

Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, О. П. УСАТИЙ, О. П. АВДЄЄВА

ІНФОРМАЦІЙНА ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ТУРБОБЛОКУ

Розглянуті питання удосконалення структурно-топологічного формування інформаційної моделі проточної частини (ПЧ) парової турбіни з метою її використання в задачах оптимального проєктування турбоблоків. Додано новий ієрархічний рівень «Відсік», що дозволило зв'язати в єдиному інформаційному просторі параметри ПЧ та решти обладнання турбоблоку та надало можливість ставити і розв'язувати задачі оптимального проєктування турбоблоків. Удосконалена одновимірна модель процесів в ПЧ, що дозволяє моделювати протікання процесів в ПЧ турбіни від відсіку до відсіку (повідіскове моделювання процесів в ПЧ з заданими параметрами пари між відсіками). Удосконалена математична модель процесів в ПЧ узгоджена з удосконаленою інформаційною моделлю ПЧ і є однією із складових підсистеми оптимального проєктування САПР «Турбоагрегат». Проведені тестові порівняльні розрахунки ПЧ циліндрів парових турбін виконані з використанням алгоритмів створених на основі двох математичних моделей: вихідної та удосконаленої. Підтверджено хороший збіг результатів.

Ключові слова: турбоблок, парова турбіна, проточна частина, інформаційна модель, математична модель.

R. SHERFEDINOV, O. USATYI, O. AVDIEIEVA INFORMATION AND MATHEMATICAL MODELS OF THE FLOW PART IN THE PROBLEMS OF OPTIMAL DESIGN OF A TURBOBLOCK

The issues of improving the structural-topological formation of the information model of the flow path of a steam turbine with the aim of using it in the problems of optimal design of turbine blocks are considered. A new hierarchical level "Compartment" has been added, which made it possible to link in a single information space the parameters of the frequency converter and the rest of the equipment of the turbine unit and made it possible to set and solve the problems of optimal design of turbine blocks. An improved one-dimensional model of the processes in the frequency converter, which allows simulating the course of processes in the frequency converter of a turbine from compartment to compartment (sub-section modeling of processes in the frequency converter with given steam parameters between the compartments). The improved mathematical model of the processes in the frequency converter is coordinated with the improved information model of the frequency converter and is one of the components of the optimal design subsystem of the "Turboagregat" CAD system. The performed test comparative calculations of the FC of steam turbine cylinders were carried out using algorithms created on the basis of two mathematical models: the original and the improved one. Good agreement was confirmed. Insignificant differences in thermodynamic parameters in the cross-sections between the rims of the inverter, obtained according to the original and improved models, are noted. Small deviations in the results are mainly caused by the need to use in the improved model the formulation of the problem with the given steam parameters in front of each compartment and the value of the mass flow rate to the head of each compartment. The fulfillment of the boundary conditions was ensured by a corresponding change in the effective angle of the nozzle grate of the first stage of each compartment.

Key words: turbo block, steam turbine, flow path, information model, mathematical model.

Вступ

Сучасні тренди розвитку світової енергетики направлені на зменшення карбонізації навколишнього середовища за рахунок збільшення долі генерації електроенергії з використанням відновлювальних джерел енергії (сонячних, повітряних, гідроелектростанцій). Разом з цим не менш важливою є задача підвищення ефективності теплових та атомних електростанцій, а саме збільшення вироблення електроенергії на одиницю затраченої теплової енергії.

Враховуючи той факт, що в Україні близько 90 % електроенергії виробляється на атомних та теплових електростанціях, на яких парові турбіни (особливо на теплових електростанціях) в більшості своїй відпрацювали гарантійний термін і працюють з низькими рівнями ККД, що і є однією з вагомих причин підвищених рівнів вуглецевих викидів в навколишнє середовище.

Зрозуміло, що заміна старих, зношених та низькоефективних парових турбін на новітні, надійні, мобільні і високоефективні турбіни дозволить суттєво підвищити рівень енергетичної безпеки України та знизить карбонове навантаження на

навколишнє середовище. Тому задача створення турбоблоків з високим рівнем надійності та ефективності є на сьогодні важливою і актуальною.

