

УДК 621:658.562.3/6

**Д.С. Фоменко***Одеський національний політехнічний університет***КОНТРОЛЬ ДИНАМІЧНОЇ НЕВРІВНОВАЖЕНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ**

*У роботі проведено аналіз методів контролю динамічної неврівноваженості металевих тіл обертання. Приведена методика контролю динамічної неврівноваженості металевих тіл обертання дозволяє розрахувати неврівноважену силу і момент в залежності від масово-геометричних і кінематичних характеристик, оцінити якість їх виготовлення за величиною кутового відхилення головної центральної осі інерції від геометричної осі обертання, привести до однієї рівнодіючої при наявності неврівноваженості в декількох перетинах, що дає можливість побудувати метод автоматичного контролю.*

*Ключові слова:* динамічна неврівноваженість, контроль, металеві тіла обертання.

*Літ. 7.*

**Д.С. Фоменко***Одесский национальный политехнический университет***КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ  
ВРАЩЕНИЯ**

*В работе проведен анализ методов контроля динамической неуравновешенности металлических тел вращения. Приведенная методика контроля динамической неуравновешенности металлических тел вращения позволяет рассчитать неуравновешенную силу и момент в зависимости от массово-геометрических и кинематических характеристик, оценить качество их изготовления по величине углового отклонения главной центральной оси инерции от геометрической оси вращения, привести к одной равнодействующей при наличии неуравновешенности в нескольких пересечениях, что дает возможность построить метод автоматического контроля.*

*Ключевые слова:* динамическая неуравновешенность, контроль, металлические тела вращения.

**D.S. Fomenko***Odessa National Polytechnic University***CONTROL OF DYNAMIC UNBALANCE OF METAL BODIES OF REVOLUTION**

*The paper analyzes the methods of controlling the dynamic unbalance of metal bodies of revolution. The given methodology of controlling the dynamic unbalance of metal bodies of revolution allows calculating the unbalanced force and moment depending on mass geometric and kinematic characteristics, evaluating the quality of their production by the magnitude of the angular deviation of the main central inertia axis from the geometric axis of rotation, reducing to one resultant force in case of unbalance in several sections, which makes it possible to build an automatic control method. On the basis of the above-mentioned methodology of control of dynamic unbalance, one can determine the values of the unbalanced forces and moment caused by an unbalance of controlled metallic bodies of revolution, with subsequent development of methods and control theory.*

*Keywords:* dynamic unbalance, control, metal bodies of revolution.

**Постановка проблеми.** Як відомо [1-3] динамічна неврівноваженість металевих тіл обертання характеризується наявністю як статичної, так і моментної неврівноваженості, коли відмінні від нуля і головний вектор дисбалансів, і головний момент дисбалансів. При динамічній неврівноваженості металевих тіл обертання вісь їх обертання і одна з головних осей інерції або перетинаються поза центром мас, або перехрещуються в просторі.

Металеві тіла обертання, що мають великі кутові швидкості, повинні бути добре врівноважені щоб уникнути биття, вібрації, порушення центрування і підвищення навантаження на опорні деталі. Розрізняють три види неврівноваженості [2, 4]:

- неврівноваженість, що викликається зміщенням центру ваги деталі щодо осі обертання, при якій сила інерції приводиться до однієї рівнодіючої відцентрової сили. Така неврівноваженість характерна для деталей з незначною осьовою довжиною в порівнянні з діаметром (маховики, шків, зубчасті колеса) і усувається статичним (одноплосинним) балансуванням;

- неврівноваженість, при якій сили інерції приводяться до рівнодіючої пари сил, що створює відцентровий момент інерції щодо осі обертання;

- неврівноваженість, при якій сили інерції приводяться до рівнодіючої сили і до пари сил.

Другий і третій види неврівноваженості характерні для деталей, що мають значну довжину в порівнянні з діаметром (ротори) і усуваються динамічним (двоплосинним) балансуванням, при якому одночасно зменшуються статична і моментна неврівноваженості. На практиці, динамічне балансування являє собою процес перевірки розподілу мас металевих тіл обертання і, при

наявності дисбалансів, зміна цього розподілу відбувається за допомогою коригувальних мас до досягнення допустимого значення дисбалансу.

