

Лекція №9

Розділ 7. УРІВНОВАЖУВАННЯ ОБЕРТОВИХ МАС (РОТОРІВ)

Тема 7.1. НЕВРІВНОВАЖЕНІСТЬ РОТОРА ТА ЇЇ ВИДИ

Роторами називатимемо будь-які обертові маси: зубчасті колеса, робочі колеса турбін, колінчасті вали, маховики і т. ін. Питання їх балансування як на стадії проектування, так і після виготовлення, стоїть дуже серйозно. Наприклад швидкість обертання турбіни атомної електростанції становить $\sim 400 \text{ хв}^{-1}$, а ротор важить $\sim 50 \text{ т}$. Її діаметр близько 2 м, а довжина 20 м. Незбалансованість ротора турбіни може призвести до сильних вібрацій, а можливо і до катастрофи. В газотурбінних двигунах кількість обертів головного вала турбіни $\sim 10000 \text{ хв}^{-1}$!

При рівномірному обертанні ротора відносно осі z (рис. 7.1) можуть виникнути динамічні навантаження, якщо центр мас S не буде лежати на його осі.

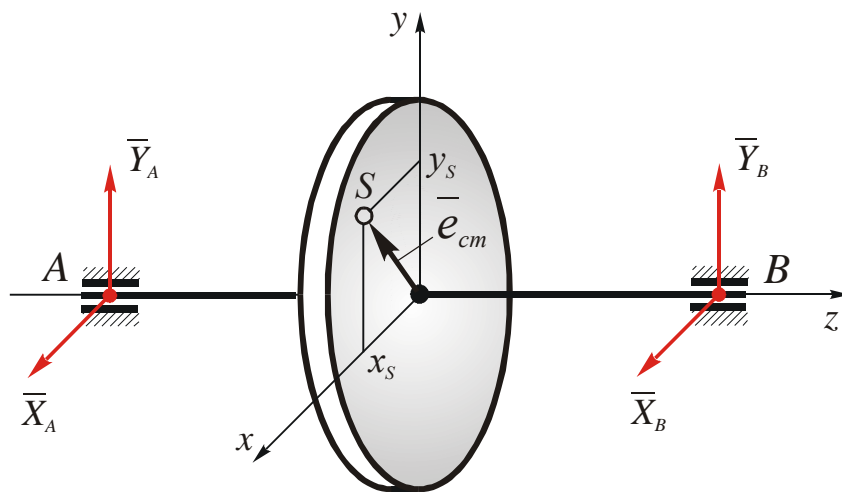


Рис. 7.1 Ротор з ексцентриситетом маси

Головний вектор сил інерції $F_a = m\omega^2 \sqrt{x_s^2 + y_s^2}$. У векторному вигляді запишемо

$$\vec{F}_a = m\omega^2 \vec{e}_{cm}. \quad (7.1)$$

Тут $\vec{e}_{cm} = \vec{r}_S$ – радіус-вектор центру мас S ротора і називається *ексцентриситетом маси ротора*.

Позначимо

$$\bar{D}_{cm} = m\bar{e}_{cm}. \quad (7.2)$$

Це головний вектор дисбалансу ротора.

Тоді

$$\bar{F}_a = \omega^2 \bar{D}_{cm}. \quad (7.3)$$

Головний момент інерції ротора $M_a = \omega^2 \sqrt{J_{xz}^2 + J_{yz}^2}$ або $M_a = \omega^2 M_D$. Тут $M_D = \sqrt{J_{xz}^2 + J_{yz}^2}$ – головний момент дисбалансу ротора. Ця величина має векторний зміст, тобто

$$\bar{M}_a = \omega^2 \bar{M}_D. \quad (7.4)$$

На практиці невірноваженість ротора характеризується не величинами \bar{F}_a і \bar{M}_a , а пропорційними їм головним вектором \bar{D}_{cm} і головним моментом \bar{M}_D дисбалансу ротора.

Розрізняють *статичну, моменту і динамічну* невірноваженість ротора.

7.1.1. Статична невірноваженість ротора

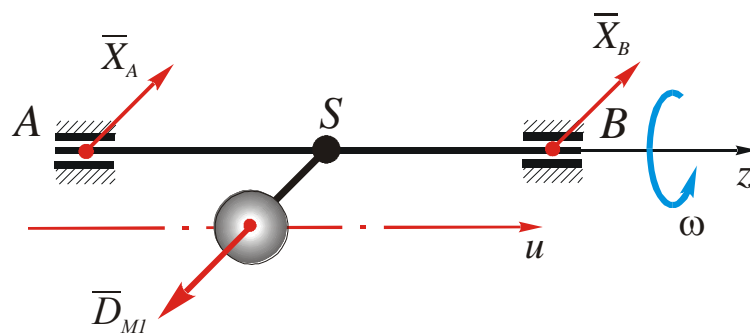


Рис. 7.2 Статично невірноважений ротор

У цьому випадку ексцентриситет маси ротора $\bar{e}_{cm} \neq 0$; а відцентрові моменти інерції $J_{xz} = J_{yz} = 0$. Тобто

$$\bar{D}_{cm} \neq 0; \quad \bar{M}_D = 0.$$

Цю невірноваженість легко усунути, якщо до ротора прикріпити коректуючу масу m_K , яка забезпечить виконання умови

$$\bar{D}_{cm} = -\bar{D}_K. \quad (7.5)$$

Тут $\bar{D}_K = m_K \bar{e}_K$. Причому центр коректуючої маси має лежати на лінії дії вектора \bar{e}_{cm} , а вектор її дисбалансу \bar{e}_K – обернено направлений по відношенню до \bar{e}_{cm} .

