

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

РУДЕНКО ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 62-135.001.26

**БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН
ОСЬОВИХ ТУРБІН З УРАХУВАННЯМ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2012

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

кандидат технічних наук, професор
Бондаренко Герман Андрійович,
Сумський державний університет, м. Суми,
професор кафедри технічної теплофізики

Захист відбудеться «17» травня 2012 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий « 6 » квітня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Покращення енергетичних показників осьових турбін є дуже важливим завданням. Враховуюче їх широке розповсюдження, а також той факт що Україна входить до десятки країн з повним циклом виробництва турбоагрегатів, успішне вирішення вказаного завдання здатне принести Україні значний економічний ефект та дозволить знизити техногенне навантаження на довкілля.

На сучасному етапі розвитку турбінобудування, при створенні нових турбоустановок та модернізації вже існуючих, як правило, виконується однорежимне проектування проточних частин (ПЧ) і тільки в окремих випадках здійснюється врахування впливу режимів експлуатації на вибір одиничних параметрів ПЧ. Спроектовані таким чином проточні частини мають високий рівень ККД на номінальному режимі. В той же час, досвід експлуатації показує, що існує цілий клас турбомашин, які працюють в широкому діапазоні зміни експлуатаційних навантажень. Такі умови роботи негативно впливають на ККД та показники працездатності осьових турбін. Враховуючи вищезазначене, перспективно враховувати майбутні режими роботи на етапі проектування ПЧ.

Поліпшення техніко-економічних показників турбоустановок в широкому діапазоні зміни експлуатаційних навантажень висуває задачу вибору основних геометричних параметрів ПЧ з урахуванням індивідуальних особливостей роботи агрегату. Вказана задача є актуальною й визначила напрямок дисертаційної роботи по багатопараметричній оптимізації ПЧ осьових турбін з урахуванням режимів роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ» у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: «Теоретичні фундаментальні дослідження в галузі гідродинаміки й теплообміну в парових і газових турбінах» (ДР №0106U001480), «Аеродинамічне вдосконалення ступенів турбін на основі розрахункових та експериментальних досліджень структури потоку в проточній частині» (ДР №0106U001479), «Фундаментальні наукові дослідження проблем оптимізації термогазодинамічних процесів турбомашин в інтегрованому інформаційному просторі» (ДР №0109U002389), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – створення вірогідної та обґрунтованої методики оптимального проектування проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та розробка на її основі спеціального програмного забезпечення.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- розробити методику оптимального проектування проточних частин осьових турбін з урахуванням передбачуваних режимів експлуатації;
- для конструкцій ПЧ з поворотними сопловими лопатками розробити методику визначення кутів виходу з соплових апаратів в залежності від режимів роботи;

– вдосконалити математичні моделі одновимірної течії в ПЧ осьових турбін і термодинамічних процесів у циклах газотурбінних установок (ГТУ), а також провести роботи для їх використання в САПР «Турбоагрегат» НТУ «ХП»;

– реалізувати можливість використання розробленої методики багатопараметричної оптимізації проточних частин осьових турбін в якості сценаріїв обчислювальних процесів САПР «Турбоагрегат»;

– виконати оптимізацію існуючих конструкцій проточних частин осьових турбін з урахуванням реальних режимів експлуатації.

Об'єктом дослідження є термодинамічні процеси в теплових схемах (ТС) ГТУ та аеродинамічні явища в проточних частинах осьових турбін.

Предмет дослідження – термодинамічні параметри циклів ГТУ і газодинамічні характеристики проточних частин осьових турбін при відхиленні режимів експлуатації від проектних.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії гідродинаміки та термодинаміки. Декомпозиція загальної оптимізаційної задачі у відповідності з структурною ієрархією турбоустановки. Для визначення впливу геометричних параметрів ПЧ на її робочі характеристики використовується методи математичного моделювання течії в ПЧ. Чисельні рішення систем алгебраїчних рівнянь здійснюються методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівса. Оптимальна конструкція ПЧ визначалась з допомогою методів планування експерименту та точок ЛПт послідовностей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– вперше для визначення основних геометричних параметрів проточної частини розроблено та апробовано методику багатопараметричної оптимізації, яка враховує передбачувані експлуатаційні навантаження агрегату;

– вперше, для ПЧ з поворотними сопловими лопатками, в рамки алгоритму оптимізації геометрії ПЧ включено створену методику визначення кутів виходу з соплових апаратів в залежності від режиму експлуатації;

– для ГТУ розроблено оптимізаційний алгоритм, який дозволяє визначати параметри режимів роботи проточної частини турбіни, що необхідно для подальшої оптимізації, при заданих режимах роботи установки;

– вперше в рамках однієї методики виконано оцінку впливу оптимізації геометрії проточної частини на інтегральні характеристики ГТУ.

Практичне значення отриманих результатів для галузі турбінобудування полягає у використанні розробленої оптимізаційної методології для створення нових та модернізації вже існуючих проточних частин осьових турбін, що дозволить суттєво підвищити енергетичні показники турбоагрегату з урахуванням передбачуваних експлуатаційних навантажень.

Результати дисертаційної роботи використовуються ПАТ «Турбогаз» (м. Харків) в процесі проектування нових утилізаційних турбодетандерних

установок, конструкція яких передбачає наявність соплових апаратів з поворотними лопатками (акт впровадження від 20 грудня 2011 р.).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХП» (акт впровадження від 22 грудня 2011 р.) в курсах лекцій «Основи теорії оптимального проектування турбін» та «Змінні режими парових турбін» для студентів та магістрів, які навчаються за напрямками «Енергомашинобудування» та «Теплофізика».

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз сучасних методів оптимального проектування ПЧ осьових турбін; розробка алгоритму багаторівневої оптимізації проточних частин з урахуванням режимів роботи; роботи по вдосконаленню математичних моделей робочих процесів в ПЧ осьових турбін та циклах ГТУ, а також доробка розрахункових програмних процедур, створених на основі зазначених моделей; розробка та апробація методики визначення кутів виходу з соплових апаратів в залежності від режимів роботи для конструкцій ПЧ з поворотними сопловими лопатками; практична реалізація результатів досліджень в САПР «Турбоагрегат» за допомогою програмування; оптимізація існуючої конструкції турбодетандера з поворотними сопловими лопатками та модернізація установки ГТ-750-6М, яка встановлена на Шебелінській компресорній станції, з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: I Науково-практичній конференції магістрів НТУ «ХП» (м. Харків, 2007 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2010 р., 2011 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергосбереження України и пути их решения» (м. Харків, 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2010 р.); Всеросійській міжвузівській науково-технічній конференції «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (м. Москва, Росія, 2008 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «8th European Turbomachinery Conference» (м. Грац, Австрія, 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Современные технологии в газотурбостроении» (м. Алушта, Крим, 2010 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 9 наукових публікаціях, з них: 7 статей у наукових фахових виданнях України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури, 7 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 151 сторінку; з них 30 рисунків по тексту; 3 рисунка на 2 окремих сторінках; 16 таблиць по тексту; список використаних літературних джерел з 94 найменувань на 10 сторінках; 7 додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної інформації про постановки оптимізаційних задач та сучасні методи оптимального проектування ПЧ осьових турбін. Особлива увага приділена питанням вибору математичних моделей, методам пошукової оптимізації, основним підходам до врахування багатокритеріальності та режимів експлуатації при проектуванні ПЧ, а також деяким питанням практичної реалізації оптимізаційних алгоритмів.

