

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

АВДЄЄВА ОЛЕНА ПЕТРІВНА



УДК 621.165

**ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНА КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ
ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бойко Анатолій Володимирович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри турбінобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Шубенко Олександр Леонідович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
завідувач відділом оптимізації процесів
і конструкцій турбомашин

кандидат технічних наук
Швецов Віктор Леонідович,
Публічне акціонерне товариство
«Турбоатом», головний конструктор
парових турбін

Захист відбудеться « 18 » лютого 2016 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 08 » січня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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 електростанціях генерується 60% світового видобутку електроенергії. Саме тому навіть невелике підвищення ККД енергоблоків призводить до різкого скорочення споживання корисних копалин (газу, вугілля), а значить – до помітного вкладу у зменшення ризику зміни клімату на земній кулі.

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.

Розробка методології оптимального проектування, ґрунтуючись на об'єктно-орієнтованому підході і перевагах єдиного інтегрованого інформаційного простору (ЄІП), забезпечує створення на базі САПР потужного інструменту удосконалення та створення нових проточних частин парових турбін, які не поступаються зарубіжним аналогам. Таким чином, задача розробки методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін є актуальною та визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ» в рамках держбюджетної теми МОН України «Фундаментальні наукові дослідження проблем оптимізації термогазодинамічних процесів турбомашин в інтегрованому інформаційному просторі» (ДР № 0109U002389, 2009-2011 рр.) і госпдоговірних робіт з ПАТ «Турбоатом» (м. Харків): «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВД турбіни К-220-44-2М АЕС «Ловіса» (Фінляндія) при виконанні модернізації», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини турбіни (ЦВТ) К-330-23,5 виробництва ВАТ «Турбоатом», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВТ турбіни К-540-23,5 при виконанні модернізації», де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін і реалізації її в вигляді спеціального програмного забезпечення.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– проаналізувати основні принципи побудови та тенденції розвитку сучасних програмних комплексів, а також існуючі методи й алгоритми оптимального проектування складних технічних систем (СТС);

– розробити методологію об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін і реалізувати її в єдиному інтегрованому інформаційному просторі (ЄІП) САПР «Турбоагрегат»;

– удосконалити математичну модель термогазодинамічних процесів моделювання спільної роботи системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату;

– розробити методика визначення: втрат тиску в камері за регулюючим ступенем з урахуванням режимних і конструктивних параметрів; коефіцієнта втрат і кута виходу потоку робочого тіла з решітки від величини підрізки вихідної кромки, а також оцінити вплив зміни міжвінцевого зазору і схеми подачі робочого тіла до сегментів направляючого апарату на ефективність регулюючого ступеня з використанням методів обчислювальної гідродинаміки;

– виконати оптимізацію існуючої конструкції потужної парової турбіни за різними цільовими функціями.

Об'єкт дослідження - термогазодинамічні процеси в проточній частині парової турбіни.

Предмет дослідження - комплексна оптимізація проточної частини потужної парової турбіни з урахуванням конструктивних, технологічних та функціональних обмежень.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії газодинаміки, термодинаміки та теорії систем автоматизованого проектування. Декомпозиція загальної оптимізаційної задачі реалізується у відповідності зі структурною ієрархією турбоустановки в єдиному інтегрованому інформаційному просторі. Для визначення впливу геометричних параметрів проточної частини (ПЧ) турбіни на її робочі характеристики використовуються методи математичного моделювання течії робочого тіла в проточній частині і її елементах; чисельні рішення систем алгебраїчних рівнянь здійснюється методом сполучених градієнтів Флетчера-Ривса. Тривимірне комп'ютерне моделювання використовується для дослідження тривимірної течії в камері за регулюючим ступенем, в міжвінцевому зазорі регулюючого ступеня та в міжлопатевому просторі парової турбіни. Оптимальна конструкція турбіни визначається з використанням методів теорії планування експерименту, комбінаторних алгоритмів, точок ЛПт послідовностей, а також методів динамічного програмування.

Достовірність оцінки втрат у проточній частині турбіни підтверджена шляхом багаторазового порівняння чисельних результатів розрахунків з експериментальними даними, отриманими на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП».

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше розроблено методологію об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін з урахуванням конструктивних, технологічних і функціональних обмежень;

– вперше для типової камери за регулюючим ступенем розроблена методика визначення втрат тиску при взаємному впливі конструктивних та режимних параметрів;

– дістало подальшого розвитку математична модель термогазодинамічних процесів моделювання спільної роботи системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату;

– вперше вирішена задача комплексної оптимізації проточної частини потужної парової турбіни і одержані нові дані по взаємному впливу елементів турбіни на її оптимальні характеристики, що дозволяє виявляти та оцінювати якісні та кількісні показники.

Практичне значення одержаних результатів для галузі турбінобудування полягає у розробці методології об'єктно-орієнтованої комплексної опти-

мізації проточної частини потужних парових турбін, яка реалізована в рамках розроблюваного програмного комплексу на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП» САПР «Турбоагрегат», який являє собою готовий програмний продукт, використання якого дозволяє істотно поліпшити показники ефективності нових турбоагрегатів, а також провести модернізацію існуючих. Висока ефективність, багатофункціональність і зручний інтерфейс зазначеного програмного комплексу дозволяє суттєво скоротити час проектування. Комплекс рекомендований для широкого впровадження на турбінних заводах, у конструкторських бюро та інших організаціях, які займаються проектуванням і модернізацією потужних парових турбін.

Результати дисертаційної роботи використовуються ПАТ «Турбоатом» (м. Харків) при проектуванні і модернізації ПЧ циліндрів високого тиску турбін К-330-23,5, К-220-44-2М, К-540-23,5 (акт впровадження від 18 травня 2015р.).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХП» в курсах лекцій «Основи теорії оптимального проектування турбін» і «Змінні режими парових турбін» для студентів і магістрів, які навчаються за напрямками «Енергомашинобудування» і «Теплоенергетика» (акт впровадження від 22 травня 2015р.).

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, винесені на захист, здобувачем розроблені і виконані особисто. Серед них: аналіз основних принципів побудови і тенденцій розвитку сучасних програмних комплексів, а також існуючих методів і алгоритмів оптимального проектування складних технічних систем; розробка і реалізація методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в ЄІП САПР «Турбоагрегат»; удосконалення математичної моделі термогазодинамічних процесів моделювання спільної роботи системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату; розробка методики визначення втрат тиску в камері за регулюючим ступенем з урахуванням впливу режимних та конструктивних параметрів; виконані дослідження з оцінки впливу міжвінцевого зазору на ефективність регулюючого ступеня на змінному режимі; проведена оптимізація турбіни К-310-240 за допомогою двох різних підходів і в результаті комплексної оптимізації отримана конструкція даної турбіни з поліпшеними показниками ефективності. Здобувач брав участь у розробці методики оцінки впливу підрізки вихідних кромок на ефективність турбінних решіток активного типу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: ХІХ-ХХІІІ Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2011-2015 рр.); VIII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2012 р.); Х Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2014 р.).

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи відображені в 10 наукових працях, серед яких: 4 - статті у наукових фахових виданнях України (3 входять до міжнародної наукометричної бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)), 1 у закордонному періодичному фаховому виданні, 5 - у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і 8 додатків.