7.1.2. Моментна невірноваженість ротора



$$\bar{D}_{cm} = 0; \quad \bar{M}_D \neq 0.$$

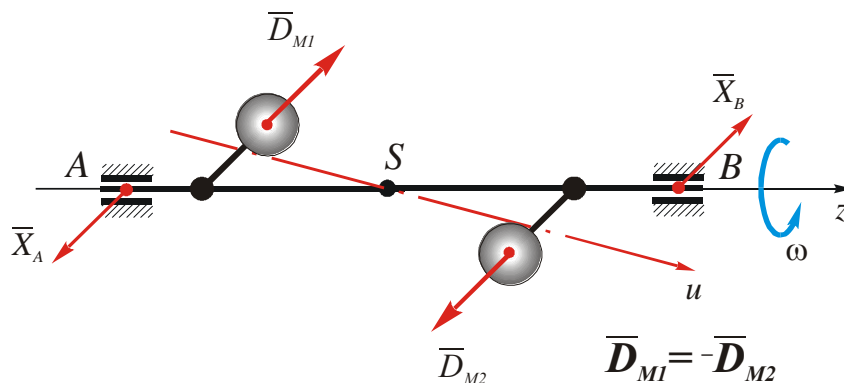


Рис. 7.3 Моментно невірноважений ротор

Для усунення невірноваженості потрібно встановити, як мінімум, дві коректуючі маси, щоб створити пару сил $\bar{M}_K = -\bar{M}_D$. Ці маси ставлять в площині корекції таким чином, щоб виникала саме пара сил корекції.

7.1.3. Динамічна невірноваженість ротора



$$\bar{D}_{cm} \neq 0; \quad \bar{M}_D \neq 0.$$

У цьому випадку ми маємо в опорах реакції R_A і R_B , представлені векторами, які перехрещуються, і які обертаються разом з валом (рис. 7.4).

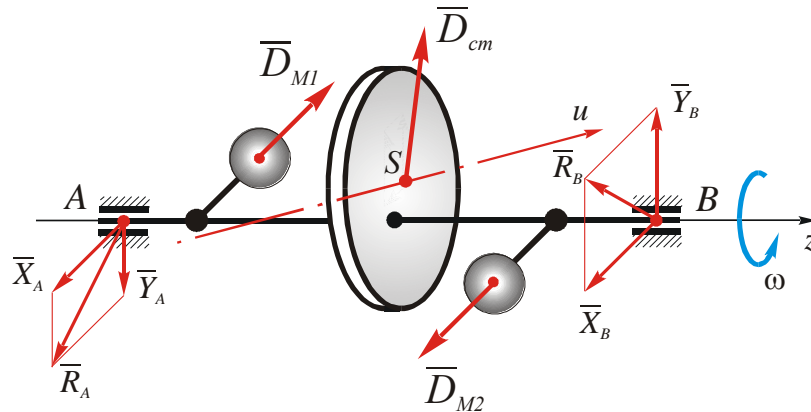


Рис. 7.4 Динамічно нерівноважений ротор

Ця нерівноваженість усувається постановкою відповідним чином двох мас в площинах, перпендикулярних до осі обертання.

Тема 7.2. СТАТИЧНЕ І ДИНАМІЧНЕ БАЛАНСУВАННЯ ВИГОТОВЛЕНИХ РОТОРІВ

Нерівноваженість роторів має виключатись вже на стадії проектування. Однак в процесі виготовлення роторів нерівноваженості можуть виникати за рахунок відхилення від проектних розмірів, неоднорідності матеріалу, неточності складання.

7.2.1. Статичне балансування виготовленого ротора

Його метою є суміщення центру мас ротора з віссю обертання. Виконується як вручну з допомогою ножових опор (рис. 7.5), так і на спеціальних стендах (рис. 7.6)

За першим методом виготовлений ротор встановлюється на ножові опори, що практично виключає тертя в точках обпирання. Якщо ротор незбалансований, то він прагнучиме зайняти положення стійкої рівноваги. Після того, як ротор займе таке положення, його центр мас лежатиме на вертикальній прямій, яка належить площині, що проходить через точки обпирання. Після виявлення місця надлишкової маси, вона або видаляється, або додається з протилежного боку. Процедура повторюється доти, аж поки ротор не набуде стану байдужої рівноваги на ножових опорах, що є можливим лише за умови повної його збалансованості.

