



ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН ДЛЯ ТЕС ТА АЕС

АВДЄЄВА Олена Петрівна

ПАЛЬКОВ Ігор Андрійович

ПАЛЬКОВ Сергій Андрійович

ІЩЕНКО Олег Ігорович

*Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»*

АТ «Українські енергетичні машини»;

АТ «Українські енергетичні машини»;

АТ «Українські енергетичні машини».

МЕТА РОБОТИ

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

НАУКОВА НОВИЗНА

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

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

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

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

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

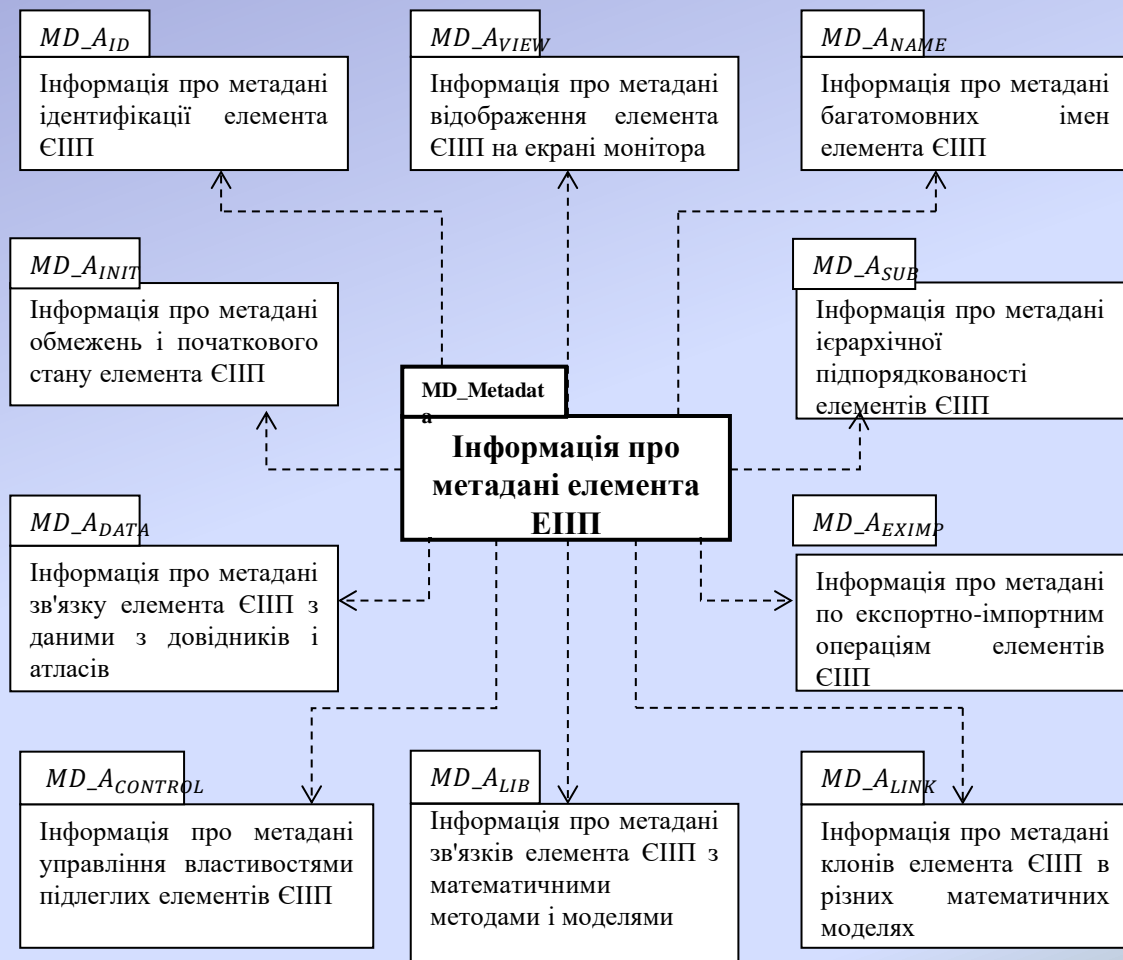
СТВОРЕННЯ ЄДИНОГО ІНТЕГРОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ

➤ МЕТА:

• Підвищення ефективності надійності, зниження вартості і кардинальне розширення можливостей управління постановками, процесом рішення і ефективністю рішення багато режимних, багато параметричних і багатокритеріальних задач оптимального проектування складних технічних систем.

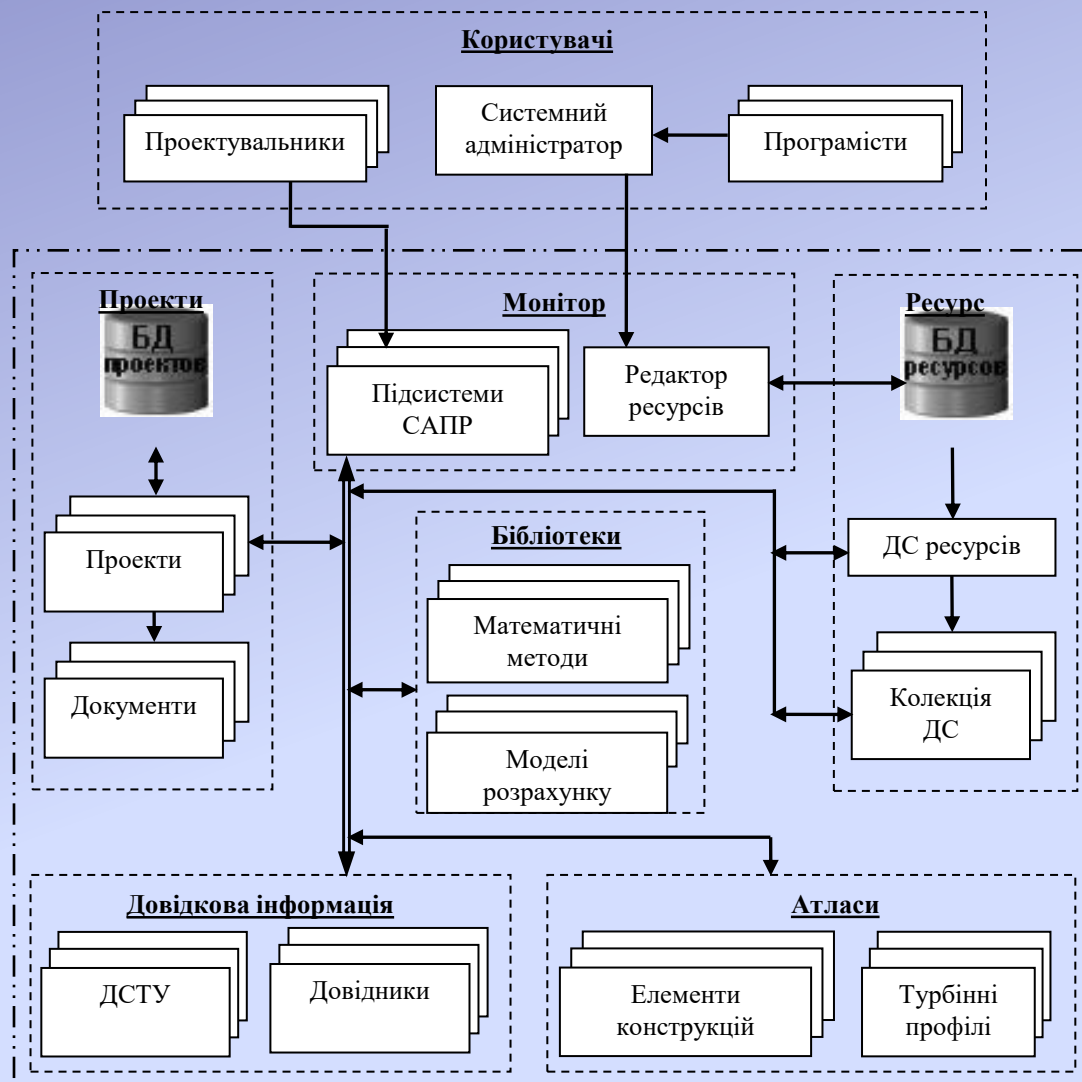
➤ ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОВУДОВИ :

- Інформаційна узгодженість і системна єдність елементів і підсистем ЕІП.
- Відкритість
- Забезпечення властивостей систем, що розвиваються.
- Максимальне використання уніфікованих форматів і модулів.



Пакети універсального класу метаданих інформації про елементи ЕІП :

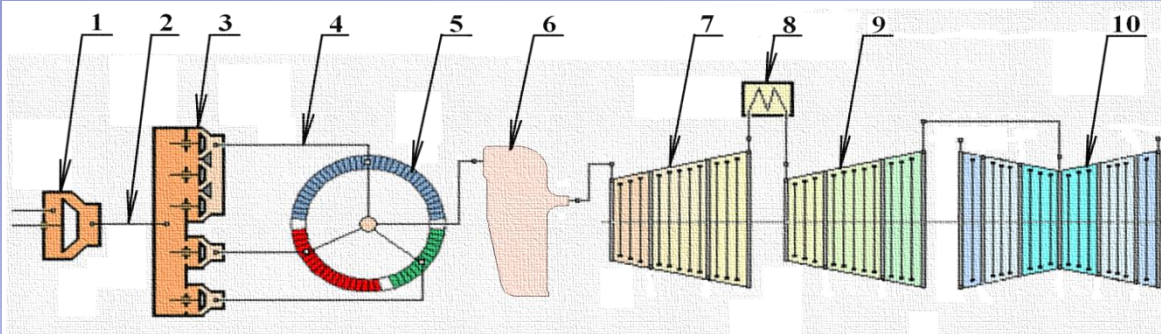
СТВОРЕННЯ ЄДИНОГО ІНТЕГРОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ



Архітектура і схема інформаційних потоків ЄІП комплексу багаторівневої, багатокритеріальної і багатопараметричної оптимізації

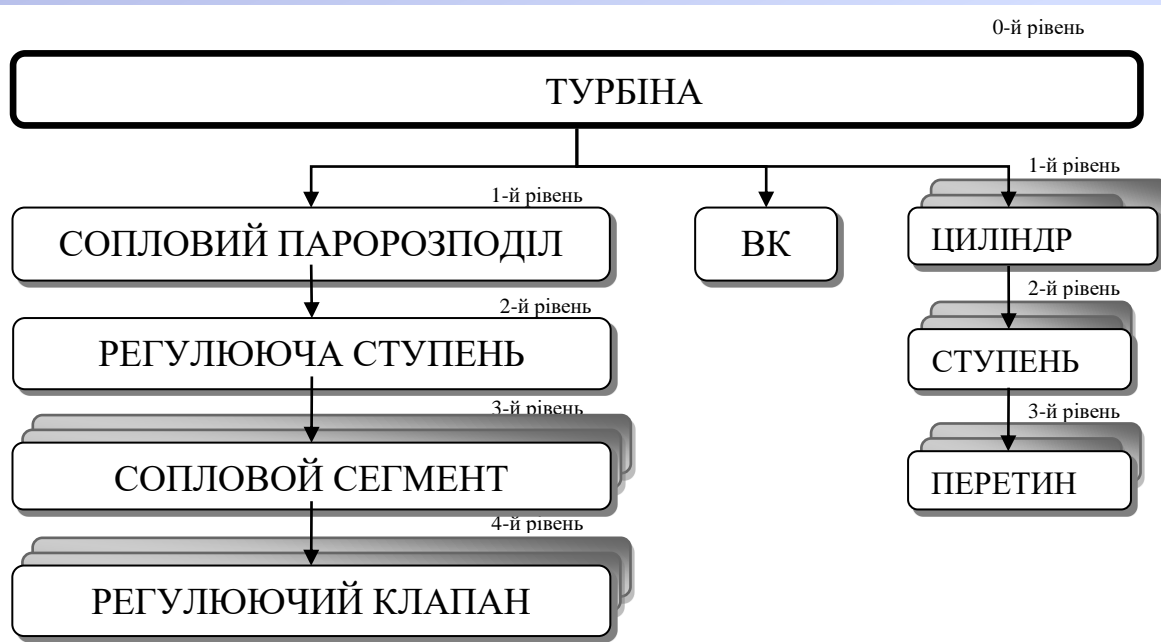
МЕТОДОЛОГІЯ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН

Схема проточної частини парової турбіни



- 1 – стопорний клапан (СПР);
- 2 – трубопровід стопорного клапану (СПР);
- 3 – коробка с регулюючими клапанами (СПР);
- 4 – трубопроводи сегментів (СПР);
- 5 – регулюючий ступень та сегменти соплового апарату (СПР);
- 6 – вирівнююча камера (ВК);
- 7 – ЦВТ (Циліндр);
- 8 – паропідігрівач;
- 9 – ЦСТ (Циліндр);
- 10 – ЦНТ(Циліндр)

