

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

УСАТИЙ ОЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ



УДК 621.135.001.26

**ВСЕРЕЖИМНА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА
ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ТУРБІН В ІНТЕГРОВАНОМУ
ІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРИ**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Бойко Анатолій Володимирович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, 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, м. Харків, завідувач відділу оптимізації
процесів і конструкцій турбомашин

доктор технічних наук, професор
Єпіфанов Сергій Валерійович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м.
Харків, завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів

доктор технічних наук, професор
Черноусенко Ольга Юріївна,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут», м. Київ, професор кафедри
теплоенергетичних установок теплових та атомних
електричних станцій

Захист відбудеться «23» квітня 2013 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий «___» березня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні накопичено величезний досвід в області оптимального проектування турбоагрегатів, створені зразки проточних частин (ПЧ) з достатньо високими техніко-економічними показниками. Подальші перспективи розвитку турбінобудувальної галузі пов'язані із використанням потужної обчислювальної техніки поряд з новими методами й підходами, реалізованими в рамках сучасних систем автоматизованого проектування (САПР).

При цьому, досвід експлуатації більшості турбін показує, що дійсні режими їх роботи з ряду причин відхиляються від номінального режиму, у результаті чого реальні показники їх ефективності мають більш низький рівень у порівнянні із проектними. Урахування режимів експлуатації в процесі проектування дозволяє виявити сховані резерви й одержати конструкції ПЧ із більш високими показниками якості.

Існуючі методи, методики та алгоритми оптимізації ПЧ направлені на вирішення певних проблем в області турбінобудування. Разом з тим, подальше удосконалення турбоагрегатів потребує урахування режимів експлуатації та взаємного впливу параметрів теплової схеми (ТС) установки і проточної частини турбіни. Недостатність інформаційної та системної погодженості програмного забезпечення вимагає додаткового втручання проектувальників у процес інформаційного обміну, що призводить до підвищення вартості проектування і появи помилок. Існуючі блочно-ієрархічні методи та алгоритми оптимізації, як правило прив'язані до конкретного об'єкта оптимізації і його структурної ієрархії, що обмежує область їх використання. Перспективними є задачі визначення оптимального положення керуючих елементів залежно від режиму експлуатації, наприклад, соплових лопаток (для конструкції ПЧ із поворотними сопловими лопатками всіх ступенів турбоагрегату) і запірних елементів регулюючих клапанів (ЗЕРК) системи соплового паророзподілу

Сучасна методологія оптимального проектування повинна базуватися на об'єктно-орієнтованому підході та перевагах єдиного інтегрованого інформаційного простору (ЄІП), що забезпечить створення на базі САПР потужного інструмента подальшого вдосконалювання проточної частини осьових турбомашин. Розробка такої методології є особливо актуальною проблемою для енергетичного сектора економіки України, що визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ». Результати, що одержані в процесі виконання дисертації, є складовою частиною комплексу досліджень, проведених в рамках держбюджетних НДР МОНмолодьспорту України: «Теоретичні фундаментальні дослідження в області гідродинаміки й теплообміну в парових і газових турбінах» (ДР №0106U001480, 2006-2008 р.р.), «Аеродинамічне вдосконалювання ступенів турбін на основі розрахункових і експериментальних досліджень структури потоку в проточній частині» (ДР №0106U001479, 2006-2008 р.р.), «Фундаментальні наукові дослідження проблем оптимізації термогазодинамічних процесів турбомашин в інтегрованому інформаційному просторі» (ДР №0109U002389, 2009-2011 р.р.), та госпдоговірних робіт з ВАТ «Турбоатом» (м.Харків): «Багатопараметрична оптимізація конструктивних та термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВТ турбіни К-220-44-2М АЕС «Ловііса» (Фінляндія) при виконанні модернізації», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних та термогазодинамічних параметрів проточної частини турбіни (ЦВТ) К-330-23,5 виробництва ВАТ «Турбоатом», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних та термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВТ турбіни К-540-23,5 при виконанні модернізації», де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка універсальної об'єктно-орієнтованої методології розв'язання багатопараметричних і багатокритеріальних задач оптимального проектування ПЧ осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації, а

також конструктивних, технологічних і функціональних обмежень та створення на її основі комплексу прикладного програмного забезпечення.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- здійснити аналіз основних принципів побудови й тенденцій розвитку сучасних програмно-інструментальних комплексів, а також існуючих методів і алгоритмів розв'язання задач оптимального проектування складних технічних систем;
- розробити нові й удосконалити існуючі математичні моделі термогазодинамічних процесів в проточній частині осьових турбін, теплових схем ГТУ і їхніх елементів. Інтегрувати розроблений комплекс математичних моделей у ЄШП САПР «Турбоагрегат»;
- розробити й програмно реалізувати методологію універсального структурно-топологічного опису інформаційних моделей складних технічних об'єктів енергетики (СТОЕ) у ЄШП, а також універсальні методи взаємодії алгоритмічної частини математичних моделей об'єктів проектування з відповідними їм інформаційними моделями в ЄШП;
- розробити й програмно реалізувати універсальну об'єктно-орієнтовану й інваріантну, стосовно структурної топології інформаційної моделі ПЧ, методологію рекурсивного розв'язання багатопараметричних і багатокритеріальних задач оптимального проектування ПЧ осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень;
- виконати оптимізацію існуючих конструкцій проточної частини осьових турбін з урахуванням реальних режимів експлуатації.

Об'єкт дослідження – термогазодинамічні процеси в проточній частині парових і газових турбін, теплових схемах ГТУ та її елементах.

Предмет дослідження – геометричні і термогазодинамічні характеристики проточної частини осьових турбін і ГТУ на базі багатопараметричної й багатокритеріальної оптимізації з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії газодинаміки й термодинаміки, теорії систем, теорії автоматизованого проектування, а також теорії розробки мов програмування. Декомпозиція загальної оптимізаційної задачі здійснюється у відповідності зі структурною ієрархією турбоустановки в ЄШП. Для визначення впливу геометричних параметрів ПЧ на її робочі характеристики використовуються методи математичного моделювання течії в ПЧ та її елементах; чисельні розв'язання систем алгебраїчних рівнянь здійснюються методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівса. Для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь застосовується метод Рунге-Кутта третього порядку. Оптимальна конструкція ПЧ визначалася з використанням методів теорії планування експерименту, кубічної сплайн-інтерполяції, комбінаторних алгоритмів, точок КПт послідовностей, методу роя частинок, а також методів динамічного програмування. Розроблені методи формування й керування інформаційними й математичними моделями СТОЕ в ЄШП базуються на методах теорії систем, вимогах міжнародного стандарту ISO 11179 і застосуванні реляційних СУБД і ODBC.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено універсальну, об'єктно-орієнтовану методологію рекурсивного розв'язання багаторівневих, багатокритеріальних і багатопараметричних задач оптимального проектування проточної частини осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень;
- вперше поставлено й, на основі об'єктно-орієнтованого підходу, рекурсивно розв'язано багаторівневу задачу визначення оптимальних параметрів проточної частини осьових турбін. Здійснено аналіз термогазодинамічних процесів, а також причин зменшення втрат і підвищення ефективності оптимальної проточної частини;
- вперше розроблена математична модель течії робочого тіла в осьовій турбіні, що включає рівняння соплового паророзподілу в оберненій постановці й рівняння термогазодинамічних процесів в багатоступеневій проточній частині всіх циліндрів турбіни;

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

- дістали подальшого розвитку математичні моделі термодинамічних процесів теплових схем для газотурбінних установок зі змінними навантаженнями;

- вперше з використанням переваг єдиного інтегрованого інформаційного простору забезпечено інформаційну й системну погодженість комплексу розроблених та удосконалених математичних моделей течії робочого тіла в багатоступеневій проточній частині та елементах теплових схем газотурбінних установок;

- вперше, відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 11179, розроблено універсальний клас метаданих для опису елементів єдиного інтегрованого інформаційного простору. Створені інформаційні моделі об'єктів проектування: проточної частини осьової турбіни, соплового паророзподілу, камери згоряння, осьового компресора, регенератора, газотурбінної установки та інш.;

- вперше із застосуванням розроблених і апробованих універсальних рекурсивних методів розв'язання багаторівневих, багатопараметричних і багатокритеріальних задач оптимального проектування ПЧ осьових турбін, реалізованих в єдиному інтегрованому програмному комплексі, розв'язані задачі з визначення оптимальних значень:

- конструктивних і термогазодинамічних параметрів багатоступеневих парових турбін, газових турбін газотурбінних установок, а також утилізаційних турбодетандерних установок, що працюють на природному газі;

- положень запірних елементів регулюючих клапанів для заданої масової витрати пари з урахуванням оцінки впливу їхнього розташування на ефективність проточної частини всієї турбіни й парового циклу;

- ефективних кутів виходу потоку із соплових апаратів залежно від заданих значень масової витрати природного газу для осьових турбодетандерів з поворотними сопловими лопатками всіх ступенів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методологія оптимального проектування ПЧ осьових турбін з урахуванням імовірних і реальних режимів експлуатації реалізована як готовий програмний продукт, використання якого дозволяє істотно поліпшити показники ефективності нових турбоагрегатів, а також провести модернізацію існуючих. Завдяки високій ефективності, багатофункціональності й зручному інтерфейсу, зазначений програмний комплекс рекомендований для широкого впровадження на турбінних заводах, у конструкторських бюро й інших організаціях, які займаються проектуванням і модернізацією проточної частини осьових турбін. Результати дисертаційної роботи використовуються ВАТ «Турбоатом» (м. Харків) при проектуванні й модернізації ПЧ циліндрів високого тиску турбін К-330-23,5, К-220-44-2М, К-540-23,5 (акт впровадження від 12 квітня 2012р.), ПАТ «Турбогаз» (м. Харків) у процесі проектування нових утилізаційних турбодетандерних установок (акт впровадження від 18 квітня 2012р.).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» у курсах лекцій «Основи теорії оптимального проектування турбін» і «Змінні режими парових турбін» для студентів і магістрів, які навчаються по напрямках «Енергомашинобудування» і «Теплофізика» (акт впровадження від 11 квітня 2012р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації, які винесені на захист, здобувачем розроблені і виконані особисто. Серед них:

- аналіз основних принципів побудови й тенденцій розвитку сучасних програмно-інструментальних комплексів автоматизації розв'язання задач оптимального проектування проточних частин осьових турбін та інших складних технічних систем, а також методів та алгоритмів оптимізації;

- розроблено універсальну об'єктно-орієнтовану методологію й створено програмний комплекс для рекурсивного розв'язання багаторівневих, багатокритеріальних і багатопараметричних задач оптимального проектування проточної частини осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень;

- рекурсивно розв'язано багаторівневу задачу визначення оптимальних параметрів проточної частини осьових турбін. Здійснено аналіз термогазодинамічних процесів, а також причин зменшення втрат і підвищення ефективності оптимальної проточної частини;

- розроблено математичну модель течії робочого тіла в осьовій турбіні, що включає рівняння соплового паророзподілу в оберненій постановці й рівняння термогазодинамічних процесів в багатоступеневій проточній частині всіх циліндрів турбіни;

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

- адаптовано й інтегровано в єдиний інтегрований інформаційний простір підсистему побудови й розрахунку теплових схем ГТУ з урахуванням змінних навантажень;

- відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 11179 розроблено універсальний клас метаданих для опису елементів єдиного інтегрованого інформаційного простору (проточної частини осьової турбіни, соплового паророзподілу, камери згоряння, осьового компресора, регенератора, газотурбінної установки та інш.);

- розроблено комбінаторний метод і розв'язано задачу визначення оптимальних положень запірних елементів регулюючих клапанів для заданої масової витрати робочого тіла з урахуванням оцінки впливу їхнього розташування на ефективність проточної частини всієї турбіни й парового циклу;

- виконано оптимізацію конструкції турбодетандера з поворотними сопловими лопатками та модернізацію газотурбінної установки ГТ-750-6М, що встановлена на Шебелинській компресорній станції під реальні експлуатаційні навантаження протягом календарного року.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи й результати досліджень доповідалися й обговорювалися на: XV-XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012); Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження України й шляхи їхнього рішення» (Харків, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012); Всеросійській міжвузівській науково-технічній конференції «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (Москва, 2009); 8th European Turbomachinery Conference (Австрія, Грац, 2009); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології в газотурбобудуванні» (Алушта, 2010).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 24 наукових працях, з них: 22 статті у наукових фахових виданнях України, 2 тези доповідей.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, висновків, списку літератури, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 417 сторінок, з них: 94 рисунки за текстом; 41 рисунок на 31 окремій сторінці; 37 таблиць за текстом; 40 таблиць на 24 окремих сторінках; список використаних джерел з 164 найменувань на 18 сторінках; 7 додатків на 43 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність та доцільність теми дисертації, сформульовані її мета і задачі, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, наукова новизна і практична цінність роботи.