Металеві тіла обертання більшості відомих машин на робочих частотах можна розглядати, як жорсткі і застосовувати до них методи динамічного балансування, регламентовані ГОСТ ІСО 1940-1. Дані методи передбачають усунення головного вектора дисбалансів – установкою корегуючої маси в одній площині корекції і усунення головного моменту дисбалансів – розподілом мас у двох площинах корекції. Також застосовується і ГОСТ 31320, який передбачає кілька методів динамічного балансування.

Сучасні методи динамічного балансування металевих тіл обертання засновані на пропорційності амплітуди і фази вібрації чинного дисбалансу. Іншими словами, вимірюючи вібраційні характеристики металевих тіл обертання, можна точно визначити величину і місце установки коригувальних мас в обраних площинах корекції [1, 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для випадку якщо контрольоване металеве тіло обертання встановлено в базове пристосування так, що вісь обертання його зафіксована, то всі існуючі методи контролю зводяться до двох великих груп. У першій групі сили прикладаються до маси металевих тіл обертання і відбувається реєстрація виникаючих кутових поворотів. У другій групі методів змінюють кутове положення металевих тіл обертання і проводять реєстрацію виникаючих при цьому невірноважених інерційних сил.

У першій групі – сили, які прикладаються до маси металевих тіл обертання – це або сила тяжіння (постійна), або сила інерції (найчастіше змінюється за гармонійним законом). Використання сили тяжіння, що повертає невірноважену деталь в базовому пристосуванні, є одним з найбільш старих методів визначення статичної невірноваженості, що застосовуються всюди, де не потрібна висока точність [2, 4, 5].

Базовою поверхнею металевого тіла обертання поміщають на горизонтальну або похилу плиту (або ножі); дисбаланс (неспівпадіння центру мас з геометричною віссю) проявляється у вигляді крутного моменту, що діє до тих пір, поки вони не урівноважаться і центр мас не займе крайнє нижнє положення на горизонтальній плиті. Якщо скачувати металеве тіло обертання по похилій плиті, крутний момент від невірноваженої сили алгебраїчно додається моменту кочення і тим самим впливає на кутове прискорення тіла. Перевагою методу контролю є відсутність джерел шкідливих вібрацій, простота реалізації і можливість автоматизації; недоліком методу контролю є невисока точність горизонтального способу через зменшення крутного моменту в міру заняття металевим тілом крайнього положення [4-6].

Більш високу точність і продуктивність дає метод накладення замість постійної сили тяжіння змінних сил інерції (метод лінійних і кутових коливань). Контрольоване металеве тіло обертання закріплюється на опорах і за допомогою віброприводу повідомляють йому лінійні (за координатою) або кругові (за двома координатами із зсувом фаз в  $90^\circ$ ) коливання в площині, перпендикулярній осі тіла. Дисбаланс виявляється у вигляді кутових коливань контрольованого металевого тіла обертання в опорах (з'являється крутний момент інерційних сил, що змінюється за гармонійним законом через розбіжність центру мас металевого тіла обертання з його геометричною віссю повороту). Кутові коливання вимірюються за допомогою відповідних датчиків і перетворюються в електричні сигнали, по амплітуді яких судять про величину дисбалансу [1, 2, 4-7].

До переваг методу контролю можна віднести високу продуктивність та простоту приводу, а до недоліків – збільшену витрату часу на зміну контрольованих металевих тіл обертання на позиції контролю та необхідність у наявності настановних баз. Накладення кутових коливань краще накладення лінійних, оскільки при цьому виключається можливість виникнення «мертвих зон», що маскують наявність дисбалансу і скорочується час контролю (не потрібно його повертати щодо направлення дії коливань)[7]. Недоліком методу кутових коливань є складність технічної реалізації контролю динамічної невірноваженості.

