

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСТАННЯ АВТОБАЛАНСУВАННЯ В РОТОРНИХ МАШИНАХ З ПАСИВНИМИ АВТОБАЛАНСИРАМИ

В.В. Гончаров

*доцент, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри вищої математики та фізики,
Кіровоградський національний технічний університет*

Відоме широке застосування пасивних автобалансирів (АБ) [1], зокрема: для зрівноваження дисків ручних шліфувальних машин; крильчаток осьових вентиляторів; барабанів побутових пральних машин; роторів відцентрових дробарок та інших.

При дослідженні процесу автобалансування виникають наступні проблеми: 1. При яких умовах відбувається автобалансування. 2. Дослідження перехідних процесів (ПП). 3. Оптимізація параметрів АБ роторних машин.

Перша проблема досліджувалась і раніше, але: по-перше, ротор встановлювався безпосередньо на пружно-в'язкі опори, хоча в наведених прикладах ротор майже завжди жорстко встановлений в корпусі, а вже корпус утримується пружно-в'язкими опорами; по-друге, розглядалися АБ тільки з двома корегувальними вантажами (КВ).

Останні дві проблеми взагалі не досліджувалися.

Мета даної роботи: дослідження ПП при настанні автобалансування в реальних роторних машинах з пасивними АБ з багатьма КВ; оптимізація параметрів АБ.

Для цього розв'язані наступні задачі.

I. Теоретична частина. Розроблено метод аналітичного дослідження умов настання автобалансування і ПП в реальних роторних машинах з АБ з багатьма КВ [2]. Метод складається з наступних етапів.

1. Детально описується фізико-математична модель роторної машини.

2. *Вперше* запропоновано відразу складати спрощені диференціальні рівняння руху роторної машини з АБ на основі рівнянь Лагранжі 2-го роду. При цьому малість відхилень поздовжньої осі ротора від осі обертання і співвідношення малості між параметрами машини враховуються ще на етапі складання диференціальних рівнянь руху машини. За малий параметр прийнято відношення маси КВ до маси всієї машини.

В отриману таким чином систему диференціальних рівнянь входять *тільки ті доданки*, які вже в 0-му або 1-му наближенні по малому параметру дають відповідь про стійкість або нестійкість по Ляпунову основних рухів. При цьому система рівнянь розпадається на дві зв'язані підсистеми. Перша підсистема описує рух ротора і є завжди лінійною відносно координат ротора і сумарного дисбалансу, друга – описує рух КВ і є суттєво не лінійною.

3. *Вперше пропонується досліджувати* процес автобалансування за мінімальною кількістю динамічних змінних. Це змінні, які входять в рівняння руху ротора – координати ротора і сумарного дисбалансу. На основних рухах вони рівні нулю, а на не основних – відмінні від нуля, тому за ними можна досліджувати процес автобалансування. Але рівняння руху ротора не замкнуті відносно введених змінних – немає рівнянь, які описують зміну проекцій сумарного дисбалансу.

4. Встановлено, що для будь-якої роторної машини такі рівняння завжди можна отримати з диференціальних рівнянь, які описують рух КВ. При анізотропних опорах для дослідження стійкості отриманої замкнутої системи застосовується теорія стійкості періодичних розв'язків систем лінійних диференціальних рівнянь з періодичними коефіцієнтами.

5. У випадку ізотропних опор проводяться типові перетворення: комплексне псевдозгортання; перехід до обертальної системи координат і безрозмірних змінних та параметрів. В результаті отримується автономна система лінійних диференціальних рівнянь,

стійкість якої досліджується за коренями характеристичного рівняння.

б. Проводиться безпосереднє дослідження стійкості основних рухів і характеру перебігу ПП за коренями характеристичного рівняння першого наближення.

Запропонований метод був апробований на роторних машинах, в яких незрівноважений ротор поміщений з можливістю обертання в корпусі, що має нерухому точку або утримується податливими опорами. При цьому ротор зрівноважувався статично одним однорядним чи двохрядним АБ або динамічно двома однорядними АБ.

В результаті проведених досліджень *вперше* було встановлено, що:

а) при встановленні ротора в корпус роторна машина динамічно веде себе як умовний складений ротор – більш масивний і видовжений;

б) ПП діляться на: швидкі, при яких зупиняються швидкі відносні рухи КВ і встановлюється рух ротора, що відповідає поточному сумарному дисбалансу ротора і КВ; повільні, при яких КВ приходять в автобалансувальне положення;

в) для пришвидшення настання автобалансування потрібно використовувати в АБ не менше трьох КВ;

г) роторну машину з нерухою точкою можливо зрівноважити тільки, якщо складений ротор витягнутий; при цьому ротор має одну критичну швидкість і автобалансування настає при її перевищенні;

д) для роторної машини на податливих опорах *вперше* встановлено наступне:

- при статичному зрівноваженні одним АБ: для довгого складеного ротора в машині існують три резонансні швидкості, і автобалансування настає між першою і другою та над третьою швидкостями; для сферичного і короткого складеного ротора в машині існує одна або дві резонансні швидкості – у випадку двох резонансних швидкостей автобалансування настає між цими швидкостями, у випадку однієї резонансної швидкості автобалансування настає над цією швидкістю і тільки для короткого складеного ротора.