Повний обсяг дисертації складає 202 сторінки, серед них 45 рисунків за текстом і 8 рисунків на 5 окремих сторінках, 25 таблиць за текстом, списку використаних джерел інформації з 111 найменувань на 13 сторінках, 8 додатків на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз основних принципів побудови і тенденцій розвитку сучасних програмних комплексів, а також існуючих методів і алгоритмів оптимального проектування складних технічних систем. Результати аналізу показали, що перспективним є створення методології комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін, заснованої на об'єктно-орієнтованому підході.

Систематизовані питання вибору сучасних математичних моделей термогазодинамічних процесів, методів пошукової оптимізації, основних підходів до врахування багатокритеріальності при проектуванні потужних парових турбін.

У **другому розділі** наведені основи методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в ЄП САПР «Турбоагрегат».

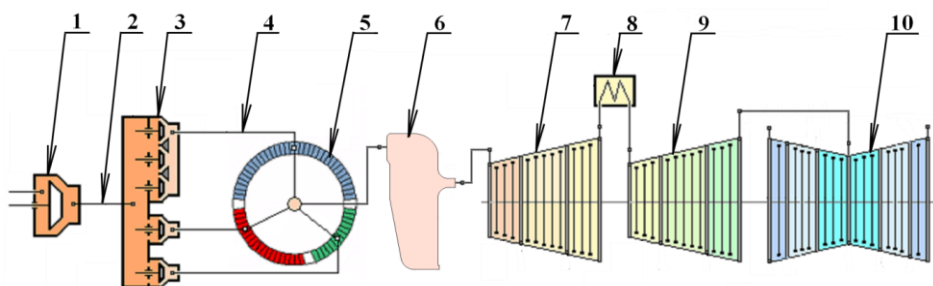


Рисунок 1 – Схема проточної частини: 1 - стопорний клапан (СПР); 2 - трубопровід стопорного клапана (СПР); 3 - коробка з регулюючими клапанами (СПР); 4 - трубопроводи сегментів (СПР); 5 - сегменти регулюючого ступеня (СПР); 6 - вирівнююча камера (ВК); 7 - циліндр високого тиску (Циліндр); 8 - пароперегрівач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

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).

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.

Кожен з оптимізаційних об'єктів турбіни має свою математичну модель

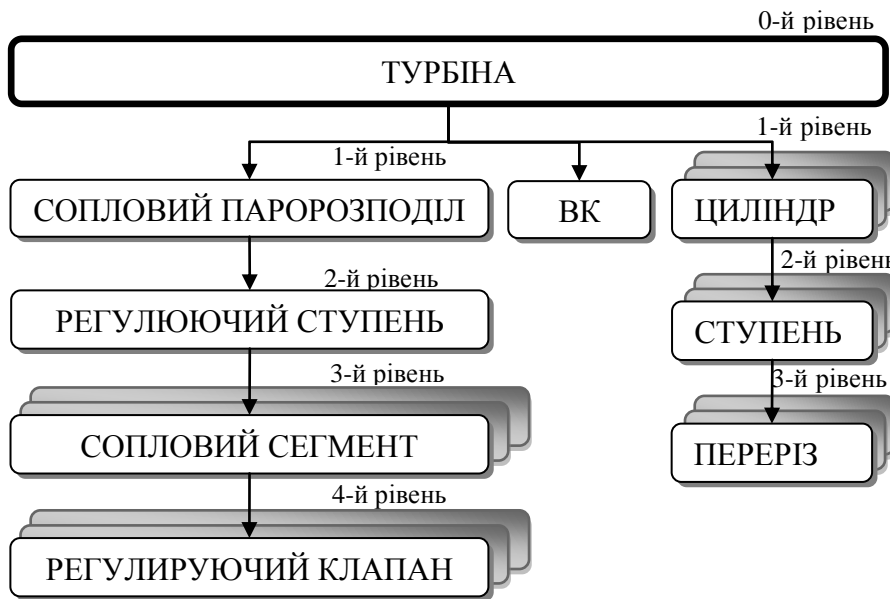


Рисунок 2 – Блок-схема інформаційної моделі парової турбіни

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 теплоперепада між ступенями, складається з наступних рівнів: «Ступень» і «Переріз». 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

термогазодинамічних процесів і системі 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 ка-

робочих решіток (якщо задана геометрія відповідних профілів) всіх циліндрів турбіни. Цільові функції даного об'єкта: ККД циліндра по потужності; діаграмні ККД циліндра по загальмованим параметрам; діаграмні ККД циліндра по статичним параметрам; потужність циліндра. Функціональні обмеження: повний тиск на вході в циліндр; об'ємна витрата на виході з циліндра; витрата на вході в циліндр; осьове зусилля на ротор циліндра.

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; ККД ступеня по статичним параметрам; ККД ступеня по загальмованим параметрам. Функціональні обмеження: максимальна напруга в крайній направляючій лопатці; напруга вигину на вхідній кромці; напруга вигину на вихідній кромці; обсяг соплових лопаток; максимальне напруження в тілі діафрагми; об'єм тіла і обода діафрагми; максимальна напруга вигину; напруження розтягу; маса робочих лопаток; частота коливань обертової лопатки.

На рівні «Переріз» оптимізуються параметри: радіуси вхідної кромки соплових і робочих профілів; кути загострення вхідний і вихідний кромки; кути відгину вихідних кромки 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 перерізі.

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

$$\vec{Y}^{opt}(\vec{x}_k^{opt}) = \max \vec{Y}(\vec{x}_k), \vec{x}_k \in X, \vec{v}(\vec{x}_k) \in V, \quad (1)$$

$$\vec{Y}(Y_1(\vec{x}_k), Y_2(\vec{x}_k), \dots, Y_n(\vec{x}_k)), N_{Xmin} \leq |X| \leq N_{Xmax} < \infty, N_{Vmin} \leq |V| \leq N_{Vmax} < \infty,$$

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 рішення задачі (1) використовують наступні оптимізаційні методи: формальне макромодельовання, ЛПт – пошук та многокритеріальну 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 рішення «своїх» завдань в різних постановках, забезпечуючи при цьому ефективно досягнення спільної мети - отримання оптимального рішення для всій турбіни в цілому.

У третьому розділі удосконалена математична модель термогазодинамічних процесів моделювання спільного розрахунку системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбіни.

Математична модель одномірної течії робочого тіла в проточній частині містить у собі:

– рівняння енергії й нерозривності:

$$H_0 = i_0^* = i_1 + C_1^2/2 = const; \quad G_1 = \rho_1 C_{1z} F_1 = const; \quad (2)$$

$$H = i_1 + C_1^2/2 - u_1 C_{1u} = i_2 + W_2^2/2 - u_2^2/2 = const; \quad G_2 = \rho_2 W_{2z} F_2 = const;$$

Математична модель течії робочого тіла через регулюючий клапан, яка необхідна для визначення витрати через клапан і параметрів пари на виході з клапану:

$$\begin{cases} G_{\text{рк}} = 0,6484 \mu_{\text{рк}} K_{\text{бнд}} F_{\text{рк}} \sqrt{P_{0\text{рк}} \rho_{0\text{рк}}}; \mu_{\text{рк}} = f(\beta_{\text{рк}}, h_{\text{рк}}/d_{\text{рк}}); P_{0\text{рк}} = P_{1\text{т_стк}}; \\ \rho_{0\text{рк}} = \rho_{1\text{т_стк}}; \beta_{\text{рк}} = P_{1\text{рк}}/P_{0\text{рк}}; \text{если } \beta_{\text{рк}} < \beta_{\text{крит}}, \text{ то } K_{\text{бнд}} = 1, \text{ иначе} \\ K_{\text{бнд}} = \sqrt{|1 - 2\beta_{\text{рк}}(1 - \beta_{\text{рк}}) - \beta_{\text{рк}}^2|}/(1 - \beta_{\text{рк}}); \rho_{1\text{рк}} = f(P_{1\text{рк}}, i_{0\text{стк}}), \end{cases} \quad (8)$$

