

УДК 621.165

РЕАКТИВНА ПАРОВА ТУРБІНА

Борисюк Дмитро Вікторович аспірант
Твердохліб Ігор Вікторович асистент
Яцковський Віктор Іванович к.т.н., доцент
Півнюк Андрій Вікторович студент
Вінницький національний аграрний університет

Borisyuk D.

Tverdokhlib I.

Yatskovskyy V.

Pivniuk A.

Vinnitsia National Agrarian University

Анотація: у статті пропонується спроектувати реактивну парову турбіну для вироблення теплової та електричної енергії з використанням пари підвищеного тиску, яка повинна замінити звичайну парову турбіну в структурі парової електростанції з метою підвищення виходу електричної та теплової енергії, а також зменшення затрат на її будівництво та обслуговування під час експлуатації порівняно із звичайною паровою турбіною.

Коротко проаналізовані перші спроби створення перших парових турбін.

Коротко описані існуючі прототипи парових турбін, їх переваги, недоліки та галузі використання.

Наведено принцип роботи запропонованої реактивної парової турбіни, особливості її конструкції та основні переваги в роботі.

Подана математична модель роботи запропонованої реактивної парової турбіни та розрахунок конструкції основних її частин.

Розглянуто процес протікання пари через сопла турбіни.

Ключові слова: парова турбіна, електрична енергія, електростанція, сопло Лавалю, пар підвищеного тиску, потужність, крутний момент.

Вступ

Теплова електростанція (ТЕС) - електростанція, в якій первісна енергія має хімічну форму і вивільняється шляхом спалювання вугілля, рідкого палива чи газу; в парових електростанціях (з паровими турбінами) у топці парового котла відбувається перетворення хімічної енергії палива в тепло газів — продуктів згоряння; це тепло передається воді та водяній парі, пара з котла надходить до парової турбіни, де тепло перетворюється на кінетичну енергію обертання електрогенератора, з'єданого з турбіною; відпрацьована в турбіні пара надходить до конденсатора і віддає тепло охолоджуючій воді (наприклад, з ріки); у деяких електростанціях застосовують замість парової газову турбіну [1].

Парова турбіна (фр. turbine від лат. turbo - вихор, обертання) – паровий двигун неперервної дії, що перетворює теплову енергію в енергію обертання ротора. Він потрібен для перетворення теплової енергії водяної пари в механічну роботу. Парова турбіна використовує не потенційну енергію, а кінетичну енергію пари [2].

Спроби створити парову турбіну тривали дуже довго. Відомий опис примітивної парової турбіни, зроблений Героном Олександрійським (1 ст. до н.е.). Але тільки в кінці 19

ст., коли машинобудування і металургія досягли достатнього рівня, К.Г.П. Лаваль (Швеція) та Ч.А. Парсонс (Великобританія) незалежно один від одного у 1884-89 рр. створили промислово придатні парові турбіни [2].

Парова турбіна виявилась дуже зручною для приводу обертових механізмів (генератори електричного струму, насоси) та суднових гвинтів; вона виявилась дуже легкою, швидкісною та економічною. Розвиток парової турбіни йшло дуже швидко, як в напрямку поліпшення економічності та підвищення одиниці потужності, так і в напрямку створення спеціалізованих парових турбін різного застосування [2].

Неможливість отримати велику агрегатну потужність і дуже велика частота обертання одноступеневої парової турбіни Лавалю (до 3000 об/хв у перших зразків) призвело до того, що вона зберегла своє значення тільки для приводу допоміжних механізмів. Розвиток турбін дав можливість збільшити потужність, зберігши достатню частоту обертання, необхідну для неї [3].

Реактивна парова турбіна Парсонса деякий час застосовувалась (на військових кораблях), але поступово поступилася місцем більш розвинутих турбінам [4].

Мета дослідження

Замінити парову турбіну в структурі парової електричної станції на реактивну парову турбіну для вироблення тепло- та електроенергії з використанням пари підвищеного тиску.

Основна частина

В основу винаходу поставлена задача заміни парової турбіни в структурі парової електричної станції на реактивну парову турбіну (рис. 1) для вироблення тепло- та електроенергії з використанням пари підвищеного тиску.

Ознаки прототипу - для вироблення електричної енергії використовується кінетична енергія пари підвищеного тиску.

Поставлена задача вирішується тим, що на базі даної реактивної парової турбіни пропонується здійснити парову тепло-електричну станцію.