В результаті проведеного аналізу виявлені: особливості і недоліки існуючих алгоритмів оптимізації ПЧ; можливості різних за ступенем деталізації математичних моделей та розроблені рекомендації стосовно їх застосування; особливості використання тих чи інших чисельних методів оптимізації при розгляді складних багатокритеріальних і багатопараметричних задач. Визначені перспективні напрямки досліджень по підвищенню ефективності ПЧ за допомогою врахування прогнозованих режимів експлуатації.

У **другому розділі** описано програмну процедуру «TopSchema» для моделювання термодинамічних процесів в циклах ГТУ, математичну модель одновимірної течії в ПЧ, а також підхід до побудови формальних макромоделей які використовуються в розробленому оптимізаційному алгоритмі.

Універсальна процедура термодинамічного розрахунку теплових схем ГТУ «TopSchema» (кафедра турбінобудування НТУ «ХП») завдяки використанню об'єктно-орієнтованого підходу дозволяє моделювати будь-які газотурбінні цикли з доступних елементів. Описано основні модулі вказаної програмної процедури, зв'язки між ними та послідовність виконання термодинамічних розрахунків ТС ГТУ.

Для виконання термодинамічних розрахунків циклів ГТУ на змінні режими роботи з використанням «TopSchema» здобувачем розроблено модуль, який відповідає за моделювання характеристик окремих елементів схем (турбіна, компресор, камера згоряння та інші) при відхиленні режиму роботи від номінального. Вказаний модуль дозволяє використовувати універсальні характеристики елементів ТС, спрощені залежності або інші дані. Для моделювання робочих характеристик компресорів та газових турбін запропоновано використовувати характеристики, побудовані в безрозмірних координатах (параметрах подібності):

$$\bar{G}_{corr} = G/G_0 \cdot P_0^*/P^* \cdot \sqrt{T^*/T_0^*}, \quad \bar{n}_{corr} = n/n_0 \cdot \sqrt{T_0^*/T^*}, \quad (1)$$

де \bar{G}_{corr} та \bar{n}_{corr} – відносні зведені витрата і оберти; G – масова витрата газу; n – оберти ротора; P^* та T^* – повні температура та тиск робочого тіла на вході до ПЧ; індексом «0» позначені параметри що відповідають роботі установки на номінальному режимі.

На рис. 1 наведені приклади універсальних характеристик в безрозмірних

координатах. Для зручності використання характеристик, вони зберігаються в вигляді таблиць. Визначення необхідного параметра здійснюється за допомогою лінійної інтерполяції функції двох змінних, при цьому табличні дані використовуються в якості базових точок. При роботі з характеристикою компресора, для виключення попадання в область помпажа, запропоновано будувати інтерполяційну сітку з використанням допоміжних ліній (штрихові лінії на рис. 1а). В цьому випадку вузли інтерполяції утворюються на перехресті допоміжних ліній та ліній постійних зведених обертів, а інтерполяційна сітка відміна від прямокутної.

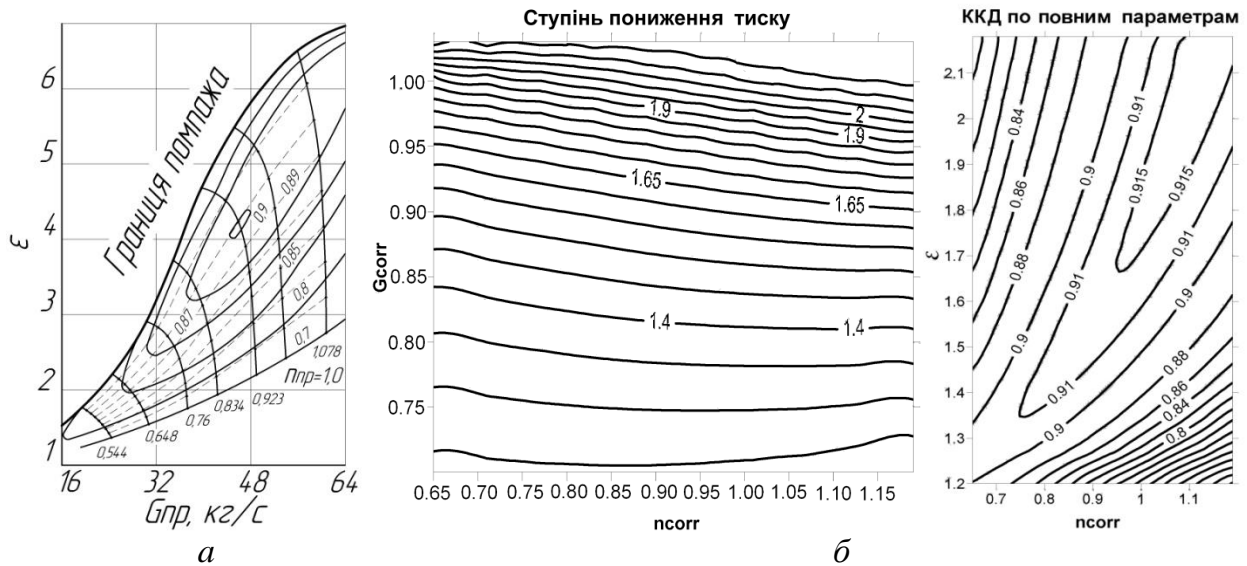


Рис. 1 Універсальні характеристики елементів ГТУ: а – характеристика осевого компресора, б – характеристика газової турбіни

Також вдосконалено модуль побудови систем балансових рівнянь. Завдяки проведеним роботам в програмі «TopSchema» з'явилася можливість виконувати термодинамічний розрахунок ТС ГТУ на будь-які режими роботи в двох постановках: $n=\text{const}$ (енергетичні установки) та $n=\text{var}$.

Для визначення впливу геометричних параметрів ПЧ на втрати в соплових та робочих решітках використовується математична модель одновимірної течії в ізольованому турбінному ступені та в групі ступенів. Стаціонарна одновимірна течія потоку описується рівняннями енергії та нерозривності, процесу і стану, кінематичними та замикаючими співвідношеннями.

Вказана математична модель реалізована в якості програмної процедури на мові програмування С і дозволяє виконувати теплові розрахунки одиночного осевого ступеня та групи ступенів в наступних постановках: визначення витрати G_0 , для заданого тиску на вході P_0^* ; визначення тиску P_0^* при відомій витраті G_0 ; визначення кутів виходу з соплових апаратів α_1 для одночасно заданих P_0^* и G_0 . Наприклад, для прямої задачі визначення витрати G_0 через осевий ступень, необхідно вирішити систему з трьох рівнянь:

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

$$G_2 = \rho_2 \left(P_2 \left(H + \frac{1}{2} \left(u^2 - \frac{w_2^2}{\psi^2} \right), S_1(P_1, i_1) \right), H + \frac{u^2 - w_2^2}{2} \right) w_2 \cdot \sin \beta_2 F_2; \quad (3)$$

$$P_2 \left(H + \frac{1}{2} \left(u^2 - \frac{w_2^2}{\psi^2} \right), S_1 \right) = P_{23a\delta}. \quad (4)$$

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 та робочої решіток в абсолютному та відносному русі; F_1 , F_2 – площі соплової та робочої решіток. В системі рівнянь (2)-(4) невідомими є G , c_1 та w_2 . Ця система рівнянь вирішується методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівса. При розгляді багатоступінчатих ПЧ система рівнянь складається з рівнянь для витрат в розрахункових перетинах (G_1 та G_2) для кожного ступеня та замикаючого співвідношення.