Розв'язання цієї задачі неможливе без розробки спеціальних методів, математичних моделей та відповідних алгоритмів оптимального проєктування. В даній статті представлені матеріали, пов'язані з розробкою структурно-топологічної інформаційної моделі ПЧ парової турбіни та її математичної моделі, як обов'язкових складових системи оптимального проєктування турбоблоку.

Мета роботи

Метою роботи є удосконалення структурно-топологічного формування інформаційної та математичної моделей ПЧ парової турбіни для подальшого їх використання в задачах оптимального проєктування потужних турбоблоків.

Постановка задачі

Об'єктом дослідження є ПЧ турбіни турбоблоку, в складі якого окрім турбіни є решта допоміжного енергетичного обладнання відповідно,

© Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, 2022

наприклад, до теплової схеми наведеної на рис. 1.

Підвищення ефективності такого складного технічного об'єкту, як турбоагрегат потребує оптимізації параметрів не тільки окремих його складових, наприклад, ПЧ турбіни, парового котла, конденсаторів, підігрівачів живильної води та інших, але, що також дуже важливо, і визначення оптимальних параметрів робочого тіла, яке передається від одного об'єкту до іншого.

Для реалізації процесу оптимального проектування турбоблоку в першу чергу потрібно створити:

- 1) структурно-топологічну інформаційну модель ПЧ парової турбіни, яка забезпечить інформаційний обмін відповідними параметрами між ПЧ і підігрівачами живильної води;
- 2) математичну модель ПЧ, яка буде здатна використовувати в якості вихідних даних параметри теплової схеми в місцях відбору пари на підігрівачі живильної води.

Результати

Розглянемо особливості створення структурно-топологічної інформаційної моделі ПЧ парової турбіни.

Один із успішних варіантів реалізації інформаційної моделі ПЧ парової турбіни наведено в [1], тому доцільним буде використати цей позитивний досвід та удосконалити уже розроблену інформаційну модель ПЧ і пристосувати її до розв'язання поставленої задачі.

Аналізуючи структурно-топологічну інформаційну модель ПЧ та її елементи із [1] (рис. 2) видно, що циліндр, як об'єкт проектування складається із окремих ступенів, які в свою чергу мають відповідні перетини соплових і робочих решіток.

Слід зазначити, що розроблені інформаційні моделі об'єктів проектування, в тому числі і ПЧ парової турбіни (рис. 2) являються однією із складових єдиного інтегрованого інформаційного простору (ЄІП) САПР «Турбоагрегат» (рис. 3).

Об'єднання усіх інструментів проектування в ЄІП має суттєві переваги та можливості щодо проведення багатоваріантних розрахункових досліджень ПЧ парових турбін в задачах оптимального проектування [1–4].

Короткий огляд та аналіз наявних об'єктів проектування та структури інформаційної моделі ПЧ «Циліндр» (рис. 2) показує, що вони мають свої обмеження і не можуть бути використані для розв'язання задач оптимізації параметрів турбоблоку. Як видно з рис. 2 серед об'єктів проектування відсутній об'єкт «Турбоблок», а також відсутня можливість управління параметрами робочого тіла в місцях відбору пари в ПЧ циліндру (рис. 1, рис. 2) для підігріву живильної води.

Використовуючи можливості редактора ресурсів (рис. 3, рис. 4) САПР «Турбоагрегат» було проведено роботи з розширення переліку інформаційних моделей об'єктів проектування та удосконалення структурно-топологічної моделі «Циліндр» з метою розширення її функціональних можливостей при розв'язанні задач оптимального проектування турбоагрегату.

