

**О. П. УСАТИЙ, Ю. В. ЖИВОТЧЕНКО**

### **АНАЛИЗ ВПЛИВУ ЕФЕКТИВНОСТІ ОКРЕМИХ ВІДСІКІВ ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ТУРБОБЛОКА**

Стаття присвячена питанням оптимізації теплової схеми паротурбінної установки з використанням програмного комплексу *DNA*, створеного групою авторів Датського технічного університету та програмного комплексу багатопараметричної оптимізації, розробленого на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ». Алгоритми оптимізації базуються на методах теорії планування експерименту (використовуються насичені плани Рехтшафнера) та методі створення формальних макромодель цільових функцій підвищеної точності. Крім цього, для пошуку оптимальних рішень багатоекстремальних цільових функцій також були задіяні ЛПт послідовності та метод пошуку оптимального рішення «Рій бджіл». По результатам розв'язання низки задач з оптимізації теплової схеми була проведена оцінка впливу ефективності окремих відсіків турбіни на значення параметрів, які оптимізуються. Залежно від постановки оптимізаційної задачі і обраного критерію якості були знайдені оптимальні варіанти теплової схеми турбоблоку, що забезпечують економію умовного палива від 10000 до 13000 т/рік. Також було виявлено факт істотного впливу рівня внутрішнього відносно-го ККД першого відсіку на оптимальний перерозподіл теплового перепаду турбіни між її відсіками.

**Ключові слова:** *DNA*, планування експерименту, оптимізація, теплова схема, критерій якості.

**А. П. УСАТЫЙ, Ю. В. ЖИВОТЧЕНКО**

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ОТСЕКОВ МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ**

Статья посвящена вопросам оптимизации тепловой схемы паротурбинной установки с использованием программного комплекса *DNA*, созданного группой авторов Датского технического университета и программного комплекса многомерной оптимизации, разработанного на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ». Алгоритмы оптимизации основаны на методах теории планирования эксперимента (используются насыщенные планы Рехтшафнера) и методе создания формальных макромодель целевых функций повышенной точности. Кроме этого, для поиска оптимальных решений многоэкстремальных целевых функций также были задействованы ЛПт последовательности и метод поиска оптимального решения «Рой пчел». По результатам решения ряда задач по оптимизации тепловой схемы была проведена оценка влияния эффективности отдельных отсеков турбины на значения параметров, которые оптимизируются. В зависимости от постановки оптимизационной задачи и выбранного критерия качества были найдены оптимальные варианты тепловой схемы турбоблока, которые обеспечивают экономию условного топлива от 10000 до 13000 т/год. Также был выявлен факт существенного влияния уровня внутреннего относительного КПД первого отсека на оптимальное перераспределение теплового перепада турбины между ее отсеками.

**Ключевые слова:** *DNA*, планирование эксперимента, оптимизация, тепловая схема, критерии качества.

**A. USATY, YU. ZHIVOTCHENKO**

### **ANALYZING THE INFLUENCE OF THE EFFICIENCY OF INDIVIDUAL COMPARTMENTS OF HIGH-POWER STEAM TURBINE ON THE OPTIMIZATION DATA OF A HEAT FLOW DIAGRAM OF THE TURBINE PLANT**

This scientific paper is devoted to the optimization issues of the heat flow diagram of steam turbine plant. Optimal parameters of the heat flow diagram are searched for automatically by connecting the Dynamic Network Analysis (*DNA*) software system developed by the team of scientists from the Danish Technology University to the software system of multiparametric optimization developed by the Turbine Building Department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". The applied optimization technique is based on the methods of experiment planning (saturated Rechtschafner plans are used), methods of improved accuracy and reliability of created formal macromodels of the finite function, the method of LPt series and the method of "bee swarm" used for the search of optimal solution of multiextreme finite function. Based on the solution data of a number of the problems on the heat flow diagram optimization we evaluated the influence of the efficiency of individual turbine compartments on optimized parameter values. Depending on the formulation of optimization problem and selected quality criteria the optimal options for the heat flow diagram of the turbine plant were found that provide the saving of conventional fuel in amount of 10000 to 13000 t/year. In addition, the research done allowed us to define the most promising approaches to a further increase in the efficiency of heat flow diagrams of the turbine plant. A considerable influence of the level of internal relative coefficient of efficiency of the first compartment on optimal redistribution of the heat difference between the turbine compartments has been established.

