

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до розрахункової роботи

**З КУРСУ «МОНТАЖ ТА РЕМОНТ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО  
УСТАТКУВАННЯ»**

для студентів за спеціальністю G11 Машинобудування  
спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»  
(142 «Енергетичне машинобудування»)

Харків  
НТУ ”ХПІ”  
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до розрахункової роботи

**З КУРСУ «МОНТАЖ ТА РЕМОНТ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО  
УСТАТКУВАННЯ»**

для студентів за спеціальністю G11 Машинобудування  
спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»  
(142 «Енергетичне машинобудування»)

Затверджено редакційно-  
видавничою радою університету,  
протокол № 2 від 26.06.2025 р.

Харків  
НТУ „ХПІ”  
2025

**Методичні вказівки** до розрахункової роботи з курсу «Монтаж і ремонт теплоенергетичного устаткування» для студентів за спеціальністю G11 «Машинобудування» спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки» (142 «Енергетичне машинобудування») / Укл. Ю.О. Юдін, О.В. Лапузін., О.Ю. Юдін – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – 17с.

Укладачі: Ю.О. Юдін,  
О.В. Лапузін  
О.Ю. Юдін

Рецензент О.І. Тарасов

Кафедра турбінобудування

## ЗМІСТ

1	ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	5
2	ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	6
3	ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГИНІВ І КУТІВ ПОВОРОТУ ПЕРЕРІЗІВ ВАЛУ ПІД ДІЄЮ ЗОСЕРЕДЖЕНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	8
4	ПОБУДОВА ПРУЖНОЇ ЛІНІЇ ВАЛОПРОВОДА І З'ЄДНАННЯ ОКРЕМИХ РОТОРІВ .....	13
5	УРАХУВАННЯ ПОХИБКИ ВИВІРКИ ЗОРОВОЇ ТРУБИ.....	15
	СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	16

## 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Метою даної розрахункової роботи є вивчення основ розробки технологічного процесу установки і центрування циліндрів і корпусів підшипників турбоагрегатів великої потужності за допомогою оптико-механічного комплексу.

Завдання на розрахункову роботу включає геометричні дані одного з роторів, загальні геометричні розміри і прогини інших роторів, дані по центрівці роторів між собою і деякі додаткові відомості, характерні для конкретного турбогенератора.

Розрахункова робота складається з пояснювальної записки. У пояснювальну записку входять: теоретична частина, схема ротора і розбивка його на ділянки, таблиці вихідних даних, таблиці розрахунків прогинів роторів, схема валопроводу з розмірами, таблиці положень основних розточувань корпусів щодо базової лінії, центрувальні таблиці турбоагрегату. Розрахунки виконуються в офісній програмі EXCEL, яка дозволяє представити результати у вигляді таблиць та рисунків.

## 2. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Підготовка вихідних даних до розрахунку прогину ротора полягає в обчисленні мас і моментів інерції окремих перетинів ротора, включаючи консольні частини. Слід мати на увазі, що для розрахунку центрування роторів між собою необхідно визначити напрямок дотичної до лінії прогину на кінцях ротора (в площині торця півмуфти), тому консольні частини ротора повинні бути розбиті на досить велику кількість ділянок.

Розрахунок лінії прогину і кутів повороту решт ротора виконують за допомогою програми PROGIB. Лінію прогину апроксимують поліномом для визначення координат центрів розточувань елементів проточної частини турбіни.

Для визначення положення центрів розточувань проточної частини при монтажі турбіни необхідно враховувати осідання опор при навантаженні їх масою ротора, це досягається установкою опор і всієї лінії ротора з перевищенням, рівним величині просідання опор при навантаженні ротором. Просадка опор задається у вихідних даних до проекту. Необхідно врахувати просідання вбудованих опор при створенні вакууму в ЦНД, величини їх задаються в завданні.

При збільшенні температури опор при роботі турбін ротори піднімаються і це також необхідно враховувати при визначенні положення центрів розточування проточної частини.

Визначення положення центрів розточування виробляють з прив'язуванням до прямої лінії, що проходить через дві базові розточення. У більшості випадків, особливо при центруванні ЦНД, як базових приймають розточення під мастилозахисні кільця і координати інших розточувань проточної частини відраховують від прямої, що з'єднує центри цих розточувань.

