j -го відсіку;
 n – кількість відсіків у турбіні.

Використаємо загальновідому залежність для потужності відсіку парової турбін

$$N_j = \eta_{oi(j)} G_j H_j, \quad (5)$$

де $\eta_{oi(j)}$ – внутрішній відносний ККД j -го відсіку;

G_j – масова витрата пари через j -й відсік;

H_j – наявний перепад ентальпій j -го відсіку.

Скористаємося добутком $K_j = \eta_{oi(j)} G_j$, як

ваговим коефіцієнтом перед наявним перепадом ентальпій j -го відсіку в формулі (5). Тоді потужність j -го відсіку можна записати наступним чином

$$N_j = K_j H_j, \quad (6)$$

а потужність турбіни, як

$$N_t = K_1 H_1 + K_2 H_2 + \dots + K_j H_j + \dots + K_{(n-1)} H_{(n-1)} + K_n H_n, \quad (7)$$

Якщо поставити за мету спроектувати турбоблок з максимальним рівнем потужності, то, аналізуючи вид залежності (7) можна стверджувати, що для досягнення цієї мети потрібно розподілити наявний перепад ентальпій турбіни таким чином, щоб більшому значенню вагового коефіцієнта K_j j -го відсіку в формулі (7) відповідало більше значення його наявного перепаду ентальпій (H_j).

Для розв'язання задачі конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій між відсіками парової турбіни введемо поняття нормованого значення вагового коефіцієнта наявного перепаду ентальпій j -го відсіку

$$k_j = \frac{K_j}{\sum_{j=1}^n K_j}, \quad (8)$$

та нормованого значення наявного перепаду ентальпій відсіку

$$\gamma_j = \frac{H_j}{H_0} = \frac{H_j}{\sum_{j=1}^n H_j}, \quad (9)$$

де H_0 – наявний перепад ентальпій турбіни.

Використовуючи ці два нормованих коефіцієнти кожного із відсіків можна отримати **раціональний** (оптимальний) розподіл наявного перепаду ентальпій турбіни між її відсіками.

Основна ідея організації механізму конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій для отримання **раціонального** (оптимального) розподілу полягає в наступному:

1 Задаємося початковими значеннями $\eta_{oi(j)}$ внутрішніх відносних ККД кожного із відсіків турбіни.

2 Одним із відомих методів [7] знаходимо початкові значення масових витрат пари для підігріву живильної води.

3 Визначаємо вагові коефіцієнти K_j та їх нормовані значення k_j .

4 Для справедливого та раціонального розподілу наявного перепаду ентальпій турбіни задаємо нормованим коефіцієнтам наявних перепадів ентальпій відсіків значення нормованих вагових коефіцієнтів відповідних відсіків ($\gamma_j = k_j$).

5 Використовуючи залежність (9) знаходимо значення наявних перепадів ентальпій відсіків турбіни

$$H_j = \gamma_j H_0. \quad (10)$$

Отримавши перше наближення значень наявних перепадів ентальпій відсіків турбіни визначаємо кількість ступенів турбіни для кожного відсіку та розподіляємо між ними наявні перепади ентальпій відсіків, використовуючи також конкурсний механізм розподілу обмеженого ресурсу, відповідно до (4) – (10). В даному випадку j буде відповідати номеру ступеня у відсіку, а n буде дорівнювати кількості ступенів у відсіку.

Далі розв'язуємо задачі оптимального проектування ступенів відсіків та оцінюємо їх ефективність і внутрішні відносні ККД ($\eta_{oi(j)}$) кожного відсіку. Повертаємося до п. 2 і продовжуємо ітераційні розрахунки до виконання умови збіжності. На рис. 1 наведена блок-схема алгоритму, що реалізує конкурсний механізм розподілу наявного перепаду ентальпій між відсіками турбіни та між ступенями відсіків.