Наведено послідовності чисельного вирішення системи рівнянь (2)-(4) методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівса та визначення коефіцієнтів швидкості соплових і робочих решіток (φ , ψ). При визначенні рівня економічності турбінних ступенів враховуються наступні види втрат: втрати в решітках, втрати від нестационарності, втрати пов'язані з наявністю витоків через радіальний зазор та діафрагмене ущільнення та додаткові втрати. Для розрахунку, наведених втрат використовуються методики які добре себе зарекомендували, а саме: профільні втрати оцінюються по методиці Крейга і Кокса (з поправками ХПІ); вторинні – по методиці Г.Ю. Степанова; втрати від нестационарності – по С.З. Копелеву; інші втрати визначаються відповідно до загальноприйнятих рекомендацій.

Для підвищення стійкості розрахунку ПЧ на режимах роботи з наднизькими витратами робочого тіла, до програмного коду процедури прямого одновимірного розрахунку проточних частин здобувачем були внесені деякі зміни. Також було додано нове замикаюче співвідношення

$$P_2^* \left((i_2 + c_2^2/2), S_2(P_2, i_2) \right) = P_{23a\delta}^*, \quad (5)$$

де P_2^* – значення повного тиску на виході з ПЧ, отримане в результаті розрахунку на поточній ітерації; $P_{23a\delta}^*$ – задане значення повного тиску на виході; i_2 , S_2 та P_2 – ентальпія, ентропія та статичний тиск на виході з ПЧ; c_2 – швидкість виходу з останнього ступеня в абсолютному русі. Рівняння (5) дозволяє в якості відомого вихідного тиску використовувати повний тиск на виході з ступеня/відсіку що розглядається.

Як показали численні розрахункові дослідження й подальші порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, а також з даними з технічної документації, вказані математичні моделі задовольняють вимогам універсальності, адекватності, точності, економічності. Для використання описаних програмних процедур в розробленому оптимізаційному алгоритмі було виконано їх інтегрування до САПР «Турбоагрегат».

Детально описано підхід до побудови формальних макромоделей (ФММ) з використанням засобів теорії планування експерименту у вигляді повного квадратичного поліному другого порядку

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i q_i + \sum_{i=1}^n A_{ii} q_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (6)$$

де y – функція відгуку; n – кількість факторів ФММ; A – коефіцієнти ФММ; \vec{q} – вектор нормованих значень факторів \vec{x} ФММ. Формальні макромоделі використовуються в оптимізаційному алгоритмі замість математичної моделі одновимірної течії в ПЧ для мінімізації затрат машинного часу на етапі пошуку оптимального рішення. Для створення макромоделей в роботі використовуються трьохрівневі плани Бокса-Бенкіна та насичені плани Рехтшафнера.

У **третьому розділі** наведено детальний опис розробленої методики багатопараметричної оптимізації ПЧ осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації, а також представлені питання її практичної реалізації.

Задача оптимізації ПЧ з урахуванням прогнозованих режимів експлуатації при наявності функціональних та параметричних обмежень розглядається в наступному вигляді:

$$\vec{Y}^{opt}(\vec{x}_c, \vec{x}_r = \vec{f}(t)) = \max \left(\int_0^T \left(\vec{Y}(\vec{x}_c, \vec{x}_r = \vec{f}(t)) \right) dt \right), \\ \vec{x}_c \in X, \quad \vec{v}(\vec{x}_c) \in V, \quad 0 \leq |X| \leq N_X < \infty, \quad 0 \leq |V| \leq N_V < \infty, \quad (7)$$

де \vec{Y} – вектор цільових функцій; \vec{x}_c – вектор конструктивних параметрів; $\vec{x}_r = \vec{f}(t)$ – вектор функції зміни режимних параметрів з часом; T – період часу; \vec{v} – вектор функціональних обмежень; V, X – області існування функціональних та конструктивних обмежень; N_V, N_X – межі областей існування відповідних обмежень.

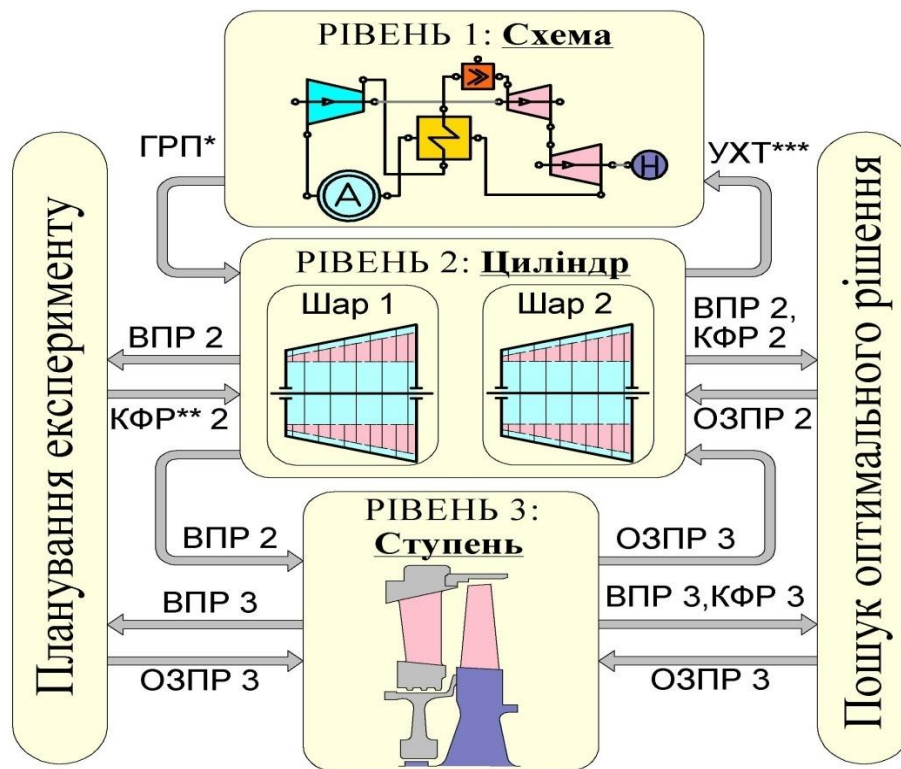
Для вирішення складної задачі оптимізації ПЧ осьових турбін використовується метод декомпозиції. Даний підхід передбачає рознесення загальної оптимізаційної задачі на декілька локальних ієрархічно-підлеглих рівнів. Завдяки вирішенню рівневих задач помірної складності та інформаційним зв'язкам між рівнями проектування, досягається ефективне рішення глобальної оптимізаційної задачі. Процес оптимізації складається з наступних етапів: 1) розподіл задачі на ряд локальних, рівневих задач; 2) створення на оптимізаційних рівнях макромоделей виду (6) функцій цілі та функціональних обмежень за допомогою планування експерименту; 3) при розгляді задач багаторежимної оптимізації необхідно виключити відомі режимні параметри з макромоделей шляхом їх інтегрування; 4) визначення кращих рішень на оптимізаційних рівнях за допомогою ЛПт-пошуку.

Детально розглянута структура розробленого оптимізаційного алгоритму, що наведена на рис. 2. Як видно з рис. 2, для вирішення загальної оптимізаційної задачі використовуються 3 локальних рівня. Найвищий за ієрархією рівень «Схема» призначений для визначення режимних параметрів, необхідних для оптимізації ПЧ, та для оцінки впливу оптимізації ПЧ на

інтегральні показники ГТУ в цілому. Даний рівень може використовуватися лише при оптимізації проточних частин ГТУ.