Для використання оптико-механічного комплексу при центруванні проточної частини турбіни необхідно розташовувати зміщенням

розточування у вертикальній площині щодо прямої (світлового променя), що проходить через центри базових розточування. Для визначення зміщення центрів елементів проточної частини з урахуванням прогину ротора і просадки опор складаються таблиці, в яких вказують відхилення центру розточування даного елемента проточної частини від базової прямий. Якщо центр розточення вище базової лінії, то координата записується зі знаком (+), якщо нижче, то зі знаком (-). Таким чином, в таблицю входять всі елементи проточної частини з відповідними координатами у вертикальній площині.

При установці зорової труби її оптична вісь повинна проходити через обидва центри базового розточування з точністю до 0,01 мм, проте вивірити оптичну трубу з такою точністю не представляється можливим, тому оптичну трубу встановлюють з деякою похибкою (0,1 - 0,2 мм) і при вимірюванні вводять поправку на установку труби. Поправлення залежить від геометричних розмірів валопроводу.

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГИНІВ І КУТІВ ПОВОРОТУ ПЕРЕРІЗІВ ВАЛУ ПІД ДІЄЮ ЗОСЕРЕДЖЕНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахункова схема вала приведена на рис.3.1.

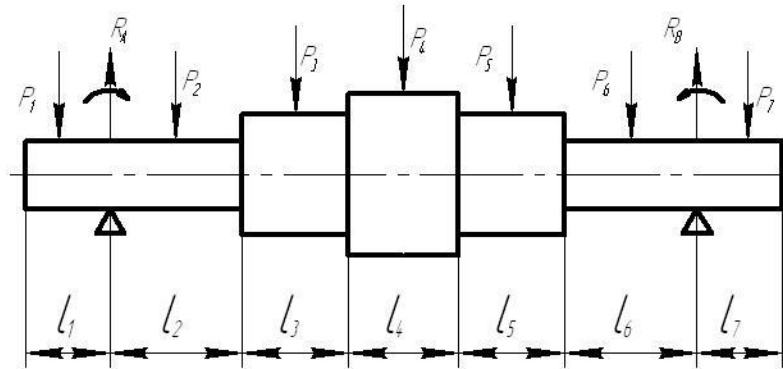


Рисунок 3.1

$P_i$  - зосереджене навантаження на ділянці вала, кгс (Н);

$R_i$  - реакція опори, кгс (Н);

$l_i$  - довжина ділянки вала, см;

$E$  - модуль поздовжньої пружності, кгс / см<sup>2</sup> (МПа);

$J_i$  - момент інерції поперечного перерізу ділянки см<sup>4</sup>;

$M_i$  - момент від консольних частин.

Повний прогин в перерізі вала складається з прогину, викликаного нормальними напруженнями згину (від згинальних моментів), прогину, викликаного дотичними напруженнями (від поперечних сил) і зміщення від просідання опор.

$$y_{i\bar{i}\bar{e}} = y_i + y_Q + y_0$$

Додатковий прогин  $y_Q$ , викликаний дотичними напруженнями, необхідно враховувати, якщо діаметр перетину порядку 1/4 прольоту вала або більше.

Далі визначають прогин, викликаний тільки дією нормальних напружень, так як діаметр вала значно менше довжини.

Ось вала розташовується по кривій  $y(x)$  званої пружною лінією (рис.3.2).

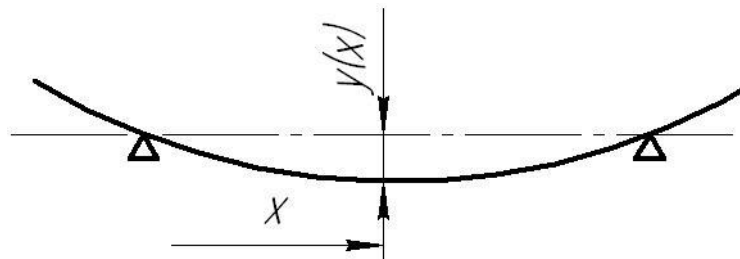


Рисунок 3.2

Прогин вала при вигині визначають інтегруванням диференціального рівняння пружної лінії при малих прогинах і обліку деформацій від згинального моменту:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EJ_x}$$

Кут повороту перетинів і прогин пов'язані з згинальними моментами вала залежностями:

$$Q(x) = -S \frac{M}{EJ} dx + C$$

$$y(x) = -S dx \int \frac{M}{EJ} dx + Cx + D$$

Найбільш часто застосовується метод початкових параметрів, що спрощує розрахунки прогинів і кутів оберту. При використанні цього методу рівняння пружної лінії і кута оберту перетину при навантаженні вала