З точки зору високої продуктивності перспективним видається використання тимчасового способу контролю, при якому транспортний рух поєднаний з процесом контролю [6].

Принцип накладення сил тяжіння лежить в основі тимчасового способу контролю дисбалансу: металеве тіло обертання скачують з двох початкових кутових положень, що розрізняються на  $90^\circ$  і вимірюють різницю в часі кочення тіла до датчика положення кінцевого вимикача. Слід зазначити, що різниця в  $90^\circ$  між вихідними кутовими положеннями необхідна тільки для визначення фази дисбалансу. Якщо ця умова знімається, доцільно процес контролю

наблизити до випадкового пошуку, задаючи приблизно декілька вихідних положень, оскільки важливо зробити такі ситуації, коли відхилення часу кочення буде максимальним [6].

Класичним методом за своєю сутністю є моделювання реальних умов експлуатації контрольованих металевих тіл обертання. Характерною особливістю класичного методу є те, що в процесі контролю металеві тіла обертаються. Даний метод, в свою чергу, підрозділяється на наступні види: обертання в базовому пристосуванні, вісь якого зафіксована, скочування з похилої площини і вільне обертання на опорних обертових валах [5].

При застосуванні методу контролю – обертання в базовому пристосуванні, контрольоване металеве тіло обертання встановлюється в базовому пристосуванні і починають обертання з певною кутовою швидкістю. Завдяки зсуву центру мас металевих тіл обертання моментна нерівноваженість проявляється у вигляді сукупності головного вектора і головного моменту сил інерції, яка викликає вимушені коливання пов'язані з контрольованим тілом механічної системи базового пристосування. Роль чутливого елемента виконує саме базове пристосування, за коливаннями якого судять про нерівноваженість контрольованого металевого тіла обертання. Слід зазначити, що базове пристосування спільно з валом врівноважено за допомогою пружинних підвісів і здійснено віброізоляцію приладу від приводу обертання [3, 5].

При застосуванні амплітудного методу контролю, який заснований на класичному принципі – обертання контрольованого металевого тіла обертання при скочуванні на похилій плиті і зняття сигналів з датчиків. При скочуванні металевих тіл обертання по похилій площині дисбаланс проявляється у вигляді періодичного впливу на опору. В даному методі необхідно, щоб похила площина була налаштована в резонанс, тобто необхідний збіг частот власних опор і вимушених коливань металевих тіл обертання за рахунок дисбалансу [4, 5].

Якщо металеві тіла обертання мають малі маси і розміри і відсутня нормальна базова поверхня, то найкращим методом контролю динамічної нерівноваженості є метод вільного обертання. При цьому є можливість зменшити шкідливий вплив вібрацій приводу на результати контролю шляхом відділення датчиків від опор. Іншими словами, необхідно використовувати датчик, який безпосередньо реєструє коливання тіла. Що стосується конструкції опор, то більш переважним є використання аеростатичного принципу, що зменшує вплив похибок форми опорної поверхні металевих тіл обертання, проте, щоб мати загальне уявлення про правильність обраного напрямку, може бути вироблено з використанням більш простих в реалізації двовалкових приводних опор.

Датчиками коливань металевих тіл обертання можуть бути застосовані фотоелектричні датчики. Датчиком також може служити самі нерівноважені металеві тіла обертання, що зриваються з валків при різних кутах нахилу в залежності від величини нерівноваженості. Суть методу контролю полягає в тому, що контрольоване металеве тіло обертання встановлюється на двох обертових опорах (валках), які встановлені на жорсткій рамі повороту. Електропривод обертає опорні валки. Контрольовані металеві тіла обертаються з ще більшою швидкістю в зв'язку з тим, що діаметр тіл приблизно в два рази менше діаметра валків [3].

При обертанні металевих тіл обертання з'являється нерівноважена відцентрова сила при наявності радіального зміщення центру мас (РЗЦМ), яка прагне зірвати контрольоване тіло з валків. Глибина посадки металевого тіла обертання обирається таким чином, щоб при можливому максимальному значенні РЗЦМ виключити зрив тіла до повороту рами.