Рівні «Циліндр» та «Ступень» призначені для оптимізації геометричних параметрів ПЧ. Дані рівні мають власні функції цілі, функціональні обмеження, конструктивні й режимні параметри. На рівні «Циліндр» визначаються меридіональні обводи ПЧ (d_1, d_2, l_1, l_2), а також вхідні та вихідні кути для соплових та робочих решіток ($\alpha_1, \alpha_{0g}, \beta_2, \beta_{1g}$). В якості режимних параметрів рівня «Циліндр» можуть бути задіяні: вхідні тиск та ентальпія (P_0^*, i_0^*), вихідний тиск (P_2^* або P_2), масова витрата (G_0), оберти ротора (n) та співвідношення швидкостей U/C_0 . Критерій якості для другого рівня – внутрішній ККД або потужність відсіку. Нижчий за ієрархією оптимізаційний рівень призначений для пошуку оптимальних значень хорд та чисел лопаток (b_1, b_2, Z_1, Z_2) під задану геометрію ступеня. Вектор режимних параметрів рівня «Ступень» може формуватися з: $P_0^*, i_0^*, P_2, U/C_0, n$. Функціональні обмеження на рівні «Циліндр» – масова витрата робочого тіла на вході до ПЧ та осьове зусилля, діюче на ротор, на рівні «Ступень» – напруги в лопатках, диску та діафрагмі.

Описано запропонований рекурсивний зв'язок між оптимізаційними рівнями, завдяки якому всі рішення вищого рівня «Циліндр» включають в себе кращі рішення нижчих за ієрархією рівнів «Ступень».



Рівень	Варійовані параметри рівня (ВПР)	Оптимальні значення параметрів рівня (ОЗПР)
Циліндр	$d_{1,2}; l_{1,2}; \alpha_1; \alpha_{0g}; \beta_2; \beta_{1g}; P_0^*; i_0^*; P_2; P_2^*; G_0; n; u/C_0$	$d_{1,2}; l_{1,2}; \alpha_1; \alpha_{0g}; \beta_2; \beta_{1g}$
Ступень	$d_{1,2}; l_{1,2}; \alpha_1; \alpha_{0g}; \beta_2; \beta_{1g}; P_0^*; i_0^*; P_2; u/C_0; n; Z_{1,2}; b_{1,2}; m_{1,2}$	$Z_{1,2}; b_{1,2}; m_{1,2}$

*ГРП - графіки зміни режимних параметрів, що визначають режими роботи ПЧ;

**КФР - коефіцієнти ФММ рівня;

***УХТ - універсальні характеристики турбін.

Рис. 2 Структура алгоритму оптимального проектування

Наведена методика визначення кутів виходу з соплових апаратів (α_1) в залежності від режиму експлуатації для конструкцій проточних частин з поворотними сопловими лопатками. Для пошуку оптимальних значень кутів α_1 необхідно вирішити цілий ряд задач виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{Y}_i^{opt}(\vec{\alpha}_{1i}^{opt}) = \max \vec{Y}_i(\vec{\alpha}_{1i}) \\ \vec{Y}_{i+1}^{opt}(\vec{\alpha}_{1i+1}^{opt}) = \max \vec{Y}_{i+1}(\vec{\alpha}_{1i+1}) \\ \dots \\ \vec{Y}_n^{opt}(\vec{\alpha}_{1n}^{opt}) = \max \vec{Y}_n(\vec{\alpha}_{1n}) \end{array} \right\}, \quad (8)$$

де i – номер режиму роботи. Тобто кількість задач є еквівалентною кількості режимів роботи, що розглядаються. Для вирішення задач виду (8), до розробленого оптимізаційного алгоритму було додано паралельний обчислювальний шар («Шар 2» рівня «Циліндр» див. рис. 2). Визначення кутів α_1 , як функцій рівня експлуатаційних навантажень, здійснюється на другому етапі вирішення загальної оптимізаційної задачі, після визначення основних геометричних параметрів ($d_1, d_2, l_1, l_2, \beta_2, \beta_{1g}, b_1, b_2, Z_1, Z_2$).

На прикладі утилізаційної турбодетандерної установки (УТДУ) з поворотними сопловими апаратами на всіх 4-х ступенях доведено доцільність включення методики визначення кутів α_1 , в залежності від режимів роботи, до оптимізаційного алгоритму. Підбір оптимальних кутів α_1 для всіх ступенів ПЧ дозволив істотно підвищити ККД УТДУ на маловитратних режимах роботи.

Для розгляду багатокритеріальних задач в розробленому алгоритмі використовуються складені критерії якості.

У **четвертому розділі** наведено результати оптимізації ПЧ утилізаційної турбодетандерної установки з урахуванням прогнозованих режимів роботи.

В рамках розрахункових досліджень було виконано 2 варіанта оптимізації ПЧ УТДУ. Відмінність вказаних варіантів полягає в тому, що в першій конструкції ПЧ сопловий апарат (СА) першого ступеня виконано з поворотними лопатками, а в іншій – всі соплові апарати мають поворотні лопатки.

Описана постановка оптимізаційної задачі. При оптимізації ПЧ з поворотними лопатками СА першого ступеня були задіяні два рівні оптимізаційного алгоритму – «Циліндр» та «Ступень» (рис. 2). На рівні «Циліндр» визначалися оптимальні значення наступних параметрів: $d_1, d_2, l_1, l_2, \alpha_1, \alpha_{0g}, \beta_2, \beta_{1g}$. На нижчому рівні визначалися: b_1, b_2, Z_1, Z_2 . В якості режимного параметра використовувалася масова витрата природного газу через ПЧ (G_0 змінювалася в залежності від режиму роботи від 10,18 до 20,66 кг/с, $G_{0ном}=16,66$ кг/с). Критерій якості рівня «Циліндр» – сумарна робота УТДУ за обраний проміжок часу, для рівня «Ступень» – внутрішній ККД ступеня.

Деякі результати оптимізації ПЧ з поворотними лопатками СА першого ступеня наведено в таблицях 1, 2 та на рис. 3. Як видно з рис. 3, оптимальна конструкція за рівнем економічності істотно перевершує вихідну на режимах з

витратами вищими за номінальну та поступається на двох маловитратних режимах. Враховуючи, що кількість режимів з великими витратами більша за кількість маловитратних, отримане рішення є закономірним та обґрунтованим.