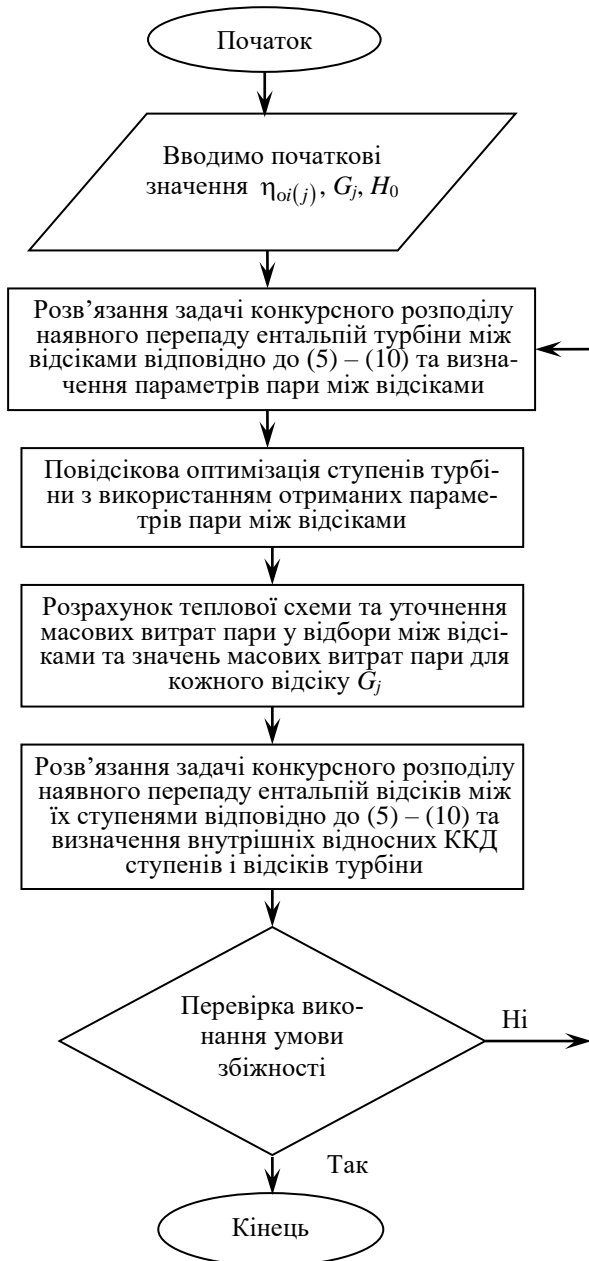


Рис. 1 – Блок схема алгоритму розподілу наявного перепаду ентальпій між відсіками і ступенями турбіни

Обговорення результатів

На прикладі циліндру високого тиску (ЦВТ) турбіни К-540-23,5 розглянемо можливість використання конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій між відсіками та їх ступенями відповідно до (5) – (10) для аналізу двох варіантів ЦВТ – вихідного і оптимального.

Порівняння інтегральних показників якості оптимального і вихідного варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5 показує, що оптимальний варіант ПЧ має більш високі значення внутрішнього

відносного ККД (85,61 %) і потужності (148,071 МВт) по відношенню до вихідного варіанту у якого аналогічні показники становлять 84,09 % і 146,672 МВт відповідно. За результатами оптимізації приріст внутрішнього відносного ККД ПЧ ЦВТ склав 1,52 %, а потужності – 1,399 МВт.

Розглянемо рівні внутрішнього відносного ККД ступенів вихідного і оптимального варіантів ЦВТ (рис. 2), масових витрат пари на вході в кожен ступень (рис. 3), потужності ступенів (рис. 4), а також проаналізуємо яким чином розподілено наявний перепад ентальпій ЦВТ між його ступенями у вихідного і оптимального варіантів ПЧ (рис. 5).

В табл. 1 і 2 наведені параметри, які визначаються для вихідного і оптимального варіантів ПЧ ЦВТ відповідно до методу конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій ЦВТ (залежності (5) – (10)) між його ступенями.

В останніх колонках табл. 1 і 2 наведені значення відхилення перепадів ентальпій ступенів вихідного і оптимального варіантів ПЧ ЦВТ (у відсотках) відносно результатів ідеального конкурсного розподілу, при якому для кожного ступеня повинно виконуватися наступне співвідношення

$$\frac{k_j}{\gamma_j} = 1,0. \quad (11)$$

Як бачимо у оптимального варіанту ПЧ (табл. 2) максимальне відхилення перепаду ентальпій від його ідеального значення становить 1,929 % (ступень 1). Для решти ступенів це відхилення суттєво менше.

В той же час максимальне відхилення перепаду ентальпій ступеня у вихідного варіанту ЦВТ досягає –15,401 % (ступень 7), а мінімальне відхилення в 4,56 % спостерігається у 2-го ступеня (табл. 1).

Слід зазначити, що від'ємне значення відхилення (остання колонка табл. 1 і 2) говорить про те, що ступень працює з перевантаженням, тобто на ньому спрацьовується більше значення перепаду ентальпій чім потрібно для досягнення максимальної потужності ЦВТ. При позитивному значенні відхилення відповідно ступень працює з недовантаженням.

