

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РІДИННОМУ АВТОБАЛАНСУЮЧОМУ ПРИСТРОЇ

Сапужак О.М.<sup>1</sup>, Драч І. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Хмельницький національний університет, [nullalbis@gmail.com](mailto:nullalbis@gmail.com)

<sup>2</sup> Хмельницький національний університет, [cogitare410@gmail.com](mailto:cogitare410@gmail.com)

Спосіб балансування роторів за допомогою пасивних автобалансуючих пристроїв (АБП), який розглядається у цій статті, є перспективним в першу чергу завдяки тому, що пасивні АБП мають ряд переваг [1]: пасивні АБП є прості у своїй структурі і, отже, можуть виготовлятися навіть в умовах невеликих виробничих майстерень, їх виготовлення не вимагає значних економічних витрат; вони легко вбудовуються в ротор без суттєвої модифікації його конструкції, вони ефективно компенсують зміну дисбалансу; пасивні АБП надійні в експлуатації, працюють, споживаючи енергію самого ротора; немає необхідності витрачати велику кількість потужності двигуна для подолання значної напруги між осями та підшипниками в критичному діапазоні обертання, отже, це енергозберігаюча технологія.

Історія рідинного автоматичного балансування починається з 1916 року, коли французький інженер Леблан (Leblanc) запропонував конструкцію рідинного АБП для зрівноваження екстрактора пральної машини під час її роботи. Пізніше було запропоновано АБП Сирла, АБП Дункан, а також відомі удосконалення конструкцій АБП типу Леблана. Вперше зробив спробу теоретично обґрунтувати принцип дії АБП Леблана у циклах своїх статей Сирл (E.L.Thearle) [2]. Він запропонував плоску модель ротора і АБП. У її рамках у ротора існує єдина критична швидкість, при перевищенні якої ротор починає обертатися легкою стороною назовні і починає проявлятися явище самоцентрування ротора, яке і було покладено Сирлем в основу принципу роботи усіх пасивних АБП. Насправді, тут явище самоцентрування видається за явище самобалансування.

Підходи і результати робіт E.L.Thearle склали основу наступних досліджень і є класичним підходом для опису роботи рідинного АБП. У роботах [3] викладено нову теорію, яка відрізняється від класичної врахуванням гідромеханічних властивостей рідини і демпфування системи. В її межах дано теоретичне обґрунтування самобалансування рідиною на дорезонансних і всіх інших режимах обертання ротора. Однак автори у [3] обмежуються лише вивченням стаціонарних рухів системи ротор-АБП.

Не менш цікавими можуть бути результати при дослідженні перехідних процесів. Аналізу літератури щодо нестационарних рухів системи ротор-АБП присвячено цю статтю.

У багатьох дослідженнях, присвячених динаміці та стабілізації роторів, частково заповнених рідиною, приділяється велика увага динамічним властивостям рідини; хорошими оглядами щодо цих питань є робота Болотіна [4] та Кандалла [5]. Більшість досліджень, таких як роботи Вольфа [6], Хендрікса і Мортонна [7] та Холма-Крістенсена і Трегера [8], базуються на лінійній теорії (лінеаризації). Хоча такого підходу цілком достатньо для визначення стійкості руху, але може бути недостатнім для моделювання та розуміння динаміки рідинного балансування (у будь-якому випадку, якщо до розгляду включені вільні (необмежені) компоненти хвилі), оскільки необхідно знати амплітуду поверхневих хвиль.

Нелінійні дослідження були проведені Берманом [9], Касахара [10] та Йосізумі [11]. Берман та ін. виявили, як за чисельним аналізом, так і експериментально, що нелінійні поверхневі хвилі можуть існувати на рідинному шарі у вигляді гідравлічних стрибків, хвильових каналів і, як вважається, відокремлених хвиль (або солітонів). [Хвильовий канал - відносно слабкий гідравлічний стрибок з хвилеподібними вогнищами позаду. Що стосується відокремленої хвилі, яка описується квадратом функції гіперболічного секанса, *sech*, то слід зазначити, що такий розв'язок / хвиля існує лише в подвійно нескінченній (тобто неперіодичній) області. У періодичній області роторної камери розв'язок, що відповідає відокремленій хвилі, описується квадратом якобіана еліптичного косинуса, *cn*, і називається кноїдальною хвилею]. Так, Кальдинг-Йоргенсен [12] зосереджується на розв'язку, що відповідає гідравлічному стрибку, наслідуючи підходи знаходження аналітичного розв'язку, наведені [9]. Дослідження [10] і [11] є чисельними.

В роботі [13] розглядається ротор з двома ступенями свободи і знайдено (наближений) аналітичний розв'язок рівнянь динаміки рідини за допомогою підходу збурень. У цій статті детально розкривається наближений аналітичний розв'язок, що включає в себе так звану кноїдальну хвилю; і чисельно показано, як поверхнева хвиля може компенсувати незбалансовану масу в гнучкому монтажі ротора.