Реактивна парова турбіна складається з барабана 1, який розміщено в бункері 2, корпуса підшипників 3, підшипників 4, рами 5, вхідної горловини 6, витяжних каналів 7, витяжної горловини бункера 8, вихідного вала 9, Г-подібних сопел у середині яких встановлені сопла Лавалю 10 і приймача конденсату 11. Барабан 1, вхідна горловина 6 і вихідний вал 9 утворюють ротор реактивної парової турбіни.

Реактивна парова турбіна, що пропонується буде працювати наступним чином.

Від джерела пари підвищеного тиску паропроводом подається пар у вхідну горловину 6. Цей потік пари підвищеного тиску з швидкістю приблизно від 35 – 70 м/с, потрапляючи в порожнину барабана 1 надає йому обертальний рух за рахунок перетворення кінетичної енергії потоку пари в механічну енергію, за рахунок виходу пари через сопла 10. Вихідний вал 9, який зв'язаний з електрогенератором перетворює механічну енергію в електричну, виробляє при цьому електричний струм.

Відпрацьована пара, що потрапляє в бункер 2 від барабана через витяжні канали 7 і витяжну горловину 8 відводиться паропроводом в конденсаторну установку, а конденсат, що зібрався в приймачі 11 по конденсаторному проводу подається до джерела пари підвищеного тиску.

Технічний результат: простота конструкції, висока надійність, незначні експлуатаційні і будівельні витрати.

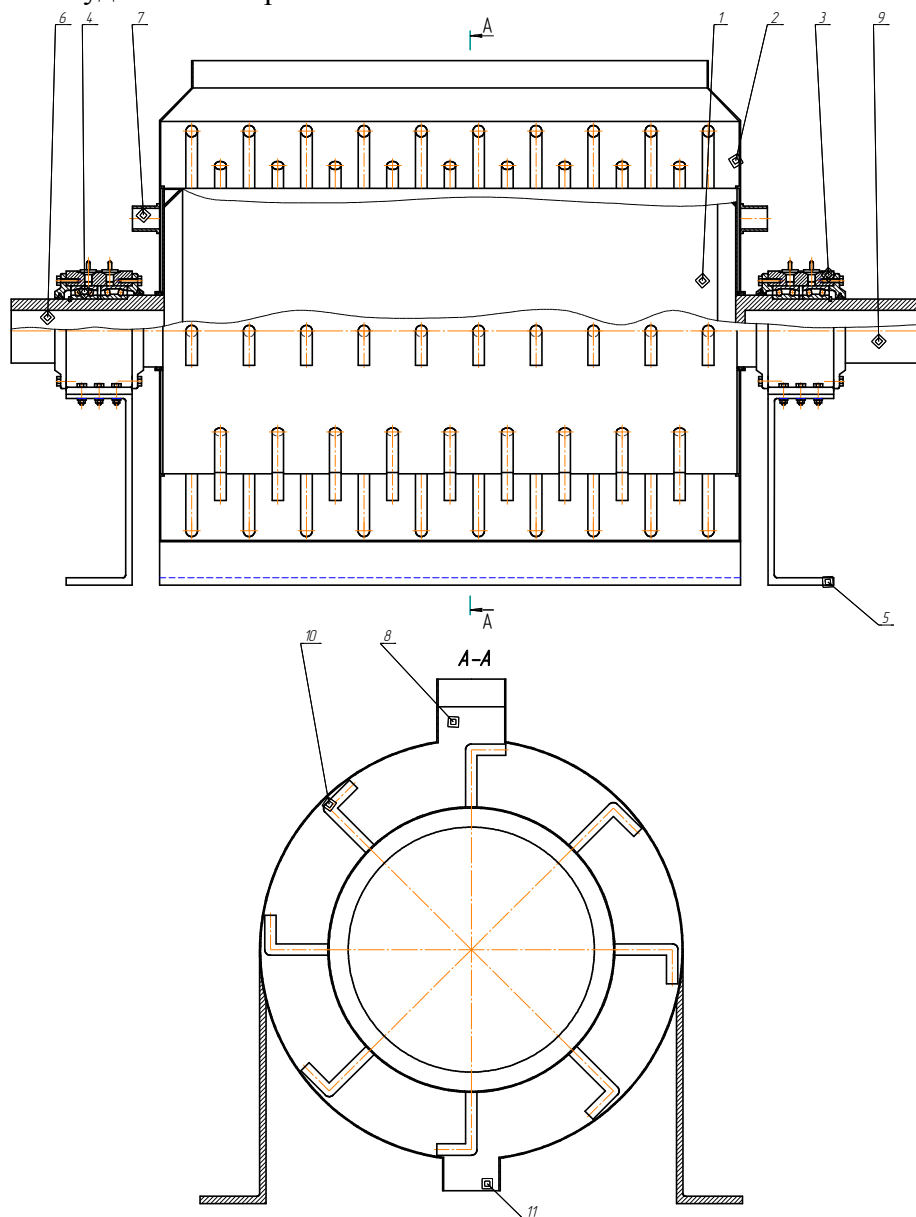


Рис. 1. Реактивна парова турбіна:

**1 - барабан; 2 - бункер; 3 - корпус підшипників; 4 - підшипник; 5 - рама;
6 - вхідна горловина; 7 - витяжний канал; 8 - витяжна горловина бункера; 9 - вихідний вал; 10 - сопло; 11 - приймач конденсату**

Розпочнемо моделювання реактивної парової турбіни з проектування розрахункової схеми (рис. 3.1) і визначення узагальнюючої координати. В нашому випадку узагальнюючою координатою буде y - кут повороту барабана.

Активний момент (момент рушійної сили) на валу барабана:

$$M_A = \frac{1}{2} g \cdot y \cdot \frac{V_2}{w}, \quad (1)$$

де

\mathcal{G} - коефіцієнт, що залежить від конструкції парової турбіни.

Лінеаризуємо залежність за допомогою розкладу в ряд Тейлора в околиці стаціонарного режиму руху (y_0, V_0, w_0) за ступенями малих збільшень $\Delta y, \Delta w$, відкидаючи члени розкладання другого і більше порядків малості і вважаючи, що $V = const$.

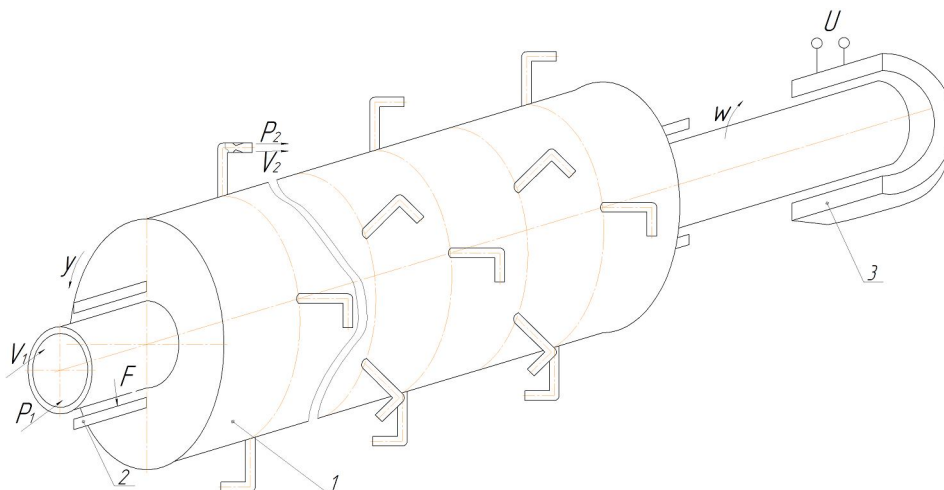


Рис. 2. Розрахункова схема:

1 - барабан; 2 - підшипник; 3 - електрогенератор; y - кут повороту барабана; V_1 - швидкість подачі пари; P_1 - тиск подачі пари; V_2 - швидкість виходу пари з сопла; P_2 - тиск виходу пари з сопла; w - кутова швидкість барабана; U - напруга електрогенератора; F - навантаження, яке сприймає підшипник

$$M_A = M_{A0} + \frac{1}{2} \mathcal{G} \frac{V_0}{w_0} \cdot \Delta y - \frac{1}{2} \mathcal{G} \frac{V_0 y_0}{w_0^2} \Delta w, \quad (2)$$

де

$$M_{A0} = \frac{1}{2} \mathcal{G} \frac{V_0}{w_0} \cdot y_0 - \text{сталий активний момент.}$$

Рівняння (2) приведемо до вигляду:

$$M_A = M_{A0} \left(1 + \frac{\Delta y}{y_0} - \frac{\Delta w}{w_0} \right). \quad (3)$$

Момент опору на валу барабана:

$$M_C = M_{C0} + \Delta M_C, \quad (4)$$

де M_{C0} - сталий момент опору на валу;

ΔM_C - момент, що залежить від зміни навантаження.

$$M_{C0} = F \cdot f \cdot d / 2, \quad (5)$$

де F - навантаження, яке сприймає підшипник;

f - коефіцієнт тертя;

d - діаметр вала.

З теореми про зміну моменту кількості руху системи отримаємо рівняння реактивної парової турбіни:

$$J \frac{dw}{dt} = M_A - M_C, \quad (6)$$

де J - приведений до валу реактивної парової турбіни момент інерції всіх обертових мас;
 t - час.