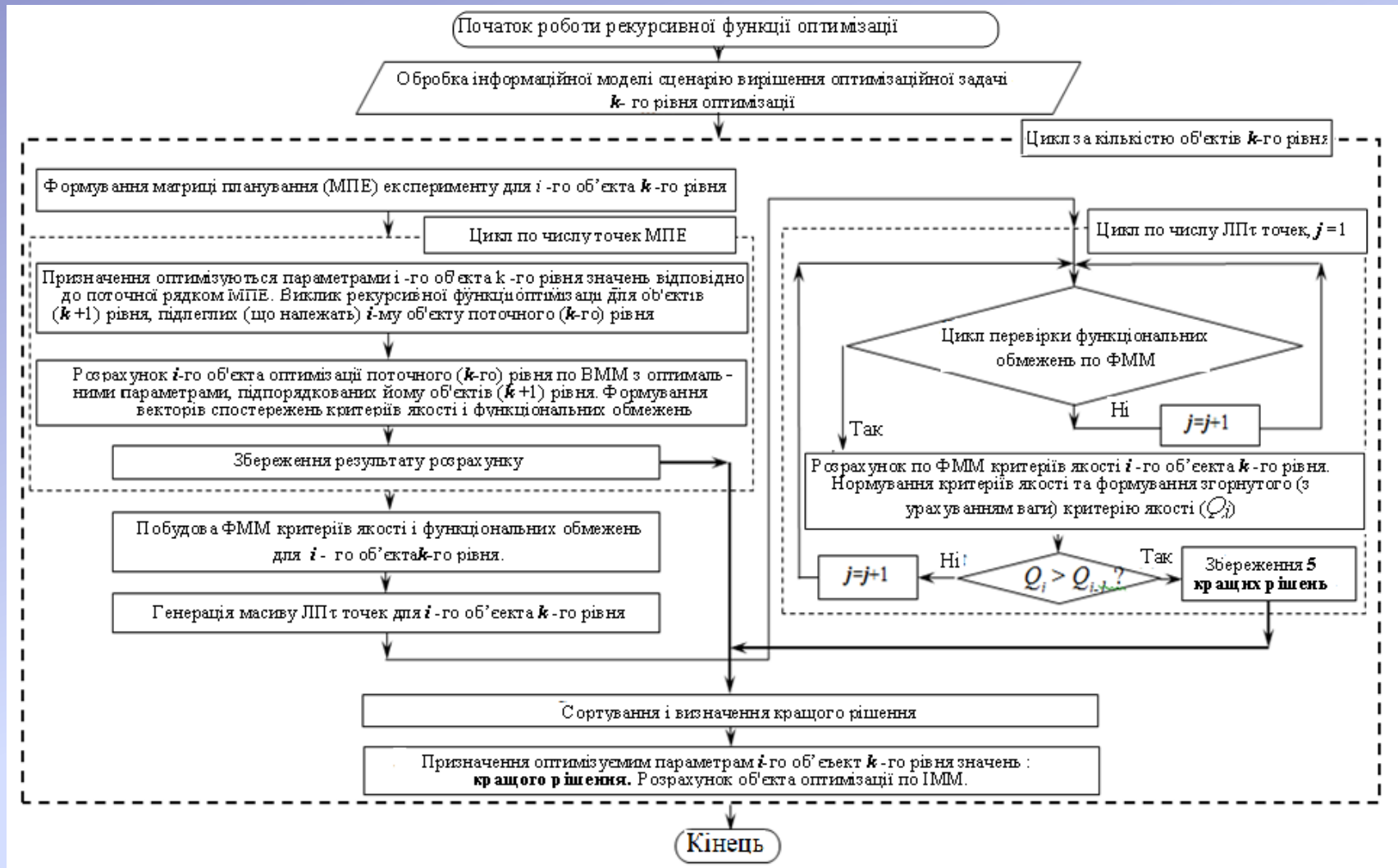
Блок-схема інформаційної моделі парової турбіни



Оптимізаційні методи, що використовуються

1. Формальне макромодельовання.
2. ЛПτ пошук
3. Багатокритеріальна оптимізація парової турбіни.

БЛОК-СХЕМА ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН



Алгоритм побудований на принципі рекурсії, що дозволило застосувати одну і ту ж процедуру оптимізації для всіх рівнів об'єкта. Алгоритм побудований таким чином, що всі точки які розраховуються за IMM рівнозначно беруть участь при виборі кращого рішення.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ.

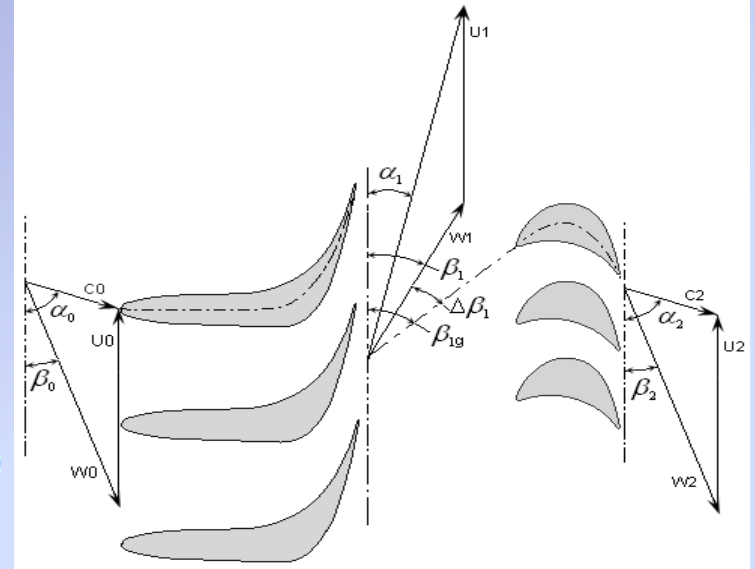
ОДНОВИМІРНА МОДЕЛЬ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ.

Рівняння, що описують стаціонарний одномірний потік в турбінній ступені:

$$H_0 = i_0^* = i_1 + \frac{C_1^2}{2} = \text{const}, \quad H = i_1 + \frac{C_1^2}{2} - u_1 c_{1u} = i_2 + \frac{w_2^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} = \text{const}, \quad T = T(P, i), \quad \rho = \rho(P, i), \quad S = S(P, i).$$
$$S_0^* - S_{1r} \left(P_1, \frac{F_1}{\varphi^2} [i_1 - (1 - \varphi^2) i_0^*] \right) = 0, \quad G_1 = \rho_1 c_{1z} F_1 = \text{const},$$
$$S_1 - S_{2r} \left(P_2, \frac{F_2}{\psi^2} [i_1 - (1 - \psi^2) i_{w1}] \right) = 0, \quad G_2 = \rho_2 w_{2z} F_2 = \text{const}.$$

Для багатоступеневої проточної частини система рівнянь буде виглядати наступним чином:

$$\Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j)}) = 0; \quad \Delta_{g2(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j)}) = 0; \quad (j = 1)$$
$$\Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j-1)}) = 0; \quad \Delta_{g2(j)}(G, C_{1(j)}, W_{2(j)}) = 0; \quad (j = 2)$$
$$\Delta_{g1(n)}(G, C_{1(n)}, W_{2(n-1)}) = 0; \quad \Delta_{g2(n)}(G, C_{1(n)}, W_{2(n)}) = 0; \quad (j = n)$$
$$(j = 1, \dots, n)$$
$$\Delta_h(G, C_{1(n)}, C_{1(n-1)}, \dots, C_{1(1)}, W_{2(n)}, W_{2(n-1)}, \dots, W_{2(1)}) = 0$$



