

УДК 62.755

Вілен Петрович РОЙЗМАН,
*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки
та зв'язку Хмельницького національного університету*

Ілона Володимирівна ДРАЧ,
*кандидат технічних наук, доцент кафедри
прикладної математики і соціальної інформатики
Хмельницького національного університету*

Віталій Павлович ТКАЧУК,
*кандидат технічних наук, доцент кафедри технології
машинобудування Хмельницького національного університету*

ВІДМІННОСТІ АВТОМАТИЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ ДЛЯ РОТОРІВ З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ І ВЕРТИКАЛЬНОЮ ОСЯМИ ОБЕРТАННЯ

У статті розглядається робота рідинного автобалансувального пристрою (АБП) для роторів зі змінним дисбалансом, який має вигляд порожнистої камери, частково заповненої робочими тілами (рідиною) і є пасивним регулятором прямої дії, що не потребує підведення енергії і системи керування для переміщення коригувальних мас.

З метою встановлення причин зниження ефективності автоматичного балансування пасивними АБП горизонтальних роторів, порівняно з вертикальними, розроблено математичну модель, що описує

© Ройзман В. П., Драч І. В., Ткачук В. П.

поведінку рідини в автобалансирі з урахуванням зовнішнього демпфування і сили ваги.

Показано, що вплив сили ваги при русі горизонтального ротора обумовлює зменшення діапазону кутових швидкостей, за яких можливе автоматичне зрівноваження рідиною ротора, а також зменшення тангенціальної складової рівнодійної відцентрової сили інерції і сили ваги, яка переміщує рідину в положення, протилежне дисбалансу, що, у свою чергу, призводить до зменшення точності балансування.

Ключові слова: *ротор, вібрації, пасивне автоматичне балансування, автобалансувальний пристрій (АБП), ефективність балансування.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. У зв'язку з ростом кутової швидкості обертання роторів приборів і машин збільшуються рівні вібрації, що призводить до інтенсивного зношення підшипників, а в деяких випадках і до аварій. Найчастіше джерелом вібрації машин є незрівноважені частини, що обертаються. Сучасні методи і засоби балансування дозволяють довести початковий дисбаланс виготовленого або відремонтованого ротора до величини припустимого для заданого класу точності балансування. Однак для машин із змінним дисбалансом ротора і при зрівноваженні роторів машин без зупинки в експлуатаційних умовах традиційні методи балансування мало-ефективні. До таких машин належать пральні машини, сепаратори, центрифуги та ін., які використовуються в різних галузях народного господарства (харчовій, хімічній, цукровій, гірничій і т. д.), медицині, побуті. Періодична зупинка таких машин для добалансування економічно недоцільна, а інколи і неможлива через умови експлуатації. Ротори цих машин необхідно балансувати безпосередньо в процесі експлуатації, а саме необхідне автоматичне балансування за допомогою пасивних автобалансувальних пристроїв, тобто пристроїв з вільним переміщенням корегувальних мас.

У конструкціях зазначених роторних машин використовують як ротори з вертикальною, так і з горизонтальною віссю обертання. Розглянемо основні відмінності автоматичного балансування роторів з горизонтальною і вертикальною осями обертання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням балансування присвячена велика кількість публікацій вітчизняних і зарубіжних авторів, у тому числі й всесвітньо відомих: С. П. Тимошенка, J. P. Deu Hartog, K. Federn, W. Kellenberger, Бішопа, A. Meldal та багатьох інших. При цьому радянська та пострадянська школи балансування займають провідні позиції в даній галузі завдяки роботам багатьох відомих учених і фахівців: О. О. Гусарова, В. І. Сусаніна, Ю. В. Агафонова, Л. М. Шаталова, Ф. М. Детінка, А. І. Муйжнієка, В. П. Нестеренка, В. П. Ройзмана, В. І. Кравченка, Г. Б. Філімоніхіна інших.

У багатьох роботах стверджується, що необхідною умовою роботи пасивних АБП, зокрема рідинних автобалансувальних пристроїв, і, відповідно, зменшення вібрацій є обертання ротора з кутовою швидкістю, що перевищує критичну [1, 2, 3].

