

УДК 531.382

М.А. Колодій, асист.
Житомирський державний технологічний університет

СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ МІЦНОСТІ ОБЕРТОВИХ СУПЕРМАХОВИКІВ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ

(Представлено д.т.н., проф. Мельничуком П.П.)

В роботі представлена розробка конструкції стенда для дослідження циклічної міцності супермаховиків при обертанні навколо осі з однією нерухомою точкою з використанням енергозберігаючих технологій. Кінематична схема стенда може бути використана при створенні енергозберігаючих агрегатів у складі технологічних машин циклічної дії.

Відомо, що осесиметричні за формою конструкції, наприклад супермаховики (в подальшому – СМ або маховики), які виготовлені намотуванням міцних волокнистих матеріалів з використанням епоксидного зв'язувального, часто мають неосесиметричний розподіл маси. Тому навіть після кропіткого статичного та динамічного балансування в полі відцентрових сил з'являються неосесиметричні деформації конструкцій і, як наслідок, – дисбаланс. Його поява особливо відчутна в процесі дослідження міцності маховиків, коли їх кутові швидкості досягають значень 3...8 тис. 1/с, а колові швидкості – 700 м/с і більше. При цьому відцентрові сили невірноважених мас зростають настільки, що здатні викликати перевантаження, а іноді – й руйнування, елементів конструкцій досліджуваних об'єктів та випробувальних стендів.

Особливістю конструкцій більшості розгінних стендів (наприклад [1], [2]) є те, що досліджувані на них обертові об'єкти мають двоопорну схему монтажу несучого вала, яка чутлива до дії відцентрових сил невірноважених мас. При довготривалих циклічних випробуваннях під час розгонів та гальмувань недостатньо врівноважених оберткових тіл мають місце значні витрати енергії як на подолання інерційних навантажень, так і сил тертя в опорах.

Для виконання циклічних випробувань маховика в режимі розгін-гальмування з метою зменшення затрат енергії Дж. Джента [3] пропонує використати другий маховик з безступеневою передачею. При цьому механічна енергія, яка вводиться в привідну систему стенда при розгоні одного з досліджуваних маховиків, використовується при його гальмуванні для розгону іншого маховика і навпаки.

Така ж конструкція стенда запропонована в [4], але при спробі її використання для випробування маховиків при великих об'ємах циркулюючої в механічній системі стенда енергії виникає складна проблема створення потужних пружних накопичувачів енергії, а використання кривошипно-кулісного механізму в складі стенду для дослідження циклічної міцності супермаховиків при характерних для них швидкостях не достатньо ефективне.

В [5] показано, що вплив відцентрових сил невірноважених мас оберткових маховиків на стан елементів конструкцій та витрати енергії при випробуваннях можливо значно зменшити і за рахунок зміни схеми монтажу досліджуваного об'єкта на стенді.

В даній роботі представлена розробка конструкції стенду для дослідження циклічної міцності маховиків, виконаних із скло-, вугле-, органо- та боропластиків при їх обертанні навколо осі з однією закріпленою точкою. Як і в [5], в конструкції розглядуваного випробувального стенда використана підвіска маховиків за схемою незбурюваного гіроскопічного маятника.

Випробувальний стенд є складним машинним агрегатом, структурна схема якого представлена на рис. 1.

Двигун постійного струму М1 через зубчасті передачі П1 та П2, диференціали Д1 та Д2 і додаткові зубчасті передачі П3 та П4 передає механічну енергію до маховиків СМ1 та СМ2 і забезпечує їх обертання із заданими однаковими кутовими швидкостями.