Кінематика потоку пари в ступені парової турбіни

КОАКСИАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ БАГАТОСТУПЕНЕВОЇ ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ

Для багатоступеневої проточної частини система рівнянь коаксильної квазідвухвимірної моделі течії робочої рідини буде виглядати наступним чином:

$$\Delta_{g1(j,k)}(G, C_{1(j,k)}) = 0; \quad \Delta_{g2(j,k)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j,k)}) = 0; \quad (j = 1)$$
$$\Delta_{g1(j)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j-1),k}) = 0; \quad \Delta_{g2(j,k)}(G, C_{1(j,k)}, W_{2(j,k)}) = 0; \quad (j = 2)$$
$$\Delta_{g1(n,m)}(G, C_{1(n,m)}, W_{2(n-1),m}) = 0; \quad \Delta_{g2(n,m)}(G, C_{1(n,m)}, W_{2(n,m)}) = 0; \quad (j = n);$$
$$\Delta_h(G, C_{1(n,k)}, C_{1(n-1),k}, \dots, C_{1(1),k}, W_{2(n),k}, W_{2(n-1),k}, \dots, W_{2(1),k}) = 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (k = 1, \dots, m)$$

КОМПЛЕКСНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕЧІЇ РОБОЧОГО ТІЛА ВІД ВХОДУ В СИСТЕМУ СПР ДО КОНДЕНСАТОРА

Основні залежності моделі:

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

$$i_{0\text{ЦНД}(j)}^* = i_{2\text{ЦСД}(j-1)}^*,$$

$$\eta_{\text{ЦСТ}(j-1)}^* = H_{\text{ДЗ ЦСТ}(j-1)} / H_{0\text{ЦСТ}(j-1)},$$

$$i_{2\text{ЦСТ}(j-1)}^* = i_{0\text{ЦСТ}(j-1)}^* - H_{\text{ЦСТ}(j-1)} \eta_{\text{ЦСТ}(j-1)}^*.$$

1. Задані температура і витрата основного потоку.

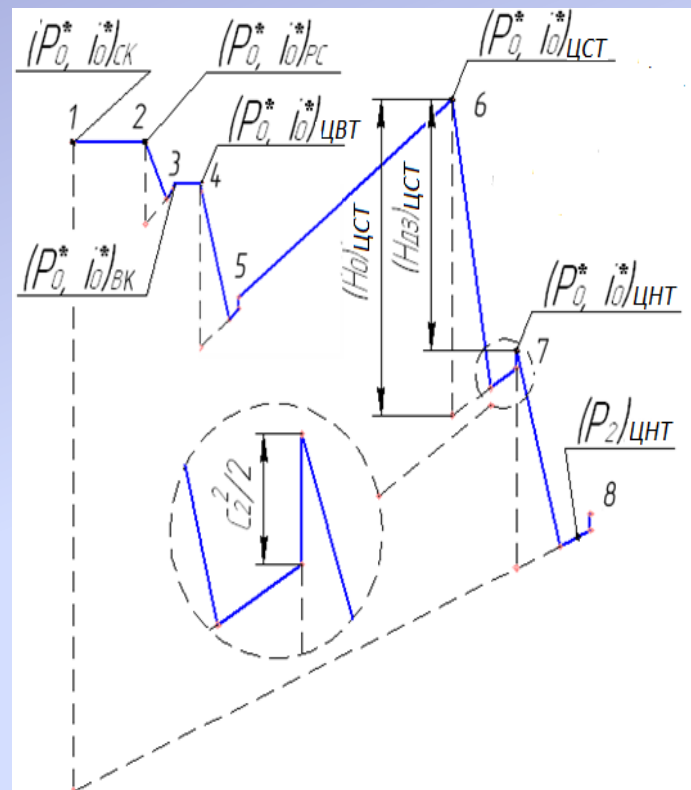
За рівняннями стану, визначаються ентальпії основного і допоміжних потоків пара, а потім :

$$i_{0\text{ЦСТ}(j-1)}^* = \frac{i_{0\text{пп ЦСТ}(j-1)}^* G_{\text{пп ЦСТ}(j-1)} + i_{0\text{дп ЦСТ}(j-1)}^* G_{\text{дп ЦСТ}(j-1)}}{G_{\text{пп ЦСТ}(j-1)} + G_{\text{дп ЦСТ}(j-1)}}$$

2. Задані температура підігріву і витрата основного потоку

$$T_{0\text{оп ЦСТ}(j-1)}^* = T_{0\text{оп ЦСТ}(j-1)\text{до пп}}^* + \Delta T_{0\text{оп ЦСТ}(j-1)\text{пп}}^*,$$

де j – номер ітерації



Процес в IS діаграмі

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

$$L_{\text{ц}} = L_{\text{РС}} + L_{\text{ЦВТ}} + L_{\text{ЦСТ}} + L_{\text{ЦНТ}}$$

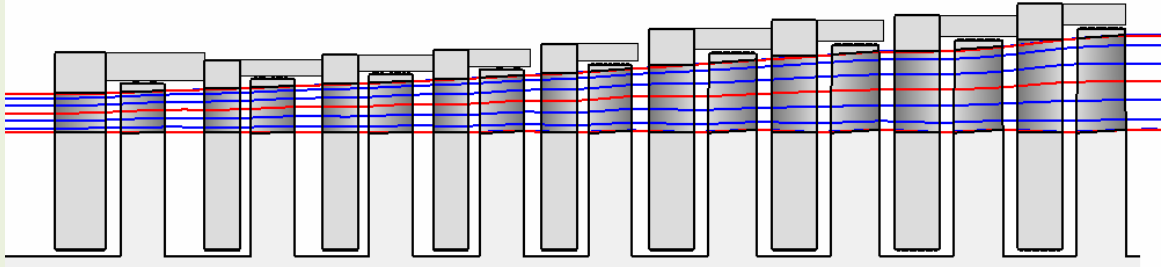
$$N_{\text{ц}} = N_{\text{РС}} + N_{\text{ЦВТ}} + N_{\text{ЦСТ}} + N_{\text{ЦНТ}}$$

$$\eta_{\text{терм}} = L_{\text{ц}} / Q_{\text{птц}}$$

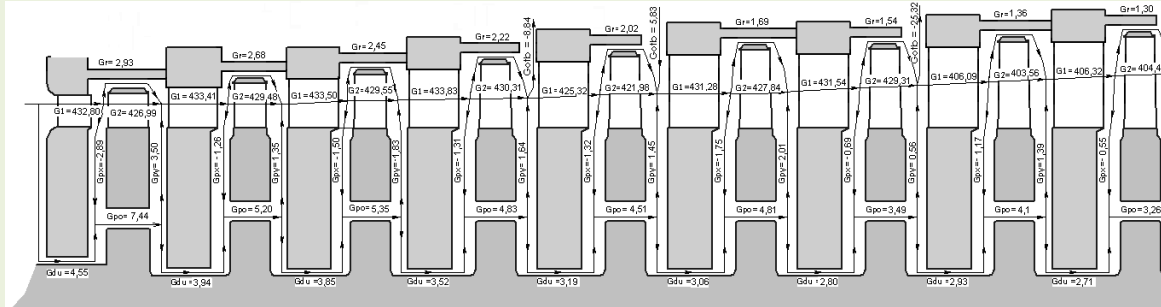
$$\eta_{\text{абс}} = N_{\text{ц}} / (Q_{\text{птц}} * G_{\text{РС}})$$

$$\eta_{\text{і цикла}} = N_{\text{ц}} / (L_{\text{ц}} * G_{\text{РС}})$$

РЕЗУЛЬТАТИ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ТУРБИНИ К-540-23,5