де $G_{\text{рк}}$ – витрата пари через регулюючий клапан; $\mu_{\text{рк}}$ – коефіцієнт витрати; $K_{\text{бнд}}$ – коефіцієнт Бендемана; $F_{\text{рк}}$ – площа поперечного перерізу клапана; $P_{0\text{рк}}$, $P_{1\text{рк}}$ – тиск пари перед і за клапаном; $\rho_{0\text{рк}}$, $\rho_{1\text{рк}}$ – щільність пара перед і за клапаном; $\beta_{\text{рк}}$, $\beta_{\text{крит}}$ – поточне і критичне ставлення тисків на клапані; $h_{\text{рк}}$, $d_{\text{рк}}$ – висота підйому і діаметр клапана.

Математична модель течії робочого тіла через сопловий сегмент регулюючого ступеня, яка необхідна для визначення витрати через сегмент і параметрів робочого тіла за ним:

$$\begin{cases} G_{\text{сс}} = 0,6484 \mu_{\text{сс}} P_{2\text{рс}} F_{\text{сс}} / \sqrt{P_{0\text{сс}} / \rho_{0\text{сс}}}; \beta_{\text{сс}} = P_{2\text{рс}} / P_{0\text{сс}}; \text{якщо } \beta_{\text{сс}} < \beta_{\text{крит}}, \\ \text{то } \mu_{\text{сс}} = 1 / \beta_{\text{сс}}, \text{ інакше } \mu_{\text{сс}} = f(\beta_{\text{сс}}) \text{ (табличне значення)}, S_{0\text{сс}} = f(P_{0\text{сс}}, i_{0\text{стк}}); \\ i_{2\text{т_сс}} = f(P_{2\text{рс}}, S_{0\text{сс}}); H_{\text{т_сс}} = i_{0\text{стк}} - i_{2\text{т_сс}}; U/C_{0\text{сс}} = \omega D_{\text{ср_рс}} / (2\sqrt{2H_{\text{т_сс}}}); \\ \eta_{\text{сс}} = f(U/C_{0\text{сс}}, l_{\text{рс}}, \varepsilon, x, \dots); i_{2\text{сс}} = i_{0\text{стк}} - H_{\text{т_сс}} \eta_{\text{сс}}; H_{\text{сс}} = i_{0\text{стк}} - i_{2\text{сс}}, \end{cases} \quad (9)$$

де $G_{\text{сс}}$ – витрата пари через сегмент; $\mu_{\text{сс}}$ – коефіцієнт витрати; $F_{\text{сс}}$ – прохідна площа сегмента; $P_{0\text{сс}}$ – тиск пари перед сегментом; $P_{2\text{рс}}$ – тиск пари за регулювальної ступенем; $\rho_{0\text{сс}}$ – щільність пари перед сегментом; $\beta_{\text{сс}}$, $\beta_{\text{крит}}$ – поточне і критичне ставлення тисків на сегменті; $S_{0\text{сс}}$ – ентропія пара перед сегментом; $i_{2\text{т_сс}}$ – теоретична ентальпія за сегментом; $H_{\text{т_сс}}$ – теоретичний наявний теплоперепад сегменту; $U/C_{0\text{сс}}$ – відношення швидкостей; $D_{\text{ср_рс}}$ – середній діаметр; $\eta_{\text{сс}}$ – ККД; $l_{\text{рс}}$, ε , x – висота лопатки, ступінь парціальності, ступінь вологості; $i_{2\text{сс}}$ – дійсна ентальпія пари за сопловим сегментом; $H_{\text{сс}}$ – наявний теплоперепад сегменту.

Математична модель регулюючого ступеня:

$$G_{\text{рс}} = \sum G_{\text{сс}}; i_{2\text{рс}} = i_{0\text{стк}} - \sum (G_{\text{сс}} H_{\text{сс}}) / G_{\text{рс}}. \quad (10)$$

Використання об'єктно-орієнтованого підходу при оптимізації проточної частини парової турбіни призвело до моделювання відповідної взаємодії між елементами турбіни. Розрахунок системи соплового паророзподілу (рівняння (5) – (10)) 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.

Для визначення параметрів робочого тіла на вході і виході з циліндрів ітераційний розрахунок починається з кінця турбіни, а саме з розрахунку ЦНТ. Вихідні дані для розрахунку ЦНТ задаються з умови задачі. Використовуючи рівняння стану, отримується статичний тиск за ЦСТ

$$P_{2ЦСД(j)} = P_2 \left(i_{0ЦНД(j)}^* - c_{2ЦСД(j-1)}^2 / 2, S_{2ЦСД(j-1)} \right), \quad (11)$$

де j – номер поточної ітерації циклу керованого обчислювального процесу; $P_{0ЦНД(j)}^*$ – тиск гальмування перед ЦНТ, отримане в результаті його розрахунку; $c_{2ЦСД(j-1)}^2$ – швидкість на виході з ЦСТ; $S_{2ЦСД(j-1)}$ – ентропія за останнім ступенем ЦСТ з попередньої ітерації; $i_{0ЦНД(j)}^* = i_{2ЦСД(j-1)}^*$. При цьому

$$i_{2ЦСД(j-1)}^* = i_{0ЦСД(j-1)}^* - H_{ЦСД(j-1)} \eta_{ЦСД(j-1)}^* \quad (12)$$

де $\eta_{ЦСД(j-1)}^* = H_{ДЗЦСД(j-1)} / H_{0ЦСД(j-1)}$; $i_{0ЦСД(j-1)}^*$ залежить від наявності та типу промперегріву, а також від ентальпії та масової витрати додаткового потоку пари.

У ході ітераційного циклу останнім розраховується циліндр ЦВТ, отриманий тиск гальмування робочого тіла перед ним дорівнює тиску гальмування за регулюючим ступенем з урахуванням втрат у вирівнюючій камері. Статичний тиск пара за регулюючим ступенем ідентичний статичному тиску пари на вході у вирівнюючу камеру, який отримується за її формальною макромоделлю.