Порівнюючи значення параметрів в останніх колонках табл. 1 (вихідний варіант ПЧ ЦВТ) і табл. 2 (оптимальний варіант ПЧ ЦВТ) бачимо, що у оптимального варіанту загалом відхилення від ідеального варіанту розподілу наявного перепаду ентальпій не суттєві і дуже близькі до ідеального варіанту розподілу. У вихідного варіанту ПЧ ЦВТ ці відхилення суттєві і це призвело до не раціонального використання наявного перепаду ентальпій ЦВТ між його ступенями і, як наслідок зниження потужності ЦВТ в порівнянні з оптимальним варіантом ЦВТ.

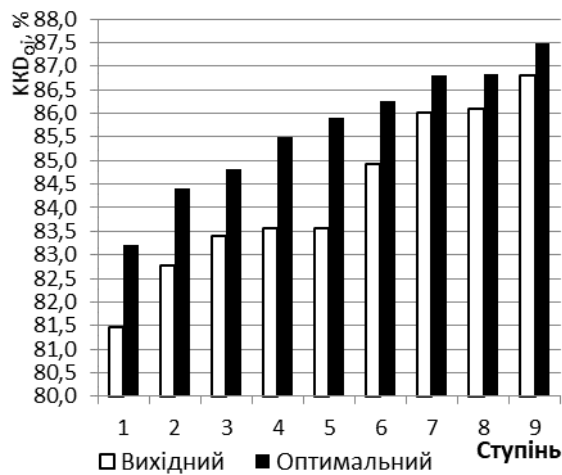


Рис. 2 – Відносні внутрішні ККД ступенів вихідного і оптимального варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5

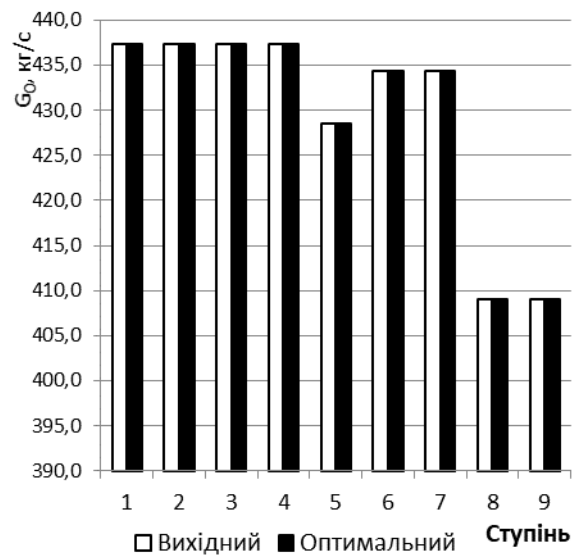


Рис. 3 – Масові витрати пари на вході в ступінь вихідного і оптимального варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5

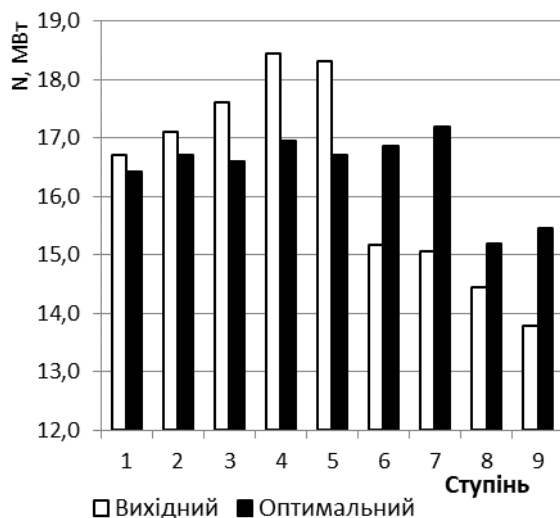


Рис. 4 – Потужності ступенів вихідного і оптимального варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5

