

# РЕФЕРАТ

наукової роботи

## «Оптимізація проточних частин потужних парових турбін для ТЕС та АЕС»

аторів к.т.н. О.П. Авдєєвої, І.А. Палькова, С.А. Палькова, О.І. Іщенко

### Актуальність роботи

На сьогоднішній день енергетика є ключовим фактором у вирішенні як глобальних проблем так і економічного розвитку суспільства. Найважливішою складовою енергетики являється виробництво електроенергії. При цьому на теплових та атомних електростанціях генерується більше 90% видобутку електроенергії, як в Україні, так і в цілому світі. Саме тому навіть невелике підвищення ККД енергоблоків призводить до різкого скорочення споживання корисних копалин (газу, вугілля), а значить - до підвищення стабільності та надійності роботи енергосистеми, конкурентоздатності економіки та енергонезалежності нашої держави, а також до помітного вкладу у зменшення ризику зміни клімату на земній кулі.

На жаль, сьогодні у вітчизняній енергетиці працюють турбоустановки потужністю від 200 до 1250 МВт, які створювались ще у 60-70-і роки ХХ століття для несення базових навантажень енергосистеми. В останні роки ці турбоустановки досить часто використовуються і для покриття напівпікових та пікових навантажень енергосистеми, що створило ряд проблем, пов'язаних з суттєвим зниженням рівнів надійності та ефективності енергетичних турбін великої потужності. В контексті цього і згідно з Програмою участі АТ «Турбоатом» у поставках обладнання для АЕС України на п'ятирічний період (2018-2022 рр.) та Програмою участі АТ «Турбоатом» у поставках обладнання для АЕС України на п'ятирічний період (2020-2024 рр.), необхідно модернізувати проточні частини циліндрів парових турбін. Основними напрямкам при модернізації проточних частин турбін мають бути: створення новітніх, високоефективних і надійних оптимальних конструкцій турбін для АЕС з забезпеченням можливості установки робочих лопаток та діафрагм в існуючі циліндри без заміни роторів та корпусів; підвищення економічності

проточних частин з метою приросту електричної потужності турбоустановок на затискачах генератора без додаткового використання паливних ресурсів; підвищення надійності та терміну служби парових турбін.

Подальший пошук резервів для підвищення ефективності парових турбін можливий тільки за умови використання потужної обчислювальної техніки поряд із новими методами і підходами, реалізованими в рамках сучасних систем автоматизованого проектування (САПР). Слід зазначити, що парова турбіна є достатньо складним інженерним об'єктом, тому ефективність її окремих елементів суттєво впливає на їх взаємодію та спільну роботу. Моделювання термогазодинамічних процесів таких об'єктів варто проводити з урахуванням взаємного зв'язку їх складових та об'єктно-орієнтованого підходу.

Розроблена методологія оптимального проектування проточних частин потужних парових турбін, яка ґрунтується на об'єктно-орієнтованому підході і перевагах єдиного інтегрованого інформаційного простору (ЄІП) реалізована науковцями НТУ «ХПІ» в тісній співпраці з фахівцями АТ «Турбоатом» в програмному продукті САПР «Турбоагрегат», яка є потужним інструментом удосконалення та створення новітніх зразків проточних частин парових турбін. Розроблені з використанням САПР «Турбоагрегат» парові турбіни за своїми характеристиками не тільки не поступаються кращим зарубіжним зразкам, а і на сьогодні являються недосяжним взірцем для багатьох загальновідомих світових виробників турбінного обладнання. З урахуванням сучасних проблем, які стоять перед енергетичною галуззю України і потребують негайного їх вирішення, розв'язання надскладних задач оптимізації проточних частин потужних парових турбін для ТЕС та АЕС з використанням можливостей САПР «Турбоагрегат» є не тільки актуальним завданням сучасності, а і має всі підстави для його реального виконання.

Досягти таких амбітних цілей без співпраці науково-дослідних організацій та виробничих підприємств, які працюють в галузі турбінобудування неможливо. Сьогодні в Україні успішним прикладом такої тісної і скоординованої взаємодії для досягнення поставленої мети є спільні роботи з підвищення ефективності та конкурентоспроможності вітчизняної

турбінобудівної галузі, які виконують Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та АТ «Турбоатом».