Для оцінки ефективності роботи об'єктів турбіни розраховуються інтегральні характеристики, до числа яких віднесені: сумарна потужність, термічний ККД циклу, внутрішній відносний і абсолютний ККД циклу. Спочатку визначається кількість теплоти, підведеної в циклі від спалювання палива

$$Q_{птц} = i_{0ЦВД}^* - i_{кв(1)ЦВД} + Q_{птц}, \quad (13)$$

де $i_{кв(1)ЦВД}$ – ентальпія киплячої води в місці першого відбору пари на підігрів живильної води; $Q_{птц}$ – теплота, що передається циклу в результаті всіх промперегрівів. Далі визначаємо теоретичну роботу циклу

$$L_{ц} = L_{PC} + L_{ЦВТ} + L_{ЦСТ} + L_{ЦНТ}, \quad (14)$$

де $L_{PC} = H_{0PC}$ – теоретична робота регулюючого ступеня, яка рівна її наявному теплоперепаді; $L_{ЦВТ}$, $L_{ЦСТ}$ і $L_{ЦНТ}$ – теоретичні роботи ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ, відповідно. Теоретичні роботи $L_{ЦВТ}$, $L_{ЦСТ}$ і $L_{ЦНТ}$ визначаються як суми добутків наявних теплоперепадів відсіків кожного циліндра на долі масових витрат цих відсіків. Таким чином, залежності інтегральних характеристик проточної частини потужної парової турбіни мають вид:

$$N_{ц} = N_{PC} + N_{ЦВД} + N_{ЦСД} + N_{ЦНД}; \quad \eta_{терм} = L_{ц} / Q_{птц}; \quad (15)$$

$$\eta_{абс} = N_{ц} / (Q_{птц} G_{PC}); \quad \eta_{i\text{цикла}} = N_{ц} / (L_{ц} G_{PC}),$$

де $\eta_{терм}$ – термічний ККД циклу; $\eta_{абс}$ – абсолютний ККД циклу; $\eta_{i\text{цикла}}$ – внутрішній відносний ККД циклу; N_{PC} , $N_{ЦВТ}$, $N_{ЦСТ}$, $N_{ЦНТ}$ – потужності регулюючого ступеня й відповідних циліндрів осевої турбіни; G_{PC} – розрахункове значення масової витрати через регулюючий ступінь.

Таким чином, використовуючи наведені вище залежності (11) – (12), отримуємо відсутні параметри робочого тіла для організації успішної узгодже-

ності математичних моделей багатоступневих циліндрів, для оцінки їх інтегральних характеристик. Математична модель течії пари через проточну частину турбіни – це математична модель, яка враховує спільну роботу системи СПР, вирівнюючої камери і циліндрів тиску.

У четвертому розділі наведені детальні описи чисельних досліджень впливу різних параметрів на ефективність елементів проточної частини потужної парової турбіни.

Одним із проведених досліджень є оцінка впливу міжвінцевого зазору на ефективність регулюючого ступеня на змінному режимі. В якості прототипу досліджуваного об'єкту обрано регулюючий ступінь турбіни К-325-23,5, виробництва ПАТ «Турбоатом» із його геометричними характеристиками та вихідними даними для режиму 0,54 від номінального. Також проаналізовані різні схеми підведення пари до соплових сегментів (рис. 3): схема №1 – подача пари в протилежному напрямку обертання ротора; схема №2 – подача пари в тому ж самому напрямку, що і обертається ротор; схема №3 – подача пари на протилежні сегменти. Дослідження проводилися за допомогою тривимірної обчислювальної гідродинаміки. Значення величини зазору варіювалось від 8 до 28 мм.

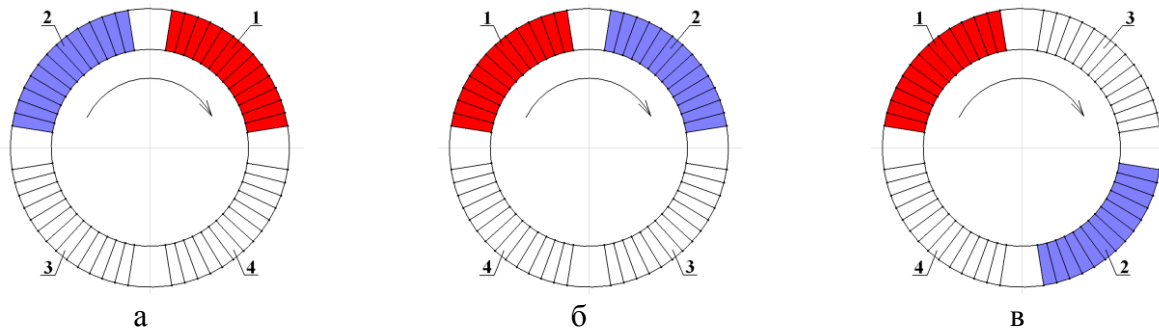


Рисунок 3 – Схеми підводу пари до сегментів РС: а – Схема №1, б – Схема №2; в – Схема №3

У результаті дослідження отримана залежність величини втрат в окремих частинах ступеню від міжвінцевого зазору та схеми подачі пари до сегментів регулюючого ступеня.

Наступним об'єктом досліджень є камера за регулюючим ступенем турбіни К-310-240, розрахунковий об'єм якої наведено на рис.4. Попередні розрахунки течії в камері за регулюючим ступенем показали наявність складної просторової течії (рис. 5). Складність отримання теоретичного вирішення такого роду завдання призводить до застосування чисельних досліджень. Для вирішення поставленого завдання використовувалися CFD-вирішувачі в комбінації

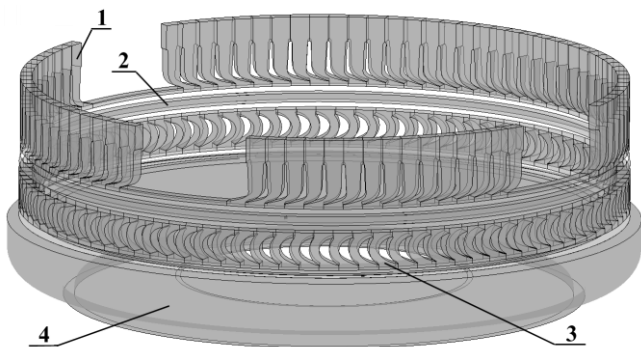


Рисунок 4 – Розрахунковий об'єм: 1 – соплова решітка; 2 – міжвінцевий зазор; 3 – робоча решітка; 4 – вирівнююча камера

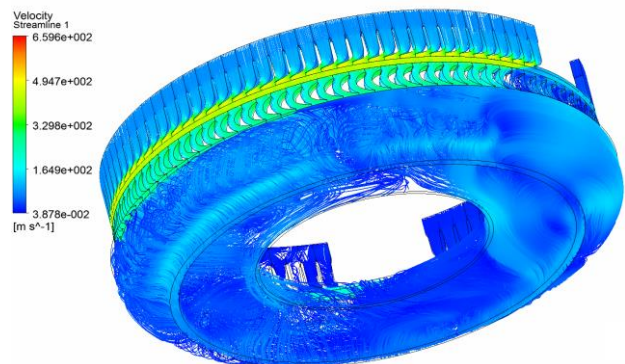


Рисунок 5 – Лінії току та величини швидкості на режимі 0,8 $G_{ном}$

із застосуванням теорії планування експерименту (план Бокса і Бенкіна). Обчислювальний експеримент спланований на підставі трьох варійованих параметрів: відносна витрата пари на вході в турбїну; відносний середній діаметр направляючого апарату ступеню тиску та відносний довжина лопатки направляючого апарату ступеню тиску. Складений план містить у собі 13 розрахунків. Для кожного з них виконано тривимірне моделювання об'єкта дослідження.

Таким чином, чисельно отримана формальна макромодель зміни втрат тиску в камері за регулюючим ступенем в залежності від конструктивних та режимних параметрів, яка потім долучається до математичної моделі комплексного розрахунку проточної частини турбїни.