У міру нахилу рами (зростання кута повороту) глибина посадки металевого тіла обертання зменшується, і воно зривається з валків. Чим більше радіальна нерівноваженість, тим менше буде кут повороту рами і навпаки. Можливості даного методу досить широкі: можна контролювати нерівноваженість металевих тіл обертання за кутами повороту рами, за швидкістю обертання валків і інтегральним способом. В принципі можлива комбінація з двох і навіть трьох параметрів, проте в цьому випадку, особливо для останнього, недоцільність такого поєднання очевидна через ускладнення системи контролю. Ці методи враховують, крім статичної нерівноваженості і моментну нерівноваженість. Саме металеве тіло обертання вільно обертається на валках, навіть під дією моментної нерівноваженості відчуває зіткнення з валками. Причому слід зауважити, що чутливість методу до моментної нерівноваженості приблизно в три рази вище, ніж до чисто статичної. До переваг такого методу слід віднести: граничну простоту конструкції – саме нерівноважене металеве тіло обертання як би є датчиком, простоту автоматизації, він дозволяє здійснювати сортування металевих тіл обертання за групами якості і, що важливо, одночасно контролюється якість металевих тіл обертання (відхилення форми, осьовий зсув центру мас,

розбіжність осей поверхонь та інші відхилення, які в кінцевому підсумку істотно впливають на зрив тіл з опорних валиків) [4-7].

Оскільки важко визначити безпосередньо величину радіального зміщення центру мас металевих тіл обертання, то її можна виявити побічно за величиною відхилення траєкторії руху, моделюючи реальні умови експлуатації і при застосуванні методів математичної статистики при обробці результатів [4]. Для усунення похибок при визначенні невірності металевих тіл обертання вони попередньо контролюються на точність за формою і геометричними розмірами. Пристрій для моделювання складається з механічного пристосування, що імітує рухи металевих тіл обертання при їх експлуатації, електронної схеми і вимірювальної машини.

Контрольоване металеве тіло обертання встановлюється в механічне пристосування, де воно спочатку обертається до необхідної швидкості обертання, потім спеціальним пристроєм йому повідомляють поступальний рух. Проходячи певну відстань, металеве тіло обертання потрапляє в вимірювальну мішень, на якій нанесено шар воску товщиною 10 мм і там залишає слід. За даними мішені визначають відхилення від заданої траєкторії щодо результатів еталонного металевого тіла обертання. Перевагою даного методу є те, що металеві тіла обертання контролюються в умовах, близьких до реальних, а недоліком – складність виготовлення установок для моделювання і методів проведення випробувань, а також вплив побічних результатів на точність контролю [7].

Також застосовується інтегральний метод контролю РЗЦМ металевих тіл обертання, який полягає в тому, що металеве тіло обертання з РЗЦМ вільно обертається на валках і під впливом моментної невірності відчуває зіткнення з валками [7]. Амплітуди і частоти коливань при цьому залежать від величини РЗЦМ, некрутості металевих тіл обертання. Метод заснований на вимірюванні величини підскакувань металевих тіл за певний час, що дозволяє побічно судити про величину його дисбалансу.

Для вимірювання величини вертикальних переміщень металевих тіл обертання використовується фотоелектричний датчик, оптична вісь якого розташована уздовж осі обертання валків на висоті, що відповідає верхній межі контрольованого металевого тіла обертання. До основних переваг методу можна віднести порівняно високу продуктивність, простоту конструкції, легкість автоматизації та можливість оцінки якості металевого тіла обертання в цілому.

Крім того, контроль невірності металевих тіл обертання можна здійснювати за часом розгону та швидкості його обертання на валках [5, 6]. При цьому металеве тіло обертання встановлюється на обертові валки з нульовою початковою швидкістю. З цього моменту починається процес вимірювання швидкості обертання металевого тіла до певної граничної сталої швидкості обертання. Інформація про поточне значення швидкості обертання металевого тіла надходить в підсилювач, далі в компаратор, де порівнюється з сигналом до відповідно встановленої швидкості.

