

Впровадження оптимальних варіантів проточних частин ЦВТ та ЦСТ в теплову схему турбоагрегату К-540-23,5

Р.Б. Шерфедінов¹, В.Л. Швецов², О.П. Усатий³

1 – начальник конструкторського відділу теплових розрахунків та розрахунків на міцність, АТ “Українські енергетичні машини”, Харків, Україна

2 – головний конструктор парових турбін, кандидат технічних наук, АТ “Українські енергетичні машини”, Харків, Україна

3 – завідувач кафедри турбінобудування, доктор технічних наук, НТУ “ХП”, Харків, Україна

Анотація: Розглянуто особливості оптимізації проточних частин (ПЧ) циліндру високого тиску (ЦВТ) та циліндру середнього тиску (ЦСТ) турбіни К-540-23,5. Виконано впровадження оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ та ЦСТ в теплову схему з урахуванням впливу температури недогріву живильної води та параметрів пари у відборах на підігрівачі.

Ключові слова: оптимізація, турбоагрегат, теплова схема, проточна частина, теплоперепад.

Вступ

Розвиток енергетики в світі направлений на підвищення потужностей, ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище, як нових так і існуючих енергоблоків. Розробка нових методів підвищення енергоефективності ПЧ з гарантованим підвищенням рівня енергетичної безпеки країни необхідна як для існуючих, так і для створюваних парових турбін.

Методи

Вдосконалення методів багатопараметричної оптимізації дозволило отримати та провести впровадження оптимальних варіантів проточних частин (ПЧ) циліндрів високого (ЦВТ) та середнього тиску (ЦСТ) в теплову схему турбоагрегату К-540-23,5 з оцінкою інтегрального показника якості турбоблоку N – потужність на клеммах електрогенератора та питомої потужності \bar{N} , яка оцінює величину потужності, що виробляється з одиниці теплової енергії, яка підводиться в циклі за рахунок спалювання палива.

Враховуючи результати чисельного дослідження початкового варіанту ПЧ ЦВД турбіни К-540-23,5 та те, що соплові і робочі решітки мають відносні кроки близькі до оптимальних значень, було прийнято рішення провести оптимізацію ПЧ, виключивши з числа параметрів, що оптимізуються число соплових і робочих лопаток [1].

При цьому, забезпечення ще більшого наближення відносних шагів соплових і робочих решіток до оптимальних значень виконувалося зміною їх шагів за рахунок зміни кореневого діаметру і висот лопаток.

В процесі оптимізації визначалися оптимальні значення наступних параметрів:

- кореневий діаметр (однаковий для всіх ступенів);
- висоти соплових і робочих лопаток;
- ефективні кути виходу з соплових і робочих решіток

Крім того, при виборі компонент вектору критеріїв якості була врахована інформація отримана в результаті аналізу результатів чисельного дослідження існуючих варіантів ПЧ ЦВТ та ЦСТ особливо, що стосується раціональності розподілу наявних теплоперпадів циліндрів між їх ступенями. В вихідній конструкції ПЧ ЦВТ виразно проявляється ідея розподілу наявного теплоперпаду циліндру (рис. 1) на користь перших ступенів, тоді як останні ступені вийшли явно недовантаженими [2].



Рис. 1. Розподіл теплових перепадів на ступенях ЦВТ турбіни К-540-23,5

На перший погляд такий перерозподіл теплоперепаду (з точки зору отримання максимальної потужності) здається цілком обгрунтованим, оскільки в цьому випадку перші ступені, через які проходить більша масова витрата, мають і більші теплоперепади. В той же час, очевидним є і той факт (див. залежність 1), що для правильного розподілу теплоперепаду циліндру між його ступенями необхідно враховувати, нарівні з масовою витратою пари через ступені, також і їх ККД.

$$\max N_{cyl} = \max \left\{ \sum_{i=1}^n (H_{0i} \eta_{Ni} G_{0i}) \right\}, \quad (1)$$

де:

H_{0i} – наявний теплоперепад i -го ступеня;

G_{0i} – масова витрата ступеня;

η_{Ni} – внутрішній відносний ККД ступеня;

Тому для найбільш раціонального розподілу наявного теплоперепаду циліндру між його ступенями був запропонований евристичний критерій \bar{K}_{cyl} (2), що відображає міру раціональності його розподілу.