У конструкціях проточної частини сучасних циліндрів високого тиску потужних парових турбін все частіше застосовуються робочі колеса з цільнофрезерованими робочими лопатками. Технологія виготовлення цільнофрезерованих лопаток, як правило, орієнтована на реалізацію підходу, заснованого на ідеї повного розміщення контурів кореневого і периферійного профілів, відповідно на кореневої і бандажної полицях. Використання такого підходу дозволяє отримувати вельми міцні і надійні конструкції як робочих коліс, так і всього ротора ЦВТ. Разом з тим, існуючі особливості вітчизняної технології виробництва цільнофрезерованої робочих лопаток та можливого зменшення кроку решітки в результаті оптимізаційних розрахунків приводить іноді до звисанням вихідних кромки пера лопатки з її кореневої та периферійної полиці. У цьому випадку частина пера лопатки (зона вихідний кромки) «заходить» на полицю сусідній лопатки робочої решітки. Для вирішення цієї задачі розроблена методика оцінки впливу підрізки вихідних кромки на ефективність решіток активного типу.

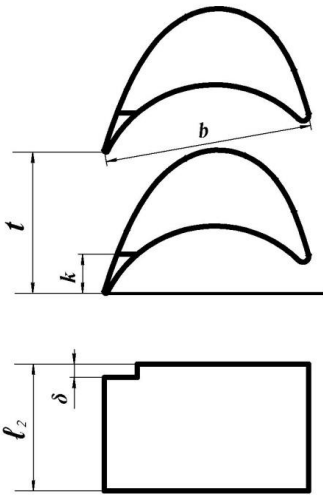


Рисунок 6 – Схема підрізки

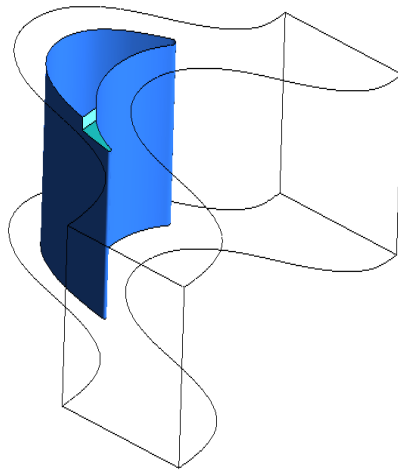


Рисунок 7 – Розрахунковий об'єкт

У дослідженні чисельний експеримент проведений на плоскій турбінній решітці з лопатками постійного перетину, профільна частина яких відповідає активному профілем 1ММК (рис. 6, 7). Використано 5-ти факторна матриця Бокса і Бенкіна таким чином, що кожен рядок створеного плану задавався значеннями варійованих параметрів (β_{2e} , P_2/P_1 , t/b , k/b і δ). Для кожної комбінації цих па-

раметрів виконувалися відповідні побудови геометрії лопаток, розрахункових обсягів та їх сіток, які потім використовувалися в якості вихідних даних для CFD розрахунків. В результаті досліджень отримані залежності визначення коефіцієнта втрат і кута виходу потоку робочого тіла з решітки від величини підрізки, що дозволяє точніше визначити ефективність решітки.

У п'ятому розділі наведені результати об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужної парової турбїни К-310-240 з сопловим паророзподіленням на номінальному режимі.

Оптимізація проводилася за двома підходами.

Перший підхід – незалежна оптимізація окремих об'єктів турбіни: системи СПР, ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ з подальшим розрахунком, враховуючи роботу ВК (рис. 8).

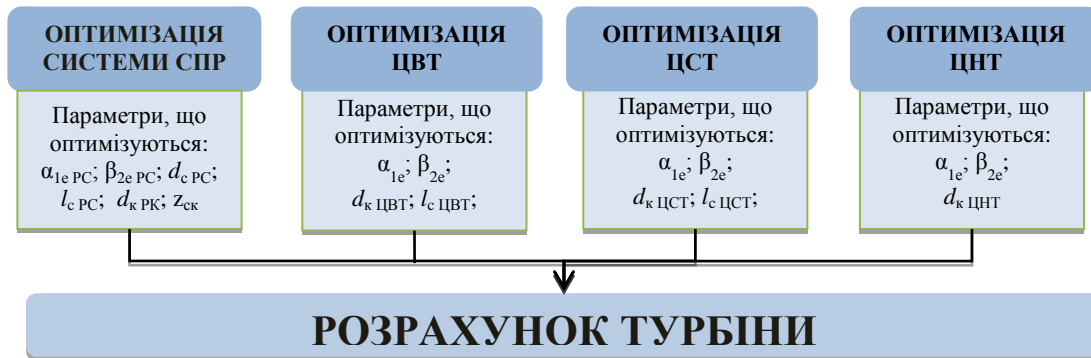


Рисунок 8 - Схема першого підходу оптимізації турбіни

Постановка оптимізаційної задачі для системи СПР. У ході оптимізації системи соплового паророзподілу оптимізувались 13 параметрів, в число яких увійшли: діаметри регулюючих клапанів ($d_{k\text{ РК}}$); кількість соплових каналів в кожному сегменті (z_{ck}); середній діаметр регулюючого ступеня ($d_{c\text{ PC}}$); довжина соплової лопатки регулюючого ступеня ($l_{c\text{ PC}}$); ефективний кут виходу з соплової решітки регулюючого ступеня ($\alpha_{1e\text{ PC}}$); ефективний кут виходу з робочої решітки регулюючого ступеня ($\beta_{2e\text{ PC}}$). Оптимізація системи СПР проводилася за трьома цільовими функціями: потужність регулюючого ступеня; ККД системи СПР; потужність регулюючого ступеня й ККД системи СПР в рівних вагових частках.

Постановка оптимізаційної задачі для ЦВТ. Оптимізація циліндра високого тиску виконувалася за наступними параметрами: ефективний кут виходу потоку з направляючого апарату всіх ступенів тиску (α_{1e}), крім першої; ефективний кут виходу потоку з робочого колеса всіх ступенів тиску (β_{2e}); кореневий діаметр і висота лопатки направляючого апарату першого ступеня тиску ($d_{k\text{ ЦВТ}}, l_{c\text{ ЦВТ}}$), відповідно. Ефективний кут направляючого апарату першого ступеня в число параметрів, що оптимізуються не увійшов, оскільки він використовується для забезпечення заданої пропускної здатності проточної частини. В якості цільових функцій обрані: потужність циліндра, ККД циліндра і в рівних вагових частках ККД і потужність циліндра.

Постановка оптимізаційної задачі для ЦСТ. При оптимізації циліндра середнього тиску використовувався той же підхід вибору оптимізованих параметрів і цільових функцій, як і для ЦВТ.

Постановка оптимізаційної задачі для ЦНТ. Оптимізація циліндра низького тиску виконувалася при варіюванні наступних параметрів: ефективний кут виходу потоку з направляючого апарату другого ступеня тиску (α_{1e}); ефективний кут виходу потоку з робочого колеса ступенів тиску (β_{2e}) перших двох ступенів тиску; кореневий діаметр направляючого апарату першого ступеня тиску ($d_{k\text{ ЦВТ}}$). Цільові функції для оптимізації ЦНТ такі ж, як і для інших циліндрів.

Таким чином, для кожного оптимізуемого об'єкту вирішувалося чотири задачі: «прототип» - розрахунок прототипу; « η » - оптимізація за критерієм якості ККД оптимізуемого об'єкту; « N » - оптимізація за критерієм якості потужність оптимізуемого об'єкту; « $\eta + N$ » - оптимізація по цільовій функції, до скла-

ду якої входить критерій якості ККД і критерій якості потужність оптимізуемого об'єкта в рівних вагових частках.