**Key words:** *DNA*, DOE, optimization, heat flow diagram, and the quality criteria.

#### **Вступ**

На сьогодні, зважаючи на постійне збільшення споживання електроенергії в Україні, а також на складність широкого використання відновлювальних джерел енергії через високу вартість їх виробництва і невеликі одиничні потужності, єдиною гарантованою можливістю забезпечення потреб суспільства в енергії, буде збільшення споживання традиційних паливно-енергетичних

ресурсів. Однак, це може призведе до загострення економічних питань, пов'язаних зі збільшенням вартості і обмеженістю їх запасів, а також матиме негативний вплив на екологічне становище в країні. Враховуючи наведені чинники стає необхідним введення заходів для підвищення ефективності добування, транспортування, переробки, і споживання енергоресурсів.

Одним з таких заходів є оновлення і модернізація існуючого обладнання теплових схем ТЕС і

АЕС. Розв'язання задач підвищення ефективності ТЕС і АЕС при їх модернізації не може бути реалізовано в повній мірі без використання сучасних методів оптимального проектування. Одним з ефективних методів розв'язання такого роду оптимізаційних задач є використання заміни складної ресурсоемкої вихідної математичної моделі, заснованої на моделюванні фізичних процесів, що відбуваються в елементах на деяку апроксимаційну залежність її цільової функції – формальну макромодель підвищеної точності (ФММ) [1]. Найбільш зручно такі залежності створювати у вигляді степеневих поліномів, отримання яких засноване на обробці результатів чисельних експериментів, поведених з використанням вихідної математичної моделі.

В даній статті розглядаються результати оптимізації теплової схеми за різними критеріями якості, а також, проводиться аналіз впливу ефективності окремих відсіків потужної парової турбіни на результати оптимізації теплової схеми турбоблока. Алгоритми оптимізації засновані на використанні методів теорії планування експерименту (для створення ФММ цільових функцій на основі вихідної математичної моделі), ЛПт послідовності [2] та методу «Рою бджіл» [3].

На сьогоднішній день приділяється багато уваги розв'язанню задач оптимізації теплових схем з використанням сучасних методів оптимізації, наприклад, [4, 5].

### Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності турбоблоків за допомогою оптимізації параметрів теплової схеми.

### Методика оптимізації теплової схеми

Використання математичних моделей разом з сучасною обчислювальною технікою, при пошуку оптимального рішення, дозволяє розглянути величезну кількість альтернативних варіантів, а також істотно прискорити і здешевити процес розробки нових конструкцій і модернізації тих, що вже існують. Таким чином, для розв'язання задачі оптимізації теплової схеми паротурбінної установки з застосуванням даного підходу необхідно мати різноманітні математичні моделі теплообмінного обладнання, яке використовуються в тепловій схемі. Широкий спектр математичних моделей необхідних для моделювання процесів в елементах теплових схем застосовується в багатьох програмних комплексах таких як *CycleTEMPO* [6], *AxCYCLE* [7], об'єктно-орієнтований ітераційно-рекурсивний алгоритм моделювання термогидравлічних систем [8], *Dynamic Network Analysis (DNA)* [9], та інших.

Короткий огляд цих програмних інструментів показав, що універсальний програмний комплекс *DNA* розроблений групою авторів в Датському технічному університеті якнайкраще підходить для розв'язання задачі автоматизації розрахункового експерименту з ціллю подальшого створення ФММ цільових функцій та оптимізації теплової схеми.

Головна перевага програмного комплексу *DNA* перед більшістю розглянутих програм полягає в тому, що його можна використовувати в пакетному режимі, а це надає можливість організувати автоматичний процес обміну інформацією між комплексом *DNA* та програмою багатопараметричної оптимізації і забезпечити ефективне розв'язання задачі оптимізації теплових схем.

Файлова система вводу і виводу даних комплексу *DNA* зручна для формування файлу вихідних даних і зчитування результатів за допомогою строкових класів *QString* бібліотеки *Qt*.

В якості параметрів, що оптимізуються були обрані рівні тисків пари за кожним відсіком, а також значення витрат пари у відбори. При виборі діапазонів зміни параметрів, які оптимізуються була врахована обов'язкова вимога, щодо недопущення кипіння живильної води за підігрівачами.

Таким чином, планування обчислювального експерименту відбувалося в гіперкубі, границі якого були обрані за умови, щоб значення наявного теплового перепаду на відсік не відрізнялось від вихідного варіанту більш ніж на  $\pm 5\%$ , а витрати пари у відбори не більш ніж на  $\pm 2\%$ .