Підставляючи в рівняння залежності і враховуючи те, що в сталому режимі $M_{A0} = M_{C0}$, отримаємо рівняння реактивної парової турбіни в приростах:

$$J \frac{dw}{dt} = M_{A0} \left(1 + \frac{\Delta y}{y_0} - \frac{\Delta w}{w_0} \right) - \Delta M_C. \quad (7)$$

Номінальними значеннями для реактивної парової турбіни будуть w_0 , y_0 , $M_{A0} = M_{C0} = M_0$.

З урахуванням цього:

$$J \frac{w_0}{M_0} \frac{d\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right)}{dt} = -\frac{\Delta M_C}{M_0} - \frac{\Delta w}{w_0} + \frac{\Delta y}{y_0}. \quad (8)$$

Вводячи наступні $J \frac{w_0}{M_0} = T_0$, $\frac{\Delta M_C}{M_0} = f_0$, $\frac{\Delta w}{w_0} = \gamma$, $\frac{\Delta y}{y_0} = \mu$,

отримаємо

$$T_0 \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = \mu - f_0. \quad (9)$$

Загальна потужність реактивної парової турбіни:

$$N = (M_A - M_C) \cdot w. \quad (10)$$

Загальна потужність електрогенератора:

$$P = N \cdot m \cdot r \cdot I^2, \quad (11)$$

де m - число фаз електрогенератора;
 r - активний опір обмоток статора;
 I - сила струму в обмотках статора.
Вихідна напруга електрогенератора:

$$U = \frac{w}{\pi \sqrt{2}} \cdot n^2 \cdot N_k \cdot B \cdot S, \quad (12)$$

де n - частота обертання;
 N_k - число витків обмотки статора;
 B - індуктивність обмотки статора;
 S - площа полюса.

Розпочнемо моделювання сопла реактивної парової турбіни з проектування розрахункової схеми (рис. 3) і визначення узагальнюючої координати. В нашому випадку узагальнюючою координатою буде V_2 - швидкість виходу пари з сопла і G - витрата пари.

Витрата пари:

$$G = F \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{\rho} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (13)$$

де F - площа поперечного перерізу сопла на виході;

ρ - густина пари;

k - показник адіабати.

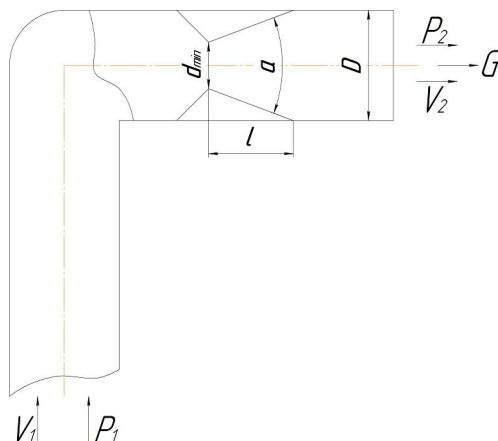


Рис. 3. Розрахункова схема сопла:

V_1 - швидкість подачі пари; P_1 - тиск подачі пари; V_2 - швидкість виходу пари з сопла; P_2 - тиск виходу пари з сопла; G - витрата пари; d_{\min} - діаметр отвору; D - вихідний діаметр; a - кут конусної частини сопла, яка розширюється; l - довжина частини сопла, яка розширюється

Швидкості витікання пари із сопла Лавалю, м/с:

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (14)$$

де ρ_1 - густина пари на вході в сопло, м³/кг,

$$\rho_1 = \frac{RT_1}{P_1}, \quad (15)$$

де T_1 - температура пари на вході в сопло, К;

$R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ - універсальна газова стала;

$P_1 = p_t = p_s + \left(\frac{\rho_1 V_1^2}{2} \right)$ - тиск у соплі (тиск Піто);

$V_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_t - p_s)}{\rho_1}}$ - швидкість пари після подолання Г-подібного повороту (P_s -

статичний тиск пари).

З рівняння адіабатного процесу $\frac{\rho_K}{\rho_1} = \left(\frac{P_1}{P_K}\right)^{\frac{1}{k}}$, визначимо густину пари в критичній точці сопла:

$$\rho_K = \rho_1 \left(\frac{P_1}{P_K}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (16)$$

де $P_K = P_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ - тиск пари в критичній точці сопла.