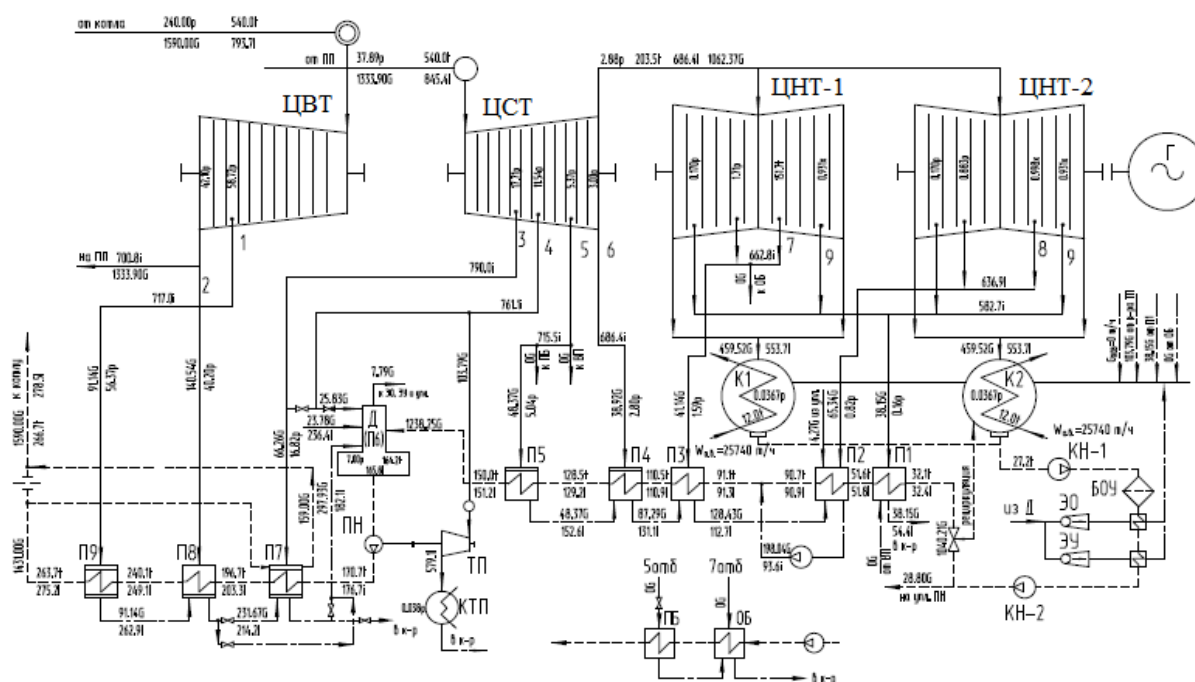


Рис. 1 – Теплова схема турбоблоку

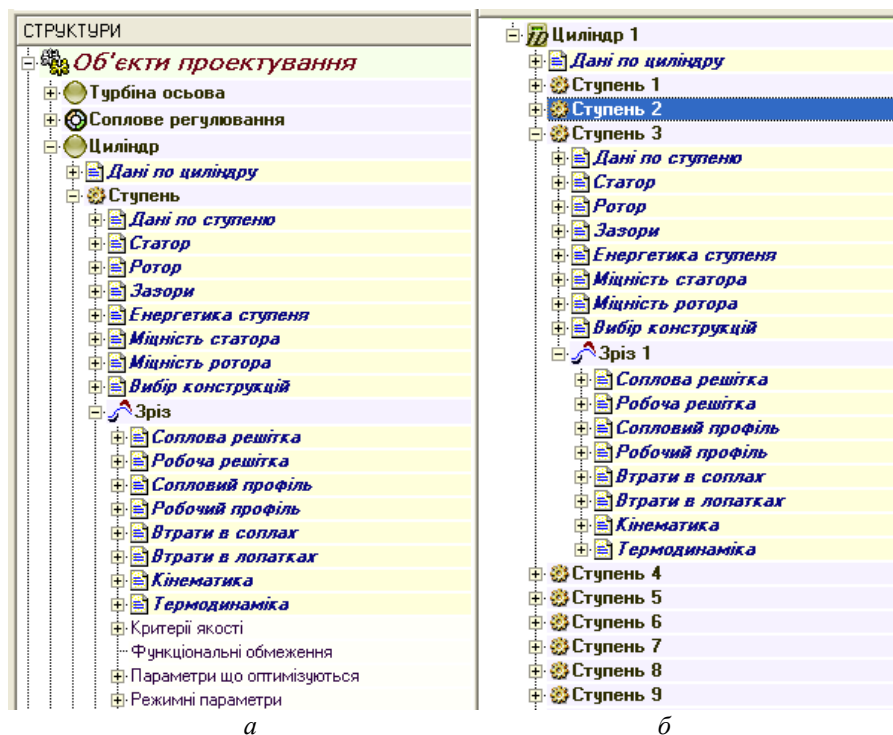


Рис. 2 – Структурно топологічна інформаційна модель ПЧ циліндру:
 а – в базі даних структур об'єктів проектування; б – в робочому проекті циліндру