У першому розділі наведений аналіз джерел наукових публікацій, присвячених питанням математичного моделювання течії робочого тіла в ПЧ осьових турбін, постановкам і сучасним методам розв'язання задач оптимального проектування складних технічних систем, у тому числі й ПЧ осьових турбін. Проведено класифікацію існуючих математичних моделей термогазодинамічних процесів в проточній частині осьових турбін та її елементах, а також проаналізовані рекомендації, що стосуються їх застосування в задачах оптимального синтезу. Проаналізовані сучасні методи пошукової оптимізації, питання, пов'язані з багатокритеріальністю й мультимодальністю цільових функцій, а також способи урахування режимів експлуатації при проектуванні ПЧ осьових турбін. Відзначено певні обмеження, які притаманні існуючим методам оптимізації ПЧ, а також показана необхідність і визначені основні цілі й задачі створення перспективної методології розв'язання багаторівневих, багатокритеріальних, багатопараметричних задач оптимізації складних технічних систем з урахуванням режимів експлуатації, а також конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

У другому розділі наведений комплекс розроблених і вдосконалених математичних моделей течії робочого тіла в ПЧ осьових турбін, а також заходи, спрямовані на поліпшення моделей для одержання стійких, надійних і точних рішень.

Математична модель одномірної течії в багатоступеневій проточній частині осової турбіни містить у собі рівняння енергії й нерозривності, процесу й стану, кінематичні й замикаючі співвідношення. Алгоритми, що реалізують математичну модель, дозволяють виконувати теплові розрахунки як одиночного осового ступеня, так і багатоступеневої ПЧ у наступних постановках: визначення витрати G для тиску й ентальпії гальмування (P_0^*, i_0^*) , що задані на вході в ступень; визначення тиску P_0^* при відомих витраті й ентальпії (G, i_0^*) ; визначення кутів виходу із соплових апаратів α_1 для одночасно заданих $(P_0^*, i_0^* \text{ і } G)$. Наприклад, для прямої задачі визначення витрати G через осовий ступень, потрібно вирішити систему трьох рівнянь:

$$G_1 = \rho_1 \left(P_1 \left(i_0^* - \frac{c_1^2}{2\varphi^2}, S_0^*(P_0^*, i_0^*) \right), i_0^* - \frac{c_1^2}{2} \right) c_1 F_1 \sin \alpha_1; \quad (1)$$

$$G_2 = \rho_2 \left(P_2 \left(H + \frac{1}{2} \left(u^2 - \frac{w_2^2}{\psi^2} \right), S_1(P_1, i_1) \right), H + \frac{u^2 - w_2^2}{2} \right) w_2 F_2 \sin \beta_2; \quad (2)$$

$$P_2 \left(H + \frac{1}{2} \left(u^2 - \frac{w_2^2}{\psi^2} \right), S_1 \right) = P_{2зад}, \quad (3)$$

де ρ , P , i , S – параметри стану робочого тіла в розрахункових перетинах; H – ротальпія; u – окружна швидкість; c_1 – швидкість виходу з соплової решітки; w_2 – швидкість виходу з робочого колеса; α_1 , β_2 – кути виходу з соплової й робочої решіток в абсолютному і відносному русі; F_1 , F_2 – площі соплової й робочої решіток. В системі рівнянь (1)-(3) невідомими є G , c_1 і w_2 . Ця система алгебраїчних рівнянь вирішується методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівса. При розгляді багатоступеневих ПЧ, система рівнянь складається з рівнянь для витрат в розрахункових перетинах (G_1 і G_2) для кожного ступеня й замикаючого співвідношення. Така система алгебраїчних рівнянь має загальний вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j)}) &= 0; & \Delta_{g2(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j)}) &= 0; & (j = 1); \\ \Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j-1)}) &= 0; & \Delta_{g2(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j)}) &= 0; & (j = 2); \\ & \dots & & & \\ \Delta_{g1(n)}(G, C_{1(n)}, W_{2(n-1)}) &= 0; & \Delta_{g2(n)}(G, C_{1(n)}, W_{2(n)}) &= 0; & (j = n); \\ & & (j = 1, \dots, n); & & \\ \Delta_n(G, C_{1(n)}, C_{1(n-1)}, \dots, C_{1(1)}, W_{2(n)}, W_{2(n-1)}, \dots, W_{2(1)}) &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де j – номер ступеня; n – кількість ступенів.

Чисельне розв'язання системи (4) здійснюється мінімізацією функції $\sum_{j=1}^n (\Delta_{g1(j)}^2 + \Delta_{g2(j)}^2) + \Delta_n^2$ по невідомим $2n+1$ змінним $C_{1(j)}, W_{2(j)}, G$.

Коаксіальна (квазидвовірдна) математична модель течії робочого тіла описується системою рівнянь, аналогічних рівнянням системи (4), але складених для кожного струменя току:

$$\begin{aligned} \Delta_{g1(j,k)}(G, C_{1(j,k)}) &= 0; & \Delta_{g2(j,k)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j,k)}) &= 0; & (j = 1); \\ \Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j-1,k)}) &= 0; & \Delta_{g2(j,k)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j,k)}) &= 0; & (j = 2); \\ & \dots & & & \\ \Delta_{g1(n,m)}(G, C_{1(n,m)}, W_{2(n-1,m)}) &= 0; & & & (j = n); \\ \Delta_{g2(n,m)}(G, C_{1(n,m)}, W_{2(n,m)}) &= 0; & & & (j = n); \\ \Delta_n(G, C_{1(n,k)}, C_{1(n-1,k)}, \dots, C_{1(1,k)}, W_{2(n,k)}, W_{2(n-1,k)}, \dots, W_{2(1,k)}) &= 0, \\ & & & & (j = 1, \dots, n), (k = 1, \dots, m), \end{aligned} \quad (5)$$

де m дорівнює збільшеному на два числу заданих у проекті розрахункових перетинів (струменів току) уздовж радіуса лопаток; k - номер перетину по висоті лопатки (перший перетин розташований біля кореня ступеня). З урахуванням цього розмірність системи рівнянь в коаксіальній моделі ПЧ буде дорівнювати $(n+1) \cdot m$.

Визначення кутів нахилу середніх ліній струменів току здійснюється за допомогою кубічних інтерполяційних сплайнів:

$$R_{i(j,k)} = a_{(j,k)} + \left(b_{(j,k)} + \left(\frac{c_{(j,k)}}{2} + \Delta_x \cdot \frac{d_{(j,k)}}{6} \right) \Delta_x \right) \Delta_x, \quad (6)$$

$$R'_{i(j,k)} = b_{(j,k)} + c_{(j,k)} \cdot \Delta_x + d_{(j,k)} \cdot \frac{\Delta_x^2}{2}, \quad R''_{i(j,k)} = c_{(j,k)} + d_{(j,k)} \cdot \Delta_x,$$

де $a_{(j,k)}, b_{(j,k)}, c_{(j,k)}, d_{(j,k)}$ – коефіцієнти кубічного сплайну (для j -ї ділянки k -го перетину по висоті вінця). Довжина ділянки сплайну визначається відстанню між вихідними кромками сусідніх вінців у перетині, відповідному середньому радіусу; $R_{i(j,k)}$ – значення сплайну в точці, що розраховується; $R'_{i(j,k)}, R''_{i(j,k)}$ – перша і друга похідні сплайну; Δ_x – відстань між x координатою початкового вузла j -ї ділянки сплайну й x координатою точки, що розраховується.

Осьосиметрична математична модель течії робочого тіла (при заданих у вхідному перетині розподілів по витраті ентальпії й тиску гальмування, а також заданому розподілу тиску поза робочим колесом) заснована на розв'язанні системи трьох трансцендентних рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \tilde{r}_{1H}(C_{1BH}, \Psi^*) - r_{1H} = 0; \\ \Delta_1 = \tilde{r}_{1H}(C_{1BH}, \Psi^*) - r_{1H} = 0; \\ \Delta_2 = \tilde{r}_{2H}(C_{1BH}, W_{2BH}, \Psi^*) - r_{2H} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Перше рівняння системи (7) відповідає за виконання обмеження на наявний теплоперепад ступеня при розв'язанні крайових задач поза сопловим апаратом:

$$\begin{aligned} C_1' &= \frac{\sin \alpha_1}{\mu_1 r_1 \rho_1 \cos \theta} \left(\chi_1 \cos \theta_1 + \frac{\partial \ln C_{s1}}{\partial S} \sin \theta_1 - \frac{\text{ctg}^2 \alpha_1}{r_1} \right) + \frac{1}{C_1} (i_0^* - T_1 S_1'); \\ r_1' &= (\mu_1 r_1 \rho_1 C_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1)^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $i_1 = i_0^* - \frac{C_1^2}{2}$; $i_{1T} = i_0^* - \frac{C_1^2}{2\varphi^2}$; $P_1 = P(i_{1T}, S_0^*)$; $T_1 = T(P_1, i)$;

$\rho_1 = \rho(P_1, i_1)$; $S_1 = S(P_1, i_1)$ – параметри, узяті уздовж однієї й тієї ж лінії току;

$r_1(O) = r_{1B}$; $r_1(\Psi^*) = r_{1H}$;

й поза робочим колесом:

$$W_1' = \frac{1}{\mu_2 r_2 \rho_2 \cos \theta_2} \left[\left(\chi_2 \cos \theta_2 + \frac{\partial \ln W_{s2}}{\partial S} \sin \theta_2 - \frac{\text{ctg}^2 \beta_2}{r^2} \right) \sin \beta_2 - 2\omega \frac{\text{ctg} \beta_2}{r_2} \right] + \frac{1}{W_2} [i_0' - (u_1 C_{1U})' + T_2 S_2'];$$

$$r_2' = (\mu_2 r_2 \rho_2 W_2 \sin \beta_2 \cos \theta_2)^{-1},$$
(9)

де

$$i_2 = i_0^* - u_1 C_{1U} + \frac{u_2^2}{2} - \frac{W_2^2}{2}; i_{2T} = i_0^* - u_1 C_{1U} + \frac{u_2^2}{2} - \frac{W_2^2}{2\psi^2}; P_2 = P(i_{2T}, S_1);$$

$T_2 = T(P_2, i_2)$; $\rho_2 = \rho(P_2, i_2)$; $S_2 = S(P_2, i_2)$ – параметри, узяті уздовж однієї й тієї ж лінії току; $r_2(O) = r_{2B}$; $r_2(\psi) = r_{2H}$.

Знак (') означає диференціювання по функції току (ψ).

Особливість осьосиметричної моделі й методу розв'язання системи (7) полягає в тому, що розподіл тиску поза кожним ступенем визначається згідно результатів, які отримуються розв'язанням коаксіальної задачі. Блок-схема удосконаленого алгоритму розв'язання осьосиметричної задачі приведена на рис. 1.

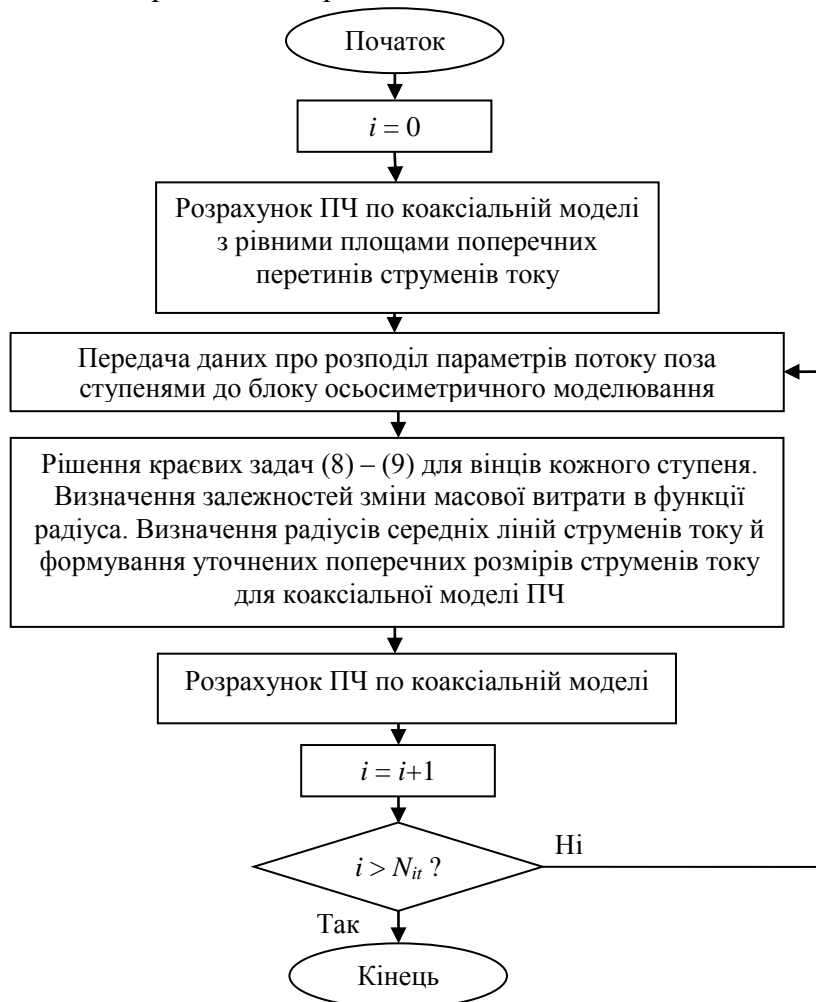


Рис. 1. Блок-схема ітераційного розв'язання осьосиметричної задачі багатоступеневої ПЧ осової турбіни з використанням коаксіальної моделі (i – номер ітерації; N_{it} – задана кількість ітерацій)

Порівняння (рис. 2) результатів розрахункових досліджень, одержаних з використанням перерахованих вище моделей течії робочого тіла в багатоступеневій ПЧ, та експериментальних даних підтверджує високий рівень точності, надійності й адекватності результатів, які були одержані розрахунковим шляхом. Це дозволяє з високою мірою

впевненості використовувати розроблені та удосконалені математичні моделі для розв'язання різного роду задач оптимального проектування ПЧ осьових турбін.

