

## ДЕЯКІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ПРО ДИНАМІКУ ТОНКОГО СФЕРИЧНОГО СЕГМЕНТА ПРИ СКЛАДНОМУ ОБЕРТАННІ

*І. І. Анік'єв, канд. техн. наук, В. І. Гуляєв, докт. техн. наук, П. З. Луговий,  
докт. техн. наук, М. І. Михайлова, докт. техн. наук, Є. О. Сущенко, канд.  
техн. наук (ІМ НАН України)*

*Разработана методика экспериментального исследования поведения тонких оболочек в виде сферических сегментов, жестко заземленных в вершине по круговому контуру, вращающихся на горизонтальном валу при одновременном повороте их вокруг вертикальной оси. Показано, что при определенных соотношениях частот вращения вала и поворота вокруг вертикальной оси оболочки деформировались скачком с образованием вблизи вала вмятины, которая перемещалась противоположно направлению своего вращения.*

В сучасному літакобудуванні велика увага приділяється задачам удосконалення авіаційних двигунів. Однією з таких задач є дослідження динамічної поведінки тонкостінних роторів авіаційних двигунів в процесі зміни їх орієнтації у просторі (зліт, посадка, маневри літака), тобто там, де присутні гіршкостійні сили, а також роторів потужних вентиляційних насосів, коли їх фундаменти починають коливатися внаслідок вибухових робіт в шахтах чи при виникненні гірських ударів. В теоретичному і експериментальному плані ці процеси можна досліджувати за допомогою тонкостінних пружних оболонок обертання [1–4]. У даній роботі експериментально досліджується динамічна поведінка тонкостінних сферичних сегментів, які одночасно обертаються на горизонтальному валу і здійснюють поворот навколо вертикальної осі. Дослідження дасть можливість довести справедливість використання розроблених математичних моделей і оцінити достовірність отриманих теоретичних результатів.

Для дослідження були взяті тонкі сферичні оболонкові сегменти з геометричними параметрами: радіус закруглення  $R = 123$  мм; діаметр основи сегмента  $D = 205$  мм; товщина  $h = 0,1$  мм. Матеріал оболонок – сталь 12Х18Н10Т; модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,3$ ; щільність  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Схема експериментальної установки у двох проекціях наведена на рис. 1. Тут 1 – сферична оболонка, у вершині якої є отвір, діаметр якого дорівнює діаметру вала двигуна 2. Оболонка закріплена на валу шляхом жорсткого заземлення кільцевої її частини в зоні контуру отвору за допомогою сталевих шайб 3 діаметром  $d = 9, 12$  і  $14$  мм. Двигун 2 змінної напруги типу ДО-20А жорстко закріплений на сталевій плиті 4 і може розвивати кутову швидкість до 100 об/с.

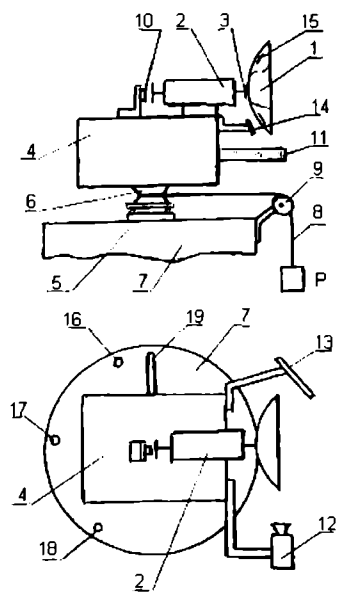


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Маса плити на порядок перевищує масу двигуна з оболонкою, усіх вимірювальних систем і кріпильних елементів.

Плита 4 симетрично встановлена на опорному підшипнику 5 з шківом 6, розташованих на нерухомій основі 7. В цілому система була відрегульована так, що поверхня плити і вісь електродвигуна розташовувались строго горизонтально. Поворот плити відносно вертикальної осі здійснювався в результаті падіння вантажу  $P$ , закріпленого на кінці шнура 8, який був намотаний в кільцевому заглибленні шківа 6 і проходив через блок 9.

При подачі на двигун заданої напруги  $U$  швидкість обертання  $\omega$  його вала визначалась за допомогою магнітного датчика 10. Магнітний датчик складався з котушки індуктивності і сталевого диска на валу двигуна (на рисунку не показані). Сигнал у вигляді гострого піка утворювався при проходженні біля котушки виїмки на циліндричній поверхні диска. Глибина виїмки порядку одного міліметра, ширина  $\sim 0,0016$  м. Сигнал датчика подавався на

цифровий запам'ятовуючий осцилограф С9-8, що давало можливість визначити час одного оберту з похибкою, що не перевищувала  $\pm 0,5\%$ . В дослідях значення  $\omega$  змінювалось від 30 до 90  $\text{с}^{-1}$ .

Переміщення нижнього краю оболонки відносно жорстко закріпленої шкали 11 неперервно реєструвалось за допомогою відеокамери 12 (модель NV-VX33EM), яка поверталася разом з плитою у міру падіння вантажу  $P$ . Крім цього, в кадр відеокамери одночасно проектувалася частина внутрішньої поверхні оболонки з допомогою дзеркала 13, прикріпленого до плити.