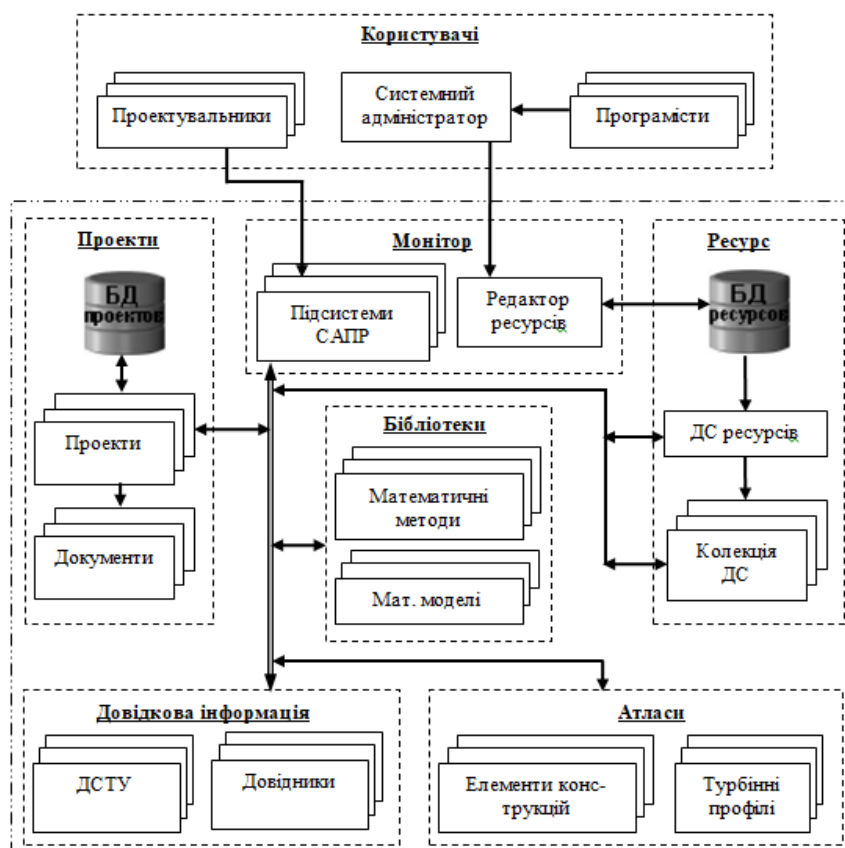


Рис. 3 – Схема інформаційних потоків в ЄПП САПР «Турбоагрегат»

n – кількість ступенів турбіни.

Зазначена система рівнянь (1) розв'язується мінімізацією функції

$$F = \sum_{j=1}^n (\Delta_{g1(j)}^2 + \Delta_{g2(j)}^2) + \Delta_h^2$$

з $(2n+1)$ невідомими змінним $c_{1(j)}$, $w_{2(j)}$, G з використанням методу сполучених градієнтів Флетчера-Рівза.

Після розв'язання системи рівнянь (1) розраховуються значення відсутніх параметрів потоку біля кореня і на периферії ступеня турбіни, а також уточнюються значення коефіцієнтів швидкості решіток (ϕ , ψ), різного роду додаткових втрат, а також втрат, пов'язаних з надбандажними і прикорневими перетіканнями робочого тіла. Описаний процес розв'язання системи рівнянь (1) проходить ітераційно до виконання заданої точності розрахунків.

Результати розрахунків ПЧ з використанням алгоритмів створених на основі цієї математичної моделі пройшли неодноразову верифікацію з використанням даних експериментальних досліджень, як на експериментальних стендах кафедри турбінобудування НТУ «ХП», так і результатів експериментальних досліджень ПЧ діючих турбін в умовах реальної експлуатації на електростанціях.

При аналізі можливості використання цієї математичної моделі в задачах оптимального проектування турбоблоків враховувалося наступне:

1 При оптимізації турбоблоку в якості параметрів оптимізації виступають параметри пари у відборах для підігріву живильної води, так як вони мають суттєвий вплив на ефективність і потужність турбоблоку [7], наприклад, статичний тиск пари за кожним із відсіків турбіни ($p_{2 \text{ відс}}$).