постійної жорсткості згинальними моментами і зосередженими силами приймають вид:

$$y(x) = y_{(0)} + \theta_{(0)}x - M_{(0)} \frac{x^2}{2EJ} - Q_{(0)} \frac{x^3}{GEJ} - \sum \frac{L(x-x_L)^2}{2EJ} + \sum \frac{P(x-x_p)}{GEJ}$$

$$\theta(x) = \theta_{(0)} - M_{(0)} \frac{x}{EJ} - Q_{(0)} \frac{x^2}{2EJ} - \sum \frac{L(x-x_L)}{EJ} + \sum \frac{P(x-x_p)}{2EJ}$$

де  $y_{(0)}, \theta_{(0)}, M_{(0)}$  і  $Q_{(0)}$  – прогин, кут повороту, згинальний момент і поперечна сила в перерізі, прийнятому за початкове (початкові параметри);

$x_L, x_p$  – відстань від початку координат (рис.3.3) до точок прикладання зосереджених сил, згинальних моментів між початком координат і перерізом  $x$ .

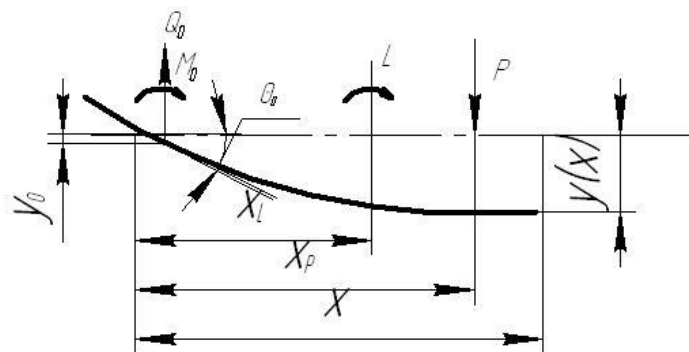


Рисунок 3.3

Початкові параметри  $M_{(0)}$  і  $Q_{(0)}$  визначають з епюр згинаючих моментів і поперечних сил, параметри  $y_{(0)}, \theta_{(0)}$  – за умовами закріплення вала (на опорах  $y = 0$ ).

Знаходимо  $y(x)$  і  $\theta(x)$  в будь-якому перерізі вала.

Вал змінного перерізу призводять до балки постійного перерізу (жорсткості). Для цього в місцях ступеневої зміни перетинів докладають додатково до зовнішніх навантажень внутрішні зусилля (поперечні сили і

згинальні моменти).

Жорсткості всіх ділянок приймають однаковими, наприклад рівними найбільшій жорсткості  $(EJ)_{i\delta}$ , а для збереження деформації наведеного валу навантаження і внутрішні зусилля збільшують на коефіцієнт, що дорівнює відношенню наведеної жорсткості до істинної,

$$K = \frac{(EJ)_{i\delta}}{EJ}$$

Для розрахунку використовується комп'ютерна програма «PROGIB», яка дає розподіл прогинів і кутів повороту на кінцях ротору.

Для підготовки вихідних даних вал замінюють балкою, опертою на жорсткі опори і навантаженою зосередженими навантаженнями, прикладеними на кожній ділянці. Ділянки замінної балки між сусідніми зосередженими навантаженнями вважають невагомими, межі розрахункових ділянок розташовують на опорах і в місцях ступеневої зміни діаметра. В розрахункові ділянки можуть об'єднуватися кілька коротких ділянок з різними, але близькими за величиною діаметрами і довжиною, значно меншою діаметра. Об'єднувати можна лише ділянки, що знаходяться по одну сторону опори. Ділянка постійного діаметра з довжиною, що значно перевищує діаметр, повинна розбиватися на кілька розрахункових ділянок. Сума довжин розрахункових ділянок повинна дорівнювати загальній довжині вала. При розрахунку повинні бути передбачені консолі на опорах (при відсутності консолей на роторі слід передбачити фіктивні).

Зосереджені навантаження на ділянках приймають з урахуванням всіх деталей ротора (дисків, лопаток, бандажів, муфт та ін.). Сума розрахункових величин всіх зосереджених навантажень повинна дорівнювати загальній масі ротора.