В умовах масового виробництва балансування роторів проводять на спеціальних стендах, одна з можливих схем якого наведена на рис. 7.6.

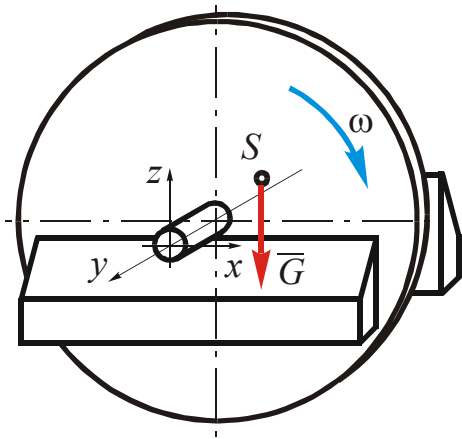


Рис. 7.5 Ножові опори для балансування ротора

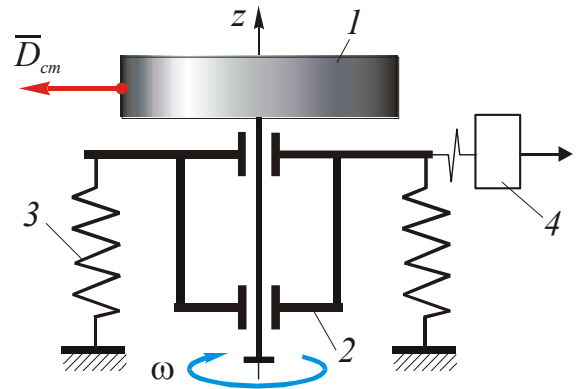


Рис. 7.6 Балансувальний стенд

Ротор 1 закріплюють в опорах обертання на плиті 2. Плита встановлена на пружній основі 3, яка допускає підвищені переміщення в просторі. При наявності дисбалансу плита виконує складний рух (вісь z описує конус). Сейсмодатчик 4 коливається. Ці коливання трансформуються в електричний сигнал, який надходить до ЕОМ. Після необхідних обчислень встановлюються точні координати місця розташування надлишкової маси.

7.2.2. Динамічне балансування виготовленого ротора

Його метою є суміщення головної осі інерції ротора з віссю обертання.

Динамічне балансування абсолютно необхідно проводити для довгих роторів. Проводиться воно на спеціальних балансувальних машинах. Вони бувають трьох типів: з нерухою віссю обертання ротора; з віссю обертання, яка коливається в площині відносно другої осі; з віссю, що виконує просторовий рух.

На рис. 7.7 показана схема балансувальної машини.

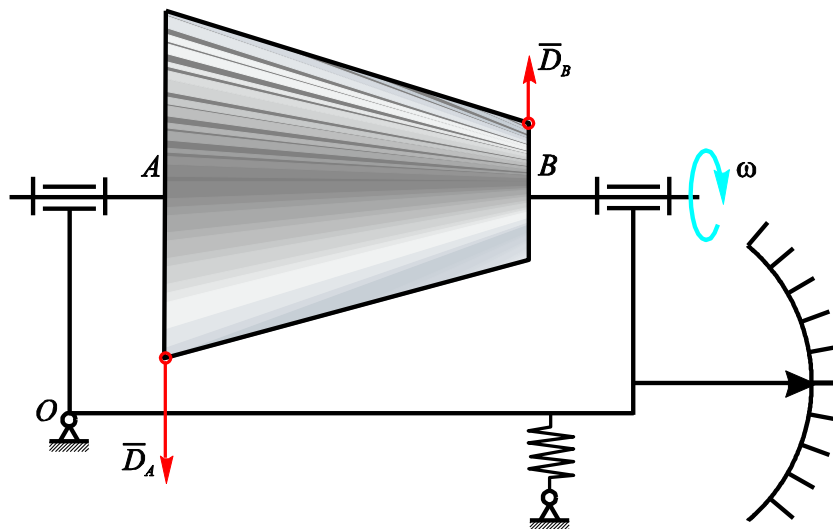


Рис. 7.7 Стенд для динамічного балансування ротора

Тут A і B – площини корекції. Спочатку усувають дисбаланс в перерізі B . Для цього при декількох пусках визначають величини амплітуди коливань A_{Bi} , яка пропорційна величині дисбалансу D_B . Причому, за першого (основного) пуску розганяється ротор у вихідному стані. У двох останніх пусках (пробних) розганяється ротор з додатковими фіксованими масами в перерізі B , що дозволяє за величиною амплітуди точно встановити величину шуканого дисбалансу D_B . Потім ротор повертається на 180° і повторюються ті ж дії для перерізу A .

Для дуже точного балансування його здійснюють у вакуумі (10^{-3} атм). Це зменшує повітряний опір і зменшується потужність приводу, враховуючи вагу турбіни.