Для організації циклічного навантаження необхідно, щоб один із маховиків розганявся до максимального значення кутової швидкості циклу, а інший – одночасно гальмувався до мінімального значення кутової швидкості циклу. При цьому через спеціальний кінематичний ланцюг забезпечується передача кінетичної енергії від маховика, який гальмується, до

маховика, який розганяється. Вказаний кінематичний ланцюг з'єднує коронні колеса диференціалів Д1 і Д2 зубчастою передачею П5, яка приводиться в дію автономним малопотужним реверсивним двигуном постійного струму М2 (коронні колеса знаходяться під дією моментів, які близькі за величинами і мають протилежні знаки, тому результуючий момент має малу величину, і його подолання забезпечується при низькому рівні потужності). При синхронній зміні частоти обертання жорстко з'єднаних вказаним кінематичним ланцюгом маховиків виникає проблема невідповідності об'ємів енергії, що передаються від маховика, який гальмується, до маховика, який розганяється. Це примушує ввести в ланцюг передачі П5 додатковий коректуючий ланцюг у складі диференціала Д3 з малопотужним реверсивним приводним двигуном постійного струму М3 для постійного погодження швидкостей маховиків СМ1 та СМ2 і, відповідно, збільшення або зменшення накопичуваної ними кінетичної енергії.

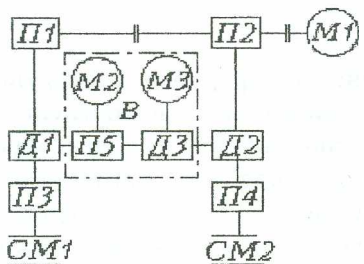


Рис. 1

Реалізація цієї структурної схеми представлена на рис. 2, де зображена схема кінематична принципова, яка суміщена із спрощеною конструктивною схемою стенда.

Елементи конструкції стенда розміщуються в порожнині вакуумної камери 1 та на зовнішній поверхні її кришки. В порожнині камери монтується дві робочі вакуумні камери 2 і 3. Герметизація камер забезпечується за допомогою ущільнень з'єднань камер і кришок коловими гумовими шнурами із спеціальним еластичним покриттям.

Досліджувані маховики СМ1 і СМ2 монтується в порожнинах робочих камер 2 і 3 за схемою висячого на стержнях-валах 4 і 5 важкого твердого тіла. Верхні несучі вузли 6 та 7 виконуються шарнірними. До їх складу входять сферичні шарніри з пальцями та два (або більше) радіальноупорних підшипники з нормованим розподілом між ними спільного осьового навантаження [5]. Для забезпечення підвіски маховиків до валів за схемою незбурюваного обертового важкого твердого тіла нижні несучі вузли 8 і 9 також виконані шарнірними.

На корпусах верхніх несучих вузлів змонтовані датчики вібрації ДВ1 і ДВ2, за частотою та амплітудою сигналів яких виконується аналіз режимних параметрів обертання опорних пристроїв роторів стенда.

В зоні нижніх кінців валів маховиків на днищі корпусу камери 1 установлені демпферні пристрої 12 та 13, які за рахунок розсіювання енергії забезпечують обмеження амплітуди і заглушування сферичних коливань маховиків, які в реальних механічних системах можуть виникати як на перехідних, так і на усталених режимах їх руху.

Контроль швидкості обертання маховиків виконується елементами системи автоматичного керування (САК) за сигналами тахогенераторів 14 і 15, які приводяться в дію обертовими кінцями валів 4 і 5.

Обертання маховиків двигуном постійного струму М1 виконується через дві зубчасті передачі 16 і 17, зубчасті диференціальні передачі Д1 і Д2, додаткові зубчасті передачі П1 та П2 (останні використовуються при необхідності отримати в циклі високі значення максимальних кутових швидкостей маховиків).

Швидкість обертання ротора привідного двигуна М1 контролюється за сигналами тахогенератора 18, який монтується разом з роторним токознімальним пристроєм 19.

Швидкість обертання кожного з маховиків, які обертаються двигуном М1, необхідно збільшувати або зменшувати при певній їх відповідності, користуючись додатковим приводом у складі двигуна постійного струму М2, самогальмівного черв'ячного редуктора 20, двох пар зубчастих коліс, які з'єднані валом 21 (перша пара) та диференціальним редуктором Д3 з автономним приводним двигуном постійного струму М3 (друга пара).