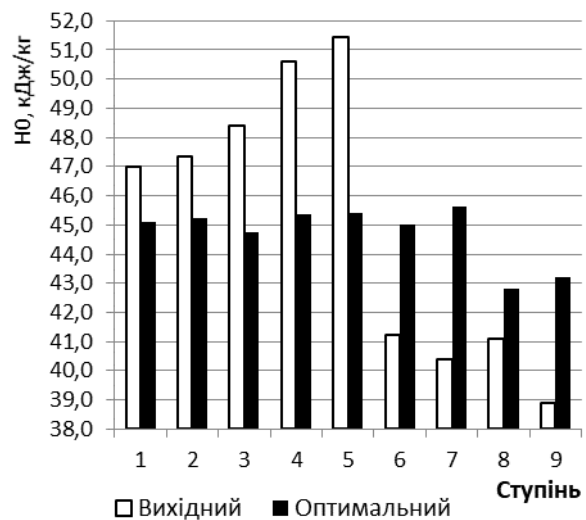


Рис. 5 – Розподіл наявного перепаду ентальпії ЦВТ турбіни К-540-23,5 між ступенями вихідного і оптимального варіантів ПЧ

Таблиця 1 – Вихідний варіант ПЧ ЦВТ

Ступінь	K_j	k_j	H_j , кДж/кг	γ_j	k_j/γ_j	відхил, %
1	356,231	0,1094	46,988	0,1156	0,9464	5,362
2	361,969	0,1112	47,344	0,1165	0,9544	4,560
3	364,711	0,1120	48,408	0,1191	0,9405	5,951
4	365,402	0,1122	50,618	0,1245	0,9011	9,887
5	358,086	0,1100	51,456	0,1266	0,8687	13,129
6	368,853	0,1133	41,233	0,1014	1,1167	-11,669
7	373,583	0,1147	40,411	0,0994	1,1540	-15,401
8	352,190	0,1082	41,101	0,1011	1,0697	-6,966
9	355,045	0,1090	38,900	0,0957	1,1393	-13,935

Таблиця 2 – Оптимальний варіант ПЧ ЦВТ

Ступінь	K_j	k_j	H_j , кДж/кг	γ_j	k_j/γ_j	Відхил, %
1	363,950	0,1099	45,122	0,1121	0,9807	1,9290
2	369,167	0,1115	45,255	0,1124	0,9918	0,8154
3	370,921	0,1120	44,74	0,1111	1,0080	-0,8029
4	373,921	0,1129	45,365	0,1127	1,0022	-0,2182
5	368,049	0,1112	45,397	0,1128	0,9857	1,4253
6	374,643	0,1132	45,022	0,1118	1,0118	-1,1765
7	376,988	0,1139	45,619	0,1133	1,0048	-0,4776
8	355,159	0,1073	42,793	0,1063	1,0091	-0,9108
9	357,842	0,1081	43,218	0,1074	1,0067	-0,6733

Слід зазначити, що пошук оптимального варіанту ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5 відбувався за постановкою з двома критеріями якості – внутрішнім відносним ККД і потужністю ЦВТ з рівними ваговими коефіцієнтами по 0,5 для кожного критерію. Це безумовно спричинило відповідний вплив на розподіл наявного перепаду ентальпій ЦВТ між його ступенями. Разом з тим спостерігається загальна тенденція до максимального наближення значень перепадів ентальпій ступенів до їх ідеальних значень з точки зору отримання максимальної потужності ЦВТ, які визначаються з використанням розробленої методики.

Висновки

В ході розрахункових досліджень можливості використання теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів для оцінки ступеню раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій між ступенями турбіни на прикладі ЦВТ турбіни К-540-23,5 було встановлено:

1 Розроблена методика розподілу наявного перепаду ентальпій групи ступенів турбіни на базі економічної теорії конкурсного розподілу обмежених ресурсів.

2 Підтверджена правильність розроблених критеріїв оцінки раціональності розподілу наявного перепаду ентальпій групи ступенів турбіни, як обмеженого ресурсу.

3 Показано на прикладі ПЧ ЦВТ турбіни К-540-23,5, що оптимізація веде до практичного співпадіння значень перепадів ентальпій ступенів зі значеннями перепадів ентальпій, які були отримані з використанням розробленої методики конкурсного розподілу наявного перепаду ентальпій ЦВТ між його ступенями.

4 Рекомендується в задачах оптимального проектування ПЧ багатоступеневих турбін використовувати величину сумарного відхилення перепадів ентальпій від їх ідеальних значень як критерій якості ПЧ.