$$\bar{K}_{cyl} = 1 - \sum_{i=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{\bar{H}_{0i}}{\bar{G}_{0i}} \right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{\eta}_{Ni}}{\bar{G}_{0i}} \right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{H}_{0i}}{\bar{\eta}_{Ni}} \right)^2 \right\};$$

$$\bar{\eta}_{Ni} = \frac{\eta_{Ni}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n \eta_{Ni}}{n} \right)}; \quad \bar{G}_{0i} = \frac{G_{0i}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n G_{0i}}{n} \right)}; \quad \bar{H}_{0i} = \frac{H_{0i}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n H_{0i}}{n} \right)}; \quad (2)$$

$$\bar{N}_i = \frac{H_{0i} \eta_{Ni} G_{0i}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (H_{0i} \eta_{Ni} G_{0i})}{n} \right)};$$

де:

n – число ступенів циліндру;

\bar{H}_{0i} – нормоване значення наявного теплоперепаду i -го ступеня;

\bar{G}_{0i} – нормоване значення масової витрати i -го ступеня;

$\bar{\eta}_{Ni}$ – нормоване значення внутрішнього відносного ККД i -го ступеня;

\bar{N}_{cyl} – нормоване значення потужності циліндру;

Цей критерій відображає міру відповідності (збалансованості) спрацьованого теплоперепаду ($H_{0i} \eta_{Ni}$) ступеню і масової витрати (G_{0i}) робочого тіла, що протікає через ступінь. Для оптимізації ПЧ ЦСТ була прийнята та ж сама методика.

З урахуванням того, що кількість теплоти q_j , яка віддається 1 кг пари при конденсації у підігрівачі, залежить від тиску у відборі $P_{від}$, в процесі пошуку оптимальних параметрів теплової схеми у відборах ЦВТ та ЦСТ були задіяні методи теорії планування експерименту [3] з використанням насиченого чотирифакторного плану Рехтшаффнера [4]. Окрім цього ефективно використання оптимальних варіантів ЦВТ та ЦСТ в складі теплової схеми залежить і від температур недогріву живильної води у відповідних підігрівачах.

Впровадження оптимальних варіантів ПЧ, розрахованих в САПР “Турбоагрегат” до теплової схеми та подальший її розрахунок виконано в програмному комплексі “Секвоя” з урахуванням вищезазначених підходів:

- включення оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ та ЦСТ до теплової схеми;
- врахування параметрів пари у відборах;
- вплив температури недогріву живильної води в підігрівачах.

Відповідно до плану, з використанням програмного комплексу “Секвойя”, були розраховані 22 варіанти турбоблоку К-540-23,5 в результаті чого були отримані значення критеріїв якості турбоблоку - потужності на клеммах турбогенератора і питомої потужності турбоблоку. Обробка результатів розрахунку дозволила створити залежності в вигляді повних квадратичних поліномів для критеріїв якості і визначити оптимальні параметри пари в відборах та температури недогріву в підігрівачах живильної води.

Порівняння значень потужності на клеммах турбогенератора визначених за допомогою програмного комплексу “Секвойя” показали високу точність і адекватність отриманих залежностей для оцінки впливу температур недогріву живильної води в підігрівачах на основні інтегральні показники якості турбоблоку – потужність на клеммах турбогенератора та питому потужність турбоблоку.

Висновки

Проведені дослідження з впровадження оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ та ЦСТ в теплову схему турбоагрегату К-540-23,5 дозволило збільшити потужність на клеммах електрогенератора на 6 МВт при цьому величина питомої витрати тепла зменшилась на 108 кДж.

Список літератури:

1. Бойко А.В. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации: монография / А. В. Бойко, А. П. Усатый, А. С. Руденко; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков: Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 220 с.
2. Шерфедінов, Р., Усатий, О., Авдеева, О., Далудін, М., Єнін, І. (2021). Особливості заміни існуючої проточної частини на оптимальну при модернізації ЦВТ парової турбіни. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, (4), 5–11. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.01>
3. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
4. Rechtschaffner R. L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs / R. L. Rechtschaffner // *Technometrics*. – 1967. – № 4. – P. 569–575.

Implementing optimal HPC and MPC flow part options into the thermal scheme of the K-540-23.5 turbine unit

R. Sherfedinov, V. Shvetsov, O. Usatyi

Abstract: Consideration is given to the optimization peculiarities of the flow parts (FP) of the high-pressure cylinder (HPC) and the medium-pressure cylinder (MPC) of the K-540-23.5 turbine. The optimal options of the FPs of the HPC and MPC were implemented into the thermal scheme taking into account the effect of the underheating temperature of the feed water and steam parameters on the heaters during the steam bleed-offs.

Keywords: optimization, turbine unit, thermal scheme, flow part, temperature differences.