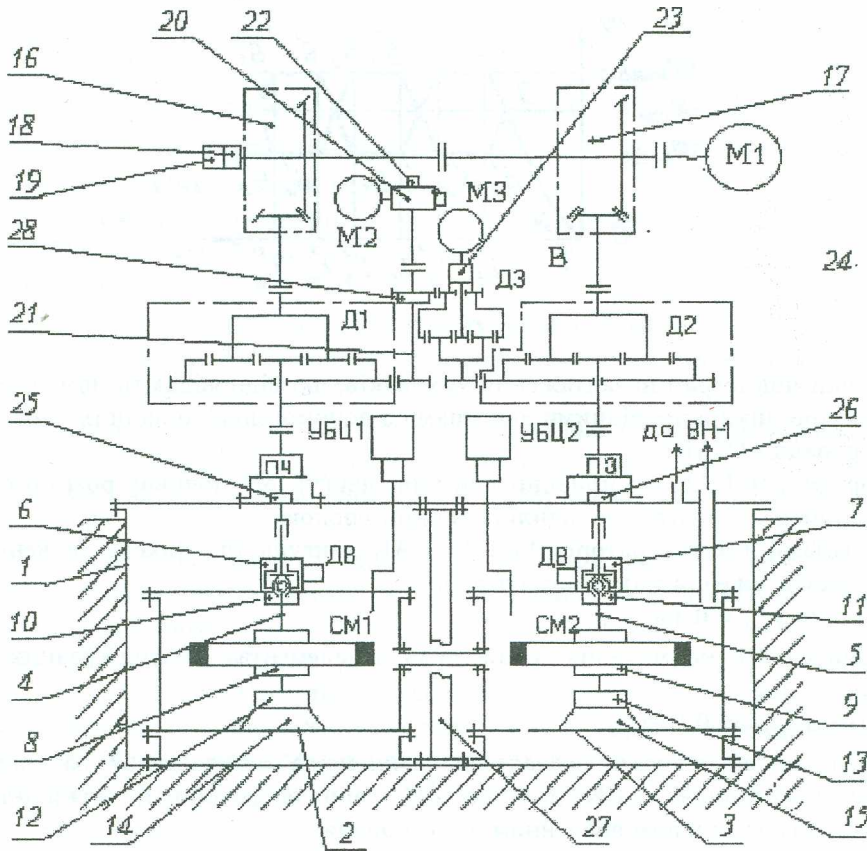


Рис. 2

Кутові швидкості колеса черв'ячного редуктора 20, вала 21 та вихідного вала диференціального редуктора ДЗ контролюються за сигналами тахогенераторів 22 та 23.

Стенд має два вакуумні контури, які надійно забезпечують стабілізацію залишкового тиску в порожнинах вакуумних камерах 3 та 4, де обертаються маховики. При руйнуванні в камерах потужних маховиків може з'явитись розгерметизація порожнин обох контурів й інтенсивне їх наповнення повітрям. Щоб запобігти спалаху, наприклад органічного волокна та пари мастила в зоні, де може мати місце тертя металевих швидкообертючих деталей маховиків та валів і нагрівання їх до температури плавлення конструкційних матеріалів, передбачена установка протипожежної системи в складі кількох балонів типу УБЦ, наповнених вуглекислотою, та системи автоматичного керування їх роботою. При падінні тиску в камерах спрацьовують сигналізатори розгерметизації, за їх сигналами спрацьовують приводи вентилів балонів з піротехнічними патронами, відкриваються балони і порожнини камер миттєво наповнюються вуглекислотою.

Робота кожного з вакуумних контурів забезпечується вакуумними насосами, які здатні постійно відкачувати повітря з порожнин камер. Вводи обертових валів у порожнини першого та другого вакуумних контурів герметизуються спеціальними ущільненнями 25 і 26 (перший контур) та такими ж ущільненнями 10 і 11, які змонтовані у верхніх вузлах підвіски маховиків 12 та 13 (другий контур). Стенд може успішно використовуватись і з одним вакуумним контуром, але залишковий тиск у вакуумній камері при цьому буде вищим.