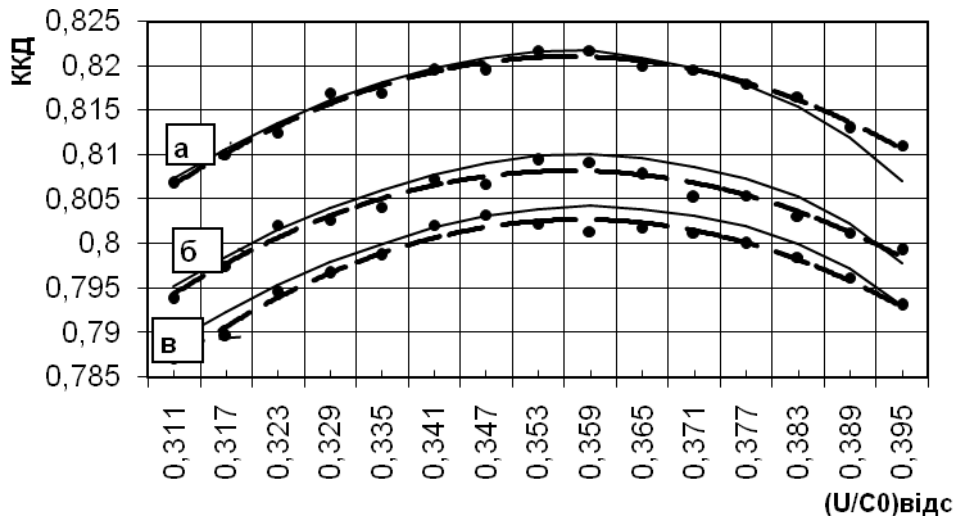


Рис. 2. Залежності внутрішнього ККД двоступеневого відсіку повітряної турбіни від відношення швидкостей $(u/c_{\phi})_{отс}$ при $\delta_{p,z,1} = \delta_{p,z,2} = 0,5$ мм:

а - $\delta_{p,z,2} = 0,5$ мм; **б** - $\delta_{p,z,2} = 1,1$ мм; **в** - $\delta_{p,z,2} = 1,5$ мм.

(— — — - розрахунок; —●— - експеримент)

Математична модель течії робочого тіла в осьовій турбіні включає рівняння соплового паророзподілу в оберненій постановці й рівняння багатоступеневої ПЧ всіх циліндрів турбіни. Алгоритм розрахунку спільної роботи СПР та всіх циліндрів осьової турбіни реалізує ітераційний обчислювальний процес з визначення параметрів робочого тіла між системою СПР і ЦВТ, між ЦВТ і ЦСТ, між ЦСТ і ЦНТ. Розрахунково-конструктивна схема математичної моделі спільної роботи системи СПР і багатоциліндрової ПЧ осьової турбіни наведена на рис. 3.

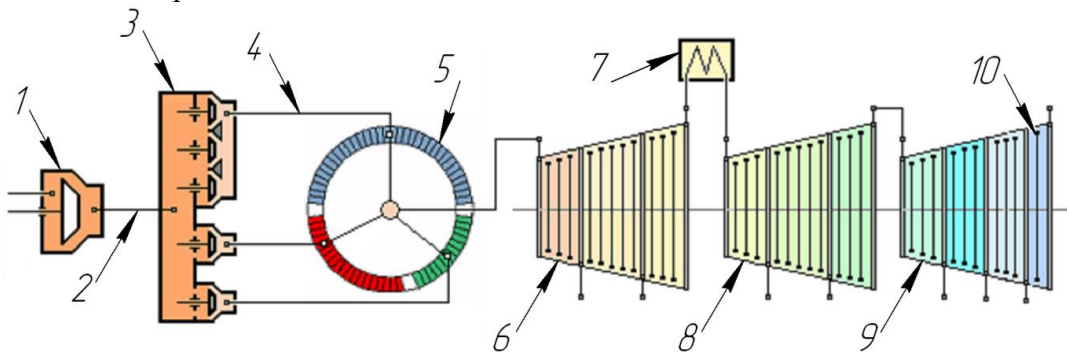


Рис. 3. Розрахунково-конструктивна схема моделі спільної роботи системи СПР і багатоциліндрової ПЧ осьової турбіни:

1-стопорний клапан (СК); 2-трубопровід СК; 3-коробка з регулюючими клапанами; 4-трубопроводи сегментів; 5-сегменти регулювального ступеня; 6-циліндр високого тиску; 7-пароперегрівник; 8-циліндр середнього тиску; 9-циліндр низького тиску (ЦНТ); 10-останній ступень ЦНТ.

На рис. 4 показаний процес в іs-діаграмі, що дозволяє більш наочно пояснити сутність організації відзначеного обчислювального процесу. Процес в іs-діаграмі від точки 1 до точки 2 (рис. 4) відповідає дроселюванню пари в регулюючих клапанах системи СПР; від точки 2 до точки 3 - процес у регулювальному ступені системи СПР; від точки 3 до точки 4 - процес у ЦВТ (модель багатоступеневої ПЧ); від точки 4 до точки 5 - процес промперегріву; від точки 5 до точки 6 - процес у ЦСТ; від точки 6 до точки 7- процес у ЦНТ.

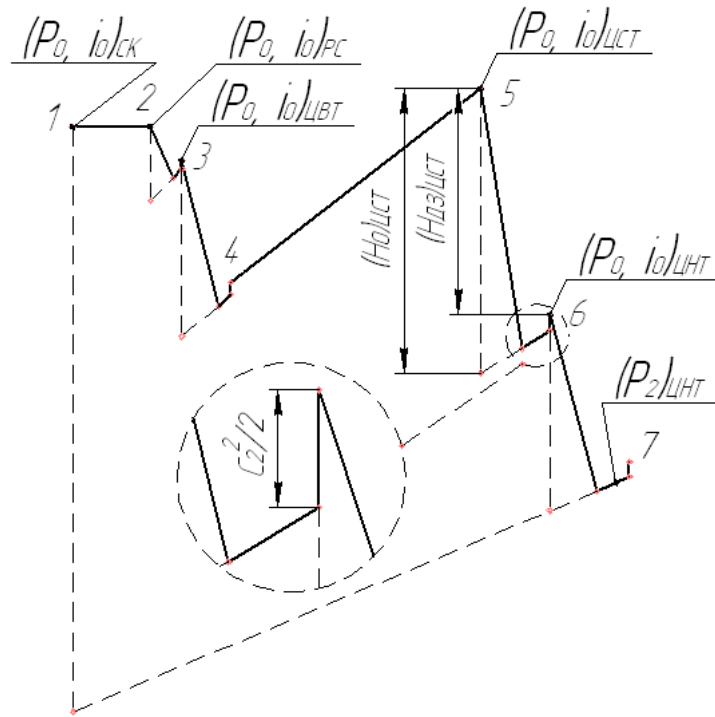


Рис. 4. Процес в i -діаграмі спільної роботи системи СПР й трьох багатоступеневих циліндрів (ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ)

Розрахунок циліндрів турбіни починається з ЦНТ у постановці, яка потребує визначення тиску гальмування перед циліндром при заданих ентальпії гальмування перед циліндром (з попередньої ітерації) і статичному тиску за ним, а також геометрії ПЧ. При визначенні статичного тиску за ЦСТ ($P_{2ЦСТ(j)}$) використовується значення тиску гальмування перед ЦНТ ($P_{0ЦНТ(j)}$), яке одержано в результаті його розрахунку, а також значення вихідної швидкості ($c_{2ЦСТ(j-1)}^2$) й значення ентropії поза останнім ступенем ЦСТ ($S_{2ЦСТ(j-1)}$), які одержані в попередній ітерації. У відповідності з рівнянням стану, одержано:

$$P_{2ЦСТ(j)} = P_2(i_{0ЦНТ(j)}^* - c_{2ЦСТ(j-1)}^2/2, S_{2ЦСТ(j-1)}), \quad (10)$$

де j – номер поточної ітерації циклу обчислювального процесу; $i_{0ЦНТ(j)}^* = i_{2ЦСТ(j-1)}^*$. При цьому

$$i_{2ЦСТ(j-1)}^* = i_{0ЦСТ(j-1)}^* - H_{ЦСТ(j-1)} * \eta_{ЦСТ(j-1)}^*, \quad (11)$$

де $\eta_{ЦСТ(j-1)}^* = H_{дзЦСТ(j-1)}/H_{0ЦСТ(j-1)}$ (рис. 4); $i_{0ЦСТ(j-1)}^*$ залежить від наявності й типу промперегріву, а також від ентальпії та масової витрати додаткового потоку пари, що подається в голову циліндра. Статичний тиск за ЦВТ визначається аналогічно (10), а за ЦНТ – задається за умовами задачі.

Інтегральні показники якості турбоблоку визначаються поетапно. Перш за все, визначається кількість теплоти, що підведена в циклі від спалювання палива

$$Q_{птц} = i_{0ЦВТ}^* - i_{кв(1)ЦВТ} + Q_{пп}, \quad (12)$$

де $i_{кв(1)ЦВТ}$, $Q_{пп}$ – ентальпія киплячої води в місці першого відбору пари на підогрів живильної води й теплота, яка була передана циклу в результаті всіх промперегрівів, відповідно. Затим визначається теоретична робота циклу

$$L_{ц} = L_{РС} + L_{ЦВТ} + L_{ЦСТ} + L_{ЦНТ}, \quad (13)$$

де $L_{РС} = H_{0РС}$, $L_{ЦВТ}$, $L_{ЦСТ}$ и $L_{ЦНТ}$ – теоретична робота регулювального ступеня, що дорівнює його наявному теплоперепаду й теоретичні роботи ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ, відповідно. В свою чергу $L_{ЦВТ}$, $L_{ЦСТ}$ та $L_{ЦНТ}$ визначаються як суми добутків наявних теплоперепадів відсіків кожного циліндра на долі масових витрат цих відсіків. Таким чином,

$$N_{ц} = N_{РС} + N_{ЦВТ} + N_{ЦСТ} + N_{ЦНТ}, \quad (14)$$

Як показали численні розрахункові дослідження й порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, а також з даними технічної документації, описані вище математичні моделі задовольняють вимогам універсальності, адекватності й точності. Вони й відповідні їм інформаційні моделі об'єктів проектування інтегровані із забезпеченням інформаційної та системної єдності в ЄПП САПР «Турбоагрегат».

У **третьому розділі** наведені детальні описи універсального методу формального макромодельовання показників якості об'єктів оптимального проектування та їхніх елементів, а також методу підвищення точності та адекватності формальних макромоделей (ФММ).

Відомий універсальний підхід створення ФММ за допомогою методів теорії планування експерименту у вигляді повного квадратичного полінома другого порядку

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i + A_{ii} q_i) q_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (16)$$

де y – функція відгуку; n – кількість факторів ФММ; A – коефіцієнти ФММ; \vec{q} – вектор нормованих значень факторів \vec{x} ФММ було модифіковано. При розв'язанні багатоекстремальних оптимізаційних задач та для підвищення точності й адекватності ФММ, суперпозиція парабол (другий член залежності (16)) замінено суперпозицією інтерполяційних кубічних сплайнів, які дозволяють із високою мірою точності й адекватності описувати функції різної складності, у тому числі й багатоекстремальні. З урахуванням заміни, ФММ виду (16) перетворюється в наступну залежність:

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n \left(a_{ij} + \left(b_{ij} + \left(\frac{c_{ij}}{2} + \Delta q_{ij} \cdot \frac{d_{ij}}{6} \right) \Delta q_{ij} \right) \Delta q_{ij} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (17)$$

де $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ – коефіцієнти кубічного сплайну поточної (j -ї) інтерполяційної ділянки i -ї незалежної змінної. Для кожної незалежної нормованої змінної q_i існує кілька інтерполяційних ділянок у діапазоні між -1 та +1; Δq_{ij} – відстань між поточним значенням q_i і координатою початкового вузла j -ї ділянки сплайну, у якого значення координати q_i перебуває між координатами початкового (j -го) і кінцевого ($j+1$ -го) його вузлів.

Для наочності на рис. 6 приведено порівняння точності апроксимації багатоекстремальної тестової функції виду

$$Z = 2 + 0,1X^2 + 0,1Y^2 - \sin X - \sin Y, \quad (18)$$

формальними макромоделями виду (16) і виду (17). Використання ФММ підвищеної точності виду (17) дозволяє з достатньою точністю й адекватністю апроксимувати багатомірні мультимодальні функції (рис. 6 в).