Основний план чисельного експерименту створено з застосуванням економічних багатфакторних планів Рехтшафнера [10].

Для організації підключення розрахунку теплової схеми за передбаченими в плані параметрами, попередньо був створений файл з розширенням *.tmp* – це файл-шаблон вихідних даних в якому значення параметрів, що оптимізуються, були замінені на символічні маркери, як зображено на рис. 1.

```
ADDCO P 2 7,5
ADDCO P 4 1,9
ADDCO P 6 0,38
ADDCO M MP_turbine 3 254
ADDCO M MP_turbine2 5 232
ADDCO M LP_turbine 7 221,4
```

а

```
ADDCO P 2 X1
ADDCO P 4 X2
ADDCO P 6 X3
ADDCO M MP_turbine 3 X4
ADDCO M MP_turbine2 5 X5
ADDCO M LP_turbine 7 X6
```

б

Рис. 1 – Зразок створення шаблону з файлу вихідних даних:

а – файл вихідних даних; б – файл-шаблон

Далі, відповідно до плану експерименту, виконується построкове зчитування файлу-шаблону та здійснюється послідовна заміна символічних маркерів на значення параметрів з плану експерименту. Отримана копія файлу-шаблону зі значеннями параметрів з плану експерименту зберігається, як файл даних для комплексу *DNA* з розширенням .dпа. Таким чином формується файл вихідних даних теплової схеми, який потім використовується

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n \left( a_{(i,k)} + \left( b_{(i,k)} + \left( \frac{c_{(i,k)}}{2} + \Delta q_{(i,k)} \frac{d_{(i,k)}}{6} \right) \Delta q_{(i,k)} \right) \Delta q_{(i,k)} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (1)$$

де  $a_{(i,k)}$ ,  $b_{(i,k)}$ ,  $c_{(i,k)}$ ,  $d_{(i,k)}$  – коефіцієнти кубічного сплайна, поточної ( $k$ -ї) інтерполяційної ділянки  $i$ -ї незалежної змінної. Для кожної незалежної нормованої змінної  $Q_i$  існує кілька інтерполяційних ділянок в діапазоні між  $-1$  і  $+1$ ;

$\Delta q_{(i,k)}$  – відстань між поточним значенням

$Q_i$  і координатами початкового вузла  $k$ -ї ділянки сплайна, у якого значення координати  $Q_i$  знаходяться між координатами початкового і кінцевого його вузлів.

Використовуючи комбінацію методів ЛПт пошуку і «Рою бджіл» виконуємо оптимізацію теплової схеми. З наступним перерахунком теплової схеми з оптимальними параметрами в програмному комплексі *DNA*.

Слід зазначити, що представлений в роботі підхід щодо розв'язання задачі оптимізації параметрів теплової схеми виник в середовищі науковців кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» в науковій школі оптимального проектування проточних частин турбомашин, яка була започаткована ще в 70 роки минулого століття д.т.н., проф. Бойко Анатолієм Володимировичем. Розв'язанню цієї задачі проф. Бойко А.В. приділяв особливу увагу та надавав відповідну підтримку за що автори висловлюють йому свою повагу та вдячність.

для розрахунку поточного варіанту теплової схеми програмним комплексом *DNA*. Потім, в автоматичному режимі, програмою оптимізації зчитується файл результатів розрахунку теплової схеми і виконується вибір значень параметрів, які відповідають критеріям якості теплової схеми.

Відповідна обробка отриманих результатів дозволяє створити ФММ цільової функції теплової схеми наступного вигляду:

### Оптимізація теплової схеми турбоустановки *KUNDBY*

Для апробації можливості розв'язання задачі оптимізації теплової схеми за вищенаведеною методикою були проведені дослідження з оптимізації параметрів теплової схеми турбоустановки *KUNDBY*, яка наведена в програмному комплексі *DNA* в якості прикладу теплової схеми паротурбінної установки (рис. 2).

Слід зауважити, що для моделювання процесів в відсіках турбіни була використана модель *TURBIN\_1*, для якої, в якості додаткових умов, необхідно задати значення масової витрати пари через відсік та тиск за ним. Діапазони зміни параметрів, що оптимізуються наведено в табл. 1.