Для виключення впливу атмосферного повітря на деформацію кришки вакуумної камери 1 в зоні її центру встановлена опора 27.

Замість самогальмівної черв'ячної передачі може використовуватись зубчаста передача з вищим коефіцієнтом корисної дії, але із спеціальним гальмівним пристроєм.

Приклад циклограм, які реалізуються при дослідженні міцності маховиків на стенді, показані на рис. 3.

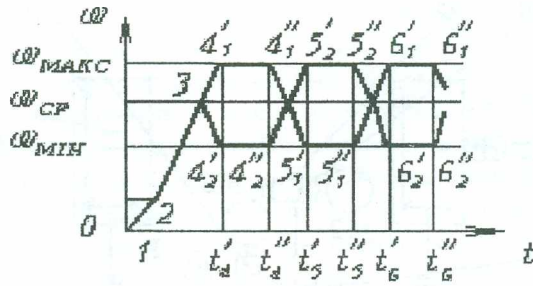


Рис. 3

Характерні точки циклограм навантаження маховиків, які відповідають моментам зміни або стабілізації параметрів циклів привідними двигунами з допомогою відповідних елементів систем автоматичного керування (САК):

т.1 – оператор вмикає САК всі привідні двигуни, двигун М1 починає розганяти маховики СМ1 і СМ2, які до цього моменту знаходились в стані спокою;

т. 2 – за сигналами тахогенераторів 14 і 15 САК двигуна М1 фіксує значення вихідної швидкості циклів навантаження маховиків на рівні

$$\omega_{СМ1-2} = \omega_{СМ2-2} = 0,1\omega_{\max} , \tag{1}$$

що відповідає значенням нормальних напружень в елементах досліджуваних обертових конструкцій:

$$\sigma_{СМ1-2} = \sigma_{СМ2-2} = 0,01\sigma_{\max} \tag{2}$$

(залежно від задач, які вивчаються, вказане значення може змінюватись); за командою, яка подається програмним блоком САК двигуна М1 (або оператором), починається розгін маховиків двигуном М1 із заданим значенням прискорення;

т. 3 – швидкості обох маховиків досягають значення, що відповідає умові:

$$\omega_{0СМ1-3} = \omega_{0СМ2-3} = \sqrt{0,75\omega_{\max}^2} , \tag{3}$$

і яке двигуном М1 підтримується протягом всього періоду циклічних випробувань (умова (3) записана для випадку, коли маховик досліджується з метою забезпечення режиму експлуатації при зніманні половини об'єму накопиченої енергії);

після невеликої витримки роторної системи стенда при вказаній швидкості (або без витримки) САК вмикає двигун М2 варіатора В і починається одночасне збільшення швидкості (розгін) маховика СМ1 до значення:

$$\omega_{СМ1} = \omega_{\max} \pm \Delta\omega_{\max} \tag{4}$$

і програмоване САК двигуна М3 зменшення швидкості (гальмування) маховика СМ2 до значення:

$$\omega_{СМ2} = \omega_{\min} \pm \Delta\omega_{\min} ; \tag{5}$$

зміна швидкостей маховиків відбувається при забезпеченні виконання умови:

$$[\omega_{СМ1}(t)]^2 + [\omega_{СМ2}(t)]^2 = C , \tag{6}$$

де ω_{\max} і ω_{\min} – найбільше та найменше значення швидкостей маховиків в циклах навантаження;

$\Delta\omega_{\max}$ і $\Delta\omega_{\min}$ – відхилення значень максимальної та мінімальної

швидкостей в циклі, які визначаються задачами випробувань;

$\omega_{СМ1}(t)$, $\omega_{СМ2}(t)$ – поточні значення швидкостей маховиків СМ1 і

СМ2 в циклі в один і той же час;