В ході оптимізації проточної частини парової турбіни К-310-240 виявлено, що при розрахунку загальної системи рівнянь можуть виникати варіанти, в яких пропускна здатність турбіни не відповідає заданій, незважаючи на те, що при окремій оптимізації об'єктів турбіни витримувалися P_0^* , P_2 , G . Для забезпечення пропуску заданої витрати коректуються діаметр та висота соплової лопатки регулюючого ступеня. В результаті чого отримані інтегральні характеристики турбіни, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Інтегральні характеристики турбіни після оптимізації

Параметри	Результати розрахунків			
	прототип	η	N	$\eta+N$
Абсолютний ККД циклу η_a	0,444	0,4502	0,4512	0,4505
Приріст абсолютного ККД циклу, $\Delta\eta_a$, %	0	0,62	0,72	0,65
Потужність турбіни N , МВт	330,577	334,271	335,651	335,215
Приріст потужності, ΔN , МВт	0	3,694	5,074	4,638

Приріст інтегральних характеристик турбіни, отриманий за рахунок: підвищення ефективності соплової та робочої решіток регулюючого ступеня; зменшення дросельних втрат на регулюючих клапанах; зміни розподілу тепловирпаду між ступенями ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ; зменшення прикореневих і радіальних перетікань в решітках ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ; збільшення ефективності соплових і робочих решіток ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ.

Другий підхід – комплексна оптимізація проточної частини турбіни (рис. 9).

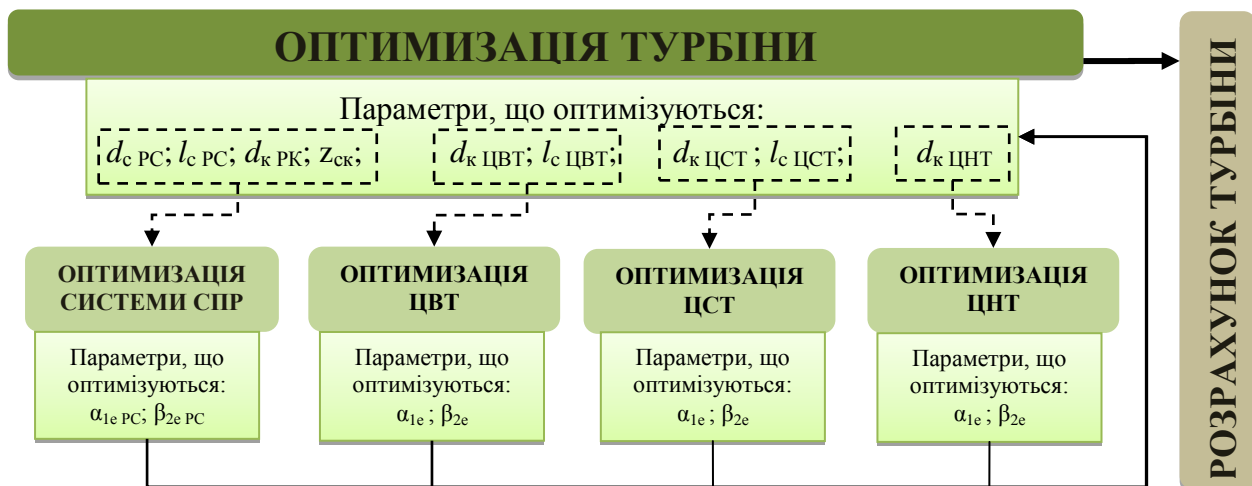


Рисунок 9 – Схема другого підходу оптимізації турбіни

На першому рівні «Турбіна» оптимізуються: діаметри регулюючих клапанів ($d_{k PK}$); кількість соплових каналів в кожному сегменті (z_{CK}); середній діаметр регулюючого ступеня ($d_c PC$); довжина соплової лопатки регулюючої ступені ($l_c PC$); кореневий діаметр направляючого апарату першого ступеня тиску ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ ($d_k ЦВТ, d_k ЦСТ, d_k ЦНТ$); висота лопатки направляючого апарату першого ступеня тиску ЦВТ і ЦСТ ($l_c ЦВТ, l_c ЦСТ$).

На другому рівні «СПР» і «Циліндр» оптимізується: ефективні кути виходу з усіх соплових і робочих решіток (рис. 9) за винятком ефективних кутів

виходу із соплових решіток перших ступенів циліндрів, що забезпечують пропускну спроможність циліндрів.

Для першого рівня оптимізації обрані наступні функції цілі: абсолютний ККД, потужність турбіни і в рівних вагових частках абсолютний ККД і потужність турбіни. На другому рівні «Циліндр» оптимізації для ЦВД, ЦСД і ЦНД оптимізація здійснюється по тих же функціях цілі, як і в першому підході. Оптимізація на рівні «СПР» проводилася за трьома цільовими функціями: ККД регулюючого ступеня; потужність регулюючого ступеня; ККД і потужність регулюючого ступеня в рівних вагових частках. В результаті чого отримані інтегральні характеристики турбіни, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Інтегральні характеристики турбіни після комплексної оптимізації

Параметри	Результати розрахунків			
	прототип	η	N	$\eta+N$
Абсолютний ККД циклу η_a	0,444	0,4525	0,4521	0,4524
Приріст абсолютного ККД циклу $\Delta\eta_a$, %	0	0,84	0,8	0,83
Потужність турбіни N , МВт	330,577	336,430	336,956	336,756
Приріст потужності ΔN , МВт	0	5,853	6,379	6,179

Проведені дослідження показали, що проточну частину потужної парової турбіни доцільно оптимізувати по двокритеріальній цільовій функції. В таблиці 3 наведено порівняльний аналіз інтегральних характеристик за двома підходами.

Таблиця 3 – Порівняння інтегральних характеристик турбіни К-310-240, отриманих за допомогою двох підходів

Параметр	Результати розрахунків		
	прототип	1-й підхід	2-й підхід
Абсолютний ККД циклу η_a	0,4441	0,4505	0,4524
Приріст абсолютного ККД циклу $\Delta\eta_a$, %	0	0,65	0,83
Потужність турбіни N , МВт	330,577	335,215	336,756
Приріст потужності ΔN , МВт	0	4,638	6,179

Виходячи з наведених даних (табл. 3), визначено, що другий підхід, заснований на розробленій методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини парових турбін реалізованої в САПР «Турбоагрегат», такого складного об'єкта як потужна парова турбіна, найбільш ефективний. Такий підхід дає приріст потужності турбіни в порівнянні з прототипом на 1,87% і приріст абсолютного ККД циклу на 0,83%, що відповідно сприяє економії паливних ресурсів. Порівняльний аналіз значень ККД об'єктів турбіни, отриманих різними підходами, по відношенню до прототипу представлено на рис. 10, а приріст потужності об'єктів турбіни – на рис. 11. З рис. 10 видно, що використання при оптимізації турбіни першого підходу призводить до значного збільшення значення ККД регулюючого ступеня. Незважаючи на це абсолютний ККД турбіни вище при використанні другого підходу оптимізації на 0,18% по відношенню до першого підходу.

Істотний приріст потужності турбіни, при використанні другого підходу в порівнянні з першим, в основному отриманий за рахунок поліпшених показників ЦВТ. Потужність ЦВТ, отримана по другому підходу перевищує майже в два рази теж значення, отримане по першому підходу.