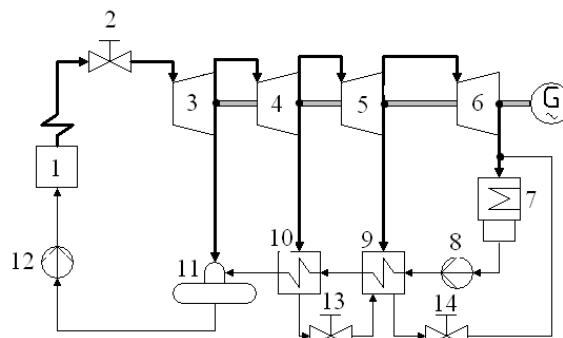


Рис. 2 – Теплова схема турбоагрегату *KUNDBY*:

- 1 – парогенератор; 3, 4, 5, 6 – відсіки турбіни;  
7 – конденсатор; 8 – конденсатний насос;  
9, 10 – регенеративні підігрівачі низького тиску;  
11 – деаератор; 12 – живильний насос;  
2, 13, 14 – засувка

Таблиця 1 – Діапазони зміни параметрів, що оптимізуються

Параметри	Позначення	Маркер	Значення		
			Вихідні	Мінімальні	Максимальні
Тиск пари за I відсіком, бар	P2	X1	7,50	6,589	8,500
Тиск пари за II відсіком, бар	P3	X2	1,90	1,733	2,082
Тиск пари за III відсіком, бар	P4	X3	0,38	0,353	0,409
Витрата пари на II відсік турбіни, кг/с	M3	X4	254,0	248,9	259,1
Витрата пари на III відсік турбіни, кг/с	M5	X5	232,0	227,4	236,6
Витрата пари на IV відсік турбіни, кг/с	M7	X6	221,4	217,0	225,8

Таблиця 2 – Результати пошуку оптимальних параметрів для різних критеріїв якості

Критерій якості	Значення оптимальних параметрів						Характеристики ефективності теплової схеми			
	P2	P4	P6	M3	M5	M7	$\bar{N}$ , кВт·год/кг	$\eta_{\text{терм}}$	$\eta_{\text{іц}}$	$\eta_{\text{абс}}$
$\bar{N}$	6,589	1,733	0,365	259,1	236,6	217,0	<b>3,1462</b>	45,57	84,75	38,618
$\eta_{\text{терм}}$	8,500	1,733	0,353	259,1	236,6	217,0	3,1441	<b>45,58</b>	84,72	38,592
$\eta_{\text{іц}}$	6,589	1,733	0,353	259,1	227,4	217,0	3,1342	45,37	<b>84,79</b>	38,471
$\eta_{\text{абс}}$	6,350	1,733	0,353	259,1	236,6	217,0	3,1462	45,57	84,75	<b>38,618</b>
Вихідний варіант	7,500	1,900	0,380	254,0	232,0	221,4	3,0950	44,89	84,63	37,99

Критеріями якості теплової схеми були обрані наступні параметри:

- 1) питома потужність;
- 2) термічний ККД циклу;
- 3) відносний внутрішній ККД циклу;
- 4) абсолютний ККД циклу.

Питома потужність визначалася за формулою:

$$\bar{N} = \frac{N}{B}, \quad (2)$$

де  $N$  – механічна потужність вироблена на валу турбіни, кВт;

$B$  – витрата умовного палива, кг/год,

$$B = \frac{Q_{\text{ц}} \cdot 3600}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot 10^3}, \quad (3)$$

де  $Q_{\text{ц}}$  – кількість теплоти підведеної до циклу від спалювання палива, кДж/с;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – робоча нижча температура згорання умовного палива,  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29,33$  МДж/кг.

Термічний ККД циклу визначається за формулою:

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{L_{\text{ц}}}{Q_{\text{ц}}}, \quad (4)$$

де  $L_{\text{ц}}$  – теоретична робота цикла, кВт, що визначається як,

$$L_{\text{ц}} = L_{\text{I}} + L_{\text{II}} + L_{\text{III}} + L_{\text{IV}}, \quad (5)$$

де  $L_{\text{I}}, L_{\text{II}}, L_{\text{III}}, L_{\text{IV}}$  – теоретична робота першого, другого, третього і четвертого відсіків турбіни відповідно, які визначаються як добуток теплових перепадів відповідних відсіків на масову витрату пари через нього.

Відносний внутрішній ККД циклу визначається за формулою:

$$\eta_{\text{іц}} = \frac{N}{L_{\text{ц}}}. \quad (6)$$

Абсолютний ККД циклу визначається за формулою:

$$\eta_{\text{абс}} = \eta_{\text{іц}} \eta_{\text{терм}}. \quad (7)$$

Значення знайдених в результаті оптимізації параметрів, за переліченими критеріями якості наведено в табл. 2.