### **Мета роботи**

Підвищення ефективності і конкурентоспроможності вітчизняної турбінобудівної галузі, надійності роботи енергосистеми України та зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище за рахунок створення новітніх високоефективних і надійних оптимальних конструкцій проточної частини потужних парових турбін для атомних та теплових електростанцій з використанням розробленої методології об'єктно-орієнтованої оптимізації, що реалізована в вигляді спеціального програмного забезпечення САПР «Турбоагрегат».

### **Наукова новизна**

Розроблена та реалізована методологія об'єктно-орієнтованої багаторівневої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в єдиному інтегрованому інформаційному просторі САПР «Турбоагрегат», що дозволяє представити процес оптимального проектування ПЧ в вигляді динамічно взаємодіючих ієрархічно структурованих підсистем оптимізації кожного елементу ПЧ, забезпечуючи при цьому ефективно досягнення спільної мети – отримання оптимального рішення для проточної частини всієї турбіни в цілому з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

Створена і програмно реалізована універсальна об'єктно-орієнтована методологія структурно-топологічного опису інформаційних моделей проточної частини осьових турбін і інших складних технічних систем в єдиному інтегрованому просторі.

Дістали подальшого розвитку математичні моделі одномірної, коаксіальної (квазидвовірної) і вісесиметричної течії робочого тіла в багатоступеневій проточній частині, що дозволило, з урахуванням зміни втрат енергії в її елементах, отримувати стійкі та достовірні рішення, у тому числі, і при моделюванні роботи на маловитратних режимах (до 6-8% від номінального);

Дістали подальшого розвитку математична модель термогазодинамічних процесів, системи рівнянь якої описують спільну роботу соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату;

Розв'язані задачі комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін для ТЕС і АЕС та одержані нові дані щодо взаємному впливу елементів турбіни на її оптимальні характеристики, що дозволяє не тільки виявляти та оцінювати якісні та кількісні показники ефективності та надійності проточних частин, а і цілеспрямовано впливати на них та підвищувати їх рівні.

### **Зміст роботи**

Авторами розроблена універсальна методологія створення інтегрованого інформаційного простору багаторівневої, багатопараметричної та багатокритеріальної оптимізації складних технічних систем, таких як потужні парові турбіни для органічних та атомних електростанцій. Забезпечені вимоги інформаційної погодженості, відкритості систем, що розвиваються, а також необхідності максимального використання уніфікованих форматів і модулів.

Аналіз сутностей підсистем системи автоматизованого проектування (параметрів, масивів, структур, моделей розрахунку, редакторів, пунктів меню, кнопок, довідників, атласів, бібліотек і т.інш.) дозволив у самій загальній формі, відповідно до міжнародного стандарту ISO 11179, представити абстрактний універсальний суперклас метаданих (відомості про склад даних, зміст, форми подання, статус, формати та умови доступу й т. ін.) про елемент інформаційної моделі ЄПП як функцію від ряду блоків з атрибутами, тобто значень, що характеризують елемент у його класі:

$$X_i = F_i \left( \begin{matrix} A_{ID}, A_{VIEW}, A_{NAME}, A_{INIT}, A_{SUB}, \\ A_{CONTROL}, A_{LIB}, A_{LINK}, A_{DATA}, A_{EXIMP} \end{matrix} \right), \quad (1)$$

$$X_i \in \rightarrow \text{ЄПП},$$

де  $X_i$  і  $F_i$ - елемент ЄПП і функція його подання в ЄПП, відповідно;  $A_{ID}$ - відповідає за унікальність ідентифікації  $X_i$  у ЄПП;  $A_{VIEW}$ - атрибути відображення й виду  $X_i$  на екрані монітора;  $A_{NAME}$ - атрибути мультимовних імен  $X_i$ ;  $A_{INIT}$ - атрибути початкового стану  $X_i$ ;  $A_{SUB}$ - атрибути ієрархічної