При визначенні жорсткості розрахункових ділянок враховуються такі рекомендації:

а) розрахунковий діаметр ділянки в районі виступів і западин кінцевих і діафрагменних ущільнень усереднюється;

б) дрібні канавки і виступи, а також шпонкові пази не приймаються до уваги;

в) для ділянок насадних дисків, муфт розрахунковим приймається діаметр вала під насадною деталлю;

г) для суцільнокованих (зварних роторів) розрахунковий діаметр ділянки диска дорівнює діаметру валу, збільшеному на товщину диска;

д) для фланцевого з'єднання розрахунковим діаметром є діаметр кола центрів болтів.

В результаті розрахунку визначають:

- прогини ротора  $y_i$ , см;
- кути повороту перерезів  $\theta$ , рад;

#### 4. ПОБУДОВА ПРУЖНОЇ ЛІНІЇ ВАЛОПРОВОДА І З'ЄДНАННЯ ОКРЕМИХ РОТОРІВ

4.1. Для зручності розрахунків все осьові розміри записують прапорцем від напівмуфти, яка пристиковується до базового ротора, зазвичай на заводському кресленні ці розміри розташовані іншим способом, тому їх необхідно перерахувати.

4.2. Для визначення вертикальних координат розточувань під елементи проточної частини і опор необхідно пов'язати два сусідніх ротора з урахуванням прогинів роторів. На рис.4.1 представлена схема зчленування двох роторів, правий ротор приймаємо за базу і всі розрахунки будемо вести відносно прямої, що проходить через його опори,

$$y_{\text{рот}} = \sin(\theta_1 + \theta_2)L_i + y_{01} - y_{02} + y_i$$

де  $\theta_1$  і  $\theta_2$  – кути повороту кінців роторів в місці з'єднання щодо своїх базових ліній;

$y_{01}$  і  $y_{02}$  – координати кінців півмуфт щодо базових ліній;

$y_i$  – координата центру поточного розточення щодо власної базової лінії вона зі знаком (+) на кінцях і зі знаком (–) в середній частині (між підшипниками);

$L_i$  – відстань від площини півмуфт до даного розточення.

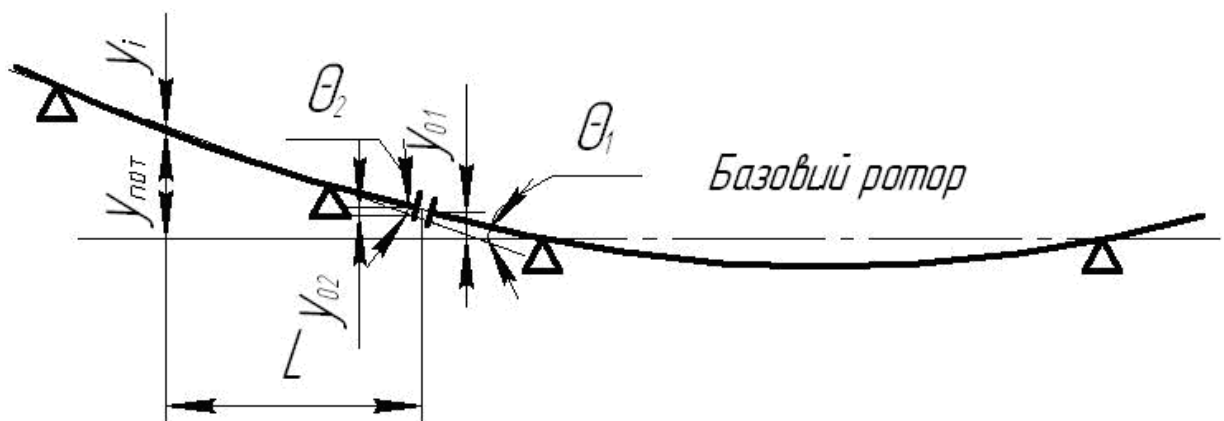


Рисунок 4.1

4.3. Розкриття півмуфт і просідання опор від навантаження ротора або вакуума враховують наступним чином: розкриття півмуфт внизу збільшує вертикальні координати ротора, що пристиковується, розкриття вгорі – зменшує.

Якщо задано розкриття півмуфт при центруванні, то до  $\theta_1 + \theta_2$  додається  $\alpha_p$ , тобто ми повинні використовувати формулу

$$y_{\text{пот}} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \alpha_p)L_i + y_{01} - y_{02} + y_i$$

де:  $\alpha_p = \delta/D$  – кут розкриття фланців півмуфт;

$\delta$  – розкриття фланців півмуфт;

$D$  – діаметр півмуфт, що з'єднуються.