Існування балансування на докритичних режимах заперечувалось. Однак науковцями під керівництвом професора В. П. Ройзмана було експериментально відкрито, а згодом і теоретично обґрунтовано явище автоматичного балансування роторів з вертикальною і горизонтальною осями обертання. Проведено ґрунтовне теоретичне і експериментальне дослідження роботи АБП з вільним переміщенням коригувальних мас, вивчено рідинні АБП (регулятори прямої дії, коригувальною масою яких є рідина) – здійснено теоретичні дослідження, конструкторські розрахунки, які враховують властивості рідин, розміри АБП і форму стінок несучої камери. Розроблена теорія рідинних АБП не обмежується розглядом ідеалізованої роторної системи, а, на відміну від існуючих стверджень, урахує демпфування і фізичні властивості рідини. Отже, встановлено, що автоматичне балансування рідиною є ефективним для пружно-деформівних роторів, роторів на пружних опорах, де наявна різниця фаз між напрямком сили від дисбалансу і прогином ротора або переміщенням ротора, у рідинному автобаланси́рі рідина прагне встановитися проти дисбалансу не тільки в зарезонансній, але й у дорезонансній зоні обертання ротора і на самому резонансі.

Метою статті є висвітлення основних відмінностей у пасивному балансуванні горизонтальних і вертикальних роторних систем.

Основні результати дослідження. У даній статті розглядається робота пристроїв автоматичного балансування, які мають вигляд порожнистої камери, частково заповненої робочою рідиною, і є пасивними регуляторами прямої дії, що не потребують підведення енергії та системи керування для переміщення корегувальних мас.

У випадку роботи рідинних автобалансувальних пристроїв прямої дії для роторів з горизонтальною віссю обертання корегувальна рідина піддається одночасній дії полів відцентрових сил, сил тертя і гравітації, на відміну від роторів з вертикальною віссю обертання, де рідина працює переважно під дією відцентрових сил. Тому й основні відмінності у балансуванні вертикального і горизонтального ротора рідинним АБП можна пояснити різним співвідношенням у діях відцентрових сил, сил тертя і сили ваги.

Вплив ваги і тертя у втягуванні в процес автобалансування рідких робочих тіл значно більший для роторів із горизонтальною віссю обертання [4], ніж з вертикальною [5]. Це пояснюється тим, що для роторів з вертикальною віссю обертання при повільному розгоні ротора рідина починає обертювий рух практично разом із корпусом автобалансира і поступово відкидається на периферію АБП та притискається до стінки. При поступовому збільшенні обертів зростає значення відцентрової сили, а разом з нею і тертя між рідиною і стінкою автобалансира, а також шарами самої рідини. Усе це сприяє тому, що через деякий порівняно невеликий час рідина й автобалансира обертаються як одне тверде тіло.

Для роторів із горизонтальною віссю обертання рідина під впливом ваги скупчується в нижньому секторі автобалансира і на початку руху, за малій силі тертя, проковзує відносно його стінки. Із збільшенням обертів рідина поступово втягується в рух разом із корпусом автобалансира, проходячи через чотири режими руху, описаних у роботі [6] і зафіксованих високошвидкісною відеозйомкою (1 – проковзування рідини відносно камери АБП; 2 – режим циркуляційного руху рідини; 3 – зрив рідини; 4 – режим захоплення рідини). Лише після того як настане четвертий режим роботи, рідина починає підкорюватись законам автобалансування.

Розрахуємо, з якою мінімальною кутовою швидкістю ω потрібно обертати камеру, щоб відбулось “захоплення” рідини.

Очевидно, що існує дві умови для визначення мінімальної кутової швидкості, за яких відбувається “захоплення” рідини (рис. 1):

кутова швидкість і в'язкість мають забезпечити таке значення сили тертя, що виникає між рідиною і стінкою АБП, щоб вона, проти діючи силі ваги, утримувала рідину, яка перебуває у положенні 1;

кутова швидкість має забезпечити таку відцентрову силу F_{in} , щоб вона змогла утримувати рідину у положенні 2, тобто переважала силу ваги.

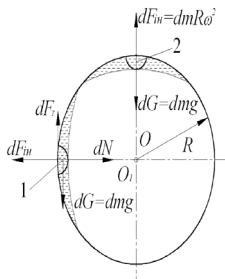


Рис. 1. Розрахункова схема визначення мінімальної кутової швидкості “захоплення” рідини

Нехай пустотіла циліндрична камера радіуса R (рис. 1), частково заповнена рідиною масою m , обертається відносно горизонтальної осі O_1 , що збігається із геометричним центром O . Розглянемо елементарний об’єм рідини масою dm , що граничить зі стінкою камери. Нехтуючи товщиною елементарної частинки, приймемо відстань від осі обертання до центра маси елементарної частинки рідини – R .