Наведено приклад використання методів формального макромодельовання для створення методики оцінки впливу підрізування вихідних кромки лопаток робочих коліс на ефективність активних турбінних решіток. При створенні даної методики й організації обчислювального експерименту, відповідно до 5-ти факторного плану Рехтшафнера, у число компонентів вектора \vec{Q} залежності виду (16) були включені незалежні параметри, які впливають на ефективність решітки, що розглядається: ефективний кут β_{23} ; відношення тисків P_2/P_1 ; відносний крок решітки t/b ; відношення глибини підрізування вихідної кромки приторцевої частини лопатки до діаметру горлового перетину k_v/a ; висота підрізування δ .

Області зміни перерахованих параметрів наведені нижче:

β_{23} (18÷24) град., P_2/P_1 (0,934÷0,984, при $P_2=1,022 \cdot 10^5$ Па),

t/b (0,68÷0,9), k_v/a (0,137÷0,416), δ (0,4(1,6) мм).

Дана методика використовується всіма математичними моделями течії робочого тіла в ПЧ осьових турбін для уточнення значень коефіцієнтів швидкості робочих решіток і кута виходу потоку з них.

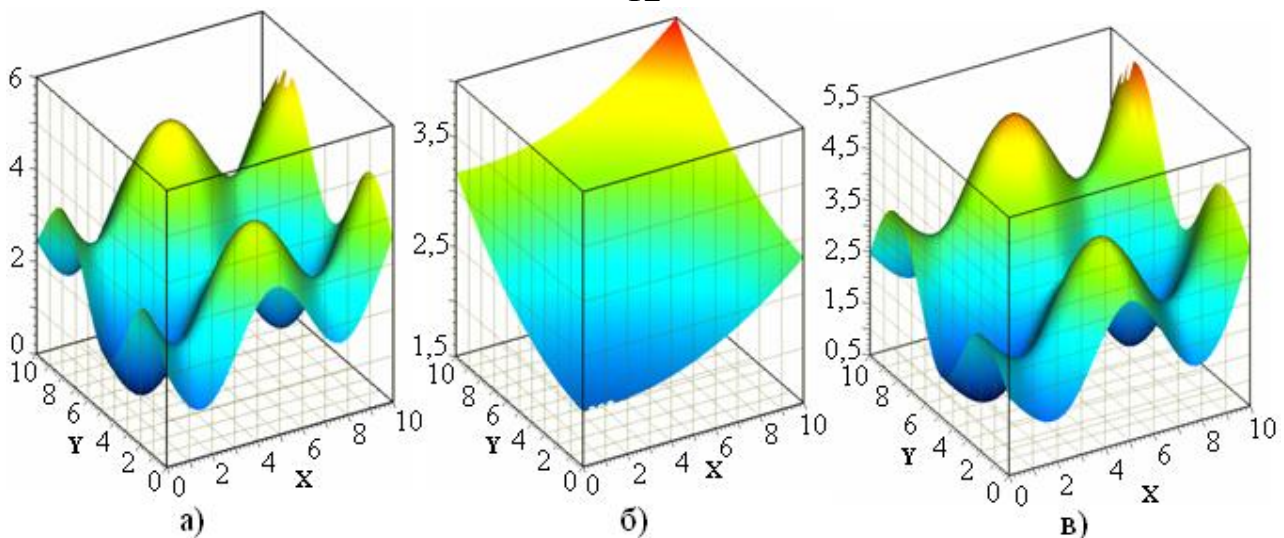


Рис. 6. Порівняння точності апроксимації мультимодальної функції формальними макромоделями:

а) – тестова мультимодальна функція виду (18); б) – апроксимація функції (18) ФММ виду (16); в) – апроксимація функції (18) ФММ виду (17)

У **четвертому розділі** описана універсальна методологія створення ЄПП багаторівневої багатопараметричної й багатокритеріальної оптимізації СТС. Забезпечені вимоги інформаційної погодженості, відкритості систем, що розвиваються, а також необхідності максимального використання уніфікованих форматів і модулів.

Аналіз сутностей підсистем САПР (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.інш.) про елемент інформаційної моделі ЄПП як функцію від ряду блоків з атрибутами, тобто значень, що характеризують елемент у його класі:

$$X_i = F_i \left(\begin{matrix} A_{ID}, A_{VIEW}, A_{NAME}, A_{INIT}, A_{SUB}, \\ A_{CONTROL}, A_{LIB}, A_{LINK}, A_{DATA}, A_{EXIMP} \end{matrix} \right), \quad (19)$$

$$X_i \in \rightarrow \text{ЄПП},$$

де i – елемент ЄПП і функція його подання в ЄПП, відповідно; F_i – відповідає за унікальність ідентифікації X_i у ЄПП; A_{VIEW} – атрибути відображення й виду на екрані монітора; A_{NAME} – атрибути мультимовних імен; A_{INIT} – атрибути початкового стану; A_{SUB} – атрибути ієрархічної підпорядкованості; $A_{CONTROL}$ – атрибути керування підлеглими елементами ЄПП; A_{LIB} – атрибути зв'язків з математичними методами й розрахунковими моделями; A_{LINK} – атрибути параметричних зв'язків зі своїми клонами в різних моделях, компонентах і підсистемах; A_{DATA} – атрибути зв'язків з даними із довідників і атласів; A_{EXIMP} – атрибути експортно-імпортних операцій зі зовнішніми джерелами даних. Архітектура та схема інформаційних потоків, що забезпечують погоджену роботу всіх підсистем у ЄПП САПР «Турбоагрегат», наведена на рис. 7.

У **п'ятому розділі** описана універсальна методологія розв'язання багаторівневих, багатопараметричних, багатокритеріальних задач оптимального проектування ПЧ осьових турбін та інших складних технічних об'єктів енергетики різного функціонально-технологічного призначення з урахуванням режимів експлуатації, а також наявності конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

Дана методологія забезпечує рекурсивно-автоматичну (у відповідності з ієрархічною структурою інформаційних моделей об'єктів оптимізації в ЄПП і інформаційними моделями

сценаріїв (постановок) оптимізаційних задач всіх об'єктів всіх рівнів оптимізації) декомпозицію загальної оптимізаційної задачі на декілька локальних ієрархічно підлеглих задач. Завдяки розв'язанню більш простих підлеглих задач кожного рівня та розробленому методу забезпечення високоефективних і надійних інформаційних зв'язків між рівнями проектування, досягається розв'язання глобальної оптимізаційної задачі.

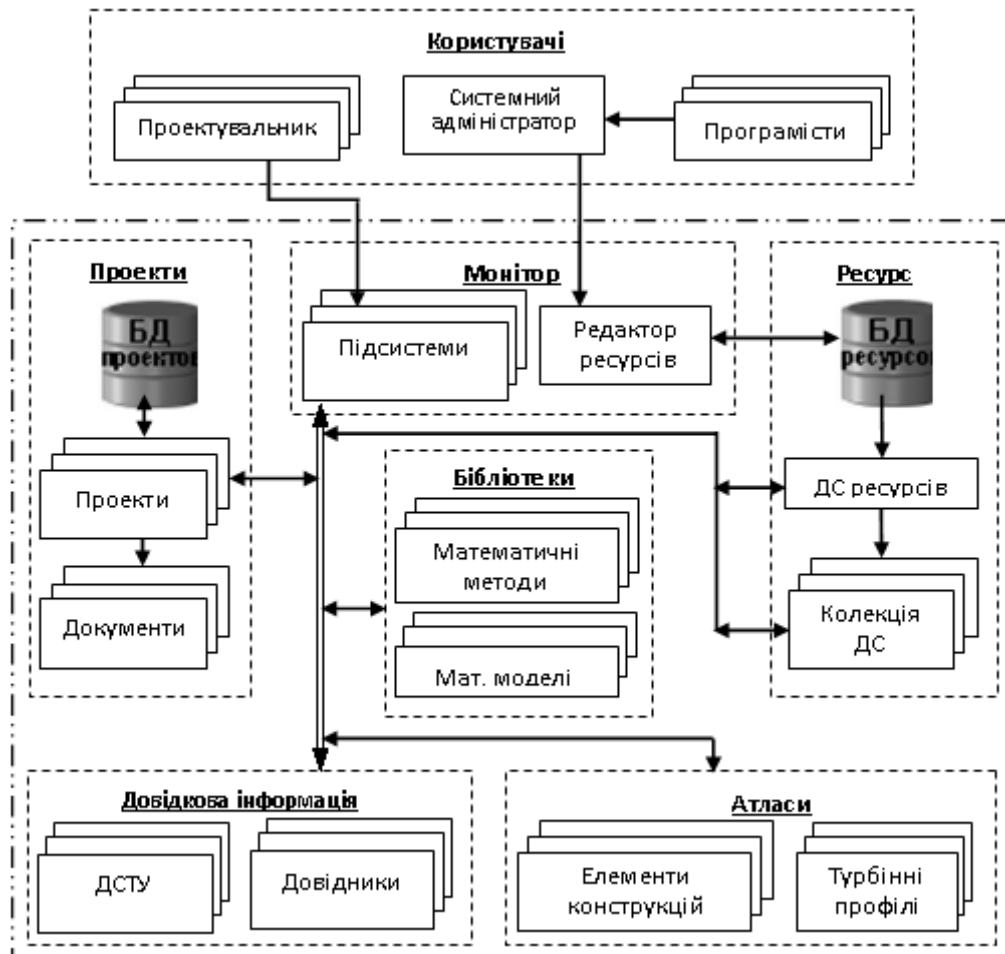


Рис. 7. Архітектура та схема інформаційних потоків в ЄПП САПР «Турбоагрегат» (ДС – динамічний словник)

Процес оптимізації містить у собі ряд етапів: автоматична декомпозиція загальної оптимізаційної задачі на ряд локальних підлеглих задач; створення на локальних рівнях оптимального проектування відповідних ФММ функцій мети й функціональних обмежень виду (16) або (17); в процесі розв'язання задач багаторежимної оптимізації режимні параметри виключаються із ФММ шляхом інтегрування останніх; на першому етапі кожної оптимізаційної ітерації кращі рішення визначаються за допомогою ФММ і КПт-пошуку. На заключному етапі, навколо отриманого за допомогою ФММ оптимального наближення, вирішується задача уточнення. Для цих цілей замість ФММ використовуються математичні моделі, що описують фізичні процеси в об'єктах оптимізації (розділ 2) і градієнтні методи пошуку оптимального рішення.

Як приклад роботи рекурсивно-автоматичної декомпозиції загальної задачі оптимізації паротурбінного блоку на рис. 8 наведена відповідна структурна схема та інформаційні зв'язки між оптимізаційними задачами кожного рівня. Як видно з рис. 8, для розв'язання загальної оптимізаційної задачі використовуються 5 локальних рівнів. Найвищий за ієрархією рівень «Теплова схема» призначений для визначення режимних параметрів,

необхідних для оптимізації ПЧ, а також для оцінки впливу оптимізації ПЧ турбіни на інтегральні показники теплової схеми в цілому.

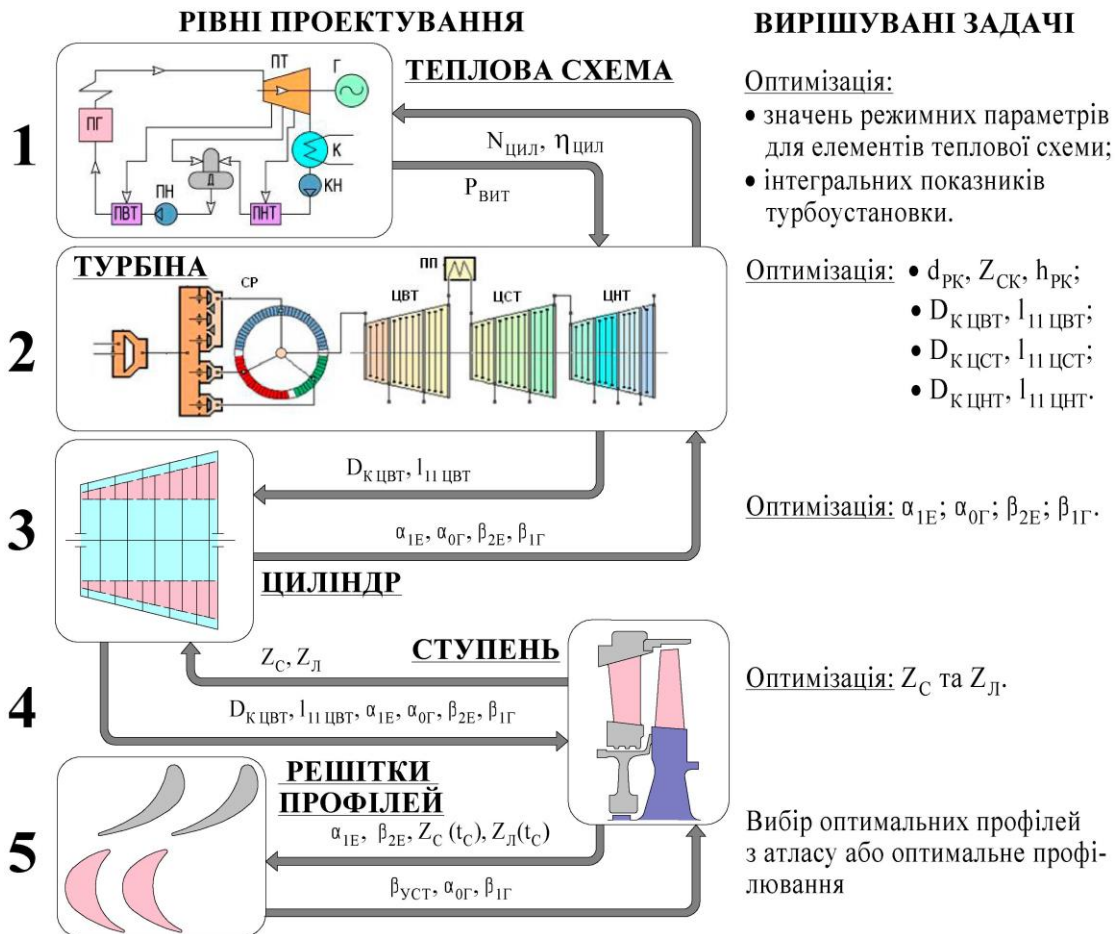


Рис. 8. Структурна схема й інформаційні зв'язки між оптимізаційними задачами кожного рівня оптимального проектування паротурбінного блока

Рівень «Турбіна» використовується для оптимізації геометричних характеристик регулюючих клапанів і регульовального ступеня, а також для оптимізації меридіональних обводів ПЧ циліндрів високого, середнього й низького тисків.