підпорядкованості  $X_i$ ;  $A_{CONTROL}$ - атрибути керування підлеглими елементами ЄПП;  $A_{LIB}$ - атрибути зв'язків  $X_i$  з математичними методами й розрахунковими моделями;  $A_{LINK}$ - атрибути параметричних зв'язків  $X_i$  зі своїми клонами в різних моделях, компонентах і підсистемах;  $A_{DATA}$ - атрибути зв'язків  $X_i$  з даними із довідників і атласів;  $A_{EXIMP}$ - атрибути експортно-імпортних операцій  $X_i$  зі зовнішніми джерелами даних. Архітектура та схема інформаційних потоків, що забезпечують погоджену роботу всіх підсистем у ЄПП САПР «Турбоагрегат».

Наведені основи методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в ЄПП САПР «Турбоагрегат». Пошук оптимальної конструкції потужної парової турбіни базується на комплексному підході, бо турбіна є складним об'єктом, що складається з безлічі елементів. Типова конструкція проточної частини потужної парової турбіни наведена на рис. 1. Елементи, що входять до складу конструкції турбіни, за своїм призначенням діляться на три об'єкти (рис. 2).

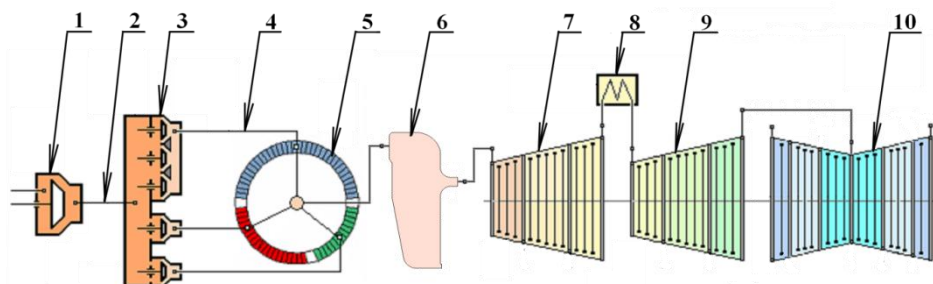


Рисунок 1 – Схема проточної частини: 1 - стопорний клапан (СПР); 2 - трубопровід стопорного клапана (СПР); 3 - коробка з регулюючими клапанами (СПР); 4 - трубопроводи сегментів (СПР); 5 - сегменти регулюючого ступеня (СПР); 6 - вирівнююча камера (ВК); 7 - циліндр високого тиску (Циліндр); 8 - пароперегрівач (Циліндр); 9 - циліндр середнього тиску (Циліндр); 10 - циліндр низького тиску (Циліндр)

Перший об'єкт – «сопловий паророзподіл» (СПР), до складу якого входить стопорний клапан, трубопровід стопорного клапана, коробка з регулюючими клапанами, трубопроводи сегментів і регулюючий ступень (сегменти регулюючого ступеня). До другого об'єкту відноситься, сполучна ланка між системою СПР і проточною частиною – вирівнююча камера, яка призначена для вирівнювання потоку на вході в першу ступінь циліндра високого тиску. У третій об'єкт - «Циліндр» - входять циліндри високого,

середнього та низького тиску. Кожен з об'єктів, крім другого діляться на підпорядковані йому об'єкти. Поділ на підрівні здійснюється до тих пір, поки не буде визначено найпростіший об'єкт оптимізації.