Таблиця 1. –

Результати оптимізації 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	0,493	0,490	0,491	0,507
d_2 , [м]	0,480	0,480	0,480	0,480	0,494	0,489	0,496	0,513
l_1 , [м]	0,0305	0,0350	0,0425	0,0510	0,0300	0,0380	0,0440	0,0550
l_2 , [м]	0,0310	0,0375	0,0465	0,0560	0,0330	0,0390	0,0500	0,0640
α_1 , [град]		16,00	19,60	24,50		15,27	18,94	24,57
β_2 , [град]	22,00	25,70	29,10	34,00	21,23	25,53	27,65	30,38
Z_1	54	54	46	46	62	47	51	46
Z_2	69	69	53	53	74	74	55	57
b_1 , [мм]	35,099	35,099	42,118	42,118	32,000	41,000	39,000	45,000
b_2 , [мм]	30,809	30,809	40,150	40,150	33,000	32,000	43,000	42,000
α_{0g} , [град]		95,250	92,540	90,410		99,737	93,692	88,992
β_{1g} , [град]	30,75	35,68	44,03	53,72	48,68	33,73	39,46	65,14

Таблиця 2. –

Значення кутів α_1 першого ступеня для прогнозованих режимів роботи

№ режиму	1	2	3	4	5	6	7
Масова витрата, кг/с	18,71	20,66	18,71	10,18	10,55	17,57	20,35
α_1 для вихідної конструкції, град	16,91	34,93	16,91	9,66	9,62	14,02	31,02
α_1 для оптимальної конструкції, град	14,73	20,05	14,73	9,21	9,22	13,19	18,77

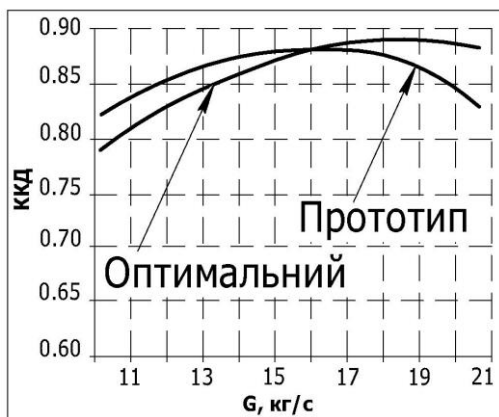


Рис. 3 ККД проточних частин УТДУ

Детально розглянуто причини збільшення та зниження внутрішнього ККД оптимальної ПЧ на різних режимах роботи. Наприклад, на режимі роботи з $G_0=10,18$ кг/с (див. табл. 2) погіршення ККД проточної частини відбулося: 1) через зниження ККД робочої решітки (її коефіцієнт швидкості зменшився на 17,5%) за рахунок збільшення удару на вході до решітки; 2) через зниження внутрішнього ККД останнього, 4-го ступеня на 7,3% за рахунок збільшення втрат в соплових та робочих решіток, а також значного збільшення втрат з вихідною швидкістю. На режимі роботи з

максимальним значення витрати через ПЧ, яка дорівнює 20,66 кг/с, вдалося підвищити ефективність всіх 4-х ступенів. Найбільший приріст ККД спостерігається на першому та останньому ступенях (в основному за рахунок поліпшення умов входу до робочих решіток, тобто зменшення ударів, та зниження втрат з вихідною швидкістю).

При рішенні оптимізаційної задачі для ПЧ УТДУ з поворотними лопатками СА на всіх ступенях використовувалися ті ж самі критерії якості та задіяні рівні проектування, що й в попередній задачі. Додатково в процесі оптимізації був задіяний шар 2 рівня «Циліндр» (див. рис. 2), який використовувався для визначення кутів виходу з соплових апаратів (α_1) в залежності від режиму роботи. Застосування поворотних соплових лопаток по всій ПЧ дозволило істотно розширити діапазон експлуатаційних навантажень (витрата газу через ПЧ варіювалася від 30% до 124% номінальної). Оптимізація проведена з урахуванням 12 режимів роботи УТДУ, значення масової витрати по режимам роботи наведені в таблиці 3 (кожен режим роботи відповідає навантаженню УТДУ на протязі місяця). Таким чином, на першому етапі вирішення оптимізаційної задачі були визначені $d_1, d_2, l_1, l_2, \beta_2, \beta_{1g}, b_1, b_2, Z_1, Z_2$ для кожного ступеня ПЧ, а на другому – значення кутів α_1 для кожного ступеня в залежності від витрати робочого тіла.

Таблиця 3. –

Витрата природного газу через ПЧ УТДУ на заданих режимах роботи

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G_0 , кг/с	18,71	20,66	18,71	10,18	6,33	6,28	4,94	6,14	7,17	10,55	17,57	20,35

Основні результати другого варіанта оптимізації ПЧ УТДУ представлені в таблиці 4 та на рисунках 4, 5. Як видно з рис. 5, спроектована ПЧ за рівнем ефективності перевершує вихідну на всіх режимах роботи. Істотне підвищення ККД спостерігається на маловитратних режимах роботи, а також на режимах з масовою витратою більше 18 кг/с. Додатковий виробіток електроенергії за експлуатаційний цикл склав 914,793 МВт·год (3,64 %).

Таблиця 4. –

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

Наведено основні причини збільшення ККД оптимальної ПЧ для різних режимів роботи. Підвищення ККД на маловитратних режимах роботи в основному відбулося завдяки підбору оптимальних кутів виходу з СА. З рис. 4 видно, що при малих витратах природного газу кут α_1 1-го ступеня приймає дуже малі значення в порівнянні з кутами наступних ступенів. Це приводить до

збільшення теплоперепаду 1-го ступеня. Незважаючи на деяке погіршення ефективності 1-го ступеня, таке рішення дозволило покращити умови роботи 2-го та 3-го ступенів та отримати позитивний підсумковий результат. Наприклад, на режимі роботи з $G_0=4,94$ кг/с (див. таблицю 3) в результаті оптимізації знизилася ефективність 1-го та 4-го ступенів, та істотно підвищилася на 2-му та 3-му. До причин зниження ККД 1-го ступеня відносяться: збільшення удару на вході до робочої решітки, зниження реактивності та збільшення витрати через діафрагмове ущільнення. ККД останнього ступеня понизився через зростання втрат з вихідною швидкістю.

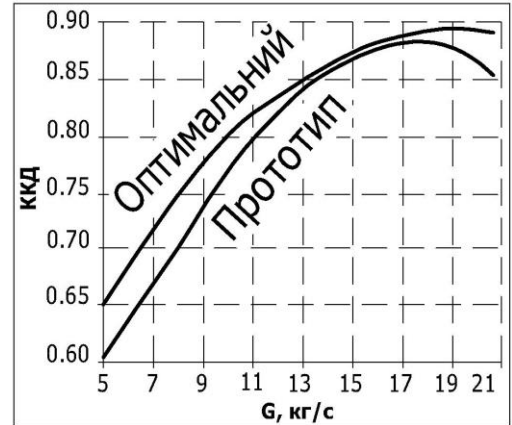
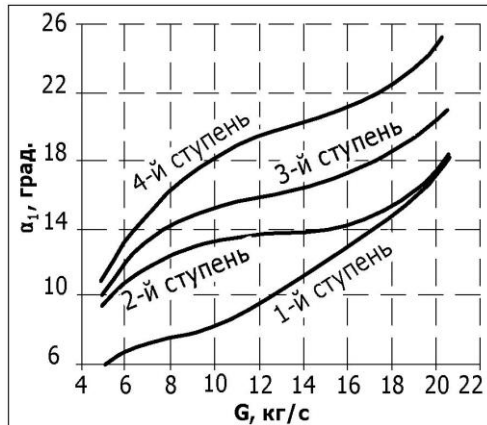


Рис. 4 Оптиміальний розподіл кутів α_1 по ПЧ в залежності від витрати G . Зростання ефективності на режимах роботи з витратами, близькими або більшими за номінальний відбулося за рахунок підбору оптимальної комбінації основних геометричних параметрів (див. таблицю 4). Це дозволило знизити втрати, пов'язані з натиканням робочого тіла на решітки, знизити втрати з вихідною швидкістю та підвищити ефективність соплових та робочих решіток. Наприклад, на режимі роботи з $G_0=20,66$ кг/с (див. таблицю 3) в результаті оптимізації підвищився ККД всіх 4-х ступенів ПЧ.

Результати оптимізації ПЧ УТДУ довели необхідність прийняття до уваги прогнозованих режимів роботи на етапі вибору основних геометричних параметрів ПЧ.