На елементарну частинку рідини, що “захоплюється” АБП, діють такі сили: відцентрова сила $dF_{in} = dmR\omega^2$, сила ваги dG , сила реакції стінки АБП $dN = -dF_{in}$ та сила тертя dF_T .

Знайдемо мінімальну кутову швидкість обертання ротора, за якої відбувається “захоплення” рідини, ураховуючи умову 1. Для “захоплення” рідини необхідно, щоб сила тертя переважала силу ваги рідини (рис. 1)

$$dF_m \geq dG;$$

$$dmR\omega^2\mu \geq dmg; \Rightarrow R\omega^2\mu \geq g,$$

де μ – коефіцієнт тертя.

Звідси визначимо мінімальну кутову швидкість, за якої відбувається “захоплення” рідини:

$$\omega_7 \geq \sqrt{\frac{g}{R \cdot \mu}}. \quad (1)$$

Далі знайдемо кутову швидкість “захоплення” рідини, урахуовуючи умову 2. На масу рідини, що обертається із камерою АБП, у положенні 2 (рис. 1) діють відцентрова сила і сила ваги. Для утримання елементарного об’єму рідини необхідно, щоб сума всіх сил, які діють на нього, дорівнювала або була більшою нуля

$$dm \cdot R \cdot \omega^2 - dm \cdot g \geq 0.$$

Якщо рідина не відривається від стінки камери, то це означає, що сила ваги не переважає відцентрову силу. Знайдемо мінімальну кутову швидкість “захоплення” рідини з умови, що сила тертя має переважати силу ваги.

Тоді $dm\omega^2R \geq dmg$, звідки

$$\omega_7 \geq \sqrt{\frac{g}{R}}. \quad (2)$$

Отже, кутова швидкість “захоплення” рідини буде дорівнювати максимальному із значень, отриманих за формулами (1) та (2). Оскільки коефіцієнт тертя μ води менший 1, то очевидно, що максимальним значенням кутової швидкості буде те, яке отримане за формулою (1).

Наявність кутової швидкості “захоплення” рідини зменшує діапазон кутових швидкостей, за яких можливе автоматичне зрівноваження рідиною горизонтального ротора. Зменшення кутової швидкості захоплення рідини можна досягти за рахунок застосування рідин більшої в’язкості, однак це негативно впливає на точність автобалансування, оскільки збільшується сила тертя.

Оцінимо вплив сил ваги і сил тертя на роботу рідинних автобалансувальних пристроїв прямої дії при русі ротора із швидкістю, більшою за швидкість “захоплення” рідини.

сектор, зайнятий рідиною, і перпендикулярна до неї, знайдемо дві сили: \bar{N} і \bar{T} . Сила \bar{N} стискає рідину, і, оскільки рідина опирається стискові (унаслідок властивості нестисливості), то виникає реакція, що зрівноважить силу \bar{N} ; отже, рідина залишиться в рівновазі. Сила \bar{T} – дотична сила – прагне зрушити рідину у напрямку, протилежному рухові ротора (рис. 3). Зрушення буде відбуватися доти, поки не буде виконуватись умова $\bar{T} = 0$. Отже, виникла тангенціальна складова рівнодійної відцентрової сили інерції і сили ваги сприяє приведенню рідини в циліндричній камері АБП у положення проти дисбалансу, що відповідає зменшенню загального дисбалансу системи навіть при докритичній швидкості.

Аналіз геометричної моделі (рис. 3) показує, що умовою рівноваги рідини без урахування сил натягу є відсутність тангенціальної складової, або

$$tg\beta = f [tg\alpha \cos(\delta + \phi_c) - \sin(\delta + \phi_c)] = 0.$$

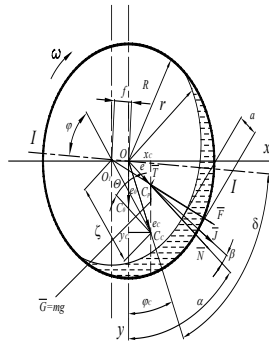


Рис. 3. Сили, які діють на систему ротор – рідина за наявності сил опору

Останнє рівняння розкладається на дві умови (нуль в індексі відповідає значенням кутів для положення рівноваги рідини ($\beta = 0$):

$$f = 0; \tag{3)}$$

$$tg\alpha_0 \cos(\delta + \phi_{0c}) - \sin(\delta + \phi_{0c}) = 0. \tag{4)}$$

Умова (3) відповідає випадку відсутності прогину, що суперечить умові задачі для пружно-деформівного ротора. А з умови (4) випливає, що при рівновазі рідини

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \operatorname{tg}(\delta + \phi_{0c}).$$

Ураховуючи значення $e, e/e_0, e_c$ і, що $\theta = \alpha - \varphi_c$, одержуємо

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{k} \sin \delta \sqrt{1 + 2k \cos \alpha_0 + k^2}. \quad (5)$$

З рівності (5) випливає, що за відсутності зовнішнього опору в системі ($\delta = 0, k \neq 0$) положення рівноваги рідини співпадає за кутом з положенням дисбалансу ротора ($\alpha_0 = 0$), що відповідає висновку про те, що в системі без зовнішнього демпфірування рідина збільшує дисбаланс.