Для врахування осідання опор координату центру розточення збільшують на величину осідання. Слід мати на увазі, що в розрахунках оперуємо з дуже малими кутами, тому чисельне значення синуса кута дорівнює куту, вираженого в радіанах, і вираз для поточної координати може бути записано:

$$y_{\text{пот}} = (\theta_1 + \theta_2 + \alpha_p)L_i + y_{01} - y_{02} + y_i$$

Якщо має місце просідання опор під дією маси ротора або вакууму, то коректувати положення центрів розточення слід з урахуванням розширення двох сусідніх опор, враховуючи різницю температур і різниця висот опор:  $h$  – висота опори від фундаментної плити до поверхні нижнього вкладиша;  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Delta y_i = (h_1 t_1 - h_2 t_2) \alpha$ .

## 5 УРАХУВАННЯ ПОХИБКИ ВИВІРКИ ЗОРОВОЇ ТРУБИ

Для складання центрувальних таблиць необхідно мати рівняння для визначення координат центрів розточення  $y'_{\text{пот}}$  з урахуванням похибки вивірки зорової труби. Позначивши похибки установки зорової труби  $M_1$  і  $M_2$ , які фіксуються у перерізах 1 і 2, отримаємо рівняння в наступному вигляді:

$$y'_{\text{пот}} = M_1 \frac{a+b}{b} - M_2 \frac{a}{b} + y_{\text{пот}}$$

де  $a$  – відстань від  $M_1$  до поточного перетину;

$b$  - відстань між  $M_1$  і  $M_2$  (рис.4.2);

$y_{\text{пот}}$  – поточна вертикальна координата пружної лінії валопроводу щодо базової лінії базового ротора.

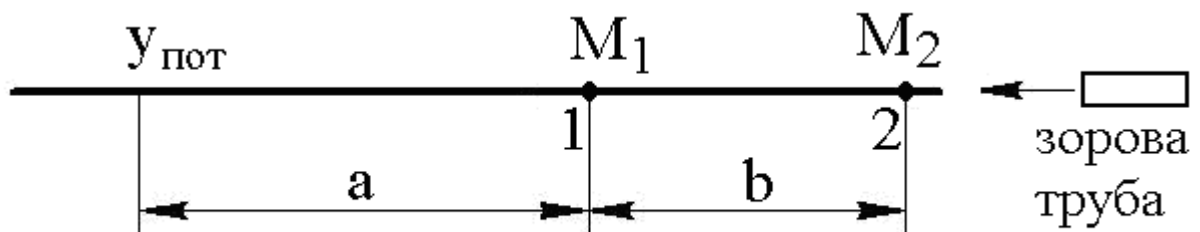


Рисунок 4.2

Для коригування горизонтальних координат рівняння втрачає останній член, так як прогини в горизонтальній площині відсутні.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Конспект лекцій з дисципліни «Монтаж та ремонт теплоенергетичного устаткування». Лектор проф. Юдін Ю.О. – Харків: НТУ «ХП», 2025. – 105 С. (електронна версія, кафедра турбінобудування НТУ «ХП»).

2. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Технологія турбінобудування» для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування / уклад. Ю.О. Юдін, О.В. Лапузін, В.П. Суботович. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 40с. (електронна версія, бібліотечний ресурс НТУ «ХП»).

### Додаткова література

1. Новіков В.А. Технологія виробництва и монтажа парових і газових турбін. – ГОУ ВПО УДТУ УП. 2009 – 669с.

2. Справочник монтажника теплових і атомних електростанцій. – під ред. Банніка В.П. і Вінницького Д.Я. – М.: Енергоатоміздат. 1983 – 880с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до розрахункової роботи з курсу «Монтаж і ремонт теплоенергетичного  
устаткування»  
для студентів за спеціальністю G11 «Машинобудування»  
спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»  
(142 «Енергетичне машинобудування»)

Укладачі:

ЮДІН Юрій Олексійович

ЛАПУЗІН Олександр Вікторович

ЮДІН Олександр Юрійович

Відповідальний за випуск

ст.н.с. О. П. Усатий

Роботу до видання рекомендував

доцент Л. І. Тютюнник.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 482

Підп. до друку 2025 Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,5

---

Видавничий центр НТУ «ХП»,  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

---

Електронна версія