Після досягнення її металевим тілом обертання генератор секундних імпульсів, безперервно видає до цього сигнал в цифровій індикації, фіксує час розгону тіла до постійної встановленої швидкості, і потім відключається. За часом розгону до спеціальної характеристики визначають РЗЦМ металевого тіла обертання. Інший спосіб визначення РЗЦМ металевого тіла обертання полягає у вимірюванні датчиком швидкості значення сталої швидкості тіла, яка залежить від його РЗЦМ.

**Постановка завдань.** У роботі необхідно виконати аналіз методів контролю динамічної невірності металевих тіл обертання та запропонувати методику контролю динамічної невірності металевих тіл обертання.

**Викладення основного матеріалу.** Метод кутових коливань, хоча і дає порівняно велику точність, ніж метод докладання зусиль, дуже складний для практичної реалізації, особливо для дрібних металевих тіл обертання з малою масою. При цьому потрібен час на установку і зняття металевого тіла обертання, що істотно знижує продуктивність праці і вимагає наявності у тіл базової поверхні. У зв'язку з цим, даний метод неприйнятний для контролю широкої номенклатури металевих тіл обертання.

Метод застосування сили тяжіння становить інтерес тим, що він високопродуктивний, завдяки поєднанню руху транспортування з контролем, крім того, і реалізація даного методу проста, тому необхідно його теоретичне і експериментальне дослідження.

У методі обертання становить інтерес саме обертання контрольованого металевого тіла обертання в базовому пристосуванні. Метод має високу чутливість і може бути застосований, якщо процес контролю вибірковий, що має місце в масовому виробництві, а також при наявності

базової поверхні в металевому тілі обертання. При цьому потрібна висока точність виготовлення і збірки пристрою контролю для отримання високої чутливості системи вимірювання.

Метод обертово-поступального руху контрольованого металевого тіла обертання («похила площа») відрізняється в порівнянні з іншими відносно меншою точністю, але більшою продуктивністю завдяки поєднанню транспортного руху з процесом контролю, та може бути застосований для контролю металевих тіл обертання, до яких пред'являються не дуже високі вимоги по точності. Конструктивно метод простий і його реалізація не вимагає особливої складності.

Метод вільного обертання контрольованого металевого тіла обертання на обертових опорних валках є перспективним і дозволяє враховувати і інші відхилення крім РЗЦМ– похибки форми, внутрішні і зовнішні дефекти.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що для створення систем контролю динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання мають бути розроблені такі методи: прикладання зусиль, обертання металевих тіл обертання в базовому пристосуванні, обертово-поступального руху металевого тіла обертання на похилій площині і обертання металевого тіла обертання на аеростатичних опорах.

Для розробки методу визначення динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання можна використати результати робіт [2, 4-6].

Припустимо, що металеве тіло обертання з розподіленою масою при наявності РЦМ обертається навколо геометричної осі з кутовою швидкістю  $\omega$  і кутовим прискоренням  $\varepsilon$ .

Згідно [4] результуюча сила інерції дорівнює:

$$P = m e \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса металевого тіла обертання; – величина РЗЦМ.

Умова, при якій металеве тіло обертання буде врівноважено при його обертанні навколо геометричної осі, очевидно буде виконано, коли сили інерції дорівнюють нулю, а це відповідає відсутності РЗЦМ, тобто при розташуванні центру мас металевого тіла на осі обертання. Металеве тіло обертання, що задовольняє даній умові, є статично врівноваженим, це означає, що його рівноважний стан буде забезпечено при будь-якому кутовому положенні.