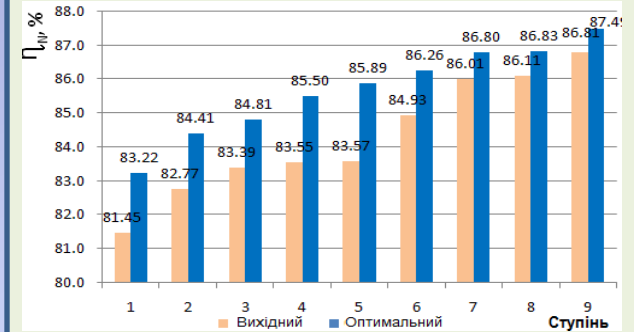


а)

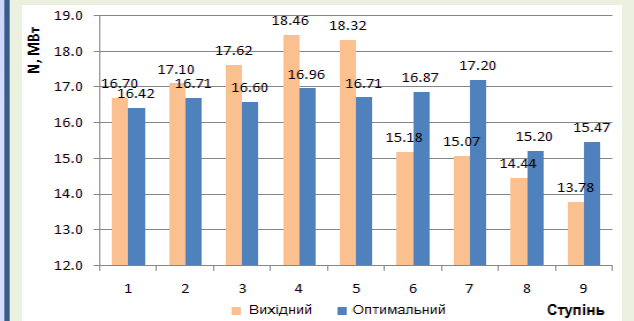


б)

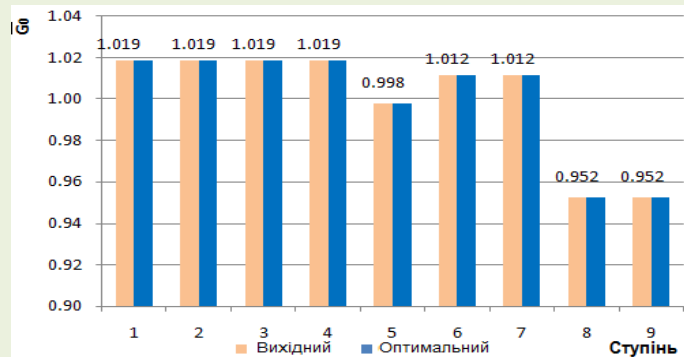
Течія робочого тіла в оптимальному варіанті проточної частини ЦВТ К-540-23,5: а) – лінії току; б) – схема протічок



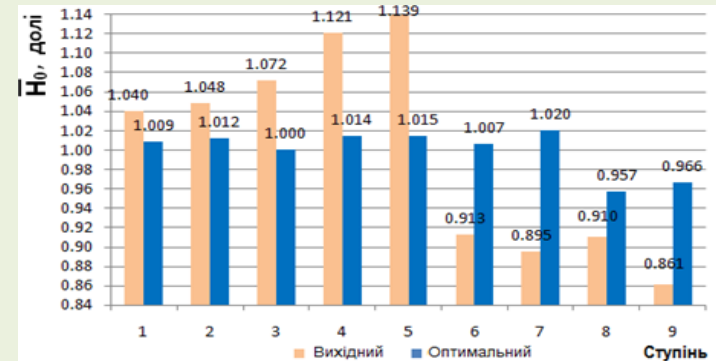
ККД ступенів ЦВТ К-540-23,5



Потужність ступенів ЦВТ К-540-23,5

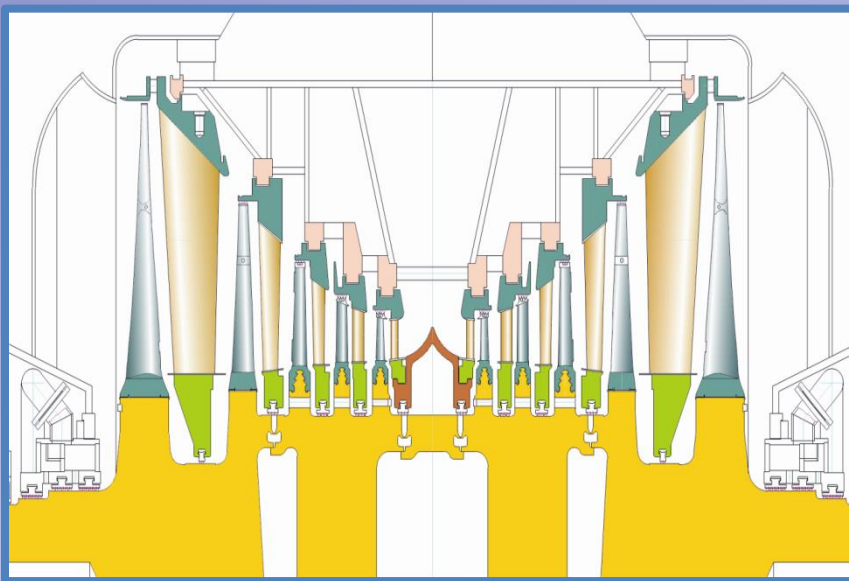


Нормовані значення масової витрати пари

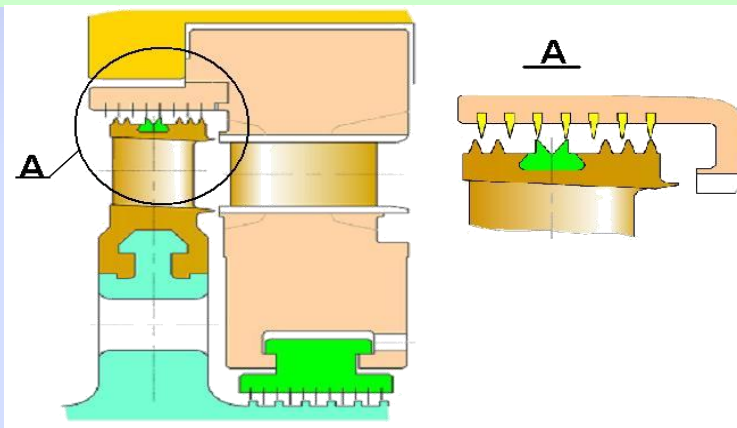


Розподіл відносних величин наявних теплоперепадів

МОДЕРНІЗОВАНА ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ТУРБИНИ К-540-23.5