C – постійна величина, яка визначається за залежністю:

$$C = \omega_{\max}^2 + \omega_{\min}^2 ; \tag{7}$$

т.т. 4'1-4''1 – верхня площинка циклу навантаження маховика СМ1 із заданим періодом $t_{4'}$ – $t_{4''}$, на котрій САК двигуна М2 витримує швидкість обертання маховика СМ1 на рівні

$$\omega_{СМ1} = \omega_{\max} \pm \Delta\omega_{\max} ; \tag{8}$$

т.т. 4'2-4''2 – нижня площинка циклу навантаження маховика СМ2 також з періодом $t_{4'}$ – $t_{4''}$, на котрій САК двигуна М3 варіатора В витримує швидкість обертання маховика СМ2 на рівні

$$\omega_{CM2} = \omega_{\min} \pm \Delta\omega_{\min}; \quad (9)$$

після витримки обертових маховиків на верхній та нижній площинках протягом періоду t_4-t_4'' САК двигуна М2 отримує сигнал реле часу на гальмування із заданим уповільненням ε_{CM1} маховика СМ1 і розгін із заданим прискоренням ε_{CM2} маховика СМ2, значення котрого постійно коректується САК двигуна варіатора М3;

т.т. $5'_1 - 5''_1$ – нижня площинка циклу навантаження маховика СМ1 із заданим періодом t_5-t_5'' , на котрій САК двигуна М2 витримує швидкість обертання на рівні

$$\omega_{CM1} = \omega_{\min} \pm \Delta\omega_{\min}; \quad (10)$$

т.т. $5'_2 - 5''_2$ – верхня площинка циклу навантаження маховика СМ2 також з періодом t_5-t_5'' , на котрій САК двигуна М3 витримує швидкість обертання маховика на рівні

$$\omega_{CM2} = \omega_{\max} \pm \Delta\omega_{\max}. \quad (11)$$

Якщо через неякісну роботу САК двигуна М3 умова (6) не виконується і в замкненому зубчастому контурі з'являються крутні моменти, вищі ніж номінальні, в конструкції стенда передбачена запобіжна муфта граничного моменту 28, яка забезпечує своєчасне розвантаження зубчастого контуру.

Подальші цикли навантаження маховиків, міцність яких досліджується на стенді, за формою і параметрами повторюються до повного виконання програми випробувань або до зупинки стенда оператором.

В конструкції розглядуваного випробувального стенда вперше використана наведена кінематична схема і конструктивна реалізація енергозберігаючого приводу обертання досліджуваних маховиків з підвіскою двох маховиків за схемою незбурюваного гіроскопічного маятника, що вигідно вирізняє стенд від аналогічних за призначенням.

Аналіз схемних та конструктивних особливостей, результатів випробувань вузлів стенда дають підстави стверджувати, що наведені рішення можливо використати при створенні подібних енергозберігаючих агрегатів у складі технологічних робочих машин циклічної дії.

Методика визначення кінематичних та силових параметрів приводу стенда, інші варіанти схемних та конструктивних рішень будуть представлені в наступній публікації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Балюк А.Д., Баженов В.Г., Артемчик В.Я. Установка для исследования малоцикловой усталости вращающихся конструкций // Проблемы прочности. – 1980. – № 8. – С. 115–118.
2. Горностай В.И., Баженов В.Г., Тонюк Н.И. Разгонный стенд для испытания вращающихся элементов турбомашин // Проблемы прочности. – 1973. – № 10. – С. 100–103.
3. Джента Дж. Накопление кинетической энергии. Теория и практика современных систем: Пер. с англ. – М.: Мир. 1988. – 430 с.
4. Мельничук С.В. Економічні переваги випробувального стенда із замкненим механічним контуром на основі кривошипно-кулісного механізму // Вестник национального технического университета Украины "КПИ". – 1999. – № 37.
5. Мельничук П.П., Колодій М.А. Випробування обертових маховиків на міцність // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2003. – № 2(26). – Т. 2. – С. 113–120.

КОЛОДІЙ Марина Анатоліївна – асистент кафедри геотехнологій та промислової екології Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– дослідження міцності деталей машин.

Подано 12.07.2004