2 Для кожної комбінації величин $p_{2 \text{ відс}}$ в процесі пошуку їх оптимальних значень необхідно розв'язувати задачу оптимального проектування ПЧ турбіни.

3 Оптимізація геометричних характеристик ПЧ повинна проходити при заданих значеннях статичних тисків за кожним із відсіків ($p_{2 \text{ відс}}$).

Використання згаданої математичної моделі в відомих постановках не забезпечує виконання вимоги п. 3, так як значення статичних тисків за всіма ступенями турбіни, крім останнього, визначаються в результаті розв'язання системи рівнянь (1).

Розглянемо більш детально, які особливості відомого варіанту програмної реалізації алгоритму математичної моделі термо та газодинамічних процесів у ПЧ можна адаптувати до вимог, що пов'язані з розв'язанням задачі оптимального проектування турбоагрегату.

Найбільш придатною для розв'язання цієї задачі виглядає постановка задачі з визначення ефективного кута виходу з соплової решітки першого ступеня, значення якого забезпечить заданий рівень масової витрати робочого тіла через проточну частину при заданих значеннях тиску гальмування перед нею та статичного тиску за останнім ступенем ПЧ.

У процесі розв'язання системи (1), при знаходженні мінімальних значень функції F на різних пов'язаних напрямках, виникає необхідність багаторазової оцінки суми квадратів нев'язок. У нашому випадку, алгоритм розрахунку значення функції F для деякого пробного вектору \bar{X} , значення компонент якого генеруються в програмній процедурі пошуку екстремуму, виглядає наступним чином:

1) Для визначення ефективного кута виходу з соплової решітки першого ступеня використовується залежність (2):

$$\alpha_{1e(t)} = \alpha_{01e(t)} \cdot e^{X[2n+1]}, \quad (2)$$

де $\alpha_{01e(t)}$ – початкове наближення ефективного кута соплової решітки першого ступеня;

2) Для кожного ступеня виконується розрахунок параметрів потоку в розрахункових перетинах (за вихідними кромками соплових і робочих решіток):

• Масові витрати для кожного наступного, уздовж осі турбіни, перетину визначаються за формулами (3):

$$G_{1(j)} = G_{2(j-1)} + \Delta G_{1(j)}, \quad G_{2(j)} = G_{1(j)} + \Delta G_{2(j)}. \quad (3)$$

• Швидкості виходу потоку з решіток для проміжного ступеня за формулами (4):

$$c_{1(j)} = c_{10(j)} \cdot e^{X[2j+1]}, \quad w_{2(j)} = w_{20(j)} \cdot e^{X[2j]}, \quad (4)$$

де $c_{10(j)}$ і $w_{20(j)}$ – початкові наближення для відповідних швидкостей.

При відомих швидкостях $c_{1(j)}$ і $w_{2(j)}$, геометрії ступеня і параметрах потоку на вході в ступень, легко визначаються відсутні параметри в розрахункових перетинах (p , ρ , S і інші) і нев'язки з масової витрати пари:

$$\Delta_{g1(j)} = \frac{G_{1(j)} - \rho_{1(j)} \cdot F_{1(j)} \cdot c_{1z(j)}}{G_0}, \quad (5)$$

$$\Delta_{g2(j)} = \frac{G_{2(j)} - \rho_{2(j)} \cdot F_{2(j)} \cdot c_{2z(j)}}{G_0}.$$

Після того, як визначені параметри потоку на виході з останнього ступеня і значення нев'язок (5) для всіх ступенів, обчислюється значення нев'язки для статичному тиску за останнім ступенем ПЧ (6):

$$\Delta_h = \frac{P_{2(n)} + \Delta P_{p.з.(n)}}{P_{2зад.(n)}} - 1, \quad (6)$$

де $p_{2(n)}$ – статичний тиск в перетині за вихідною кромкою робочої решітки останнього ступеня, отриманий в результаті розрахунку;

$\Delta p_{p.з.(n)}$ – зміна тиску, викликана витоком пари в радіальний зазор останнього ступеня;

$p_{2зад.(n)}$ – задане значення статичного тиску на виході з останнього ступеня ПЧ.

Далі розраховується функція F , значення якої передається в процедуру пошуку екстремуму методом Флетчера-Рівза. Процес пошуку триває до тих пір, поки не буде знайдено розв'язання системи рівнянь з заданою точністю, або до моменту досягнення максимально-допустимої кількості ітерацій зовнішнього циклу.