На рівні «Циліндр» визначаються ефективні кути виходу потоку із соплових і робочих решіток.

Рівень «Ступень» призначений для оптимізації чисел лопаток соплових і робочих решіток, а також параметрів, керуючих закрученням лопаток соплового й робочого вінців.

На рівні «Решітки профілів» з атласу профілів підбираються турбінні профілі, які відповідають кінематиці потоку, мають максимальні значення коефіцієнтів швидкості та задовольняють обмеженням на площі профілів й міцність лопаток.

Функціональні обмеження на рівні «Циліндр» є масова витрата робочого тіла на вході в ПЧ і осьове зусилля, що діє на ротор, на рівні «Ступень» - напруги в лопатках, диску й діафрагмі.

Запропонована методологія оптимізації з рекурсивно-автоматичним встановленням інформаційних зв'язків між оптимізаційними рівнями дозволяє на кожному вищестоящому рівні вирішувати оптимізаційні задачі з урахуванням кращих рішень, одержаних на всіх ієрархічних рівнях, які знаходяться нижче.

У випадку, коли доводиться оцінювати об'єкт по цілому комплексу відповідних показників, застосовується векторний критерій якості:

$$\vec{Y} = \{Y_1(\vec{x}_k, \vec{x}_p), Y_2(\vec{x}_k, \vec{x}_p), \dots, Y_n(\vec{x}_k, \vec{x}_p)\}, \quad (20)$$

де Y_1, Y_2, \dots, Y_n - компоненти векторного критерію (функції окремих показників якості об'єкта); \vec{x}_k, \vec{x}_p - вектори конструктивних й режимних параметрів, відповідно, які разом визначають проектне рішення.

Для розв'язання таких багатокритеріальних задач в роботі запропонована й використовується згортка векторного критерію якості у відповідності з нижченаведеною залежністю

$$\|Y^*(\vec{x}_k, \vec{x}_p)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i Y_i^*(\vec{x}_k, \vec{x}_p))^2}, \quad (21)$$

що є, по суті, модулем вектора окремих критеріїв якості з урахуванням їх вагових коефіцієнтів (μ_i). Геометрична інтерпретація даної згортки приведена на рис. 9.

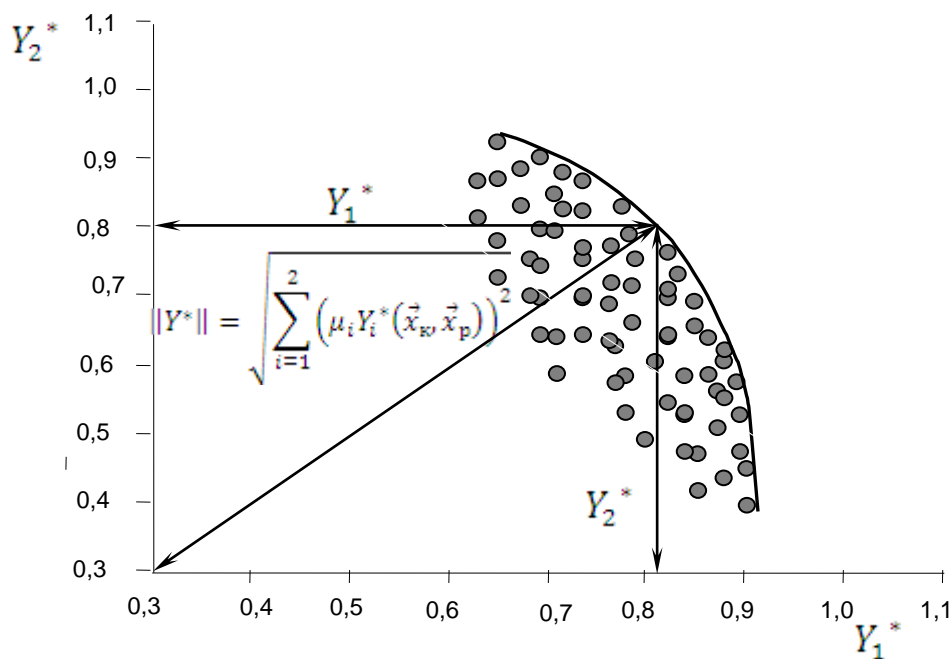


Рис. 9. Геометрична інтерпретація визначення відстані від центру координат до точок Парето

Запропонований вид згортки (21) в деякій мірі нагадує згортку метода ідеальної точки, яка, у свою чергу, близька до згортки Гермейера, котрі на відміну від методу зважених критеріїв (адитивної згортки), дозволяють знаходити рішення, що лежать як на опуклій, так і на не опуклій частині фронту Парето.

З використанням запропонованої згортки векторного критерію якості метод оптимізації знаходить рішення, у якого відстань між центром координат критеріального простору й точкою, що відповідає цьому рішення, є максимальною.

У **шостому розділі** наведені результати оптимізації й зроблений докладний порівняльний аналіз існуючих і оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ потужних парових турбін К-330-23,5 і К-220-44-2М для номінального режиму експлуатації.

Оптимізація параметрів ПЧ циліндра високого тиску турбіни К-330-23,5

Особливості вихідного варіанта ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5:

- Висока завантаженість ступенів u/c_{Φ} (0,46...0,49).
- Значний рівень кутів атаки в «животик» профілів РК i_p (12...16)°.
- Завищені значення t/b робочих решіток (0,837...0,895).

- Недостатня ефективність робочих решіток $\psi^2(0,7942\dots0,8506)$.
- Високий рівень кореневої реактивності $\rho_x(0,1\dots0,11)$.
- Підвищені прикореневі витoki ступенів $\Delta G_x(12,3\dots3,8)$ кг/с.

Параметри оптимізації ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 (55 параметрів)

1-й рівень (циліндр) - оптимізується 44 параметра:

- Кореневий діаметр і висота соплової лопатки першого ступеня циліндра.
- Меридіональне розкриття каналів соплових і робочих решіток.
- Ефективні кути виходу соплових і робочих решіток всіх ступенів.

2-й рівень (ступень) - оптимізується 11 параметрів:

- Числа лопаток робочих решіток всіх ступенів.

Критерії якості, які застосовані при оптимізації:

- Векторний критерій якості, що включає нормовані значення діаграмного ККД циліндра (η_{Σ}) і його потужність (N_{Σ}) з рівними ваговими коефіцієнтами.

Результати оптимізації ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 наведені на рис.10 та в табл. 1.

Покращення показників якості оптимальної ПЧ одержано за рахунок:

- раціонального розподілу наявного теплоперепадку циліндра між його ступенями;
- застосування оптимальної меридіональної форми обводів ПЧ із трохи зменшеними висотами лопаток;
- збільшення значень ефективних кутів виходу із соплових решіток, що забезпечили зменшення кутів атаки на робочі решітки;
- підвищення ефективності робочих решіток за рахунок оптимального вибору кутів установки й чисел лопаток, що забезпечило істотне зниження втрат від удару;
- зниження рівня реактивності ступенів і, як наслідок, зменшення втрат від прикорневих і радіальних витоків;

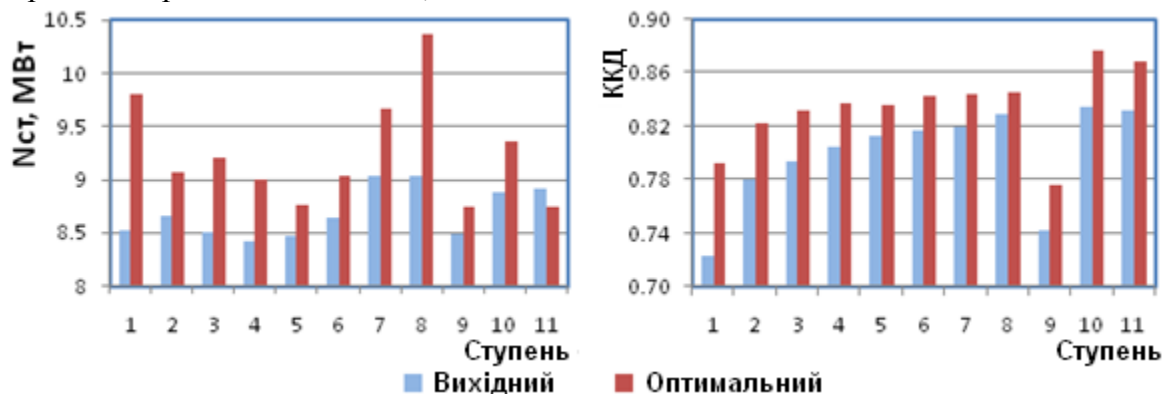


Рис. 10. Порівняння потужності та ККД ступенів вихідного й оптимального варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5

Таблиця 1

Інтегральні показники вихідного й оптимального варіантів ПЧ

Найменування параметра	Од. вим.	Вихідний варіант	Без підрізки вихідних кромок лопаток РК	З підрізкою вихідних кромок лопаток РК
Діаграмний ККД циліндра	-	0,8595	0,8989	0,8971
Внутрішній ККД циліндра	-	0,8119	0,8656	0,8612
Потужність циліндра	МВт	95,573	101,773	101,2490

Оптимізація параметрів ПЧ ЦВТ турбіни К-220-44-2М

Особливості вихідного варіанта ПЧ ЦВТ турбіни К-220-44-2М:

- Значний рівень кутів атаки в «животик» профілів РК $i_F(10...15)^\circ$.
- Нераціональний розподіл наявного теплоперепадку циліндра між його ступенями.

Параметри оптимізації ПЧ ЦВТ турбіни К-220-44-2М (33 параметра)

1-й рівень (циліндр) - оптимізується 19 параметрів:

- Кореневий діаметр і висота соплової лопатки першого ступеня циліндра.
- Меридіональне розкриття каналів соплових і робочих решіток.
- Ефективні кути виходу соплових і робочих решіток всіх ступенів.

2-й рівень (ступень) - оптимізується 14 параметрів:

- Числа лопаток соплових решіток всіх ступенів.
- Числа лопаток робочих решіток всіх ступенів.

Критерії якості, які застосовані при оптимізації:

- Векторний критерій якості, що включає нормовані значення діаграмного ККД циліндра (η_D) і його потужність ($N_{цил}$) з рівними ваговими коефіцієнтами.

Результати оптимізації ПЧ ЦВТ турбіни К-220-44-2М наведені на рис. 11 й в табл. 2.

Покращення показників якості оптимальної ПЧ одержано за рахунок:

- раціонального розподілу наявного теплоперепадку циліндра між його ступенями;
- трохи зменшеної осьової складової швидкостей і забезпечення більш близького до осьового виходу робочого тіла із ступенів знизило втрати з вихідною швидкістю;
- зменшення кутів атаки, що забезпечило підвищення ефективності соплових і робочих решіток;
- збільшення середнього діаметра ступенів, що привело до одержання оптимальних значень відношення швидкостей (u/c_Φ);
- того, що більш високі лопатки дозволили знизити частку кінцевих втрат.

Оптимальні значення відносних кроків соплових і робочих решіток привели до підвищення їхньої ефективності.