У п'ятому розділі наведено приклад застосування розробленого оптимізаційного алгоритму до вибору основних геометричних параметрів ПЧ турбіни низького тиску (ТНТ) газотурбінної установки ГТ-750-6М, що експлуатується в якості привода газоперекачуючого агрегату на Шебелинській компресорній станції, з урахуванням реальних режимів роботи та включенням у розгляд теплової схеми установки.

Враховуючи складність поставленої задачі, недостатнє висвітлення в відкритій літературі прикладів рішення подібних задач, а також відсутність конкретних рекомендацій, були проведені попередні дослідження з вивчення впливу окремих показників ПЧ на роботу інших елементів теплової схеми та на інтегральні характеристики установки в цілому. Результати термодинамічних розрахунків теплової схеми ГТ-750-6М довели, що підвищення ефективності

ТНТ добре впливає на інтегральні показники ГТУ та не викликає істотних відхилень параметрів циклу установки від проектних.

В процесі вирішення оптимізаційної задачі були задіяні всі 3 рівня запропонованого оптимізаційного алгоритму (див. рис. 2). Вищий рівень «Схема» в ієрархії оптимізаційного алгоритму використовувався для термодинамічних розрахунків ТС ГТУ на режими роботи що розглядаються. Виконання вказаних розрахунків дозволило визначити значення режимних параметрів для ПЧ газової турбіни (масової витрати – G_0 ; тиску та температури на вході до ПЧ – P_0^* , T_0^* ; тиску на виході з ПЧ – P_2^* ; обертів ротора – n), що необхідні для подальшої оптимізації на рівнях «Циліндр» та «Ступень», а також інтегральні показники установки після оптимізації ПЧ турбіни низького тиску. Для моделювання роботи компресора та газових турбін застосовувалися універсальні характеристики в параметрах подібності (1), характеристика компресора побудована за даними заводу-виробника, характеристики турбін – за результатами прямих одновимірних розрахунків. На рівні «Циліндр» були визначені оптимальні значення наступних геометричних параметрів: d_1 , d_2 , l_1 , l_2 , α_1 , $\alpha_{0г}$, β_2 , $\beta_{1г}$. Критерій якості рівня «Циліндр» – сумарна робота турбіни за рік експлуатації, функціональне обмеження – масова витрата продуктів згоряння через ПЧ. На рівні «Ступень» був виконаний пошук чисел соплових та робочих лопаток (Z_1 , Z_2), які відповідають максимальним значенням внутрішнього ККД ступеня. Режимні параметри оптимізаційних рівнів: P_0^* , T_0^* , P_2^* , n . Задача вирішувалася з урахуванням 177 реальних режимів роботи установки, кожен режим відповідає роботі агрегату на протязі 24 годин.

Значення геометричних параметрів ПЧ, отримані в результаті оптимізації, наведено в таблиці 5. Унаслідок проведеної оптимізації вдалося істотно підвищити ККД проточної частини ТНД у всьому діапазоні робочих режимів. Зокрема, на номінальному режимі роботи ГТУ, приріст корисної потужності ТНД із 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.

Таблиця 5. –

Результати оптимального проектування ТНТ 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	1,050
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 до СА – $\alpha_{0г}$, град	90,00	94,54
6. Геометричний кут входу до 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

Проаналізовано основні причини підвищення ефективності ТНТ до яких відносяться: зниження втрат в сопловій та робочій решітках, втрат з вихідною швидкістю, а також зменшення витрати через радіальний зазор. Також в результаті оптимізації збільшився теплоперепад на соплову решітку і відповідно зменшився на робочій.

Виконано оцінку впливу проведеної оптимізації ПЧ ТНТ на інтегральні показники ГТУ на режимах роботи що розглядалися. На рис. 6 наведено приріст ККД установки ГТ-750-6М по режимам роботи. У даному діапазоні зміни експлуатаційних навантажень спостерігається позитивний приріст ККД, який, залежно від режиму роботи, складає від 0,09 до 0,27%. Економія палива (природного газу) для ГТУ з оптимальною проточною частиною ТНД по режимах роботи приведена на рис. 7. Сумарна економія палива за даний проміжок часу, рівний 177 дням, склала 50831 кг.

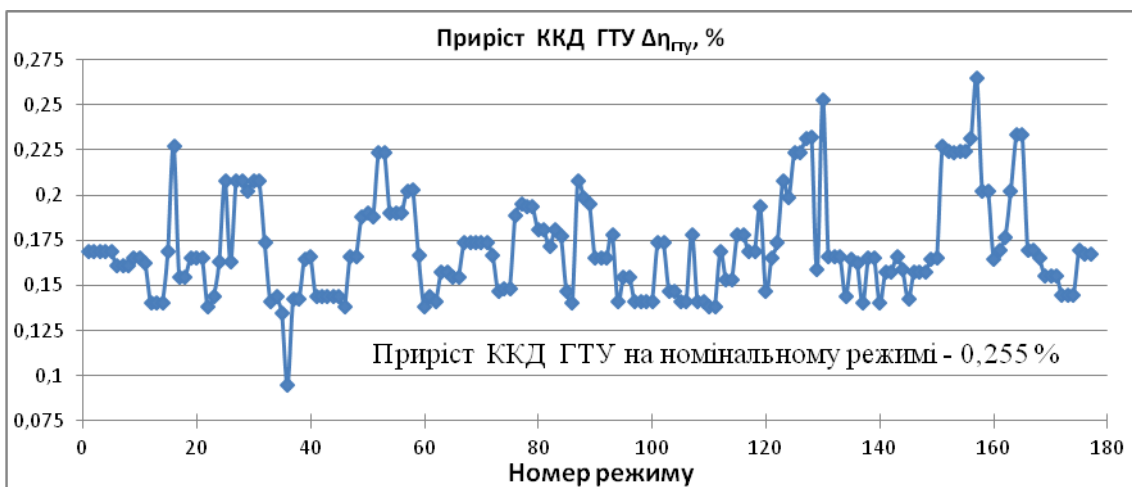


Рис. 6 Приріст ККД установки ГТ-750-6М по режимам роботи

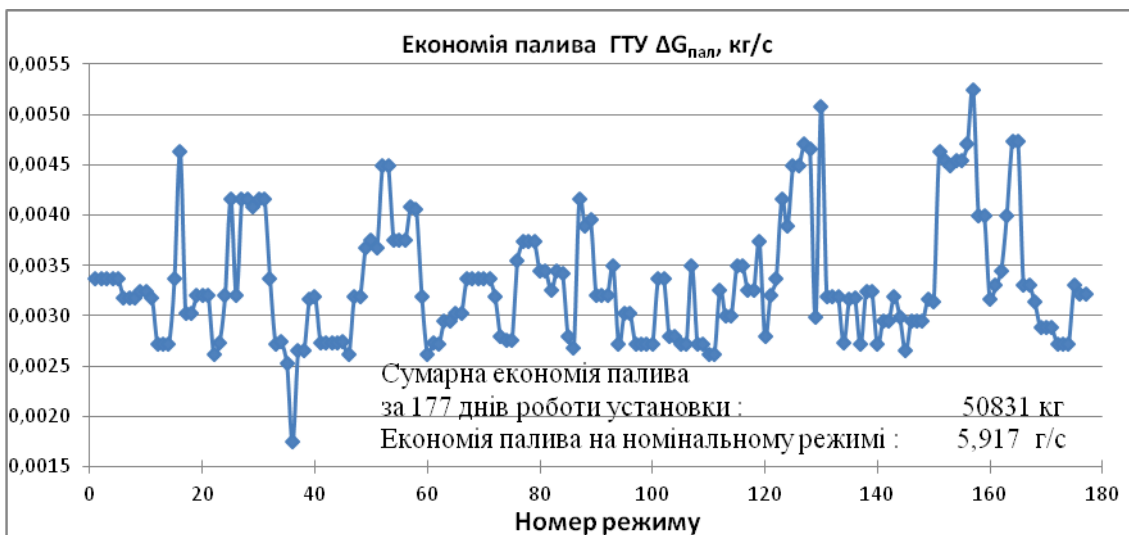


Рис. 7 Економія палива установки ГТ-750-6М по режимам роботи

У додатках наведено акти впровадження результатів роботи на ПАТ «Турбогаз», впровадження у навчальний процес на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП». Також наведено: спрощені математичні моделі для елементів ГТУ,