В результаті оптимізації за такими критеріями якості як питома потужність і абсолютний ККД циклу відбувається зміна параметрів за відсіками і перерозподіл теплових перепадів таким чином, щоб більший тепловий перепад і більша витрата пари спрацьовувались у відсіках з більшим значенням відносного внутрішнього ККД. Як видно з рис. 3 відбувається збільшення теплового перепаду, що спрацьовується на I-му відсіку турбіни за рахунок зменшення теплового перепаду останнього відсіку, що має найменшу ефективність і найменшу витрату пари за рахунок регенеративних відборів.

При оптимізації за таким критерієм якості як термічний ККД, що не враховує ефективності відсіків, відбувається перерозподіл теплових перепадів (рис. 3а), таким чином, щоб параметри пари у відбір до деаератора були найвищими, це дозволяє збільшити початковий нагрів живильної води і таким чином знизити витрату палива. Даний перерозподіл призведе до зменшення виробленої потужності першого відсіку турбіни за рахунок зменшення спрацьованого в ньому теплового перепаду і як наслідок до погіршення інших характеристик ефективності теплової схеми (питомої потужності, відносного внутрішнього ККД циклу і абсолютного ККД циклу, див. табл. 2).

При оптимізації теплової схеми з критерієм якості – відносний внутрішній ККД, відбувається перерозподіл витрати пари таким чином, щоб зменшити кількість пари, що надходить до відсіків з меншим відносними внутрішніми ККД рис. 3б, але за даних умов відбувається зменшення виробленої потужності III відсіку турбіни і як наслідок зменшення питомої потужності і абсолютного ККД теплової схеми порівняно з результатами оптимізації по іншим критеріям якості. Узагальнюючи отримані результати можна підтвердити доцільність вибору в якості критерію якості теплової схеми турбоагрегату питомої потужності, або зворотного до неї показника – питомої витрату умовного палива.

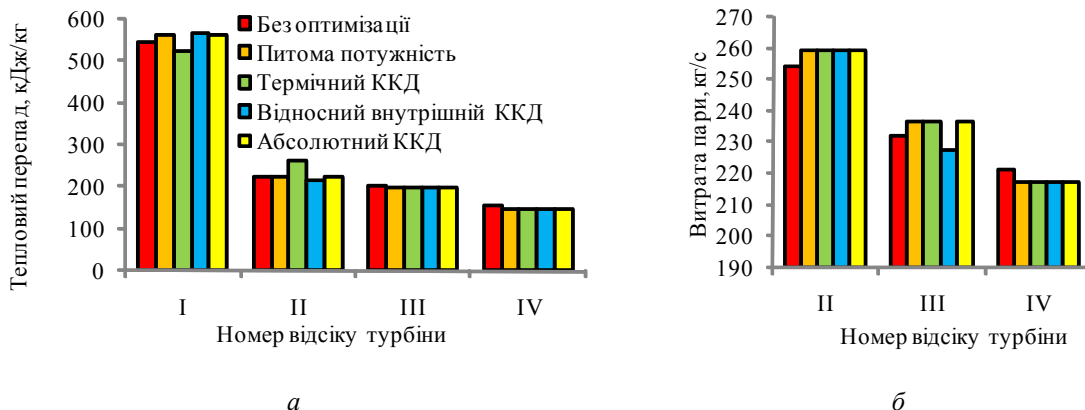


Рис. 3 – Перерозподіл теплових перепадів і витрат пари через відсіки турбіни залежно від критерію якості теплової схеми: *а* – перерозподіл теплового перепаду; *б* – перерозподіл витрати пари