- динамічно зрівноважити роторну машину двома АБ можна тільки, якщо складений ротор довгий, при цьому вона має одну резонансну швидкість і автобалансування настає при її перевищенні.

II. Конструкторська частина. Розроблені технічні рішення по модернізації роторних машин для їх автобалансування за допомогою АБ.

1. Розроблено технічні рішення по модернізації серійних соковижималок (СВ) для їх зрівноваження за допомогою АБ, які суттєво зменшують вібрації в процесі роботи СВ та підвищують їхню продуктивність.

2. Запропоновано спосіб модернізації АБ серійних відцентрових дробарок, який полягає в заміні звичайних кульових АБ на АБ з рухомими перегородами.

3. Запропоновано спосіб динамічного зрівноваження пасивними АБ жорстких коротких роторів, який полягає у встановленні ротора у корпусі на пружно-в'язких опорах. При виконанні певної умови така роторна машина утворює довгий складений ротор, і її можна зрівноважувати динамічно двома АБ.

III. В експериментальній частині: розроблено метод [3] оптимізації параметрів АБ для мінімізації функціоналів якості роботи роторних машин з АБ; створено натурні стенди та 3D моделі роторних машин з АБ; проведена апробація розробленої методики оптимізації параметрів АБ на створених натурних стендах та 3D моделях роторних машин.

Загальновідомі методи і теорії дослідження багатопараметричних систем не враховують особливостей процесу автобалансування. Основою проблемою при цьому є вибір цільової функції та її моделі регресії.

Вперше запропонована методика знаходження моделі регресії цільових функцій, які характеризують процес автобалансування. Вона полягає в наступному.

1. Створюється стандартна «чорна» скриня роторної машини з АБ. В якості цільової функції (Q) вибираються залишкове віброприскорення (a_3) або тривалість перебігу ПП ($t_{\text{пп}}$).

2. Модель регресії шукається в неявному вигляді $\varphi(Q) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, де x_1, x_2, \dots, x_n – керуючі фактори.

В якості $f(\dots)$ пропонуються дві стандартні різновидності функцій – розклади в ряд Тейлора за степенями факторів та функції, які мають гіперболічні складові. Усі вони підходять для дослідження обох цільових функцій.

Вигляд $\varphi(Q)$ залежить від вибору цільової функції і досліджуваного значення – найбільшого чи найменшого: при дослідженні залишкових віброприскорень ускладнень не виникає і можна використовувати найпростішу залежність $\varphi(a_3) = a_3$; при дослідженні тривалості перебігу ПП виникають проблеми – якщо неправильно вибрати модель регресії, то найменше значення може бути меншим за час вибігу ротора (t_p) або навіть від’ємним. В цьому випадку пропонується використовувати функції, які забезпечують виконання умови $\varphi(t_{\text{пп}}) \rightarrow \infty$ при $t_{\text{пп}} \rightarrow t_p + 0$.

Запропоновано більше 90 різновидностей функцій регресії, які добре працюють при знаходженні найменшого значення тривалості перебігу ПП та більше тридцяти функцій, які добре працюють при знаходженні як найменшого так і найбільшого значення тривалості перебігу ПП.

Дальше йдуть стандартні етапи: 3. Складається план багатофакторного експерименту. 4. Результати експериментів обробляються за допомогою програмного пакета STATISTICA_6 і системи MathCad. 5. Знаходяться оптимальні області зміни параметрів, на яких цільова функція не перевищує заданих значень.

Запропонований метод був апробований при оптимізації параметрів АБ в відцентровій СВ. При оптимізації параметрів АБ спочатку проводиться їхня оптимізація на 3D моделі СВ, а потім – отримані результати перевіряються і уточнюються на натурних стендах.

Для проведення натурних експериментів виготовлені два типових стенди: один призначений для доведення корпусу АБ і вивчення відносного руху куль в стробоскопічному світлі; інший – для дослідження ефективності роботи АБ. Для віртуальних експериментів за допомогою системи автоматичного проектування Solid Works і модуля Cosmos Motion створено динамічну 3D модель СВ.

Побудовані моделі регресії, які найточніше описують як найбільші так і найменші значення цільових функцій. Отримано прогнозовані найменше і найбільше значення цільових функцій, та значення параметрів, при яких вони досягаються. Похибка прогнозування складає 1–10%. Встановлена ефективність застосування АБ – залишкові віброприскорення корпусу СВ зменшуються в 8–9 раз.

Список літератури

1. Філімоніхін Г. Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами / Г. Б. Філімоніхін. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
2. Филимоныхин Г.Б., Гончаров В.В. Уравновешивание автобалансиrom ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе с неподвижной точкой // Известия Томского политехнического университета. – 2014, т. 324, № 2, С. 71–77.
3. Гончаров В.В., Филимоныхин Г.Б. Оптимизация параметров центробежной соковыжималки с автобалансиrom минимизацией времени наступления автобалансировки // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014.– вып. 2/7 (68).– С. 28–32.