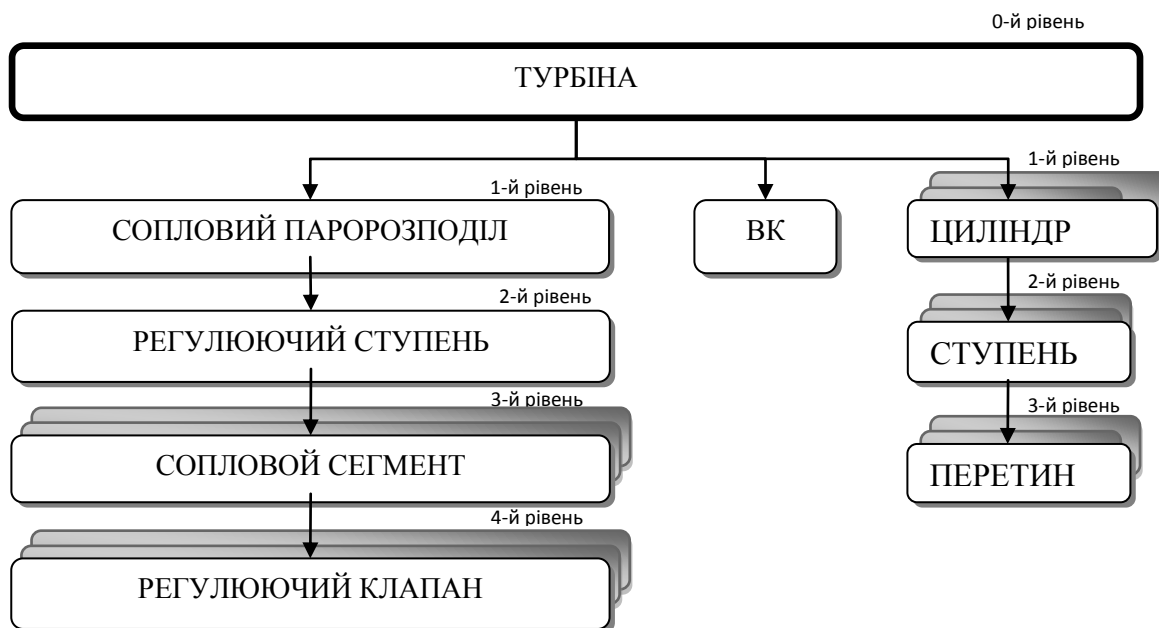


Рисунок 2 – Блок-схема інформаційної моделі парової турбіни

Кожен з оптимізаційних об'єктів турбіни має свою математичну модель термогазодинамічних процесів і систему оцінки якості. Вектор оптимізуємих параметрів найвищого (нульового) рівня формується з параметрів нижчих рівнів (СПР і циліндрів). Таким чином, на рівні «Турбіна» оптимізуються наступні параметри: діаметри регулюючих клапанів; кількість соплових каналів в сегментах; кореневий діаметр направляючого апарату регулюючого ступеня; висота соплової лопатки регулюючої ступеня; кореневі діаметри напрямних апаратів перших ступенів циліндрів (ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ); висоти соплових лопаток перших ступенів зазначених циліндрів. Цільовими функціями тут відповідно є: внутрішній відносний ККД турбіни; абсолютний ККД циклу; термічний ККД циклу; потужність турбіни. В якості функціонального обмеження виступає витрата пари, що надходить в турбіну.

Структура інформаційної моделі «СПР», складається з наступних рівнів: «Регулюючий ступень», «Сопловий сегмент» і «Регулюючий клапан». На даному рівні (1-й рівень СПР) оптимізуються параметри регулюючого ступеня: середній діаметр і висота робочої лопатки регулюючого ступеня; ефективні

кути виходу з соплової та робочої решіток; число соплових і робочих лопаток. В якості цільових функцій тут виступають: ККД і потужність регулюючого ступеня. Функціональним обмеженням є витрата пари через регулюючий ступень. Параметри, що оптимізуються на рівні «Регулюючий ступень»: хорди соплових і робочих лопаток. Критерії якості даного об'єкта: ККД і потужність ступеня; ККД і робота на окружності колеса. В якості функціонального обмеження використовується витрата пари. Параметри, що оптимізуються на рівні «Сопловий сегмент» – кількість соплових каналів в сегменті. Критерії якості даного об'єкта: потужність і робота регулюючого ступеня на ділянці сегмента; внутрішній ККД регулюючого ступеня на ділянці сегмента. В якості функціонального обмеження використовується витрата пари через сегмент. Параметри, що оптимізуються на рівні «Регулюючий клапан» – діаметр клапана, а критерії якості - робота, потужність і внутрішній відносний ККД регулюючого ступеня на ділянці сегмента, втрати тиску в клапані. В якості функціонального обмеження використовується витрата через клапан.