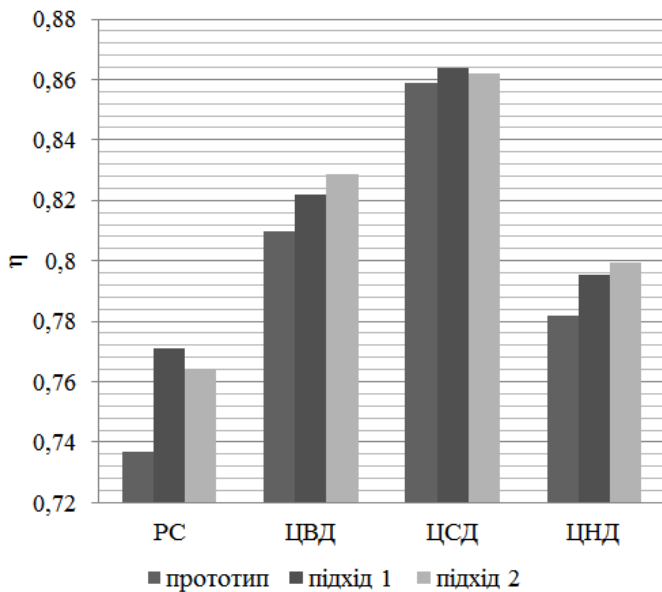


Рисунок 10 – ККД елементів турбіни в залежності від виду розрахунку

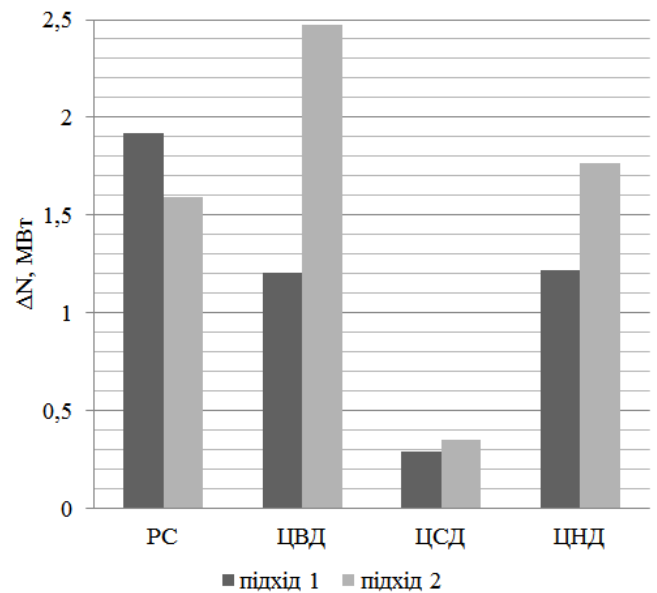


Рисунок 11 – Приріст потужності елементів турбіни щодо прототипу по різних підходах

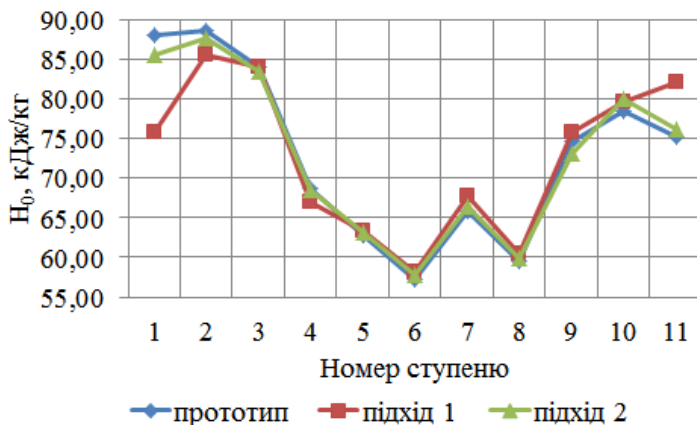


Рисунок 12 – Порівняння розподілу теплоперепаду ЦСТ після оптимізації за критерієм якості ККД в залежності від підходу оптимізації

Таким чином, проведені дослідження показали переваги застосування другого підходу до оптимізації потужних парових турбін, які полягають у підвищенні ефективності турбіни за рахунок обліку взаємного впливу об'єктів турбіни при комплексній оптимізації. Цей висновок підтверджується зміною теплоперепаду в основному першої і останньої ступенів ЦСТ при різних підходах оптимізації (рис. 12).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки та обґрунтування методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін, яка основана на спільному розрахунку термогазодинамічних процесів в елементах проточної частини парової турбіни.

У роботі отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз основних принципів побудови і тенденцій розвитку сучасних програмних комплексів, а також існуючих методів і алгоритмів оптимального проектування складних технічних систем. Результати аналізу показа-

ли доцільність створення методології комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін, заснованої на об'єктно-орієнтованому підході.

2. Розроблена і реалізована методологія об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в ЄПП САПР «Турбоагрегат». Запропонована методологія багаторівневої та багатокритеріальної оптимізації парової турбіни, що дозволяє представити задачу оптимального проектування, як єдиний комплекс ієрархічно структурованих підсистем оптимізації, які забезпечують на кожному рівні ієрархії рішення «своїх» завдань в різних постановках, забезпечуючи при цьому ефективне досягнення спільної мети – отримання оптимального рішення для всієї турбіни в цілому.

3. Удосконалено математичну модель газодинамічних процесів моделювання спільної роботи системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату.

4. Методами тривимірної обчислювальної гідродинаміки одержано залежність втрат тиску в вирівнюючій камері від конструктивних та режимних параметрів за допомогою регресійного аналізу. Аналогічним чином отримані залежності визначення коефіцієнта втрат і кута виходу потоку робочого тіла з решітки від величини підрізки, а також проведена оцінка впливу зміни міжвінцевого зазору і схеми подачі робочого тіла до сегментів направляючого апарату на ефективність регулюючого ступеня.

5. Розрахунковим шляхом виявлено та оцінено взаємний вплив об'єктів турбіни на її оптимальні характеристики. Запропонований об'єктно-орієнтований підхід для комплексної багатокритеріальної оптимізації проточної частини потужної парової турбіни, реалізований у ЄПП САПР «Турбоагрегат», показав свою ефективність на прикладі оптимізації турбіни К-310-240 в порівнянні з оптимізаційним підходом, заснованим на роздільному визначенні оптимальних геометричних параметрів об'єктів турбіни. Комплексна оптимізація турбіни К-310-240 призвела до приросту потужності турбіни на 6,179 МВт, а приріст абсолютного ККД циклу склав 0,83% в порівнянні з прототипом.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в САПР «Турбоагрегат» НТУ «ХПІ», використовуються в процесі проектування нових і модернізації існуючих потужних парових турбін виробництва ПАТ «Турбоатом» (м. Харків) і в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Авдеева Е. П. Создание методики оценки влияния подрезки выходных кромок на эффективность турбинных решеток активного типа [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, Е. П. Авдеева // Проблемы машиностроения. – Харьков: ИМаш им. А.М. Подгорного. – 2010. – Т. 13. № 6. – С. 9 – 16.

Здобувачем побудовані скінченно-об'ємні моделі та проведені усі розрахунки параметрів течії крізь міжлопатевий канал за наявності підрізки вихідних кромок решіток активного типу.

2. Авдеева Е.П. Оценка влияния межвенцевого зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №7. – С. 49 – 53.

За допомогою CFD–програми здобувач виконав розрахункові дослідження впливу величини міжвінцевого зазору на ефективність регулюючого ступеня на змінному режимі.