Шляхом алгебраїчних перетворень виразу (5) при $\delta \neq 0, k \neq 0$ одержимо квадратне рівняння для визначення косинуса кута α_0 , який відповідає положенню рівноваги рідини ($\beta = 0$):

$$k^2 \cos^2 \alpha_0 + 2k \sin^2 \delta \cos \alpha_0 + (1 + k^2) \sin^2 \delta - k^2 = 0.$$

Проаналізувавши розв'язки цього рівняння, одержимо, що при докритичному режимі обертання системи ($\delta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$) кут α_0 є кутом другої чверті, тобто і на докритичному діапазоні при стаціонарних рухах системи рідина розташовується проти дисбалансу.

Ефективність балансування характеризується відношенням відхилень центра мас системи без рідини і з рідиною λ_0 :

$$\lambda_0 = \frac{k}{\sqrt{1 + 2k \cos \alpha_0 + k^2}}. \quad (6)$$

З рівності (6) при $1 + 2k \cos \alpha_0 + k^2 = 0$ буде повне зрівноважування, звідки єдиним розв'язком буде $k = 1$ при $\cos \alpha_0 = -1$, тобто при $\alpha_0 = \pi$. Отже, найбільший ефект балансування досягається, якщо величина дисбалансу рідини буде близька до початкової величини дисбалансу ротора ($k \approx 1$).

Запропоновано таке фізичне пояснення одержаних результатів.

Рідина прагне зайняти положення в найбільш віддаленій точці від осі обертання (у прогині). Це приводить до зміни сумарного дисбалансу системи за напрямком і величиною, оскільки величина сумарного дисбалансу $\overline{D}_c = (M + m) \cdot \overline{e}_c$ визначається як геометрична сума векторів $\overline{D}_0 = M \cdot \overline{e}_0$ – дисбалансу ротора і $\overline{D} = m \cdot \overline{e}$ – дисбалансу рідини й залежить від кута між цими векторами α . Оскільки для даної кутової швидкості кут відставання прогину від сумарного дисбалансу δ є сталим, то зі зміною напрямку сумарного дисбалансу змінюється і положення прогину відносно початкового дисбалансу \overline{D}_0 . Рідина, рухаючись за прогином, знову змінює сумарний дисбаланс, збільшуючи кут α і зменшуючи величину сумарного дисбалансу. Це приводить до зменшення величини прогину і зміни його положення відносно \overline{D}_0 . Цей процес повторюється за будь-якої постійної швидкості обертання ротора, поки α не набуде значення 180° , а прогин не набуде мінімального значення (або 0 – при повному зрівноваженні). Вплив сили ваги полягає в зменшенні тангенціальної складової, яка переміщує рідину в положення, протилежне дисбалансу, що, у свою чергу, призводить до зменшення точності балансування.

Для обох типів роторів тертя має суперечливий вплив на процес автобалансування. З одного боку: чим більше тертя, тим швидше і легше вода втягується в обертання разом із корпусом автобалансира, а з другого – завершальному етапі це тертя затримує воду раніше, ніж вона досягне положення, протилежного дисбалансу. І цей вплив значно більший для ротора із горизонтальною віссю обертання, тому що потрібна більша сила тертя, щоб пересилити дію ваги і затягнути воду в обертання на початку руху, однак збільшення тертя змушує рідину зупинятись значно раніше і далі від положення проти дисбалансу, ніж у роторів з вертикальною віссю обертання. Тому ефективність автобалансування роторів із горизонтальною віссю обертання менша, ніж з вертикальною. Цей факт перевірений і підтверджений експериментально.

Висновки. У випадку роботи рідинних автобалансувальних пристроїв прямої дії для роторів з горизонтальною віссю обертання кори-

гувальна рідина піддається одночасній дії полів відцентрових сил, сил тертя і гравітації, на відміну від роторів з вертикальною віссю обертання, де рідина працює переважно під дією відцентрових сил.