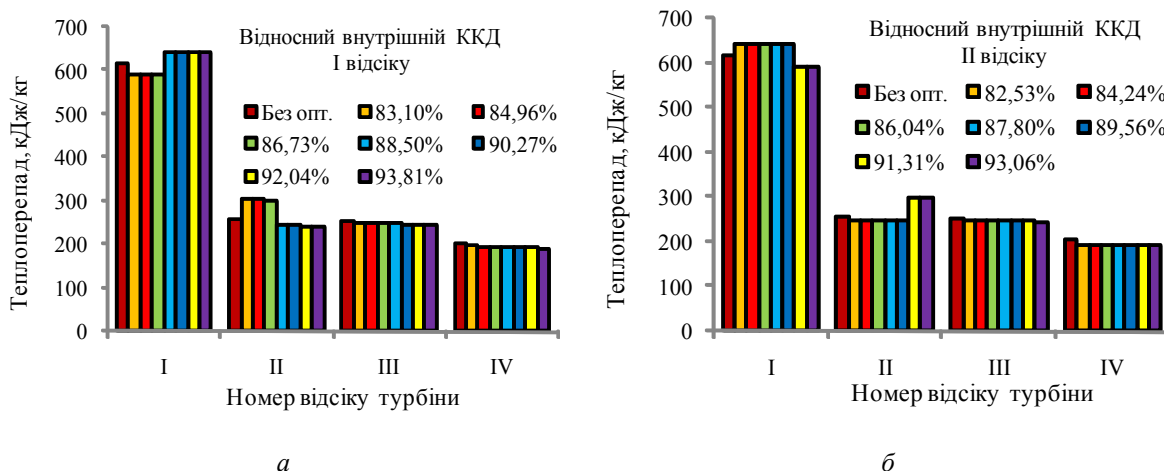


Рис. 4 – Зміна теплових перепадів на відсік турбіни, залежно від зміни відносного внутрішнього ККД відсіків турбіни: *а* – I відсіку; *б* – II відсіку

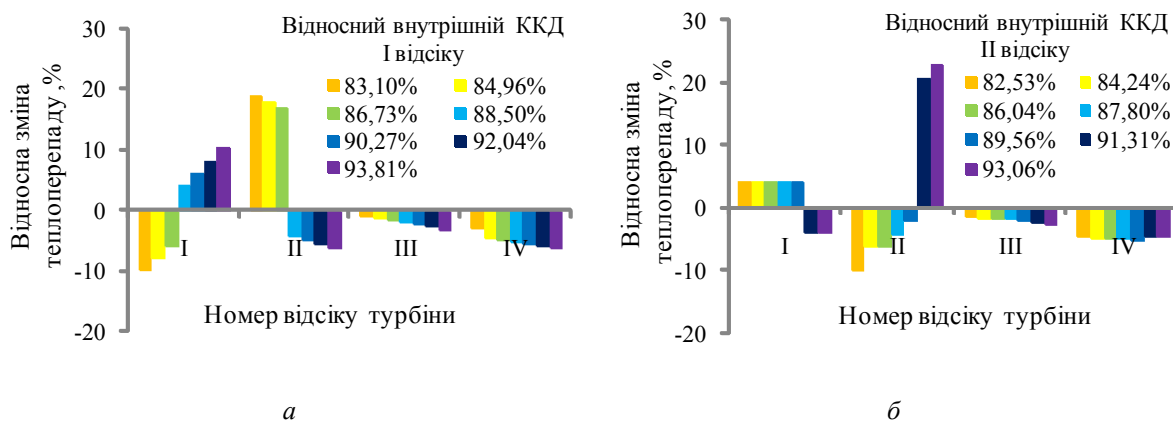


Рис. 5 – Перерозподіл теплових перепадів по відсіках турбіни залежно від зміни відносного внутрішнього ККД відсіків турбіни: *а* – I відсіку; *б* – II відсіку

При оптимізації теплових схем відносний внутрішній ККД відсіків зазвичай приймають постійною величиною, однак при оптимізації за рахунок зміни параметрів між відсіками, також буде змінюватись і ефективність проточної частини.

Проведення аналізу впливу ефективності окремих відсіків на результати оптимізації слід про-

водити по такому критерію якості, як питома потужність. Дослідження проводилися в діапазоні зміни значень відносного внутрішнього ККД відсіків в межах  $\pm 6\%$  відносно вихідного варіанту. Значення оптимальних параметрів і характеристики оптимальних варіантів теплової схеми наведено рис. 4–6.