Структура інформаційної моделі «Циліндр», на якому виконується оптимізація параметрів, що визначають форму обводів проточної частини і впливають на розподіл теплоперепаду між ступенями, складається з наступних рівнів: «Ступень» і «Перетин». Параметри, що оптимізуються на рівні «Циліндр» є: величини периферійного і кореневого розкриттів і перекриш; ефективні кути виходу соплових і робочих решіток або кути установлення профілів соплових і робочих решіток (якщо задана геометрія відповідних профілів) всіх циліндрів турбіни. Цільові функції даного об'єкта: відносний внутрішній ККД циліндру; діаграмний ККД циліндру по загальмованим параметрам; діаграмний ККД циліндру по статичним параметрам; потужність циліндру. Функціональні обмеження: повний тиск на вході в циліндр; об'ємна витрата на виході з циліндру; витрата на вході в циліндр; осьове зусилля на ротор циліндру. На рівні «Ступень» оптимізуються параметри: числа соплових і робочих лопаток; хорди соплових і робочих лопатки, або відносні кроки соплових і робочих решіток. Критерії якості даного рівня: потужність ступеня; внутрішній відносний ККД ступеня. Функціональні обмеження: максимальна

напруга в крайній направляючій лопатці; напруга вигину на вхідний кромці; напруга вигину на вихідний кромці; об'єм соплових лопаток; максимальне напруження в тілі діафрагми; об'єм тіла і ободу діафрагми; максимальна напруга вигину; напруження розтягу; маса робочих лопаток; частота коливань обертової робочої лопатки. На рівні «Перетин» оптимізуються параметри: радіуси вхідної кромки соплових і робочих профілів; кути загострення вхідної і вихідної кромок; кути відгину вихідних кромок соплових і робочих профілів. В якості цільових функцій виступають коефіцієнти швидкості соплових і робочих решіток. Функціональними обмеженнями на даному рівні є площа профілю і напруга в його перетині.

Задача оптимального проектування складного технічного об'єкту з урахуванням обмежень і нерівностей в загальному вигляді представляється як екстремальна задача з обмеженнями:

$$\begin{aligned} \vec{Y}^{opt}(\vec{x}_k^{opt}) = \max \vec{Y}(\vec{x}_k), \vec{x}_k \in X, \vec{v}(\vec{x}_k) \in V, \\ \vec{Y}(Y_1(\vec{x}_k), Y_2(\vec{x}_k), \dots, Y_n(\vec{x}_k)), N_{Xmin} \leq |X| \leq N_{Xmax} < \infty, N_{Vmin} \leq |V| \leq N_{Vmax} < \infty, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\vec{Y}$  – вектор цільових функцій;  $\vec{x}_k$  – вектор конструктивних параметрів;

$\vec{v}$  – вектор функціональних обмежень;  $V, X$  – області існування функціональних і конструктивних обмежень;  $N_{V(min,max)}, N_{X(min,max)}$  – межі областей існування відповідних обмежень.

Для розв'язання задачі (2) використовують наступні оптимізаційні методи: формальне макромодельовання, ЛПт – пошук та багатокритеріальну оптимізацію парової турбіни. Запропонована методологія багаторівневої та багатокритеріальної оптимізації парової турбіни, побудована за принципом рекурсії, що дозволяє представити задачу оптимального проектування, як єдиний комплекс ієрархічно структурованих підсистем оптимізації, які забезпечують на кожному рівні ієрархії розв'язання «своїх» задач в різних постановках, забезпечуючи при цьому ефективне досягнення спільної мети – отримання оптимального рішення для всій турбіни в цілому.

