

М.М. Можаровський, ст. викл.
 Державна агроекологічна академія України

АКУМУЛЮВАННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ШВИДКОХІДНИХ РОТОРІВ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

(Представлено д.т.н., проф. І.Г. Грабаром)

Вказується на актуальність питань, пов'язаних з акумулюванням та зберіганням енергії в екологічному плані. Перспективними можуть бути акумулятори кінетичної енергії (маховики) з композитних матеріалів. У свою чергу, конструкції таких маховиків будуть мати свої особливості при експлуатації. Розглядається питання динаміки при переході маховика, що має незбалансованість, через резонансні зони. Досліджується взаємопов'язаність коливального та обертового руху маховика в резонансних режимах.

Питання, пов'язані з накопиченням енергії, зберіганням і збільшенням її щільності, є досить актуальними з точки зору екології, оскільки акумульована енергія необхідна практично в будь-якій машині і системі, де має місце споживання та перетворення енергії. При цьому необхідно відмітити, що акумульована енергія значно дешевша, а її використання – екологічно безпечне.

Перспективність використання акумуляторів кінетичної енергії (маховиків) в екологічному плані розглядалась в роботах [1, 2]. В них було показано, що використання нових конструкційних матеріалів (волокнистих композитів) в конструкціях роторів маховиків суттєво підвищить їхні питомі енергетичні характеристики, а це, в свою чергу, зробить їх використання, з метою акумулювання та зберігання енергії, перспективним.

Але при експлуатації таких конструкцій маховиків виникають певні особливості в тому плані, що для реалізації високих енергетичних характеристик вони повинні мати великі швидкості обертання (до 1000 м/с) [1], що, в свою чергу, потребує розгляду питань, пов'язаних зі зменшенням аеродинамічного опору. Це розглядалось в роботі [1]. Іншою особливістю експлуатації таких маховиків є те, що конструкції з цих матеріалів ведуть себе як гнучкі, і в полі дії відцентрових сил існує велика ймовірність виникнення неосесиметричного деформування та появи так званого пружного дисбалансу. Цей фактор зумовлює експлуатацію даних маховиків в зарезонансних зонах, де спостерігається явище самоцентрування ротора [3, 4], а це призведе до того, що при розгоні цих маховиків буде відбуватись їх перехід через резонансні зони. Тому розгляд нестационарних режимів руху маховиків, що мають дисбаланс, являє певний інтерес.

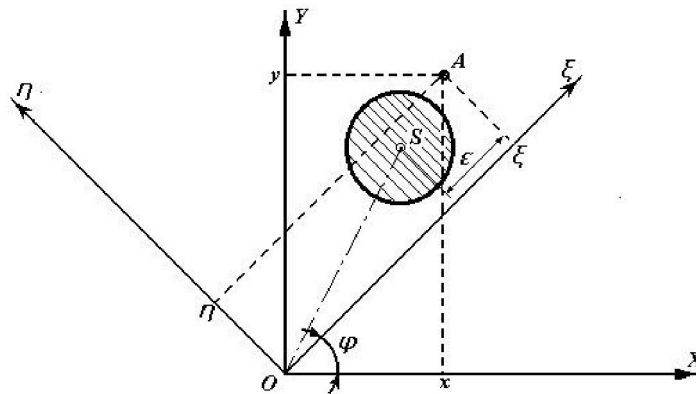


Рис. 1. Поперечний переріз системи, що розглядається, через маховик в момент її руху в резонансному режимі: *O* – вісь обертання вала; *S* – центр вала; *A* – центр мас маховика; ϵ – ексцентриситет маховика; x і y – координати центра мас маховика *A* в нерухомій системі координат (X, Y); φ – кут повороту вала

Якщо розглядати рух довільного маховика, що має дисбаланс, встановленого посередині вала, пов'язаного з двигуном і будь-яким чином опертого по кінцях, і при цьому нехтувати гіроскопічною дією диска, пружністю з'єднувальної муфти і масою ротора, то його можна описати за допомогою трьох рівнянь (рис. 1).

Два з них є проекціями всіх сил на нерухомі координатні осі X і Y :

$$\begin{aligned} F_x(x, y, \varphi) &= 0; \\ F_y(x, y, \varphi) &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

А третє – сумою всіх скрутних моментів відносно центра ваги ротора. Якщо перші два рівняння (1) залежать від ротора і від способів його опору, то рівняння моментів для всіх випадків буде мати загальний вигляд:

$$\ddot{\varphi} = \lambda(\dot{\varphi}) + \mu R(x, y, \varphi), \tag{2}$$

де φ – кут повороту системи двигун–ротор відносно нерухомої системи координат;

$\lambda(\dot{\varphi})$ – кутове прискорення цієї системи в тому випадку, якщо ротор та його опори абсолютно жорсткі;

$$\lambda(\dot{\varphi}) = \frac{M(\dot{\varphi}) - T(\dot{\varphi})}{I_1 + I_2};$$

$M(\dot{\varphi})$ – скрутний момент двигуна, що відповідає статичній характеристиці двигуна, тобто незалежній від прискорення руху ротора двигуна;

$T(\dot{\varphi})$ – момент тертя в системі;

$$T(\dot{\varphi}) = T_1(\dot{\varphi}) + T_2(\dot{\varphi});$$

$T_1(\dot{\varphi})$ – момент тертя в опорах вала;

$T_2(\dot{\varphi})$ – момент тертя в опорах і колекторному пристрої двигуна.

Ці моменти також будуть залежати від кутової швидкості ротора.