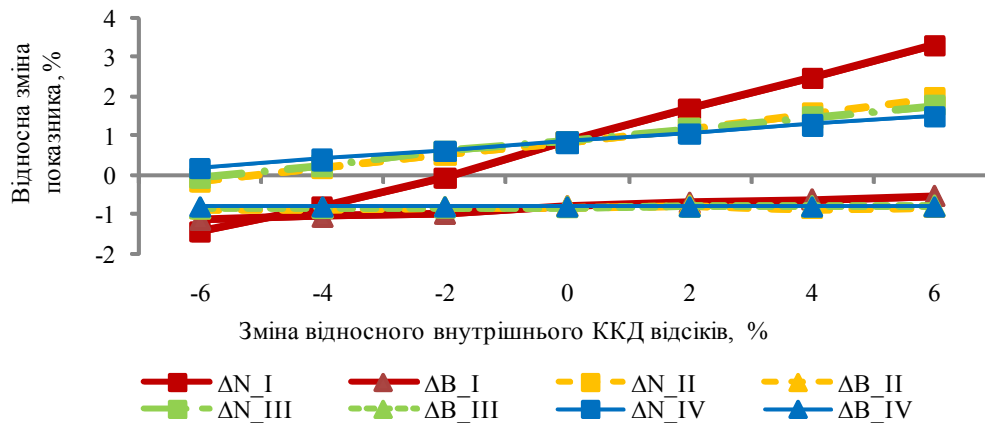


Рис. 6 – Зміна відносної потужності і відносної витрати палива залежно від зміни відносного внутрішнього ККД відсіку

Результати проведеного аналізу впливу відносного внутрішнього ККД відсіків турбіни на результати оптимізації підтверджують раніше зроблені висновки. Параметри пари за відсіками і величини витрат пари в процесі оптимізації змінюється таким чином, щоб більший тепловий перепад і більша витрата пари спрацьовувались у відсіку з більшою ефективністю.

При зменшенні ефективності першого відсіку відбувається зміна параметрів за ним таким чином, щоб більший тепловий перепад спрацьовувався на другому відсіку.

Зміна ефективності III і IV відсіків в заданому діапазоні не здійснює значного впливу на результати оптимізації теплової схеми, оскільки навіть при максимальному підвищенні їх відносні внутрішні ККД залишаються нижчими (III-го 81,1%), IV-го 75,65%) від ККД I-го (88,5%) та II-го (87,8%) відсіків. Вплив відносних внутрішніх ККД відсіків на перерозподіл теплоперепадів в процесі оптимізації більш детально відображено на рис. 5 у відносних величинах розрахованих за формулою:

$$\Delta h = \frac{h_{\text{опт}} - h_{\text{вих}}}{h_{\text{вих}}} 100\%, \quad (8)$$

де  $h_{\text{опт}}$  – дійсний тепло перепад спрацьований на вихідному відсіку, кДж/кг;

$h_{\text{вих}}$  – дійсний теплоперепад спрацьований на оптимізованому відсіку, кДж/кг.

В процесі оптимізації при зміні ефективності відсіків відбувається одночасно і підвищення потужності і підвищення витрати палива. Незважаючи на це загальний показник – питома потужність збільшується.

Як видно з рис. 6 темпи зростання потужності суттєво перевищують темпи зростання витрати палива, яка навіть при най несприятливих умовах (збільшення відносного внутрішнього ККД на 6%, що призводить до максимального зменшення параметрів пари у відбір на деаератор) залишається меншою на 0,5% за аналогічний показник не оп-

тимізованої теплової схеми.

Найбільший вплив на витрату палива здійснюють параметри у відбір до останнього підігрівача відбір пари до якого здійснюється за першим відсіком турбіни, тому що при зміні відносного внутрішнього ККД II і IV відсіків турбіни цей показник залишається незмінним.

З графіку представленого на рис. 6 видно, що найбільше впливає на питому потужність теплової схеми турбоагрегату рівень ефективності першого відсіку турбіни. Дещо менший вплив має рівень ефективності другого відсіку турбіни. Вплив ефективності двох останніх відсіків турбіни на рівні оптимальних параметрів та питомої потужності турбоагрегату *KYNDBY* практично відсутній.

Слід зазначити, що отримані результати досліджень з впливу рівнів ефективності відсіків парової турбіни на критерій якості теплової схеми (питому потужність) були отримані і справедливі тільки для турбоагрегату *KYNDBY*. Ці результати не можуть бути в повному обсязі рекомендовані для використання на інших паротурбінних установках.

## Висновки

1) Розроблено і апробовано методику з організації ефективного використання програмних продуктів розроблених різними авторами для створення відповідного середовища автоматичного розв'язання оптимізаційних задач, на прикладі оптимізації теплових схем турбоагрегатів.

2) Проведені дослідження показали, що результати оптимізації теплової схеми турбоустановки *KUNDBY* мають суттєву залежність від рівня відносного внутрішнього ККД перших двох відсіків турбіни.