Теоретична швидкість пари в мінімальному перетині сопла, м/с:

$$V_K = 1,08\sqrt{RT_1}. \quad (17)$$

Площа мінімального перетину сопла:

$$F_{\min} = \frac{G\rho_K}{V_K}. \quad (18)$$

Діаметр отвору сопла:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4F_{\min}}{\pi}}. \quad (19)$$

Площа поперечного перетину сопла на виході:

$$F = \frac{G\rho_2}{V_2}, \quad (20)$$

де $\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}}$ - густина пари на виході з сопла.

Діаметр сопла на виході:

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}. \quad (21)$$

Довжина частини сопла, яка розширюється:

$$l = \frac{D - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (22)$$

Висновки

Аналізуючи отримані залежності, можна зазначити, що дана система при наведеному сполученні параметрів є стійкою і дозволяє провести більш повномасштабні дослідження з метою формування інженерних рекомендацій по проектуванню та конструюванню систем даного типу.

Література

1. *Тепловые и атомные электростанции: учебник для вузов / Л. С. Стерман, С. А. Тевлин, А. Т. Шарков; под ред. Л. С. Стермана. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. — 456 с.: ил.*
2. *Щегляев А. В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин: ученик. для вузов: В 2 кн. Кн. 1.- 6-е изд., перераб., доп. и подгот. к печати Б. М. Трояновским.- М.: Энергоатомиздат, 1993.- 384 с: ил.*

3. Щегляев А. В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин: Учеб. для вузов: В 2 кн. Кн. 2. - 6-е изд., перераб., доп. и подгот. к печати Б.М. Трояновским. - М.: Энергоатомиздат, - 1993. - 416 с: ил.
4. Бененсон Е. И. Теплофикационные паровые турбины / Е. И. Бененсон, Л. С. Иоффе. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 272 с.

References

1. Teplovyue i atomnyue elektrostantsii: uchebnik dlya vuzov / L. S. Sterman, S. A, Tevlin, A. T. Sharkov; pod red. L. S. Stermana. - 2-ye izd., ispr. i dop. - M.: Energoizdat, 1982. — 456 s.: il.
2. Shcheglyayev A. V. Parovyue turbiny. Teoriya teplovogo protsesssa i konstruksii turbin: uchenik. dlya vuzov: V 2 kn. Кн. 1.- 6-ye izd., pererab., dop. i podgot. k pecha-ti B. M. Troyanovskim.- M.: Energoatomizdat, 1993.- 384 s: il.
3. Shcheglyayev A. V. Parovyue turbiny. Teoriya teplovogo protsesssa i konstruksii turbin: Ucheb. dlya vuzov: V 2 kn. Кн. 2. - 6-ye izd., pererab., dop. i podgot. k pechati B.M. Troyanovskim. - M.: Energoatomizdat,- 1993. - 416 s: il.
4. Benenson Ye. I. Teplo-fikatsionnyue parovyue turbiny / Ye. I. Benenson, L. S. Ioffe. - M.: Energoatomizdat, 1986.- 272 s.

РЕАКТИВНАЯ ПАРОВАЯ ТУРБИНА

Аннотация: в статье предлагается спроектировать реактивную паровую турбину для выработки тепловой и электрической энергии с использованием пара повышенного давления, которая должна заменить обычную паровую турбину в структуре паровой электростанции с целью повышения выхода электрической и тепловой энергии, а также уменьшения затрат на ее строительство и обслуживание во время эксплуатации по сравнению с обычной паровой турбиной.

Коротко проанализированы первые попытки создания первых паровых турбин.

Кратко описаны существующие прототипы паровых турбин, их преимущества, недостатки и области применения.

Приведены принцип работы предложенной реактивной паровой турбины, особенности ее конструкции и основные преимущества в работе.

Представлена математическая модель работы предложенной реактивной паровой турбины и расчет конструкции основных ее частей.

Рассмотрен процесс протекания пара через сопла турбины.

Ключевые слова: паровая турбина, электрическая энергия, электростанция, сопло Лаваля, пар повышенного давления, мощность, крутящий момент.

REACTIVE STEAM TURBINES

Summary: the article proposes the design reactive steam turbine for heat and electricity using high pressure steam, which should replace conventional steam turbine power station steam structure in order to increase the output power and heat, and reduce costs for the construction and maintenance during operation compared to conventional steam turbine.

Briefly reviewed first attempts to create the first steam turbines.

Briefly describes the existing steam turbine prototypes, their strengths, weaknesses and areas of use.

Shows the principle of the proposed reactive steam turbine, especially its design, the main advantages to work with.

The present mathematical model of the proposed jet turbine design and calculation of its main parts.

The process flow of steam through the turbine nozzle.

Keywords: steam turbine, electricity, power plant, Laval nozzle, high-pressure steam, power, torque.