які використовуються для термодинамічного розрахунку ТС; програмний код на мові «gprl» та вихідні дані для термодинамічного розрахунку ТС установки ГТ-750-6М; вихідні дані для прямого одновимірного 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 по 30.09.2008 рр.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішена науково-практична задача розробки та обґрунтування методики багатопараметричної оптимізації проточних частин осьових турбін з урахуванням індивідуальних особливостей роботи турбоагрегатів. Оптимізаційні алгоритми, створені на її основі, придатні для проектування ПЧ осьових турбін, як новостворюваних, так і модернізованих турбоустановок, будь-яких типів і сфер застосування.

Основні результати та висновки роботи полягають в наступному:

1. Запропонована методика багаторівневої оптимізації ПЧ турбін, що працюють на змінному режимі, дозволяє представити завдання оптимального проектування, як єдиний комплекс ієрархічно пов'язаних підсистем оптимізації, що забезпечують на кожному рівні ієрархії вирішення «своїх» задач в різних постановках, забезпечуючи при цьому ефективно досягнення загальної мети – отримання оптимального рішення для всієї ПЧ в цілому.

2. Для конструкцій ПЧ з поворотними лопатками соплових апаратів розроблено та апробовано методику визначення оптимальних кутів виходу з соплових апаратів в залежності від режимів роботи.

3. Удосконалено математичну модель одновимірної течії в ізолюваному турбінному ступені та в групі ступенів, яка використовується в оптимізаційному алгоритмі для визначення впливу геометричних параметрів ПЧ на втрати в соплових та робочих решітках.

4. Для виконання термодинамічних розрахунків циклів ГТУ, розроблено програмну процедуру моделювання робочих характеристик елементів ТС при відхиленні режиму роботи установки від номінального.

5. Сучасні алгоритми здобуття оптимальних рішень ПЧ, як правило, існують у відриві від теплової схеми установки. Включення в розгляд теплової схеми турбоустановки не лише істотно розширює можливості оптимізаційних алгоритмів але і дозволить проводити оптимізацію по найбільш глобальному критерію – питомій витраті палива.

6. Завдяки використанню блочно-ієрархічного підходу проектування, формального макромоделювання і псевдовипадкових послідовностей чисел ЛПт, розроблений оптимізаційний алгоритм висуває мінімальні вимоги до обчислювальних ресурсів і дозволяє розглядати складні багатопараметричні завдання в сучасних постановках.

7. Результати численних розрахункових досліджень підтвердили: ефективність і надійність розробленого оптимізаційного алгоритму;

необхідність врахування передбачуваних режимів експлуатації при оптимізації ПЧ турбомашин; розширення діапазону робочих навантажень і підвищення ефективності ПЧ (особливо на маловитратних режимах) при застосуванні поворотних соплових лопаток по всій ПЧ УТДУ; необхідність включення в розгляд теплової схеми при оптимізації ПЧ ГТУ з розрізним валом.

8. В результаті вирішення оптимізаційних завдань отримані дві конструкції ПЧ УТДУ, що працюють в широкому діапазоні зміни масової витрати природного газу. Оптимальні ПЧ забезпечують значний приріст корисної потужності, на деяких режимах експлуатації він складає близько 5%.

9. Запропоновано варіант модернізації газотурбінної установки ГТ-750-6М, встановленої на Шебелинській компресорній станції, шляхом заміни ПЧ турбіни низького тиску, який дозволяє підвищити економічність установки у всьому діапазоні робочих навантажень (економія природного газу за 177 днів експлуатації складає 50831 кг).

10. Результати дисертаційної роботи впровадженні в розробку САПР «Турбоагрегат» НТУ «ХПІ», використовуються в процесі проектування нових УТДУ ПАТ «Турбогаз» (м. Харків) та в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Руденко А.С. 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». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2007. – № 2. – С. 26-30.

Здобувач виклав основні принципи створюваної багаторівневої методики оптимізації осьових турбін та особливості врахування режимів роботи на вибір основних геометричних параметрів проточних частин.

2. Руденко А.С. Результаты оптимального проектирования турбодетандера с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Проблемы машиностроения. – Харьков: ИПМаш. - 2007. – № 4, т. 10. – С. 33-39.

Здобувач виконав оптимізацію проточної частини УТДУ низького тиску з поворотними сопловими лопатками першого ступеня. Також виконано аналіз роботи вказаної ПЧ на режимах роботи з різними масовими витратами природного газу.

3. Руденко А.С. 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». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2008. – № 6. – С. 32-40.

Здобувачем сформульовано постановку оптимізаційної задачі для проточних частин з поворотними сопловими лопатками всіх ступенів з

урахуванням режимів експлуатації. Виконано розрахункові дослідження, які підтвердили необхідність визначення оптимальних значень кутів виходу з соплових апаратів в залежності від режиму роботи.

4. Руденко А.С. 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 описав структуру оптимізаційного алгоритму, при цьому велика увага приділена інформаційній узгодженості процесу проектування. Наведено результати вирішення оптимізаційних задач з використанням розробленого алгоритму.

5. Руденко А.С. 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». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2009. – № 3. – С. 111-115.

Здобувачем виконано інтегрування програмної процедури термодинамічного розрахунку теплових схем ГТУ до САПР «Турбоагрегат», що розробляється на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ». Для перевірки працездатності зазначеної процедури проведені розрахунки та оптимізація параметрів циклу установки ГТ-750-6М.

6. Руденко А.С. 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». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2010. – № 2. – С. 37-40.

Здобувачем описано трьохрівневий алгоритм для оптимізації ПЧ турбін ГТУ з урахуванням режимів експлуатації та включенням до розгляду теплової схеми установки. Зазначено перспективні галузі застосування алгоритму та виконано роботи для його реалізації у вигляді сценарію обчислювальних процесів на базі єдиного інформаційного простору САПР «Турбоагрегат».

7. Руденко А.С. Оптимизация проточных частей газовых турбин с учётом режимов эксплуатации в рамках САПР «Турбоагрегат» // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. - 2010. – № 3. – С. 74-77.

Здобувачем виконано оптимальне проектування проточної частини низького тиску установки ГТ-750-6М.

8. Руденко А.С. Оптимизация проточной части осевых турбин с учётом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Материалы XIII всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». – Москва, МГТУ им. Баумана. – 2008. – С. 65-66.

Здобувачем описано особливості оптимізаційних задач які враховують передбачувані режими експлуатації осьових турбін.

9. Rudenko A.S. Optimal design of turbines taking into consideration the mode of operation / A.V. Boiko, Yu.N. Govorushchenko, A.P. Usaty, A.S. Rudenko //

Proceedings of the 8th European Turbomachinery Conference. – Graz, 2009. – pp. 559-569.