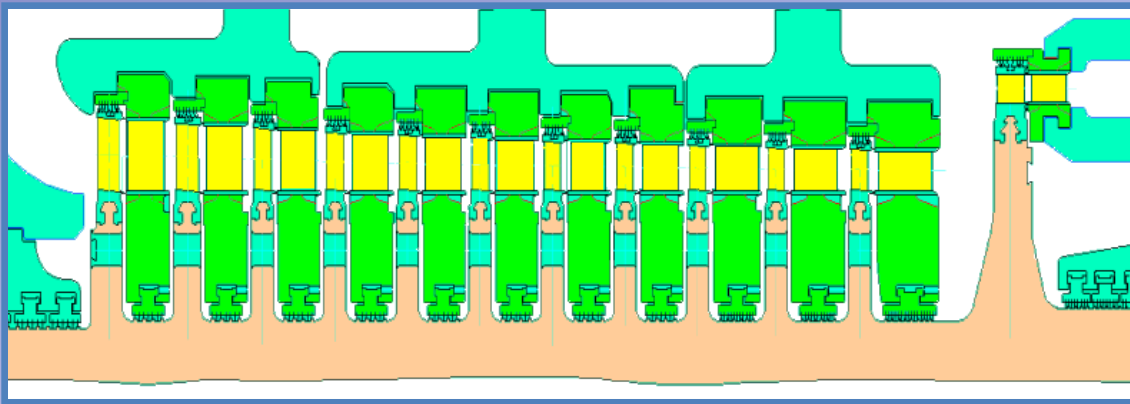
- ▶ В проточній частині ЦНТ використані високо економічні профілі направляючих і робочих лопаток.
- ▶ Кути розкриття периферійного обводу змінюються від 14° до 40° . Кореневий обвід виконано прямолінійним з невеликим від'ємним кутом розкриття.
- ▶ В 1...3 ступенях ЦНТ виконано відбір пари з прикореневої зони.



- Використовуються робочі лопатки з суцільно фрезерованими поличними бандажами і кільцевою перев'язкою лопаток вставками типу «ласточкин хвіст»;
- Різношагові вісерадіальні надбандажні ущільнення;
- Робочі лопатки без підрізок їх активної частини в корні та на периферії.



МОДЕРНІЗОВАНА ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ЦВТ ТУРБИНИ К-225-12.8



Матеріали елементів проточної частини:

Корпус циліндра – 15X1М1ФЛ.

Обойми ущільнень Сталь 15X1М1ФЛ.

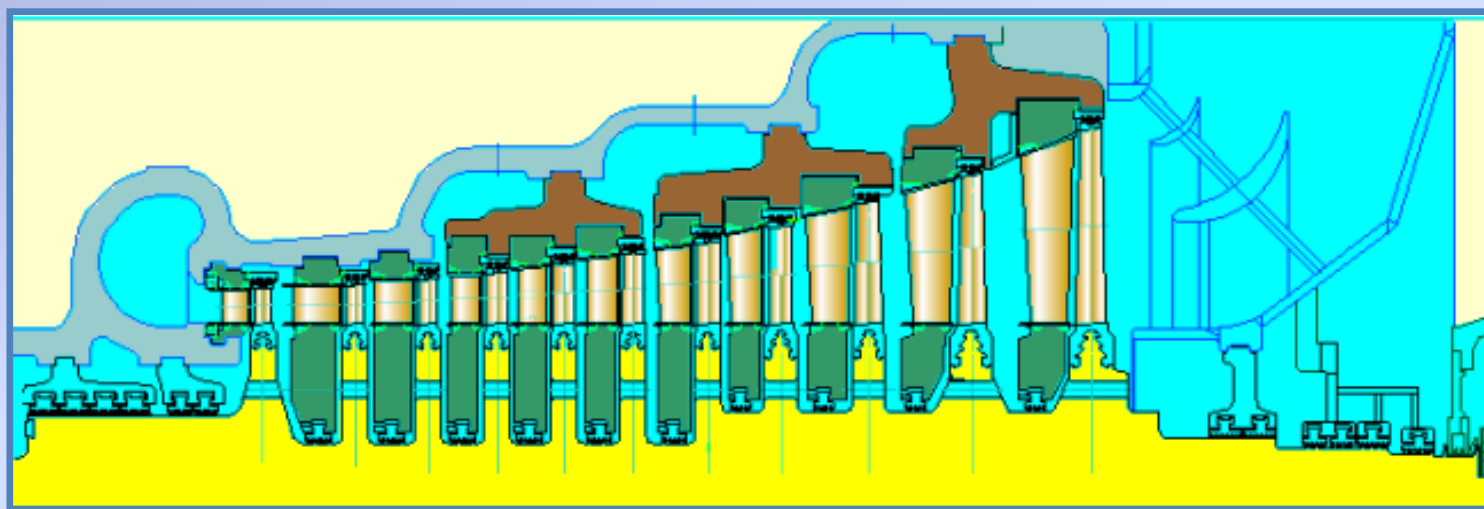
Тіла діафрагм – Сталь 15X1М1Ф.

Обіддя діафрагм – Сталь 15X1М1Ф.

Направляючі лопатки 1...12ст – Сталь 15X12ВНМФ.

Робочі лопатки 1...12ст – Сталь 15X11МФ-Ш.

МОДЕРНІЗОВАНА ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ЦСТ ТУРБИНИ К-225-12.8

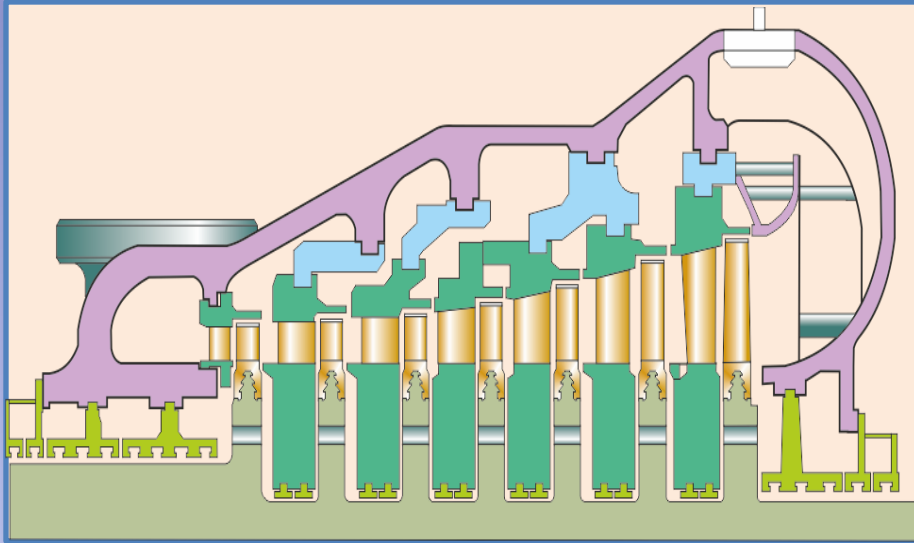


В ЦСТ розміщуються 11 ступенів.