Таким чином, наведений алгоритм чисельного розв'язання системи (1) дозволяє підбирати такі значення невідомих $c_{1(j)}$, $w_{2(j)}$ та $\alpha_{1e(i)}$, які відповідають мінімальним рівням нев'язок функції F .

Щоб використати описаний алгоритм розв'язання системи рівнянь (1) математичної моделі термодинамічних процесів в ПЧ для використання його в задачах оптимального проєктування турбоблоків були виконані дії щодо організації процесу «повідсікового» розрахунку ПЧ:

1 В програмний код алгоритму розв'язання системи рівнянь (1) введено новий цикл за числом відсіків в ПЧ відповідно до інформаційної моделі рис. 4.

2 Організовано автоматичне оновлення значень параметрів гальмування пари (тиску і ентальпії) перед кожним наступним відсіком за результатами розрахунку попереднього відсіку.

Це забезпечило автоматичне почергове розв'язання системи рівнянь (1) для кожного відсіку в складі ПЧ всієї турбіни з заданими значеннями статичного тиску ($p_{2зад}$) за кожним відсіком та масової витрати пари на вході в кожен відсік з урахуванням відбору пари на підігрів живильної води.

Слід зазначити, що використання удосконаленого таким чином алгоритму для визначення термо та газодинамічних процесів в ПЧ дещо звужує можливості оптимізації геометрії ПЧ, так як ефективні кути перших ступенів кожного відсіку ($\alpha_{1e(i)}$, де i – номер відсіку в циклі) безпосередньо не приймають участі в розв'язанні задачі оптимального проєктування ПЧ, а використовуються для забезпечення умови проходження через відсік заданої масової витрати пари.

Блок-схема удосконаленого алгоритму наведена на рис. 5.

Після додаткового аналізу системи рівнянь (1) було запропоновано і реалізовано другий варіант алгоритму розрахунку ПЧ з заданими значеннями статичного тиску ($p_{2відс}$) за кожним відсі-

ком та масової витрати пари в відбір для підігріву живильної води.

Основна ідея другого варіанту удосконалення математичної моделі та алгоритму, що її реалізує полягає в збільшенні кількості нев'язок функції F відповідно до кількості відсіків за виключенням останнього. В цьому випадку функція F буде мати наступний вигляд:

$$F = \sum_{j=1}^n (\Delta_{g1(j)}^2 + \Delta_{g2(j)}^2) + \Delta_h^2 + \sum_{i=1}^m (\Delta_{p2відс(i)})^2, \quad (7)$$

де $\Delta_{p2відс(i)}$ – нев'язка статичного тиску за i -м відсіком.

Розрахунок значень нев'язок для статичних тисків пари за відповідними відсіками виконується за наступною формулою:

$$\Delta_{p2відс(i)} = \frac{p_{2відс(i)} + p_{2п.з.(i)} - 1}{p_{2зад.(i)}}, \quad (8)$$

де $p_{2відс(i)}$ – статичний тиск в перетині за вихідною кромкою робочої решітки останнього ступеня i -го відсіку, отриманий в результаті поточного розрахунку;