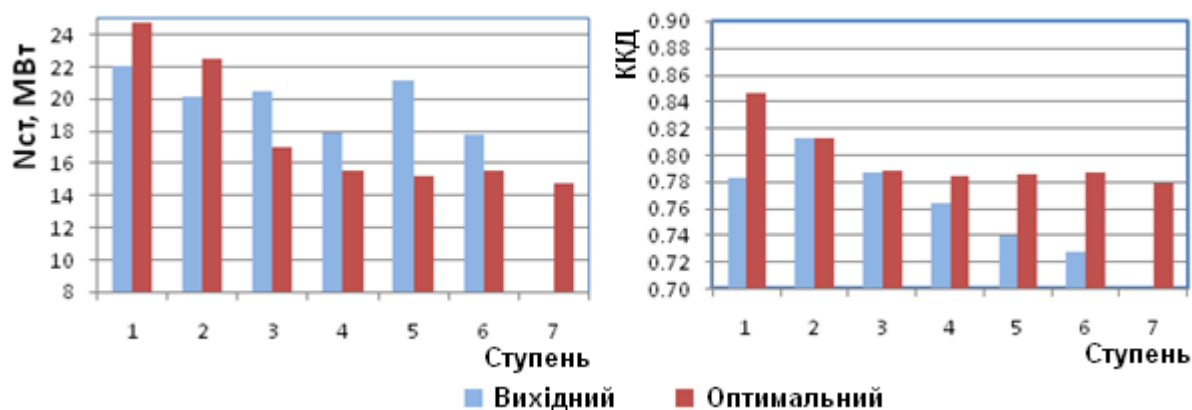


Рис. 11. Порівняння потужності та ККД ступенів вихідного й оптимального варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-220-44-2М

Таблиця 2

Інтегральні показники вихідного й оптимального варіантів ПЧ

Варіант ПЧ ЦВТ	η_D	η_N	N_T , МВт	$\Delta\eta_N$, %	ΔN_T , кВт
1. Існуючий, 6 ст.	0,7836	0,7690	119,425	0	0
2. Оптимальний, 7 ст.	0,8096	0,8011	125,375	3,21	5949,45
3. Остаточний, 7 ст.	0,8063	0,7961	124,824	2,71	5399,06

де η_D - діаграмний ККД ПЧ, η_N - ККД ПЧ вирахований через потужність турбіни, $\Delta\eta_N$ - приріст ККД оптимального варіанту ПЧ, N_T - потужність турбіни, ΔN_T - приріст потужності оптимального варіанту ПЧ.

У **сьомому розділі** наведені результати оптимізації положень ЗЕРК турбіни К-310-240, ефективних кутів соплових решіток для утилізаційних турбодетандерних установок з поворотними сопловими лопатками, а також параметрів турбіни низького тиску установки ГТ-750-6М з урахуванням режимів їхньої експлуатації.

Оптимізація положень ЗЕРК турбіни К-310-240.

Розв'язання даної задачі забезпечує проходження необхідної витрати робочого тіла через сегменти регульовального ступеня, регулюючі клапани яких, мають мінімальні втрати на дроселювання.

Розроблений метод заснований на комбінаторному алгоритмі формування масиву сумарних площ різних комбінацій сегментів регульовального ступеня. Так, наприклад, для регульовального ступеня із трьома сегментами у відповідний масив будуть внесені площі наступних комбінацій сегментів: площі окремих сегментів з номерами 1, 2, 3; сумарні площі оригінальних парних комбінацій сегментів - 1-2, 1-3, 2-3 і площа всіх сегментів - 1-2-3.

Результати оптимізації положень ЗЕРК турбіни К-310-240 наведені в таблицях 3, 4 і на рис. 12.

Таблиця 3

Вплив позиціонування ЗЕРК на ефективність турбіни К-310-240

Варіант позиціонування ЗЕРК	η_t , %	η_{oit} , %	η_a , %	l_t , кДж/кг	Q_t , кДж/кг
Оптимальний	45,799	81,252	37,213	1368,93	2987,80
Традиційний	41,848	86,269	36,102	1209,24	2889,63
Відхилення	3,951	-5,017	1,111	159,69	98,17

Тут η_t , η_{oit} , η_a , l_t , Q_t - термічний ККД циклу, внутрішній відносний ККД ПЧ турбіни, абсолютний ККД циклу, теоретична робота циклу й величина підведеного до циклу тепла (за рахунок спалювання палива), відповідно.

В табл. 4 приведено порівняння положень запірних елементів регулюючих клапанів при традиційному позиціонуванні та при оптимальному позиціонуванні за допомогою комбінаторного алгоритму.

Таблиця 4

Порівняння оптимального й традиційного позиціонування ЗЕРК турбіни К-310-240

G, кг/с	Традиційне позиціонування ЗЕРК						Комбінаторне позиціонування ЗЕРК					
	Сегм. №1				Сегм. №2	Сегм. №3	Сегм. №1				Сегм. №2	Сегм. №3
	H_{k1} , мм	H_{k2} , мм	H_{k3} , мм	H_{k4} , мм	H_{k1} , мм	H_{k1} , мм	H_{k1} , мм	H_{k2} , мм	H_{k3} , мм	H_{k4} , мм	H_{k1} , мм	H_{k1} , мм
50	5,11	5,11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,42	0,0
110	11,2	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,3	0,0
130	13,3	13,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,8	2,21
150	15,3	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,8	4,82
230	27,0	27,0	29,2	29,2	4,32	0,0	27,0	27,0	29,2	29,2	0,0	4,22
250	27,0	27,0	29,2	29,2	8,70	0,0	27,0	27,0	29,2	29,2	0,0	17,0
277,8	27,0	27,0	29,2	29,2	21,8	7,49	27,0	27,0	29,2	29,2	21,8	7,49

Оптимізація утилізаційної турбодетандерної установки (УТДУ) з поворотними сопловими лопатками всіх ступенів.

Режими роботи взяті з технічного завдання на проектування УТДУ й приведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Режими роботи УТДУ, що оптимізується

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G0, кг/с	18,71	20,66	18,71	10,18	6,33	6,28	4,90	6,14	7,17	10,55	17,57	20,35

Дана задача вирішувалася у два етапи:

1)- визначаються оптимальні значення базових конструктивних параметрів:

Параметри оптимізації УТДУ (36 параметрів)

1-й рівень (циліндр) - оптимізується 20 параметрів:

- Середні діаметри й висоти лопаток ступенів УТДУ.
- Базові ефективні кути виходу соплових і робочих решіток всіх ступенів.

2-й рівень (ступень) - оптимізується 16 параметрів:

- Хорди й числа лопаток соплових решіток всіх ступенів.
- Хорди й числа лопаток робочих решіток всіх ступенів.

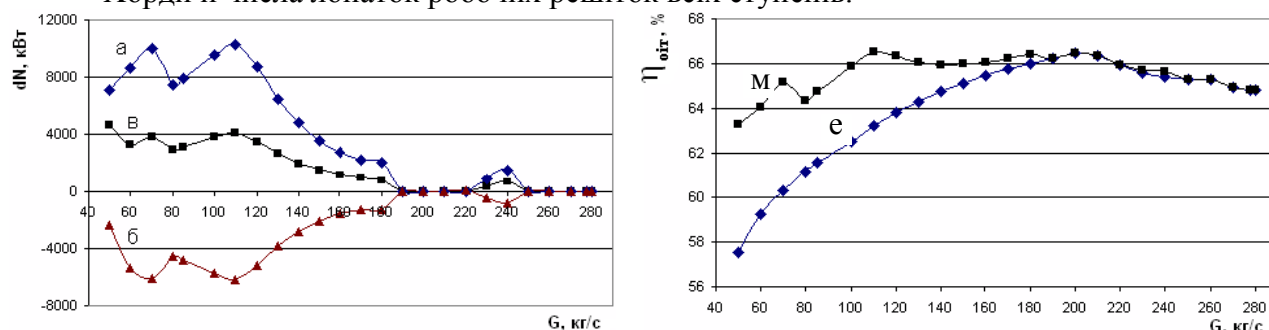


Рис. 12. Зміна потужності та ККД турбіни К-310-240:

а)- регулювального ступеня; б)- ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ;

в)- приріст потужності турбіни від застосування комбінаторного алгоритму;

е)-ККД турбіни при традиційному позиціонуванні ЗЕРК;

м)-ККД турбіни при позиціонуванні ЗЕРК з використанням комбінаторного алгоритму

Критерії якості, які застосовані при оптимізації

- рівень «Циліндр» - сумарна робота УТДУ за обраний проміжок часу:

$$U = \int_{t=0}^{t=T} N_{\text{цил}}(t) dt; \quad (22)$$

- рівень «Ступень» - внутрішній ККД ступеня.

$$\eta_{oi} = \frac{N_i}{H_{0i} * G_i} \quad (23)$$

2)- визначаються ефективні кути соплових решіток для кожного режиму роботи УТДУ.

Критерії якості, які застосовані при оптимізації

- критерій якості рівня «Циліндр» - згорнутий векторний критерій:

$$Y_{\text{кк}} = \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{2} [\bar{N}_{\text{цил}} = f(\alpha_{11} \dots \alpha_{1n})] \right)^2 + \left(\frac{1}{2} [\bar{\eta}_{\text{оіцил}} = f(\alpha_{11} \dots \alpha_{1n})] \right)^2} \right\}, \quad (24)$$

де $\bar{N}_{\text{цил}}$, $\bar{\eta}_{\text{оіцил}}$, α_1 - нормовані значення потужності внутрішнього ККД УТДУ й ефективні кути соплових решіток всіх ступенів.

Результати оптимізації ПЧ УТДУ.

Основні результати оптимізації ПЧ УТДУ з поворотними лопатками соплових апаратів всіх ступенів представлені на рисунках 13, 14 і в таблиці 6.

Як видно з рис. 14, оптимальний варіант ПЧ за рівнем ефективності перевершує вихідний на всіх режимах роботи. Істотне підвищення ККД спостерігається на

маловитратних режимах роботи, а також на режимах з масовою витратою більше, ніж 18 кг/с. Додаткове вироблення електроенергії протягом експлуатаційного циклу склало 914,793 МВт·год (3,64 %).

Ріст ефективності на режимах роботи з витратами, близькими або більшими за номінальний, відбувся за рахунок підбору оптимальної комбінації базових геометричних параметрів. Це дозволило знизити втрати, пов'язані з натіканням робочого тіла на решітки, знизити втрати з вихідною швидкістю й підвищити ефективність соплових і робочих решіток.

Результати оптимізації ПЧ УТДУ підтвердили необхідність урахування прогнозованих режимів роботи на етапі вибору основних геометричних параметрів ПЧ.

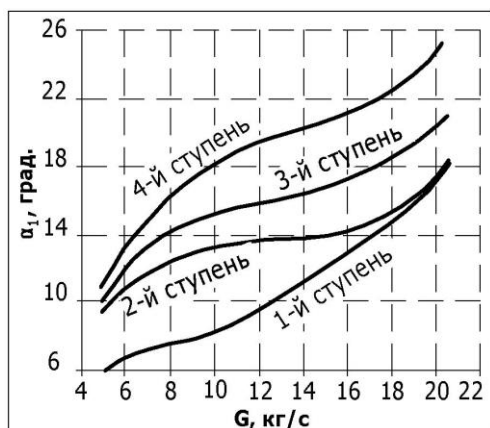


Рис. 13. Оптимальний розподіл кутів α_1 по ПЧ в залежності від витрати

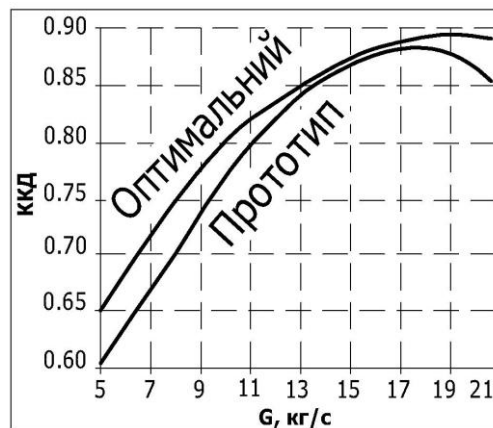


Рис. 14. ККД проточних частин УТДУ

Таблиця 6

Результати оптимального проектування по ступеням турбодетандера

Параметр	Номер ступеня				Номер ступеня			
	Вихідна конструкція				Оптимальна конструкція			
	1	2	3	4	1	2	3	4
d_1 , [м]	0,480	0,480	0,480	0,480	0,481	0,483	0,489	0,498
d_2 , [м]	0,480	0,480	0,480	0,480	0,482	0,484	0,490	0,499
l_1 , [м]	0,0305	0,0350	0,0425	0,0510	0,029	0,036	0,045	0,056
l_2 , [м]	0,0310	0,0375	0,0465	0,0560	0,032	0,039	0,049	0,060
β_2 , [град]	22,00	25,70	29,10	34,00	21,70	25,52	28,43	34,15
Z_1	54	54	46	46	54	58	48	49
Z_2	69	69	53	53	69	78	61	59
b_1 , [мм]	35,099	35,099	42,118	42,118	35,35	35,26	42,03	42,76
b_2 , [мм]	30,809	30,809	40,150	40,150	33,25	30,18	39,19	40,75
β_{1g} , [град]	30,75	35,68	44,03	53,72	38,21	32,27	38,97	48,31

Оптимізація геометричних параметрів турбіни низького тиску установки ГТ-750-6М з урахуванням режимів роботи.