Здобувачем описано розроблений алгоритм багаторівневої оптимізації проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів роботи. Наведені та проаналізовані результати оптимізації ПЧ існуючої УТДУ.

АНОТАЦІЇ

Руденко О.С. Багатопараметрична оптимізація проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2011 р.

Дисертацію присвячено створенню вірогідної та ефективної методики оптимізації проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та розробці на її основі спеціального програмного забезпечення.

На підставі розгляду сучасних умов експлуатації осьових турбін було запропоновано враховувати прогнозовані режими роботи турбоагрегату при оптимізації геометрії ПЧ. Розроблена методика багатопараметричної оптимізації основана на розділенні загальної оптимізаційної задачі на ряд локальних задач помірної складності та на використанні математичних моделей циклів ГТУ й проточних частин, макромодельовання, а також чисельних методів пошуку оптимального рішення. Описані постановка задачі, підходи до формування функцій цілі та інтегрування макромоделей при розгляді задач багаторежимної оптимізації. Доведена необхідність включення розробленої методики визначення кутів виходу з соплових апаратів (α_1), в залежності від режиму експлуатації, для проточних частин з поворотними сопловими лопатками до оптимізаційного алгоритму. Виконані роботи по вдосконаленню математичних моделей, що використовувалися, а також роботи для реалізації алгоритму в САПР «Турбоагрегат» НТУ «ХПІ» в якості сценарію обчислювальних процесів. Проведені дослідження ефективності розробленого алгоритму на прикладі вирішення оптимізаційних задач для проточних частин утилізаційної турбодетандерної установки та турбіни низького тиску ГТ-750-6М. Наведено аналіз причин збільшення ефективності оптимізованих ПЧ.

Ключові слова: осьова турбіна, течія в проточній частині, втрати енергії, робочі цикли ГТУ, термодинамічний розрахунок циклів, перемінні режими роботи, багатопараметрична оптимізація, макромодельовання.

Руденко А.С. Многопараметрическая оптимизация проточных частей осевых турбин с учётом режимов эксплуатации. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2011 г.

Диссертация посвящена созданию достоверной и эффективной методики оптимизации проточных частей осевых турбин с учётом режимов эксплуатации и разработке на её основе специального программного обеспечения.

На основании рассмотрения особенностей эксплуатации осевых турбин в современных условиях, предложено учитывать прогнозируемые режимы работы турбоагрегата на стадии выбора основных геометрических параметров ПЧ. В основе разработанной оптимизационной методики лежит блочно-иерархический подход к процессу проектирования, который предполагает разделение общей оптимизационной задачи на ряд локальных задач умеренной сложности в соответствии с иерархией объекта проектирования. Для ускорения процесса поиска оптимального решения используются макро моделирование и псевдослучайные последовательности чисел ЛПт.

Доказана целесообразность включения программной процедуры расчёта циклов ГТУ в алгоритм оптимизации ПЧ осевых турбин. Наличие указанной процедуры, при оптимизации ПЧ ГТУ с учётом режимов работы, позволяет определить неизвестные значения режимных параметров для ПЧ и оценить влияние оптимизации ПЧ на интегральные показатели установки в целом.

Описаны постановка задачи, подходы к формированию функций цели и к интегрированию макромоделей при рассмотрении задач многорежимной оптимизации. Показано, что разработанная методика позволяет рассматривать сложные многопараметрические и многокритериальные оптимизационные задачи с наличием параметрических и функциональных ограничений. В качестве оптимизируемых параметров могут быть выбраны: средние диаметры, высоты лопаток, углы входа/выхода потока, величины хорд и чисел лопаток для сопловых и рабочих решеток ПЧ турбины. Подбор оптимальной комбинации приведенных параметров позволяет повысить эффективность решеток, улучшить условия входа потока в решетки (уменьшить удары) на переменных режимах работы, уменьшить утечки и потери с выходной скоростью, а также получить рациональное распределение теплоперепадов между ступенями проточной части.

Разработана и включена в оптимизационный алгоритм методика определения углов выхода из сопловых аппаратов (α_1), в зависимости от режима эксплуатации, для конструкций ПЧ с наличием поворотных сопловых лопаток. Результаты проведенных расчётных исследований подтвердили, что предложенная методика определения углов α_1 позволяет существенно повысить КПД УТДУ с поворотными сопловыми лопатками, особенно на малорасходных режимах работы.

Выполнены работы, по усовершенствованию математических моделей термодинамических процессов в циклах ГТУ и одномерного течения в проточных частях осевых турбин. Разработаны вспомогательные программные модули для реализации оптимизационного алгоритма в рамках САПР «Турбоагрегат» НТУ «ХПИ». Описаны преимущества указанной САПР для

реализации оптимизационных алгоритмов в качестве сценариев вычислительных процессов.

Проведены многочисленные расчётные исследования эффективности разработанного алгоритма. В работе приведены примеры решения оптимизационных задач для проточных частей утилизационной турбодетандерной установки (один вариант оптимизации для ПЧ УТДУ с поворотными лопатками СА 1-й ступени и вариант оптимизации с наличием поворотных сопловых лопаток по всем ступеням ПЧ), а также для турбины низкого давления установки ГТ-750-6М. Оптимизация указанных ПЧ выполнена с учётом реальных режимов работы установок. Оптимальные ПЧ УТДУ обеспечивают значительный прирост полезной мощности, на некоторых режимах эксплуатации прирост мощности составляет около 5%. Задача оптимизации турбины низкого давления ГТ-750-6М решалась с включением в рассмотрение тепловой схемы установки. В результате выполненной оптимизации удалось улучшить интегральные характеристики ГТУ на всех рассмотренных режимах эксплуатации. Суммарная экономия топлива (природного газа) за 177 дней работы установки составляет 50.831 т. Приведен анализ основных причин повышения КПД оптимизированных проточных частей.

Ключевые слова: осевая турбина, течение в проточной части, потери энергии, рабочие циклы ГТУ, термодинамический расчёт циклов, переменные режимы работы, многопараметрическая оптимизация, макро моделирование.

Rudenko O.S. Multiparameter optimization of axial turbines flow paths taking into consideration the mode of operation. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.05.16 – Turbomachine and Turbo-installation. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2011.

The dissertation is devoted creation of correct, effective authentic technique of axial turbines flow paths optimization taking into consideration the mode of operation and development on its basis of the special software.

On the basis of consideration of modern conditions of axial turbines operation, it is proposed to take into account predicted operation modes of a turbine unit during the optimization of flow path geometry. The developed technique of multiparameter optimization is based on division of the general optimization problem into a number of local problems of moderate complexity and on use of gas turbines cycles and flow paths mathematical models, macromodelling and numerical methods of search of the optimal decision. Problem statement, approaches to formation of target functions and to integration of formal macromodels for multimode optimization problems are described. The necessity of inclusion in optimization algorithm of the developed technique of outlet effective angles of nozzle cascades (α_1) definition depending on operation mode for flow paths with rotary nozzle blades is proved. The works directed on improvement of used mathematical models, and also works for algorithm

realization as the scenario of computational processes in CAD “Turboaggregate”, developed at the Turbine Projection Chair of NTU “KhPI”, are performed. Researches of efficiency of the developed algorithm on example of optimization problems decision for flow paths of rendering turbine expander unit and for low-pressure turbine of GT-750-6M are carried out. The analysis of the causes of increase in efficiency of optimized flow paths is resulted.

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

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. V. K.', is centered on the page. The signature is stylized and written in a cursive-like font.