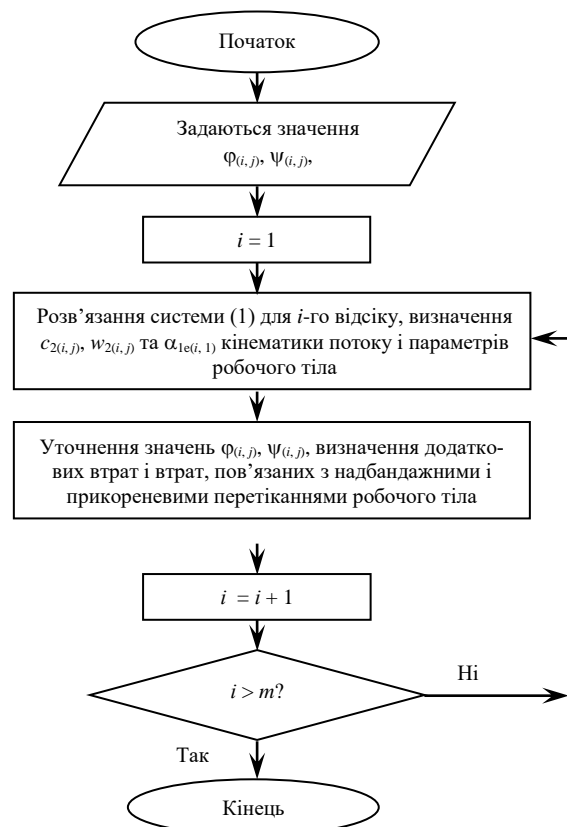


Рис. 5 – Блок-схема удосконаленого алгоритму повідсікового розрахунку ПЧ

$P_{2p,3(i)}$ – зміна тиску, викликана витоком пари в радіальний зазор останнього ступеня i -го відсіку;

$P_{2зад(i)}$ – задане значення статичного тиску на виході з останнього ступеня i -го відсіку, отримане з розрахунку теплової схеми турбоблоку.

Відповідно система рівнянь математичної моделі процесів в ПЧ буде мати наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{g1(j)}(G, c_{1(j)}) = 0; \\ \Delta_{g2(j)}(G, c_{1(j)}, w_{2(j)}) = 0; (j = 1); \\ \Delta_{g1(j)}(G, c_{1(j)}, w_{2(j-1)}) = 0; \\ \Delta_{g2(j)}(G, c_{1(j)}, w_{2(j)}) = 0; (j = 2); \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_{g1(n)}(G, c_{1(n)}, w_{2(n-1)}) = 0; \\ \Delta_{g2(n)}(G, c_{1(n)}, w_{2(n)}) = 0; (j = n); \\ \Delta_h \left(\begin{array}{l} G, c_{1(n)}, c_{1(n-1)}, \dots, c_{1(1)}, \\ w_{2(n)}, w_{2(n-1)}, \dots, w_{2(1)} \end{array} \right) = 0, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_{p2відс(i)}(\Delta_{п(i)}, c_{1(j)}, w_{2(j)}) = 0; (i = 1); \\ \Delta_{p2відс(i)}(\Delta_{п(i)}, c_{1(j)}, w_{2(j)}) = 0; (i = 2); \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_{p2відс(m)}(\Delta_{п(i)}, c_{1(j)}, w_{2(j)}) = 0; (i = m). \end{array} \right. \quad (9)$$

де $\Delta_{п(i)}$ – периферійна перекриша між робочою лопаткою останнього ступеня $(i - 1)$ -го відсіку та сопловою лопаткою першого ступеня i -го відсіку; m – кількість відсіків.

В цьому випадку при зміні величини $\Delta_{п(i)}$, яка вибрана в якості параметра, що впливає на величину наявного теплового перепаду відсіку та відповідно на статичний тиск за ним, кожного разу виконується корекція периферійних обводів ПЧ відповідно до алгоритму автоматичного формування обводів ПЧ [1].

Конкретні значення $\Delta_{п(i)}$ в процесі розв'язання системи рівнянь (9) визначаються за наступною формулою:

$$\Delta_{п(i)} = \Delta_{0п(i)} \cdot e^{X[2n+1+i]}, \quad (10)$$

де $\Delta_{0п(i)}$ – значення початкового наближення для периферійної перекриші між робочою лопаткою останнього ступеня $(i - 1)$ -го відсіку та сопловою лопаткою першого ступеня i -го відсіку.

Таким чином, при використанні другого варіанту удосконалення математичної моделі та алгоритму, що її реалізує дозволяє за рахунок вибору відповідних значень периферійних перекриш $\Delta_{п(i)}$ мінімізувати за допомогою алгоритму сполучених градієнтів Флетчера-Рівза нев'язки для

статичних тисків за відсіками відповідно до залежності (8). В результаті розв'язання системи рівнянь (9) розрахункові значення тисків за відсіками ($P_{2відс(i)}$) будуть дорівнювати заданим значенням ($P_{2зад(i)}$).

Отримані попередні результати розрахункових досліджень дозволяють рекомендувати обидва варіанти удосконалення математичної моделі процесів в ПЧ та алгоритмів, що їх реалізують для використання в задачах оптимального проектування турбоблоків.

Висновки

1) Удосконалено структурно-топологічну інформаційну модель проточної частини парової турбіни. В структуру інформаційної моделі «Циліндр» додано ієрархічну інформаційну модель «Відсік».