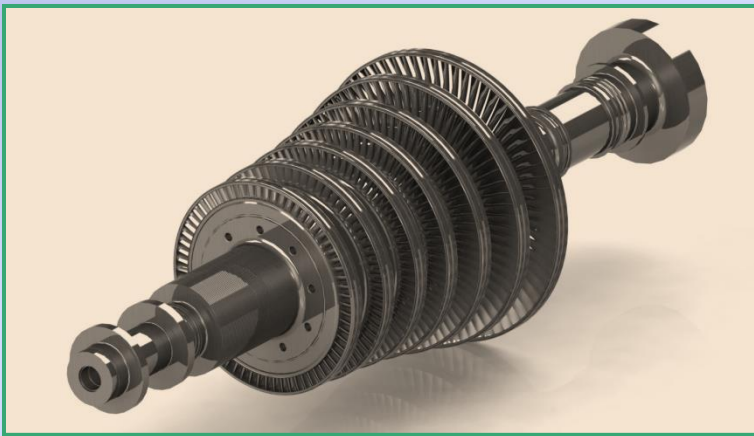
Сопловий апарат 1 ступеню встановлений безпосередньо в розточку корпуса. Перші 3 ступені розміщені в корпусі, інші – в 3-х обіддях діафрагм: в першому та другому обіддях – по три ступені, в третьому обідді – дві ступені. Із полостей між обіддями і зовнішнім корпусом здійснені відбори пари на регенерацію.

Гарантійний ККД циліндра 93%.

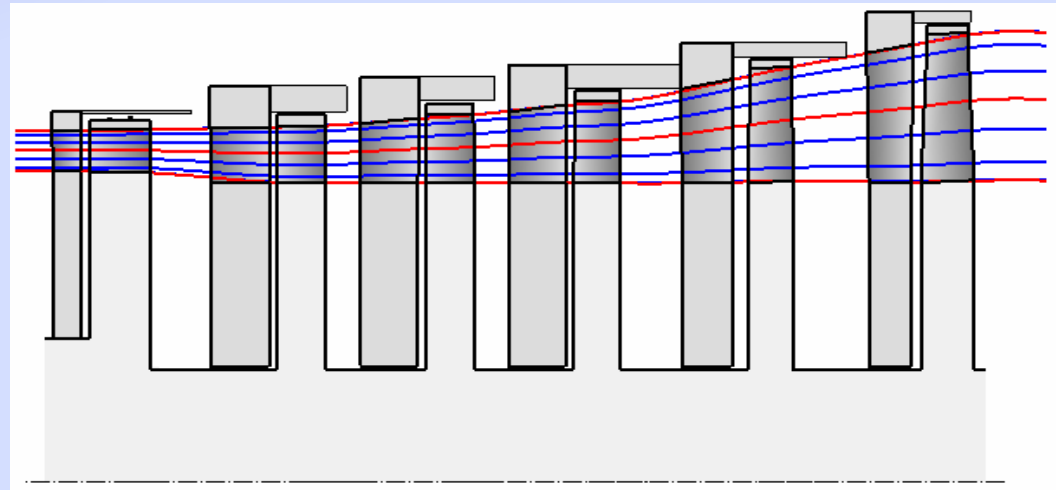
МОДЕРНІЗОВАНА ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ЦВТ ТУРБІНИ К-220-44



| Направляючі лопатки | Робочі лопатки | Паророзгрузочні отвори |
|--|--|----------------------------|
| 1-5 ст. – циліндричні 6-7 ст. – змінного перерізу | 1-2 ст. – постійного перерізу 3-7 ст. – змінного перерізу | 9 отворів Ø50 R6=370 мм |