У динаміці рідини кноїдальна хвиля [13] є нелінійним і точним періодичним хвильовим розв'язком рівняння Кортевега-де Вріса. Ці рівняння використовуються для опису поверхневих гравітаційних хвиль досить довгої довжини хвилі в порівнянні з глибиною води.

В межах нескінченної довжини хвилі кноідална хвиля стає одиночною хвилею.

Рівняння Бенджаміна-Бона-Махоні описує поведінку хвиль короткої довжини в порівнянні з рівнянням Кортевега-де Вріса та є однонаправленим хвильовим рівнянням з рівняннями кноідалної хвилі. Крім того, оскільки рівняння Кортевега-де Вріса є наближенням рівнянь Буссинеска для випадку однобічного розповсюдження хвиль, кноідалні хвилі є наближеними розв'язками рівнянь Буссинеска.

Цікаві результати опубліковані у [14], де досліджено розсіювання одиночної та кноідалної хвиль по зануреній горизонтальній пластині на мілководді. Нелінійне розсіювання кноідалних та одиночних хвиль зануреною плитою вивчають за допомогою рівнянь Гріна-Нагді першого порядку.

На глибині і проміжній глибині коли хвилі стикаються з зануреними пластинами, частина енергії хвилі відбивається завдяки взаємодії рідинно-рідкої та рідинно-конструкційної структур у передньому краї пластини. Решта енергії хвилі передається переважно над пластину залежно від глибини занурення та довжини хвилі у відношенні до довжини пластини. Можна визначити глибину та довжину поглинання пластини таким чином, щоб певні хвильові умови оптимізувалися для різних застосувань. Підводне плато на мілководді може використовуватися як засіб для послаблення енергії, або для фокусування енергії, що може бути використано для нових конструкторських рішень для АБП.

### **Література**

1. Никифоров А.Н. Состояние проблемы уравнивания роторов / А.Н. Никифоров // Вестник научно-технического развития. – 2013. - №4 (68). - С. 20-28.
2. Thearle E.L. A new type of dynamic-balancing machine. // E.L. Thearle. - Trans. ASME. – 54. - 1932. - P. 131-141.
3. V. Rozman System Analysis of Automatic Balancing (Self-Balancing) Machine Rotors with Liquid Working Bodies / V. Rozman, A. Bubulis, I. Drach // Solid State Phenomena – 2009, Vols. 147-149, pp 374-379
4. Bolotin V.V. Nonconservative Problems of the Theory of Elastic Stability / Bolotin, V.V.- Pergamon Press, Oxford, UK, 1963.
5. Crandall S.H. Rotor dynamics. / W. Kliemann // Nonlinear Dynamics and Stochastic Mechanics / W. Kliemann, N. S. Namachivaya, editors. - CRC Press, Boca Raton, 1995. – P. 1-44.
6. Wolf Jr. Whirl dynamics of a rotor partially filled with liquid / Jr. Wolf // J. Appl. Mech. – 1968. Vol. – 35. P. - 676-682.

7. Hendricks S.L. Stability of a rotor partially filled with a viscous incompressible fluid / S.L. Hendricks, J.B. Morton // J. Appl. Mech. – 1979. Vol. – 46. P. - 913-918.
8. Holm-Christensen O. A note on rotor instability caused by liquid motions / O. Holm-Christensen, K. Traäger // J. Appl. Mech. - (1991). Vol. – 58. P. - 804-811.
9. Berman A.S. Asynchronous whirl in a rotating cylinder partially filled with liquid / A.S. Berman, T.S. Lundgren, A. Cheng // J. Fluid Mech. - 1985. Vol. – 150. P. - 311-327.
10. Kasahara M. Sloshing analysis of a whirling ring / M. Kasahara, S. Kaneko, H. Ishii // In Proceedings of the Dynamics and Design Conference 2000, 5-8 August 2000, pages 1-6, Tokyo, Japan. Japan Soc. Mech. Eng.
11. Yoshizumi F. Self-excited vibration analysis of a rotating cylinder partially filled with liquid (Nonlinear analysis by shallow water theory) / F. Yoshizumi // Trans. Japan Society of Mech. Eng. (C) - 2007, Vol. - 73(735). P. - 28-37.
12. Colding-Jrgensen J. Limit cycle vibration analysis of a long rotating cylinder partly filled with fluid./ J. Colding-Jrgensen //J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 113, 1991, p. 563-567.
13. Langthjem M.A. On the dynamics of the fluid balancer / M.A. Langthjem, T. Nakamura // Journal of Fluids and Structures, v.51, 2014 Nov, p.1(19) (ISSN: 0889-9746)
14. Hayatdavoodi M. Solitary and cnoidal wave scattering by a submerged horizontal plate in shallow water/ M. Hayatdavoodi, R. C. Ertekin, B. D. Valentine // American Institute of Physics - AIP ADVANCES 7, 065212 (2017)