Список літератури

1. Шерфедінов Р. Б. Інформаційна та математичні моделі проточної частини в задачах оптимального проектування турбоблоку / Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий, О. П. Авдеева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2022. – № 1–2(9–10). – С. 32–39. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.04>.
2. Шерфедінов, Р. Б. Особливості заміни існуючої проточної частини на оптимальну при модернізації ЦВТ парової турбіни / Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий, О. П. Авдеева, М. О. Далудін, І. С. Єнін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2021. – № 4(8). – С. 5–12. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.01>.
3. Шерфедінов, Р. Оцінка можливості використання повідсієкового моделювання процесів в проточній частині парової турбіни в задачах одночасної оптимізації теплових схем та турбін / Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2021. – № 3(15). – С. 5–14. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.01>.
4. Усатый А. П. Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве : дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16 / Усатый Александр Павлович. – Харьков, 2012. – 418 с.
5. Бойко, А. В. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации : моногр. / А. В. Бойко, А. П. Усатый, А. С. Руденко. – Харьков : Підручник НТУ «ХП», 2014. – 220 с. – ISBN 978-966-2426-94-6.
6. Верес Ю. О. Розподіл обмежених ресурсів в управлінні проектами / Ю. О. Верес // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2010. – № 685. – С. 33–44. – ISSN 0321-0499 (print).
7. Методичні вказівки до виконання випускної роботи бакалавра «Розрахунок принципів теплових схем турбоустановок малої потужності» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», спеціалізації 144-02 «Теплові процеси в енергетичному обладнанні» / уклад.: О. О. Литвиненко, О. М. Іванченко, І. О. Михайлова. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – 44 с.
8. Машанова О. Є. Теплові електричні станції : навч.-метод. посіб. / О. Є. Машанова. – Запоріжжя : Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, 2011. – 166 с.

References (transliterated)

1. Sherfedinov R., Usatyi O., Avdieieva O. (2022), "Information and Mathematical Models of the Flow Part in the Problems of Optimal Design of a Turboblock", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1–2(9–10), pp. 32–39, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.04>.
2. Sherfedinov R., Usatyi O., Avdieieva O., Daludin M., Yenin I. (2021), "Specific Features of the Replacement of the Available Flow Path by the Optimal Flow Path when Upgrading the Steam Turbine High-Pressure Cylinder", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 4(8), pp. 5–12, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.01>.
3. Sherfedinov R., Usatyi O. (2023), "Assessing the Possibility of Using the Compartment -by-Compartment Modeling of Processes in the Flow Part of a Steam Turbine for Problems of the Optimal Design of Axial Turbines", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(15), pp. 5–14, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.01>.
4. Usaty, A. P. (2012), *Vserezhimnaya mnogoparametricheskaya mnogokriterialnaya optimizatsiya protochnoy chasti turbin v integririvannom informatsionnom prostranstve* [Multi-mode multi-parameters multi-criterion optimization of the turbine flow path in the integrated information space], D. Sc. thesis, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
5. Boiko, A. V., Usaty, A. P. and Rudenko, A. S. (2014), *Mnogokriterial'naya mnogoparametricheskaya optimizatsiya protochnoy chasti osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatsii* [Multi-criterion multi-parametric optimization of flow paths of axial turbines taking into consideration their mode of operation], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine, ISBN 978-966-2426-94-6.
6. Veres Yu. O. (2010), "Rozpodil obmezheny'x resursiv v upravlinni proektamy` [Allocation of limited resources in project management]", *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems Theory and Practice*, no. 685, pp. 33–44, ISSN 0321-0499 (print).
7. Lytvynenko O., Ivanchenko O., Mykhailova I. (2016), *Metody'chni vkazivky` do vy'konannya vy'pusknoyi roboty` bakalavra "Rozrachunok pry'ncy'povy'x teplovy'x sxem turbostanovok maloyi potuzhnosti" dlya studentiv dlya studentiv special'nosti 144 "Teploenergety'ka", specializaciyi 144-02 "Teplovi procesy` v energety'chnomu obladnanni"* [Methodical instructions for completing the bachelor's thesis "Calculation of basic thermal schemes of low-power turbines" for students of specialty 144 "Heat power engineering", specialization 144-02 "Thermal processes in power equipment"], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
8. Mashanova O. Ye. (2011), *Teplovi elektry'chni stanciyi : navch.-metod. posib.* [Mashanova O. E. Thermal electric stations: educational method. Manual], Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhia, Ukraine.

Надійшло (received) 12.11.2023

Відомості про авторів /About the Authors

Шерфедінов Різа Бахтіярович (Sherfedinov Riza) – начальник конструкторського відділу теплових розрахунків та розрахунків на міцність АТ «Українські енергетичні машини», м. Харків, Україна; e-mail: rizasherfedinov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-7802>.

Усатий Олександр Павлович (Usatyi Oleksandr) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник; завідувач кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.