Однак слід зазначити, що це металеве тіло обертання буде повністю урівноваженим (динамічне урівноваження), якщо крім вище названої умови складові вектора моменту сил інерції дорівнюватимуть нулю. Момент інерції  $M$  з'являється тільки при несталому русі. З теоретичної механіки відомо, що відцентрові моменти інерції звертаються в нуль тоді, коли осі інерції є її головними осями. Звідси випливає, що моменти сил інерції металевого тіла обертання будуть дорівнюють нулю і вони повністю будуть врівноважені, якщо геометрична вісь буде головною віссю інерції.

Момент інерції звертається в нуль, якщо руху немає, тому статичними методами виявити розбіжність головної осі інерції з віссю обертання не представляється можливим.

Чисельне значення моменту інерції [7] дорівнює:

$$M = I_z \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \quad (2)$$

де  $I_z$  – момент інерції навколо осі обертання тіла  $OZ$ .

На практиці зручно розглядати нерівноважену силу і момент через дисбаланс  $D$  [7], який є мірою нерівноваженості металевих тіл обертання, який визначається:

$$D = m e, \quad (3)$$

У відповідності з останнім виразом, перепишемо формули (1), (2) в наступному вигляді:

$$P = D \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, M = D e \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \quad (4)$$

При сталому процесі, тобто  $\varepsilon = 0$ , маємо:

$$P = D \omega^2, M = D \omega^2 e \quad (5)$$

Аналіз будь-якого металевого тіла обертання показує, що значення відцентрового моменту інерції (5) коливається в зв'язку з несиметричними розподілами мас щодо геометричної осі обертання, викликаними похибками його виготовлення. Тому для оцінки стану динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання з їх масо-геометричними характеристиками доцільно пов'язати положення головної центральної осі інерції з величиною відцентрового моменту інерції.

Для визначення кутового відхилення головної центральної осі інерції можна використовувати методику, розроблену в [7]. Суть методу полягає в застосуванні поняття вектора кута, розгляді головної центральної осі інерції у відповідних координатних площинах і їх зв'язку з масо-геометричними характеристиками металевого тіла обертання. Така форма подання невірноваженості металевого тіла обертання зручна при дослідженні процесу контролю. Крім того, складові вектора відцентрового моменту можна уявити як результат пари сил дисбалансу в площині, перпендикулярній вище названому вектору.

**Висновки.** На підставі проведеного аналізу систем контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання було запропоновано методику. Приведена методика визначення динамічної невірноваженості металевих тіл обертання дозволяє розрахувати невірноважену силу і момент в залежності від масово-геометричних і кінематичних характеристик за формулою (5), оцінити якість їх виготовлення за величиною кутового відхилення головної центральної осі інерції від геометричної осі обертання, привести до одної рівнодіючої при наявності невірноваженості в декількох перетинах, що дає можливість приступити до побудови методу автоматичного контролю РЗЦМ.

Таким чином, за допомогою приведеної методики контролю можна визначити значення невірноваженої сили і моменту, викликаними наявністю дисбалансу контрольованих металевих тіл обертання, що дає можливість приступити до розробки методів і теорії контролю. Для виявлення РЗЦМ металевих тіл обертання необхідно надати їм обертальний рух. При цьому виникають невірноважена сила і момент, які впливають на датчик, який буде інформувати про збільшення РЗЦМ металевих тіл обертання. На основі приведеної методики можна також розробити ряд методів автоматичного контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання.

#### **Список використаних джерел:**

1. Савуляк, В. В. Складальні процеси в машинобудуванні: навчальний посібник / укладач: В. В. Савуляк – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 99 с.
2. Advances in applied mechanics. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2013. – 453 p.
3. Безжон В. И. Технологичность конструкций машин: учебное пособие / В. И. Безжон, М. Е. Попов, А. М. Попов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2009. – 63 с.
4. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed.by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol 18. – 427 p.
5. Burch, John GandStrater, Felix R. Information systems: Theory and practice.– Santa Barbara; Hamilton, 2014. – 494 p.
6. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed.by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol 18. – 427 p.
7. Distributed parameter control systems: Teory and application / Ed.ByS.G. Tzafestas. – Oxford a.o.: Pergamon Press, 2014. – 497 p.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018