3) Підтверджено відомий факт, що враховуючи наявність розвинених систем регенерації в сучасних паротурбінних установках, і велику кількість відборів робочого тіла для інших потреб, питома потужність є найбільш справедливим кри-

терієм якості при оптимізації теплових схем турбоагрегатів.

4) Проведені розрахункові дослідження з оптимізації теплових схем, показали надійність і адекватність результатів, які отримуються за допомогою методики пошуку оптимальних рішень заснованої на використанні формального макромоделювання цільових функцій, ЛПТ послідовності та методу «Рою бджіл».

5) В результаті оптимізації теплової схеми турбоустановки *KUNDBY* був досягнутий рівень **економії умовного палива в 13000 т/рік**.

6) Зважаючи на високий рівень залежності результатів оптимізації теплової схеми від рівнів ефективності відсіків турбін, стає очевидним, що задача оптимального проектування турбоблока повинна розв'язуватися з одночасною оптимізацією параметрів теплової схеми і параметрів проточної частини турбіни.

#### Список літератури

1. Бойко А. В., Усатий А. П., Руденко А. С. *Многокритеріальна многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации* : моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. 220 с. На рус. яз.
2. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва: Наука, 1981. 110 с.
3. Усатый А. П. *Всерезжимная 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.
4. Pouria Ahmadi, Marc A. Rosen, Ibrahim Dincer. *Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm*. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212000990> (дата обращения 10.01.2018).
5. Toffolo A., Lazzaretto A. *Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544202000099?via%3Dihub> (дата обращения 10.01.2018).
6. *Cycle-Tempo. Technical Notes. A program for thermodynamic modeling and optimization of energy conversion systems*. Delft University of Technology, 2007.
7. Программное обеспечение для моделирования термодинамического цикла – Обзор AxCYCLE [Электронный ресурс] / SoftInWay incorporated : официальный сайт. URL: <http://www.softinway.com/software-applications/heat-balance-design-analysis/> (дата обращения 10.01.2018).
8. Говорущенко, Ю. Н. Объектно-ориентированный итераци-

онно-рекурсивный алгоритм моделирования термогидравлических систем. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків : НТУ «ХПИ», 2016. № 8(1180). С. 16–21. Бібліогр.: 10 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.02.

9. Elmgaard B. *The Engineer's "DNA by Example". Edition 4*. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark. 2003.
10. Rechscaffner R. L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs. *Technometrics*. 1967. No. 4. pp. 569–575.

#### Bibliography (transliterated)

1. Boiko, A. V., Usaty, A. P. and Rudenko, A. S. (2014), *Mnogokriterial'naja mnogoparametricheskaja optimizacija protочноj chasti osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatacii* [Multi-criterion multi-parametric optimization of flow paths of axial turbines taking into consideration their mode of operation], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
2. Sobol', I. M. and Statnikov, R. B. (1981), *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria], Nauka, Moscow.
3. Usaty, A. P. (2012), *Vserezhimnaya mnogoparametricheskaja mnogokriterial'naja optimizatsiya protочноj chasti turbin v integrirovannom 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.
4. Pouria Ahmadi, Marc A. Rosen, Ibrahim Dincer. *Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212000990> (accessed 10.01.2018).
5. Toffolo, A., Lazzaretto, A. *Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544202000099?via%3Dihub> (accessed 10.01.2018).
6. *Cycle-Tempo. Technical Notes. A program for thermodynamic modeling and optimization of energy conversion systems*. Delft University of Technology, 2007.
7. *Thermodynamic Cycle Simulation Software – AxCYCL Overview, SoftInWay incorporated*. Official website of the manufacturer. Available at: <http://www.softinway.com/software-applications/heat-balance-design-analysis/> (accessed 10.01.2018)
8. Govorushchenko Yu. N. (2016), "Object-oriented Iterative-recursive Algorithm for Thermal-hydraulic Systems Simulation", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 16–21, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.02.
9. Elmgaard B. (2003), *The Engineer's "DNA by Example". Edition 4*. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.
10. Rechscaffner R. L. (1967), "Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs", *Technometrics*, No. 4. pp. 569–575.

Надійшла (received) 22.02.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

**Животченко Юлія Вячеславівна (Животченко Юлия Вячеславовна, Zhivotchenko Yuliia)** – магістр, кафедра турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [zhivotchenko.yuliya@gmail.com](mailto:zhivotchenko.yuliya@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8073-8424>.