Дана задача полягає у визначенні оптимальних геометричних параметрів ПЧ турбіни низького тиску (ТНД) газотурбінної установки ГТ-750-6М, що використовується для приводу газоперекачуючого агрегату на Шебелинській компресорній станції, з урахуванням реальних режимів роботи й включенням у розгляд теплової схеми установки.

У процесі розв'язання оптимізаційної задачі задіяні 3 рівні розробленого рекурсивного оптимізаційного алгоритму стосовно до структурної топології інформаційної моделі ГТУ (аналогічно рис. 8). На вищому рівні «Схема» в ієрархії оптимізаційного алгоритму виконувалися термодинамічні розрахунки ТС ГТУ на розглянуті режими роботи для визначення значень режимних параметрів для ПЧ газової турбіни (масової витрати – G_0 ; тиску й температури на вході в ПЧ – P_0^* , T_0^* ; тиску на виході із ПЧ – P_2^* ; оборотів ротора – n), необхідних для наступної оптимізації на рівнях «Циліндр» і «Ступень». Для моделювання роботи компресора й газових турбін застосовувалися універсальні характеристики в параметрах подоби: характеристика компресора побудована за даними заводу-виготовлювача, характеристики турбін - за результатами прямих одномірних розрахунків.

Параметри оптимізації ПЧ турбіни низького тиску газотурбінної установки ГТ-750-6М (9 параметрів):

Рівень «Циліндр»- оптимізується 7 параметрів:

- Середні діаметри соплової й робочої лопаток.
- Висоти соплової й робочої лопаток.
- Ефективні кути виходу соплових і робочих решіток.
- Геометричний кут входу робочих решіток.

Рівень «Ступень» - оптимізується 2 параметри:

- Числа лопаток соплових і робочих решіток.

Критерії якості, які застосовані при оптимізації:

- рівень «Циліндр» - сумарна робота установки ГТ-750-6М за обраний проміжок часу, аналогічно (22);
- рівень «Ступень» - внутрішній ККД ступеня, аналогічно (23).

Задача вирішувалася з урахуванням 177 реальних режимів роботи установки, кожний режим відповідає роботі агрегату протягом 24 годин.

Результати оптимізації ПЧ ПЧ турбіни низького тиску газотурбінної установки ГТ-750-6М.

Значення геометричних параметрів ПЧ, які одержані в результаті оптимізації, наведені в таблиці 7. У результаті проведеної оптимізації вдалося істотно підвищити ККД проточної частини ТНД у всім діапазоні робочих режимів. Зокрема, на номінальному режимі роботи ГТУ, приріст корисної потужності ТНД зі збереженням витрати через ПЧ на колишньому рівні склав 1,5 % (93,1 кВт). Крім того, оптимізація ТНД не спричинила значних відхилень параметрів циклу установки від проектних. Економія палива (природного газу) для ГТУ з оптимальною проточною частиною ТНД по режимах роботи наведена на рис. 15. Сумарна економія палива за даний проміжок часу, рівний 177 дням, склала 50831 кг.

Покращення показників якості ГТУ отримано за рахунок:

- збільшення коефіцієнтів швидкості соплових і робочих решіток оптимальної ПЧ на 0,4 і 0,6%, відповідно;
- зменшення абсолютної швидкості виходу робочого тіла з робочих решіток на 22%;
- зменшення на 2,7% витoku робочого тіла в радіальний зазор.

Таблиця 7

Результати оптимального проектування ТНД установки ГТ-750-6М

Параметр	Вихідна конструкція	Оптимальна конструкція
1. Середній діаметр СА – d_1 , м	0,970	1,046
2. Середній діаметр РК – d_2 , м	0,972	1,057
3. Висота соплової лопатки – l_1 , м	0,210	0,203

4. Висота робочої лопатки – l_2 , м	0,211	0,222
5. Геометричний кут входу в СА – $\alpha_{0г}$, град	90,00	94,54
6. Геометричний кут входу в РК – $\beta_{1г}$, град	47,33	47,93
7. Кут виходу потоку з СА – α_1 , град	20,67	19,00
8. Кут виходу потоку з РК – β_2 , град	25,18	24,12
9. Кількість соплових лопаток – Z_1 , шт.	48	41
10. Кількість робочих лопаток – Z_2 , шт.	60	70

У **додатках** наведені акти впровадження результатів роботи на ВАТ «Турбоатом», ПАТ «Турбогаз», в навчальний процес на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП». Також наведені: спрощені математичні моделі для елементів ГТУ, які використовуються при виконанні термодинамічного розрахунку ТС; програмний код мовою «gpl» і вихідні дані для термодинамічного розрахунку ТС установки ГТ-750-6М; вихідні дані для прямого одномірного розрахунку ПЧ осьових турбін установки ГТ-750-6М; режими роботи ГТ-750-6М, що встановлена на Шебелинській компресорній станції, за період з 01.10.2007 р. по 30.09.2008 р., приклади розрізів розрахункового об'єму та розрахунків впливу підрізки вихідних кромки на розподілення тиску, приклади паретовської конкурентності потужності та ККД для ЦВТ К-220-44-2М (з відборами пари), приклади діалогових вікон конструкторів по формуванню інформаційних моделей об'єктів проектування.



Рис. 15. Економія палива установки ГТ-750-6М по режимам роботи

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи розв'язана науково-практична проблема розробки об'єктно-орієнтованої методології багаторівневої, багатопараметричної й багатокритеріальної оптимізації ПЧ осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

Оптимізаційні алгоритми, створені на основі запропонованої методології, реалізовані в прикладному програмному комплексі і придатні для оптимального проектування ПЧ перспективних осьових турбін.

Основні результати й висновки роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз основних принципів побудови й тенденцій розвитку сучасних програмно-інструментальних комплексів, а також існуючих методів і алгоритмів

автоматизації розв'язання задач оптимального проектування проточної частини осьових турбін та інших складних технічних систем.

2. Розроблені, удосконалені й включені в єдиний інтегрований інформаційний простір програмного комплексу інформаційно й системно погоджені математичні моделі:

- течії робочого тіла в осьовій турбіні, що включає рівняння соплового паророзподілу у оберненій постановці й рівняння термогазодинамічних процесів в багатоступеневій проточній частині всіх циліндрів турбіни;
- одномірної, коаксіальної (квазидвовірної) і осьосиметричної течії робочого тіла в багатоступеневій проточній частині, що забезпечують, з урахуванням зміни втрат енергії в її елементах, стійкі рішення, у тому числі, і при моделюванні роботи на маловитратних режимах (до 6-8% від номінального);
- побудови й розрахунку теплових схем газотурбінних установок з урахуванням змінних навантажень.

3. Створена й програмно реалізована універсальна методологія структурно-топологічного опису інформаційних моделей проточної частини осьових турбін та інших складних технічних систем у єдиному інтегрованому просторі.

4. Розроблена й програмно реалізована універсальна об'єктно-орієнтована й інваріантна, стосовно структурної топології інформаційної моделі проточної частини, методологія рекурсивного розв'язання багаторівневих багатопараметричних і багатокритеріальних задач оптимального проектування проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

5. Розроблено методи визначення оптимальних положень запірних елементів регулюючих клапанів і поворотних соплових лопаток для заданої масової витрати робочого тіла з урахуванням оцінки впливу їхнього розташування на ефективність проточної частини всієї турбіни й парового циклу.

6. Застосування розробленої універсальної об'єктно-орієнтованої методології рекурсивної багаторівневої оптимізації для розв'язання практичних задач оптимального проектування проточних частин осьових турбін і інших об'єктів енергетики, що працюють як на номінальному режимі, так і з урахуванням зміни експлуатаційних навантажень, підтвердило її надійність і високу ефективність.

7. Одержані оптимальні рішення для:

- проточної частини циліндра високого тиску турбіни К-330-23,5 виробництва ВАТ «Турбоатом» (досягнуте підвищення потужності циліндра на 4,52 МВт і збільшення ККД на 5,37 %);
- проточної частини циліндра високого тиску турбіни К-220-44-2М виробництва ВАТ «Турбоатом» для АЕС «Ловііса» (Фінляндія) (забезпечено приріст потужності на 5,949 Мвт і ККД на 3,21%);
- двох конструкцій проточної частини утилізаційних турбодетандерних установок, що працюють у широкому діапазоні зміни масової витрати природного газу. Оптимальні проточні частини забезпечують значний приріст корисної потужності, на деяких режимах експлуатації він становить близько 5%;
- положень запірних елементів регулюючих клапанів (ЗЕРК) (турбіна К-310-24) для заданої витрати робочого тіла, або необхідної потужності турбоагрегату. Показано, що при частковому навантаженні з масовою витратою пари в 70 кг/с. застосування оптимальних положень ЗЕРК дає вигоду в абсолютному ККД циклу більше 1%, у порівнянні із традиційним підходом керування положеннями ЗЕРК;
- теплової схеми газотурбінної установки, як об'єкта оптимізації першого рівня рекурсії при оптимізації ПЧ турбіни низького тиску в газотурбінній установці з розрізним валом дозволило запропонувати варіант модернізації газотурбінної установки ГТ-750-6М, встановленої на Шебелинській компресорній станції, що

дозволяє підвищити її економічність у всьому діапазоні робочих навантажень (економія природного газу за 177 днів експлуатації становить 50831 кг).

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені в розробку САПР «Турбоагрегат», у навчальний процес кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» (м. Харків), а результати оптимізації використовуються для тендерних пропозицій і в процесі проектування нових ПЧ ЦВТ потужних парових турбін у ВАТ «Турбоатом» (м. Харків), а також при проектуванні утилізаційних турбодетандерних установок у ПАТ «Турбогаз» (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Усатый А.П. Исследование экономичности осевых турбинных ступеней с помощью формальных макромоделей / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, Г.Л. Романов // Теплоэнергетика.– М., 1988.– № 6. – С. 24–27. *Здобувачем особисто розроблено методи та алгоритми створення формальних макромоделей з використанням методів теорії планування експерименту. Проведено чисельний експеримент та аналіз одержаних результатів.*

2. Усатый А.П. Подсистема автоматизированного проектирования проточной части паровых турбин / Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, Г.Л. Романов, О.Е. Скибина // Теплоэнергетика.– М., 1989.– № 2. – С. 68–70. *Здобувачем особисто розроблено структуру інформаційних моделей турбінного ступеня та багатоступеневого циліндра, яка забезпечує інформаційну єдність підсистеми автоматизованого проектування.*

3. Усатый А.П. Оценка геометрических параметров турбинной решетки при автоматизированном проектировании проточной части / А.П. Усатый, С.Н. Кожевников, Е.Э. Скибина, Ю.Н. Говорущенко // Вестник Харьковского политехнического института. – 1990.– №44. – С. 42 – 48. *Здобувачем особисто проведено параметризацію залежних геометричних параметрів турбінних решіток від незалежних параметрів, сплановано та проведено обчислювальний експеримент, а також виконана його обробка. Проаналізовані результати та зроблені основні висновки.*

4. Усатый А.П. Проектирование и сравнительное расчётно-экспериментальное исследование двухступенчатого отсека воздушной турбины / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2005. – №6. – С. 49–53. *Здобувачем особисто був спроектований двоступеневий відсік повітряної турбіни та проведені експериментальні дослідження його ефективності. Зроблено порівняння розрахункових та експериментальних досліджень.*

5. Усатый А.П. Разработка информационной среды и средств динамического управления информационными моделями данных сложных технических объектов применительно к САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2006. – №5. – С. 36–42. *Здобувачем особисто розроблена методологія формування інформаційного середовища та методів управління інформаційними моделями складних технічних об'єктів.*

6. Усатый А.П. Многоуровневая оптимизация параметров проточной части осевых турбин с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2007. – С. 26–30. *Здобувачем особисто розроблена методологія багаторівневої рекурсивної оптимізації з урахуванням змінних режимів експлуатації. Проведено аналіз одержаних результатів.*

7. Усатый А.П. Результаты оптимального проектирования турбодетандера с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Проблеми машинобудування. – 2007. – Т.10, №4 – С. 33–39. *Здобувачем особисто розроблено двошаровий метод багаторівневої оптимізації турбодетандерів з урахуванням змінних режимів експлуатації. Проведено аналіз одержаних результатів.*

8. Усатый А.П. Островная модель генетического алгоритма в задачах оптимизации осевых турбин с учётом переменного режима работы / А.П. Усатый // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2008. – №3. – С. 56–66.

9. Усатый А.П. Определение начальных приближений параметров проточной части осевой турбины в задачах оптимального синтеза и анализа / А.П. Усатый // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2008. – №11. – С. 14–20.