2) Удосконалено відповідно до структурно-топологічної інформаційної моделі проточної частини парової турбіни математичну модель термо та газодинамічних процесів в ПЧ турбіни.

3) Виконаний комплекс робіт з удосконалення структурно-топологічної інформаційної та математичної моделей дозволяє виконувати роботи з одночасної оптимізації параметрів теплових схем та ПЧ турбін з урахуванням їх взаємного впливу при визначенні оптимальних значень параметрів теплової схеми та ПЧ.

Список літератури

1. Усатий О. П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.16 / Усатий Олександр Павлович. – Харків, 2013. – 419 с.
2. Бойко А. В. Многокритеріальна многопараметрическая оптимізація проточної частини осевих турбін с учетом режимов эксплуатации : моногр. / А. В. Бойко, А. П. Усатый, А. С. Руденко ; Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». – Харьков : Підручник НТУ «ХП», 2014. – 220 с.
3. Boiko, A. Optimization of the Axial Turbines Flow Paths : monograph / A. Boiko, Y. Govorushchenko, and A. Usatyi. – New York : Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A, 2016. – 272 p. – ISBN 978-1-940366-67-8. – URL: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8> (дата звернення: 10.01.2022).
4. Программная реализация единого информационного пространства интегрированной системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый // Электронное моделирование. – 2009. – Т. 31, № 2. – С. 43–55. – ISSN 0204-3572. – ISSN 2616-9525.
5. Бойко А. В. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин : учебн. [для студ. высш. учеб. завед.] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко. – Харьков: Выща школа, 1989. – 217 с.
6. Говорущенко Ю. Н. Оптимізація газодинамічних і геометричних характеристик осевої турбинної установки : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / Говорущенко Юрій Николаевич. – Харьков, 1981. – 175 с.

7. Шерфедінов, Р. Б. Особливості заміни існуючої проточної частини на оптимальну при модернізації ЦВТ парової турбіни / Р. Б. Шерфедінов, О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, М. О. Далудін, І. С. Єнін // Вісник НТУ «ХПІ». 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>.
- 8, URL: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8> (accessed 10 January 2022).

References (transliterated)

1. Usatyi O. P. (2013), *Vserezhytna bagatoparametrychna bagatokryterial'na optymizacija protochnoi' chastyny turbin v integrovanomu informacijnomu prostori* [All-mode multi-parameter multi-criteria optimization of the flow part of turbines in the integrated information space], Kharkov, 419 p.
2. Boiko A. V., Usatyi A. P., Rudenko A. S. (2014), *Mnogokriterial'naya mnogoparametricheskaya optimizatsiya protochnoy chasty oseykh turbin s uchetom rezhimov ekspluatatsii* [Multicriteria multiparameter optimization of the flow part of axial turbines taking into account operating modes], Pidruchnik NTU "KHPi", Kharkov, 220 p.
3. Boiko A. V., Govorushchenko Yu. N., Usatyi A. P. (2016), *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths* : monograph, Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A., 272 p, ISBN 978-1-940366-67-
4. Boiko A. V., Govorushchenko Y. N., Usatyi A. P. (2009), "Programmaja realizacija edinogo informacionnogo prostora integriruvanoj sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija "Turboagregat" [Software Implementation of a Single Information Space of Integrated System Turboagregat CAD]", *Elektronnoye modelirovaniye* [Electronic modeling], vol. 31, no 2, pp. 43–55, ISSN 0204-3572, ISSN 2616-9525.
5. Boiko A. V., Govorushchenko Y. N. (1989), *Osnovy teorii optimal'nogo proektirovanija protochnoj chasty oseykh turbin* [Fundamentals of the theory of optimal design of the flow part of axial turbines], Higher School, Kharkov, 217 p.
6. Govorushchenko Y. N. (1981), *Optymizacija gazodinamicheskikh i geometricheskikh harakteristik osevoj turbinnoj ustanovk* [Optimization of gas-dynamic and geometric characteristics of an axial turbine installation], Kharkov, 175 p.
7. Sherfedinov R., Usatyi O., Avdieva 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>.

Надійшла (received) 18.02.2022

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 (Usaty 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>.

Авдєєва Олена Петрівна (Avdieieva Olena) – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.