При русі горизонтального ротора вплив сили ваги виявляється в тому, що рідина не відразу включається в процес автобалансування, а лише після досягнення певного значення кутової швидкості обертання, що залежить від в'язкості рідини і геометричних розмірів АБП; також зменшується тангенціальна складова рівнодійної відцентрової сили інерції і сили ваги, яка переміщує рідину в положення, протилежне дисбалансу, що, у свою чергу, призводить до зменшення точності балансування.

Отже, ефективність роботи пасивних автобалансирів, установлених на роторах з горизонтальною віссю обертання, є меншою, ніж при встановленні на вертикальному роторі.

Список використаної літератури

1. Гусаров А. А. Балансировка роторов машин : в 2 кн. / А. А. Гусаров; [отв. ред. С. М.Каплунов]; Ин-т машиноведения им. А. А. Благоднарова. – М. : Наука, 2004. – Кн. 2. – 2005. – 383 с.
2. Куинджи А. А. Автоматическое уравнивание роторов быстроходных машин / А. А. Куинджи, Ю. А. Колосов, Ю. И. Народицкая. – М. : Машиностроение, 1974. – 152 с.
3. Нестеренко В. П. Теория и практика устройств автоматической балансировки роторов : Автореф. дисс. на стиск. учен. степ. д-ра техн. наук : спец. 05.02.18 / В. П. Нестеренко; Новосиб. электротехн. ин - т. – Новосибирск, 1990. – 34 с.
4. Ройзман В. П. Результати застосування рідинних автобалансирів на роторі з горизонтальною віссю обертання / В. П. Ройзман, В. П. Ткачук // Сборник трудов междунар. научно-технической конференции “Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов”. – Хургада, Египет. – 2009. – С. 19–22.
5. Ройзман В. П. Експериментальні дослідження роботи автобалансира / В. П. Ройзман, І. В. Борко, О. В. Малигін, Р. Г. Чоловський // Сб. тр. 2-й междунар. конф. “Динамика роторных систем”. – Каменец-Подольский, 1998. – С. 91-95.

6. Ройзман В. П. Теорія автоматичного балансування роторів машин рідинними робочими тілами / В. П. Ройзман, І. В. Драч, В. П. Ткачук // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 2. – С. 45–50.

7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 736 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2015.

Ройзман В. П., Драч І. В., Ткачук В. П. Различия автоматической балансировки роторов с горизонтальной и вертикальной осями вращения

В статье рассматривается работа жидкостных устройств автоматической балансировки для роторов с изменяющимся дисбалансом, которые имеют вид полый камеры, частично заполненной рабочими телами (жидкостью), и являются пассивными регуляторами прямого действия, не нуждающимися в подводе энергии и системы управления для перемещения корректирующих масс.

С целью определения причин снижения эффективности автоматической балансировки пассивными АБУ горизонтальных роторов, по сравнению с вертикальными, разработана математическая модель, описывающая поведение жидкости в автобалансире с учетом внешнего демпфирования и силы тяжести.

Показано, что влияние силы тяжести при движении горизонтального ротора обуславливает уменьшение диапазона угловых скоростей, при которых возможно автоматическое уравнивание жидкостью ротора, а также обуславливает уменьшение тангенциальной составляющей равнодействующей центробежной силы инерции и силы тяжести, которая перемещает жидкость в положение, противоположное дисбалансу, что, в свою очередь, приводит к уменьшению точности балансировки.

Ключевые слова: *ротор, вибрации, пассивная автоматическая балансировка, автобалансирующее устройство (АБУ), эффективность балансировки.*

Royzman V. P., Drach I. V., Tkachuk V. P. **Differences of automatic balancing for rotors with horizontal and vertical rotation axes**

The article deals with the work of a liquid auto-balancing unit for rotors with variable imbalance, looked like cavity chamber partially filled with working bodies (liquid) and a passive regulator of the direct action that doesn't require power supply and control system for or correcting masses movement. It analyses ideal and viscous liquid cases.

To establish the reasons of inclination of automatic balancing effectiveness by passive ABU horizontal rotors compared with vertical ones, mathematical model of liquid behavior in auto-balancer including outside dampening and gravity has been made.

It has been shown that influence of gravity during the movement of horizontal rotor defines decrease of angular velocities and automatic balancing is possible by rotor's liquid and also decrease of tangential component of equal centrifugal inertia and gravity which displace liquid into position opposite to misbalance to cause decrease of balancing accuracy.

Keywords: *rotor, vibrations, passive automatic balancing, auto-balancing unit (ABU), balancing effectiveness.*