I_1 – момент інерції ротора маховика; I_2 – момент інерції ротора двигуна; $R(x, y, \varphi)$ – деяка величина, пропорційна моменту всіх внутрішніх сил, виключаючи інерційні (для кожної конкретної задачі ця функція змінює структуру); μ – деякий параметр.

$$\mu = \left(\frac{\varepsilon}{r}\right)^2 \frac{I_1}{I_1 + I_2}, \tag{3}$$

де ε – дисбаланс ротора; r – радіус інерції ротора.

Таким чином, система, що розглядається, має три ступеня вільності та її рух можна описати трьома диференційними рівняннями другого порядку. Перші два рівняння (1) описують коливальний рух ротора в напрямі осей X і Y , третє (2) – обертальний рух.

Наявність в перших двох рівняннях координати φ , а в останньому – координат центра ваги ротора (x, y) , може вказувати на те, що коливальний та обертальний рухи системи пов'язані і взаємообумовлені. Таку систему можна назвати автономною. Неважко замітити, що третє рівняння (2) при $\mu = 0$ інтегрується в квадратурах, і при підстановці в (1) отриманої функції $\varphi(t)$ задача зводиться до інтегрування рівнянь:

$$\begin{aligned} F_x[x, y, \varphi(t)] &= 0; \\ F_y[x, y, \varphi(t)] &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

при визначеному конкретному виразі для функції кута повороту ротора $\varphi(t)$. В цьому випадку коливальний та обертальний рухи будуть пов'язані тільки прямою залежністю.



Якщо користуватись термінологією автоматичного регулювання, то можна сказати, що при $\mu = 0$ система не має зворотного зв'язку. По-іншому буде вести себе система, якщо $\mu \neq 0$. В цьому випадку зворотній зв'язок буде проявлятися у вигляді реакції (дії) коливального режиму ротора на обертання системи:



Інтенсивність зворотного зв'язку буде визначатись параметром μ , який може в даному випадку носити назву параметра зворотного зв'язку. Цей параметр є характеристикою зв'язаності коливального та обертального режимів системи.

Якщо дивитись з іншого боку, то параметр μ може виступати як параметр, що характеризує нелінійність даної системи. Це видно з того, що при $\mu \neq 0$, незалежно від вигляду функції $R(x, y, \varphi)$, що не дорівнює нулю, система рівнянь (1) і (2) нелінійна. Таким чином, ми можемо сказати, що нелінійність в систему вноситься зворотною залежністю, тобто зв'язаністю обертального та коливального рухів. Такі системи можна відобразити у вигляді символічної тотожності:



Вона має такі особливості динаміки:

1. Амплітуда вібрацій ротора зі збільшенням зворотного зв'язку зростає.
2. Темп росту кутової швидкості зменшується.
3. Існує критичне значення зворотного зв'язку, з перевищенням якого система не проходить резонансну зону.

Висновки

Проведений аналіз, а також певні експериментальні дані, що були отримані в процесі проведення розгінних випробувань роторів маховиків з композитних матеріалів в лабораторії ЖІТІ, підтверджують наявність нелінійних ефектів при проходженні резонансних зон системою “маховик–двигун”. Якщо розглянемо вплив параметрів системи на зворотній зв'язок, то необхідно відмітити, що нехтування зворотною залежністю, виходячи з (2) і (3), можливе лише в таких випадках:

1) коли потужність двигуна значно перевищує потужність, що споживається ротором в коливальному русі, тобто при $|\lambda(\dot{\varphi})| \geq \mu(R)$;

2) коли величина дисбалансу дуже мала ($\varepsilon \ll r$), в цьому випадку збуджуючі сили дуже малі, і, як наслідок, коливальний режим надто слабкий, щоб створювати вплив на кутову швидкість системи;

3) коли інерція ротора двигуна значно перевищує інерцію маховика ($I_2 \gg I_1$), в цьому випадку інерційність двигуна настільки велика, що коливальний режим вала з маховиком не в змозі суттєво впливати на обертання всієї системи.

В указаних випадках рівняння руху можна вважати лінійними. В протилежних випадках зворотній зв'язок може розглядатись, з одного боку, як фактор нелінійності в системі, а з іншого – як фактор, що робить подібні системи автономними.

Коливання кутової швидкості, які виникають в момент “застрявання” системи в резонансі можуть згаснути, якщо буде мати місце демпфірування, і система прийде в рівновагу, відповідаючи стаціонарному рішення в тих же параметрах.

Проведений аналіз необхідний для врахування виявлених особливостей при проектуванні та створенні конструкції опор в агрегатах-нагромаджувачах енергії з маховиками і вибору потужності та характеристики привідного двигуна.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Можаровський М.М.* Екологічні перспективи та деякі проблеми використання акумуляторів кінетичної енергії // Вісник ДААУ. – 1998. – № 2. – С. 55–65.
2. *Можаровський М.М.* До питання акумулювання та зберігання енергії як одного з варіантів покращання екологічного стану навколишнього середовища // Вісник ДААУ. – 1999. – № 1–2. – С. 105–117.
3. *Кельзон А.С.* ДАН СССР. – 1956. – Т. 110. – Вып. 1. – С. 31–33.
4. *Можаровський М.М.* Нелінійні ефекти динаміки роторів // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 9. – С. 64–66.

МОЖАРОВСЬКИЙ Микола Мар'янович – старший викладач кафедри технічного сервісу та інженерної екології Державної агроекологічної академії України, м. Житомир.

Наукові інтереси:

- нові методи технологічного забезпечення оптимальних величин параметрів поверхневого шару деталей машин;
- прогресивні технології створення нових конструкційних матеріалів;
- енергозберігаючі технології транспортних засобів.

Телефон домашній: (0412) 33-80-77.

Подано 12.09.2000