Використання об'єктно-орієнтованого підходу при оптимізації проточної частини парової турбіни призвело до моделювання відповідної взаємодії між



елементами турбіни. Розрахунок системи соплового паророзподілу полягає у визначенні тиску пари між регулюючим ступенем, враховуючи втрати тиску у вирівнюючій камері, та проточною частиною, з урахуванням рівності масової витрати в обох частинах. Тому при аналізі роботи багатоциліндрової проточної частини використовується одновимірна модель з визначенням параметрів робочого тіла (повний тиск і ентальпія на вході та статичний тиск на виході) при заданій витраті. Процес розрахунку парової турбіни зводиться до ітераційного циклу з визначення параметрів пара між об'єктами інформаційної моделі. Між циліндрами дотримується рівність масової витрати, тобто витрата на виході з ЦВТ дорівнює витраті на вході в ЦСТ, аналогічно, витрата на виході з ЦСТ дорівнює витраті на вході в ЦНТ. Крім того в інформаційних моделях циліндрів тиску передбачено збільшення витрати в голову циліндра на величину витрати додаткового потоку.

В роботі удосконалені математичні моделі коаксіальної та вісесиметричної течії робочого тіла. Авторами проведено розрахунковий аналіз аеродинамічної досконалості існуючих варіантів ПЧ наступних турбін: К-225-12.8, К-330-23.5, К-540-23.5, К-220-44, К-1250-6.9/25. Визначено і підкреслено причини неповного використання потенціалів існуючих циліндрів, закладених в їх конструкцію від самого початку. Відзначені основні чинники підвищення потужності і ефективності оптимальних варіантів ПЧ у порівнянні з вихідними варіантами. До них перш за все слід віднести: раціональний перерозподіл наявних теплоперепадів між ступенями циліндру; зміна меридіональних обводів ПЧ з пониженням кореневого діаметра і збільшенням довжин лопаток; вибір оптимальної кількості лопаток соплових і робочих решіток; суттєве зменшення кутів удару натікаючого потоку на соплові і робочі решітки; забезпечення мінімальних втрат, пов'язаних з прикореневими протічками за рахунок правильного вибору ступенів реактивності у кореня ступенів.

У повному обсязі виконаний комплекс розрахунково-дослідних робіт з багатопараметричної багатокритеріальної оптимізації проточних частин турбін від 200 до 1250 МВт.

### **Практичне значення роботи**


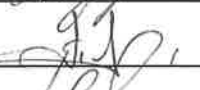


На основі багаторічних досліджень кафедри турбінобудування НТУ «ХП» та з урахуванням конструкторсько-технологічних рекомендацій АТ «Турбоатом» створено сучасний програмний комплекс, в якому реалізована методологія оптимального проектування проточних частин парових турбін з урахуванням імовірних і реальних режимів експлуатації, що реалізовано як готовий програмний продукт, використання якого дозволяє істотно поліпшити показники ефективності нових турбоагрегатів, а також провести модернізацію існуючих. Використання програмного комплексу САПР «Турбоагрегат» дозволило в повному обсязі виконати комплекс розрахунково-дослідних робіт з багатопараметричної багатокритеріальної оптимізації проточних частин турбін від 200 до 1250 МВт.

Зазначені в роботі науково-технічні розробки дозволили виконати модернізацію потужних турбін К-220-44-1М2, К-220-44-3М1, К-220-44-3М2, К-220-44-1М3 АЕС «Пакш» (Угорщина), модернізацію турбоагрегатів №3, №4 енергоблоку №2 Вірменської АЕС, модернізацію турбіни К-1000-60/1500-2 блоку №5 АЕС «Козлодуй» (Болгарія).

#### **Апробація результатів дослідження та впровадження**

Результати роботи викладені у 62 наукових публікаціях, 4 міжнародних публікаціях, що проіндексовані наукометричною базою даних SCOPUS, 1 патент України. За результатами роботи створено 4 технічні інструкції з експлуатації та 4 технічні умови. Результати роботи підтверджуються 7 актами впровадження. Економічний ефект від використання результатів роботи за 5 років складає близько 110,00 млн. грн..

Автори:

  
\_\_\_\_\_ О.П. Авдєєва  
  
\_\_\_\_\_ І.А. Пальков  
  
\_\_\_\_\_ С.А. Пальков  
  
\_\_\_\_\_ О.І. Іщенко