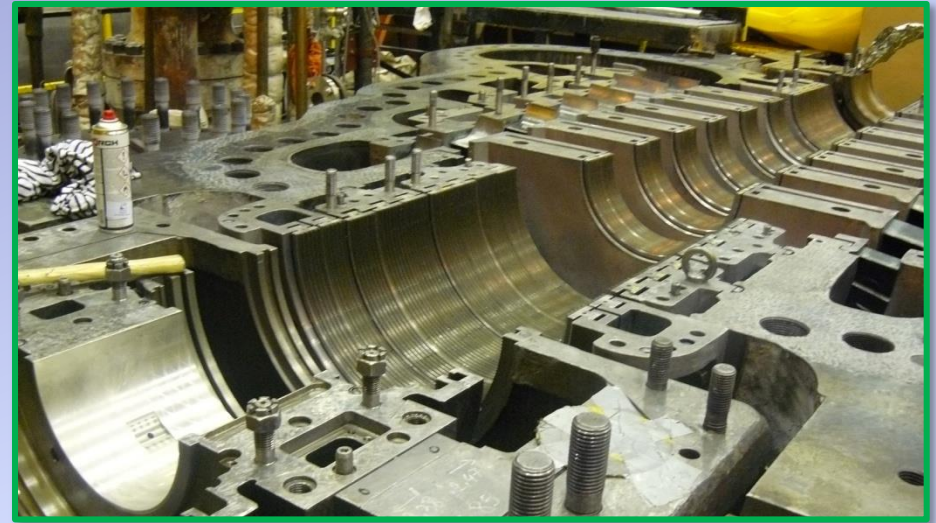


Модернізований ротор високого тиску

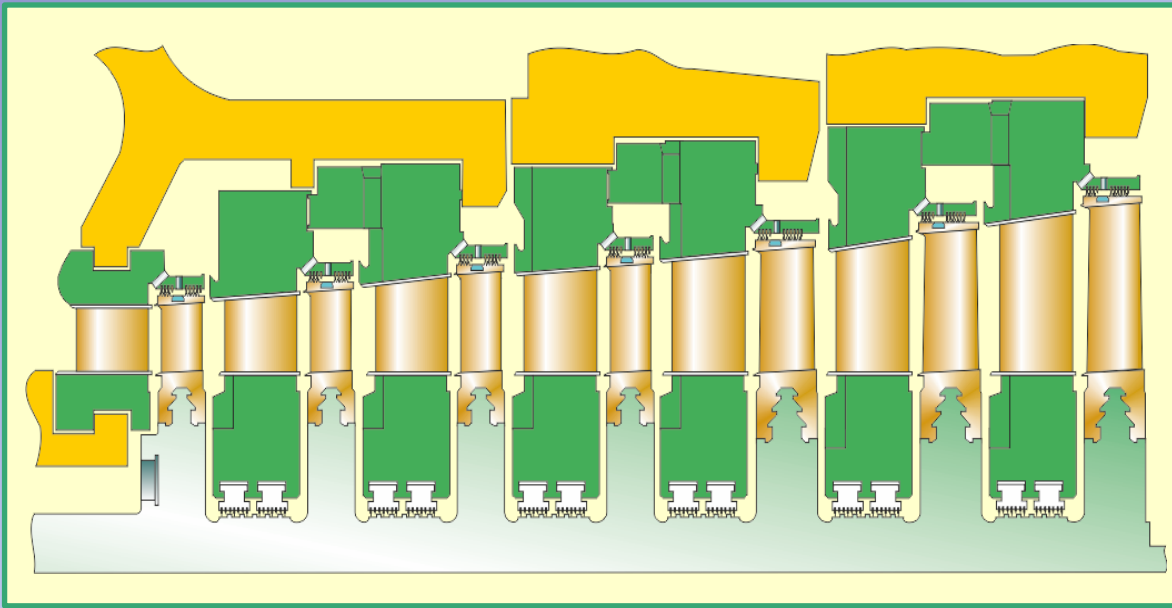


Лінії струминок течії в проточній частині ЦВТ турбіни К-220-44

МОНТАЖ МОДЕРНІЗОВАНИХ ВУЗЛІВ ТУРБІНИ К-220-44 В УМОВАХ СТАНЦІЇ



МОДЕРНІЗОВАНА ПРОТОЧНА ЧАСТИНА НИЗЬКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ К-1100-60/25

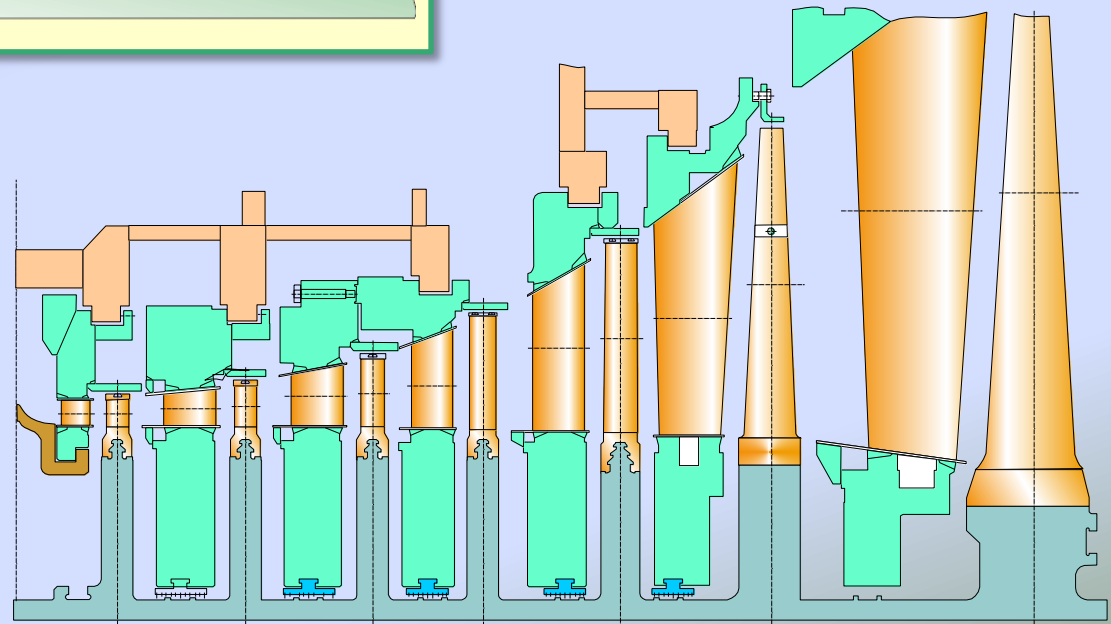


- ❖ ЦВТ – двохпоточний, в кожному потоці по 7-ступенів.
- ❖ Ротор ЦВТ – зваркований зі сталі 25Х2НМФА.
- ❖ Зовнішній і внутрішній корпус – сталь 15Х1М1Ф-Л.

Приріст потужності по результатам модернізації – **59,46 МВт**

Приріст потужності за рахунок підвищення теплової потужності реактора – **41,84 МВт**

Приріст потужності за рахунок підвищення ККД – **17,62 МВт**



РОТОР ВИСОКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ К-1100-60/25 ПІД ЧАС МОНТАЖУ НА СТАНЦІЇ



ВИСНОВКИ

В результаті спільної роботи авторів вирішена високо актуальна науково-практична задача сьогодення в галузі енергетики - розробка універсальної об'єктно-орієнтованої методології багаторівневої, багато параметричної та багатокритеріальної оптимізації проточних частин осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації та конструктивних, технологічних і функціональних обмежень.

1. Розроблена та реалізована методологія об'єктно-орієнтованої багаторівневої комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін в єдиному інтегрованому інформаційному просторі САПР «Турбоагрегат», що дозволяє представити процес оптимального проектування проточної частини в вигляді динамічно взаємодіючих ієрархічно структурованих підсистем оптимізації кожного елемента проточної частини, забезпечуючи при цьому ефективне досягнення спільної мети – отримання оптимального рішення для проточної частини всієї турбіни в цілому.

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

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

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

Проведено розрахунковий аналіз аеродинамічної досконалості існуючих варіантів ПЧ наступних турбін: *K-225-12.8, K-330-23.5, K-540-23.5, K-220-44, K-1250-6.9/25*. Визначено і підкреслено причини неповного використання потенціалів існуючих циліндрів, закладених в їхню конструкцію від самого початку. Відзначені основні чинники підвищення потужності і ефективності оптимальних варіантів проточної частини у порівнянні з вихідними варіантами.

До них слід віднести:

- Раціональний перерозподіл наявних теплоперепадів між ступенями.
- Зміна меридіональних обводів проточної частини з пониженням кореневого діаметра і збільшенням довжин лопаток.
- Вибір оптимальної кількості лопаток соплових і робочих решіток.
- Суттєве зменшення кутів удару натікаючого потоку на соплові і робочі решітки.
- Забезпечення мінімальних втрат, пов'язаних з прикореневими протічками за рахунок правильного вибору степенів реактивності у кореня ступенів.

Таким чином, модернізація і заміна застарілого паротурбінного обладнання, а також встановлення нових генеруючих потужностей дозволить розв'язати низку важливих і суттєвих задач державного рівня, та отримати значні здобутки в галузі енергетики, економіки країни та в міжнародних відносинах нашої держави. Загальний економічний ефект від впровадження роботи складає 1, 887 млрд. грн.

На сьогодні, **АТ «Українські енергетичні машини»**, як провідний виробник потужних парових турбін з проточними частинами нового покоління і науковий центр в галузі турбінобудування **НТУ «ХП»** в змозі і готові в повному обсязі забезпечити виконання робіт з модернізації та інноваційного оновлення паротурбінного обладнання паливно-енергетичного комплексу відповідно до **Енергетичної Стратегії України**.



Дякую за увагу!