10. Усатый А.П. Оптимизация геометрических параметров проточной части турбодетандера с поворотными диафрагмами / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2008. – №6. – С. 32–40. *Здобувачем особисто розроблена структура та метод розв'язання оптимізаційних задач для одержання оптимальних конструкцій турбодетандерів з поворотними сопловими лопатками усіх ступенів турбодетандерів.*

11. Усатый А.П. Программная реализация единого информационного пространства интегрированной системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Електронне моделювання. – 2009. – Т. 31, №2. – С. 43-55. *Здобувачем особисто розроблена методологія формування єдиного інтегрованого інформаційного простору системи автоматизованого проектування «Турбоагрегат», а також виконана її програмна реалізація.*

12. Усатый А.П. Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин с учетом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Тяжелое машиностроение. – М., 2009. – № 9. – С. 11–15. *Здобувач особисто розробив метод та алгоритм багаторівневої рекурсивної оптимізації із забезпеченням високої ефективності процесів інформаційної узгодженості при виконанні оптимального проектування. Проаналізовано результати розв'язання оптимізаційних задач з використанням розробленого алгоритму та зроблені висновки.*

13. Усатый А.П. Усовершенствование обобщенной методики расчета эффективности регулировочных ступеней для задач анализа и оптимального проектирования / А.П. Усатый, А.В. Бойко, И.В. Жевноватченко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009.– №3. – С. 82 – 89. *Здобувачем особисто розроблено метод і алгоритм удосконалення узагальнюючої методики розрахунку ефективності регулювальних турбінних ступенів. Висока точність одержаної удосконаленої методики забезпечує надійність та достовірність результатів оптимізації з її використанням.*

14. Усатый А.П. Модель совместного расчета соплового парораспределения и проточной части осевой турбины в САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Енергетика та електрифікація. – 2009. – №12. – С. 38–44. *Здобувачем особисто розроблена математична модель, система рівнянь якої включає рівняння течії робочого тіла через систему соплового паророзподілу та рівняння течії пари через проточні частини усіх циліндрів осьової турбіни. Проведені та проаналізовані результати розрахунку турбіни К-310-23,5, зроблені висновки.*

15. Усатый А.П. Интегрирование процедуры создания и расчёта схем ГТУ в САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2009. – №3. – С. 111–115. *Здобувачем особисто розроблена методологія формування єдиного інтегрованого інформаційного простору та запрограмовані універсальні алгоритми, використання яких дозволяє інтегрувати інформаційні і математичні моделі складних технічних об'єктів до єдиного інтегрованого інформаційного простору САПР «Турбоагрегат».*

16. Усатый А.П. Проточная часть цилиндра осевой турбины как объект интегрированного информационного пространства САПР «Турбоагрегат» / А.П. Усатый // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – №1. – С. 77–85

17. Усатый А.П. Модели расчета систем соплового парораспределения в задачах многорежимной оптимизации / А.П. Усатый // Энергобережения. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – №4(74)□. – С. 23–28

18. Усатый А.П. Алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин газотурбинных установок с учётом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – №3. – С. 37–42. *Здобувачем особисто розроблено універсальний рекурсивний алгоритм розв'язання багаторівневих, багатокритеріальних, багатопараметричних задач оптимізації складних технічних систем з урахуванням змінних режимів експлуатації. Прикладом успішного використання цього алгоритму було розв'язання задачі оптимального проектування проточної частини турбіни ГТУ з урахуванням теплової схеми установки в рамках єдиного інформаційного простору САПР «Турбоагрегат».*

19. Усатый А.П. Оптимизация проточных частей газовых турбин с учётом режимов эксплуатации в рамках САПР «Турбоагрегат»/ А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2010. – № 3. – С. 74-77. *Здобувачем особисто розроблена та описана методологія оптимального проектування проточних частин газових турбін з урахуванням режимів їх експлуатації, як складних технічних об'єктів єдиного інтегрованого інформаційного простору САПР «Турбоагрегат».*

20. Усатый А.П. Создание методики оценки влияния подрезки выходных кромок на эффективность турбинных решеток активного типа / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева // Проблеми машинобудування.– 2010. – Т.13, №6□. – С. 9–16. *Здобувачем особисто розроблена та описана методологія створення методики по оцінці впливу підрізки вихідних кромок на ефективність турбінних решіток активного типу. Проаналізовані результати та зроблені основні висновки.*

21. Усатый А.П. Комбинаторный алгоритм управления регулирующими клапанами системы соплового парораспределения / А.В. Бойко, А.П. Усатый // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2011.– №5. – С. 5–14. *Здобувачем особисто розроблено та описано комбінаторний алгоритм незалежного управління положеннями запірних елементів регулюючих клапанів системи соплового паророзподілу. За допомогою цього алгоритму вирішена задача оптимального управління положеннями запірних елементів регулюючих клапанів турбіни К-310-23,5 для різних масових витоків пари через турбіну. Проаналізовані результати та зроблені основні висновки.*

22. Усатый А.П. Оценка влияния межвенцового зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2012. – №7. – С. 49–55. *Здобувачем особисто сформульована постановка задачі та розроблена програма дослідження щодо оцінки впливу величини зазору між вінцями регульовального турбінного ступеня на його ефективність при змінних режимах.*

23. Усатый А.П. Оптимизация проточной части осевых турбин с учётом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: XIII всерос. межвуз. науч.-техн. конф., 29-31 окт. 2008 г. : тезисы докл. – Москва, МГТУ им. Баумана, 2008. – С. 65–66. *Здобувачем особисто розроблена структура та метод розв'язання оптимізаційних задач для одержання оптимальних конструкцій турбодетандерів з поворотними сопловими лопатками усіх ступенів турбодетандерів.*

24. Usaty A.P., Boiko A.V., Govorushchenko Yu.N., Rudenko A.S. Optimal design of turbines taking into consideration the mode of operation, Proceedings / A.P. Usaty, A.V. Boiko, Yu.N. Govorushchenko, A.S. Rudenko // 8th European Turbomachinery Conference, March 23-27, 2009 y.: – Graz, Austria, 2009.– P. 559-569. *Здобувачем особисто розроблена методологія та створено програмне забезпечення для багаторівневої рекурсивної, багатопараметричної і*

багатокритеріальної оптимізації проточних частин осьових турбін. Одержані та проаналізовані результати оптимізації ПЧ УТДУ та зроблені висновки.

АНОТАЦІЇ

Усатий О.П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2012 р.

Дисертацію присвячено розробці універсальної об'єктно-орієнтованої методології багатопараметричної і багатокритеріальної оптимізації проточної частини осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації і різного роду конструктивних, технологічних та функціональних обмежень в рамках ЄПП і створенню на її основі спеціального програмного забезпечення. При реалізації цієї методології було розроблено, вдосконалено та включено до ЄПП оптимізаційного програмного комплексу ряд математичних моделей (одномірну, коаксіальну (квазидвовірну), осьосиметричну, моделювання спільної роботи СПР та всіх циліндрів турбоагрегату, теплової схеми ГТУ), які описують, з різним ступенем деталізації та складності, течію робочого тіла в ПЧ осьових турбін та її елементах. Інформаційна та системна єдність математичних моделей в ЄПП забезпечена завдяки використанню спеціально розробленого, з дотриманням вимог міжнародного стандарту ISO 11179, універсального класу метаданих, призначеного для опису елементів ЄПП. Теоретичні аспекти розробленої методології базуються на фундаментальних положеннях теорії систем і автоматизованого проектування, методах теорії планування експерименту, використанні кубічної сплайн-інтерполяції, комбінаторних алгоритмів, точок КПт послідовностей, методу роя частинок, та деяких методів динамічного програмування, використовуються також реляційні СУБД і ODBC. Універсальність та висока ефективність розробленої методології підтверджені розв'язанням ряду задач: оптимізації ПЧ ЦВТ парових турбін; визначення оптимальних положень ЗЕРК для заданих витрат пари; оптимізації ПЧ УТДУ з визначенням оптимальних кутів виходу з соплових решіток для заданих витрат природного газу; оптимізації ПЧ газової турбіни низького тиску ГТУ. Наведено аналіз і роз'яснені причини збільшення ефективності оптимальних ПЧ.

Ключові слова: турбоагрегат, осьова турбіна, тепла схема, цикли ГТУ, термодинамічний розрахунок циклів, течія в проточній частині, втрати енергії, перемінні режими роботи, багато параметрична оптимізація ПЧ.

Усатый А.П. Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2012 г.

Диссертация посвящена разработке универсальной объектно-ориентированной методологии многопараметрической и многокритериальной оптимизации проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации и различного рода конструктивных, технологических и функциональных ограничений в рамках ЕИИП и созданию на ее основе специального программного обеспечения. При реализации данной методологии было разработано, усовершенствовано и включено в ЕИИП оптимизационного программного комплекса ряд математических моделей, описывающих, с разной степенью сложности и детализации, процессы в ПЧ осевых турбин и ее элементах: течения рабочего тела в осевой

турбине, которая включает уравнения соплового парораспределения в обратной постановке и уравнения многоступенчатой ПЧ всех цилиндров турбины; одномерного, коаксиального (квазидвумерного) и осесимметричного течения рабочего тела в многоступенчатой ПЧ, обеспечивающие, с учетом изменения потерь энергии в элементах ПЧ, устойчивые решения, в том числе, и при моделировании работы на малорасходных режимах (вплоть до 6-8% от номинального); построения и расчета тепловых схем ГТУ с учетом переменных нагрузок. Информационное и системное единство оптимизационного комплекса и математических моделей, включенных в его ЕИИП, обеспечено благодаря использованию специально разработанного, с учетом требований международного стандарта ISO 11179, универсального класса метаданных, предназначенного для описания элементов ЕИИП. Теоретические аспекты разработанной универсальной объектно-ориентированной методологии многопараметрической и многокритериальной оптимизации базируются на фундаментальных положениях теории систем и автоматизированного проектирования, методах теории планирования эксперимента, использовании кубической сплайн-интерполяции, комбинаторных алгоритмов, точек ЛПт последовательностей, метода роя частиц и некоторых методов динамического программирования, используются также реляционные СУБД (MS Access, MySQL, SQLite) и ODBC. Универсальность и высокая эффективность, разработанных в рамках предложенной методологии рекурсивных методов решения многоуровневых, многопараметрических и многокритериальных задач оптимального проектирования ПЧ осевых турбин, а также возможностей, созданного в работе программного комплекса, подтверждены поставленными и решенными задачами по определению оптимальных значений конструктивных и термогазодинамических параметров реальных конструкций многоступенчатых осевых турбин. В качестве примеров применения разработанной методологии в диссертационной работе приводятся результаты оптимизации: на номинальный режим – ПЧ ЦВТ мощных паровых турбин К-330-23,5 К-220-44-2М (ВАТ «Турбоатом»); с учётом реальных режимов эксплуатации – газовой турбины низкого давления ГТУ ГТ-750-6М (Шебелинская компрессорная станция); положений ЗЭРК для заданного массового расхода пара с учетом оценки влияния их расположений на эффективность ПЧ всей турбины и парового цикла (турбина К-310-240 ОАО «Турбоатом»); эффективных углов выхода потока из сопловых аппаратов в зависимости от заданных значений массового расхода природного газа для осевых УТДУ с поворотными сопловыми лопатками первой и всех ступеней (ПАО «Турбогаз»). Приведен анализ и рассмотрены причины повышения эффективности оптимальных ПЧ.

Ключевые слова: турбоагрегат, осевая турбина, циклы ГТУ, термодинамический расчет циклов, течение в проточной части, потери энергии, переменные режимы работы, многопараметрическая оптимизация ПЧ.

Usaty O.P. All-range multiparameter multicriteria optimization of the turbine flow path in the integrated information space. On the rights of a manuscript.

Thesis for granting the Degree of Doctor of Technical sciences in speciality 05.05.16 – Turbomachine and Turbo-installation. – National Technical University «Kharkiv Politechnical Institute». – Kharkiv, 2012.

The dissertation is devoted creation of universal object-oriented methodology of axial turbines flow paths multiparameter and multicriteria optimization taking into consideration operation modes and various restrictions within the limits of the integrated information space (IIS) and development on its basis of the special software. During realization of this methodology a number of mathematical models, which describe the flow of a working medium in axial turbines flow paths and in its elements with different level of detail and complexity (one-dimensional, coaxial (quasi-two-dimensional), axial-symmetric, simulation of combined action of steam distribution system and all cylinders of a turbine unit, gas-turbine unit thermal scheme), have been developed, improved and included in the integrated information space of optimization program complex. Information and

system unity of mathematical models in IIS is provided by using a specially designed, subject to the requirements of ISO 11179, the universal class of metadata for describing IIS elements. Theoretical aspects of the developed methodology are based on fundamental propositions of the system theory and computer-aided design, methods of design of experiment theory, using of cubic spline interpolation, combinatorial algorithms, points of Sobol sequences, particle swarm method and some methods of dynamic programming, also relational DBMS and ODBC are used. Universality and high efficiency of the developed methodology are confirmed by the solution of a number of tasks: optimization of high pressure cylinders flow paths of steam turbines; definition of optimal positions of regulating valves locking elements for specified steam rate; optimization of rendering turbine expander unit flow path with definition of optimal outlet effective angles of nozzle cascades for given flow rates of natural gas; optimization of low pressure turbine flow path of gas-turbine unit. The analysis an explanation of the causes of increase in efficiency of optimized flow paths are resulted.

Keywords: a turbounit, axial turbine, cycles of gas-turbine units, the thermodynamic calculation of the cycles, a flow in the flow path, energy losses, variable operation modes, multiparameter optimization.