3. Авдеева Е.П. Численное исследование эффективности уравнительной камеры за регулирующей степенью на разных режимах работы [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014.– №1. – С. 6 – 11.

Здобувачем особисто сформульована постановка задачі та розроблена програма дослідження щодо оцінки ефективності камери за регулюючим ступенем на різних режимах роботи.

4. Авдеева Е.П. Методология объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточных частей мощных паровых турбин с учетом переменного режима работы [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014.– №13. – С. 5 – 10.

Здобувачем розроблена та описана методологія об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбіни.

5. Авдеева Е.П. Численное исследование влияния режимных и конструктивных параметров на эффективность уравнительной камеры мощной паровой турбины [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева // Тяжелое машиностроение. – Москва. – 2014. – №7. – С. 25 – 29.

Здобувачем описана методика чисельних досліджень впливу режимних та конструктивних параметрів на ефективність вирівнюючої камери. Виконані розрахунки та проаналізовані результати.

6. Авдеева О.П. Влияние подрезки выходных кромок на эффективность турбинных решеток [Текст] / А.В. Бойко, О.П. Усатый, О.П. Авдеева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – С. 218.

Здобувачем розроблено програмну процедуру визначення впливу подрезки вихідних кромок на ефективність турбінних решіток.

7. Авдеева О.П. Влияние межвинцевого зазора на эффективность регулиющего ступеня на частковом режиме работы [Текст] / А.В. Бойко, Ю.М. Говорущенко, О.П. Усатый, О.П. Авдеева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХ Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 234.

Здобувачем виконано обробку даних чисельних досліджень та їх порівняння з теоретичними результатами.

8. Авдеева О.П. Тривимірне моделювання в дослідженні камери за регулюючим ступенем на різних режимах роботи [Текст] / А.В. Бойко, О.П. Усатый, О.П. Авдеева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 267.

Здобувачем проведені тривимірні розрахунки течії робочого тіла в камері за регулюючим ступенем при змінному режимі роботи.

9. Авдеева О.П. Впровадження методології оптимізації турбіни в інтегрований інформаційний простір САПР «Турбоагрегат» [Текст] / А.В. Бойко, О.П. Усатый, О.П. Авдеева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІІ Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – С. 257.

Здобувачем виконано інтегрування розробленої методології до САПР «Турбоагрегат», що розробляється на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ».

10. Авдєєва О.П. Тривимірне моделювання в дослідженні впливу режимних та конструктивних параметрів на ефективність камери за регулюючим ступенем потужної парової турбіни [Текст] / А.В.Бойко, О.П.Усатий, О.П.Авдєєва // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 244.

Здобувачем виконана обробка даних впливу конструктивних та режимних параметрів на ефективність вирівнюючої камери, отриманих за допомогою тривимірного моделювання.

АНОТАЦІЇ

Авдєєва О.П. Об'єктно-орієнтована комплексна оптимізація проточної частини потужних парових турбін. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена розробці методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін, яка ґрунтується на спільному розрахунку термогазодинамічних процесів в елементах проточної частини парової турбіни.

У зв'язку з постійним зростанням попиту суспільства на електроенергію стає актуальним проектування нових та модернізація існуючих парових турбін. Для підвищення їх ефективності розроблена методологія об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін. При реалізації цієї методології було вдосконалено математичну модель термогазодинамічних процесів моделювання спільної роботи системи соплового паророзподілу, вирівнюючої камери та багатоциліндрової проточної частини турбоагрегату, розроблені методики визначення: втрат тиску в камері за регулюючим ступенем з урахуванням режимних і конструктивних параметрів; коефіцієнта втрат і кута виходу потоку робочого тіла з решітки від величини підрізки вихідної кромки, а також оцінено вплив зміни міжвінцевого зазору і схеми подачі робочого тіла до сегментів направляючого апарату на ефективність регулюючого ступеня та включено до єдиного інтегрованого інформаційного простору САПР «Турбоагрегат». За допомогою запропонованої методології виконана оптимізація турбіни К-310-240, її потужність збільшена на 6,18 МВт, а абсолютний ККД циклу – на 0,83%.

Ключові слова: парова турбіна, оптимальне проектування, об'єктно-орієнтований підхід, макромоделювання, втрати енергії, CFD моделювання.

Авдєєва Е.П. Объектно-ориентированная комплексная оптимизация проточной части мощной паровой турбины. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена разработке методологии объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточной части мощных паровых

турбин, которая основана на совместном расчете термогазодинамических процессов в элементах проточной части паровой турбины.

На основании современной тенденции постоянного роста спроса общества на электроэнергию становится актуальным проектирование новых и модернизация существующих паровых турбин. Разработана методология объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточной части мощных паровых турбин. При реализации этой методологии была усовершенствована математическая модель термогазодинамических процессов моделирования совместной работы системы соплового парораспределения, уравнивающей камеры и многоцилиндровой проточной части турбоагрегата, разработаны методики определения: потерь давления в камере за регулирующей степенью с учетом режимных и конструктивных параметров; коэффициента потерь и угла выхода потока рабочего тела с решетки от величины подрезки выходной кромки, а также оценено влияние изменения межвенцового зазора и схемы подачи рабочего тела к сегментам направляющего аппарата на эффективность регулирующей ступени и включено в единое интегрированное информационное пространство САПР «Турбоагрегат».

С помощью предложенной методологии выполнена оптимизация проточной части турбины К-310-240 с помощью двух подходов. Первый подход – оптимизация турбины с отдельным определением оптимальных геометрических параметров её объектов, а второй подход – комплексная оптимизация всей турбины. Результаты проведенных расчетов, показали эффективность второго подхода при оптимизации проточной части мощной паровой турбины по сравнению с первым. Использование предложенной методологии позволило увеличить мощность турбины К-310-240 на 6,179 МВт, а абсолютный КПД цикла – на 0,83%.

Ключевые слова: паровая турбина, оптимальное проектирование, объектно-ориентированный подход, макро моделирование, потери энергии, CFD моделирование.

Avdieieva O.P. The object-oriented complex optimization of flow path of powerful steam turbines. Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of Sciences in Technique for speciality 05.05.16 – turbomachine and turbine-installations. – National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, 2015.

This thesis deals with the development of object-oriented methodology for complex optimization of the flow path of powerful steam turbines based on joint calculations of the thermal and gasdynamic processes in the elements of the steam turbine's flow path.

Due to the constant growth of the consumption of the electricity by society, it is necessary to design new one or modernize the existing steam turbines. To improve the efficiency of steam turbines the methodology of object-oriented complex optimization of the flow path of powerful steam turbines is developed. The mathematical model of the thermal and gasdynamic processes for combined calculating of the nozzle steam distribution, equalizing chamber, and multicylinder turbine flow path is improved. In this work the methods for determining pressure losses in the regulating chamber with respect to operational and design parameters are developed. The dependence of loss factor and the blade outflow angle on the size of the original trimmed edge is obtained. It is also assessed the impact of changes of axial gap downstream stator and the fluid supply circuit to the nozzle segments on the stage ef-

iciency. This model is included to the integrated information space CAD "Turboagregat". Developed methodology is implemented while optimization of the K-310-240 turbine. As result, it power increases by 6,179 MW, and the absolute efficiency of the cycle - by 0,83%.

Keywords: steam turbine, optimal design, object-oriented approach, macromodelling, loss of energy, CFD modeling.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'E. Hoff', located in the upper right quadrant of the page.