Одночасно переміщення нижнього краю оболонки фіксувалось датчиком переміщення і універсальним запам'ятовуючим осцилографом С8-13 з диференціальним входом. Датчик переміщення складався з магнітної котушки 14, нерухомо встановленої на плиті, і двох квадратних феромагнітних елементів 15 ( $\sim 10 \times 10$  мм), наклеєних на внутрішню поверхню оболонки в діаметрально протилежних точках. Феромагнітні елементи при обертанні оболонки проходили напроти серцевини магнітної котушки так, що під час кожного оберту на екрані осцилографа виникало два імпульси. Оскільки обертання плити навколо вертикальної осі проходило за кілька секунд, а оболонка за кожну секунду поверталася навколо своєї осі не менше тридцяти разів, то на екрані осцилографа всі сигнали зливалися в суцільну світлу область, контури

якої були симетричними відносно середньої лінії. Типова осцилограма наведена на рис. 2. На осцилограмі видно, що по мірі падіння вантажу край оболонки коливався з досить сталою амплітудою до моменту (поміченого стрілкою), коли виникають інтенсивні коливання.

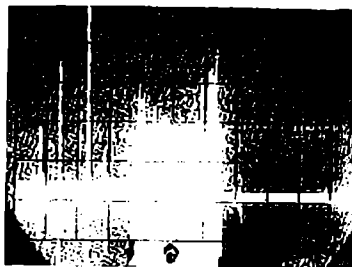


Рис. 2. Осцилограма, на якій зафіксовано коливання краю оболонки

Сигнал, який вимірювався по подібній осцилограмі, є сумою двох складових. Перша з них  $S$  обумовлена обертянням оболонки з швидкістю  $\omega$  на нерухомій плиті. Залежність  $S$  від швидкості обертання вала двигуна визначалася в попередній серії дослідів. Друга складова  $W$  є результатом реакції оболонки, що обертається, на поворот навколо вертикальної осі плити і зміни при цьому відстані між нижнім краєм оболонки і магнітом котушки 14. Складова  $W$  визначалася як різниця між величиною сигналу  $U$ , який знаходився по осцилограмі, і значенням  $S$ , яке бралось із попередніх дослідів при однакових значеннях швидкості оболонки  $\omega$ .

Для реєстрації швидкості повороту плити навколо вертикальної осі  $\Omega$  на відстані 0,5 м від неї на нерухомій основі були закріплені три пари магнітних котушок 16, 17, 18. Сигнал з котушок, який утворювався при проходженні над ними стрічки 19 з феромагнітного матеріалу, прикріпленої до плити, подавався на цифровий запам'ятовуючий осцилограф С9-8. Осцилограма мала вигляд, показаний на рис. 3, де час появи максимального значення сигналу визначався з точністю 0,01 с. Відстань між котушками в кожній парі датчиків становила 150–200 мм і вимірювалася з похибкою 0,5 мм. Загальна похибка визначення швидкості повороту плити відносно вертикальної осі не перевищувала 5%. Визначення в кожному досліді швидкості обертання в трьох різних точках по мірі падіння вантажу дає можливість оцінити швидкість повороту в будь-який момент часу на відрізку реєстрації процесу.

Сигнал магнітних котушок 16–18, крім осцилографа С9-8, подавався на другий диференціальний вхід осцилографа С8-13, де реєструвалося переміщення нижнього краю оболонки. На осцилограмі (рис. 3) чітко видно стрибки напруження, які виникали на котушках 16–18 в процесі повороту плити. Названі сигнали слугують відмітками, по яким встановлювалася

відповідність між значеннями переміщення краю оболонки з швидкістю повороту навколо вертикальної осі в заданий момент часу.

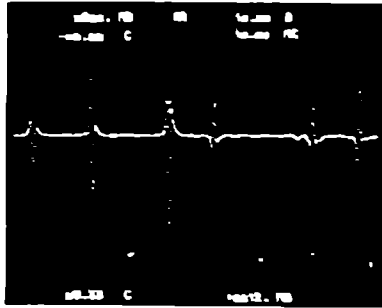


Рис. 3. Осцилограма, за якою визначалася швидкість повороту оболонки навколо вертикальної осі

В попередніх дослідях у стаціонарному режимі обертання оболонок (без повороту плити) в діапазоні кутових швидкостей  $30\text{--}90\text{ с}^{-1}$  для кожної заданої відстані між оболонками і датчиком в інтервалі від 6 до 30 мм проводилися виміри сигналу магнітного датчика переміщення краю оболонок в мілівольтах. Для кожної конкретної відстані між датчиком і оболонками залежності мали лінійний характер. Зі зменшенням відстані нахил кривих збільшувався. Отримані залежності задовільно (похибка  $\sim 5\%$ ) описуються емпіричною формулою

$$S = A\omega / m_s^2 \omega^*, \quad (1)$$

де  $S$  – сигнал датчика, мВ;  $m_s$  – відстань між датчиком і оболонкою, мм;  $\omega$  – кутова швидкість оболонки;  $\omega^*$  – критична кутова швидкість обертання, при якій оболонка втрачає свою стійкість;  $A = 18236\text{ мВ}\cdot\text{мм}^2$  – константа, отримана по конкретно виміряним відстаням між датчиком, оболонкою і сигналом датчика з екрана осцилографа.

Переміщення краю оболонки в процесі повороту плити дорівнює

$$W = W_0 - \sqrt{\frac{A\omega}{S\omega^*}}, \quad (2)$$

де  $W_0$  – відстань між оболонкою і катушкою, мм.

При критичних швидкостях обертання відеокамера фіксувала максимальні переміщення краю оболонки і виникання прогину (вм'ятини) в центральній її частині, поблизу зовнішнього контуру защемлення, який зміщувався при цьому протилежно обертанню вала. Результати обробки вимірів наведені на рис. 4 у вигляді залежності переміщення  $W$  краю оболонки від кутової швидкості  $\omega$  при повороті плити з кутовою швидкістю  $\Omega = 0,069\text{ с}^{-1}$ . Суцільною кривою показано результати теоретичного аналізу цього явища [3] при  $d = 14\text{ мм}$ .

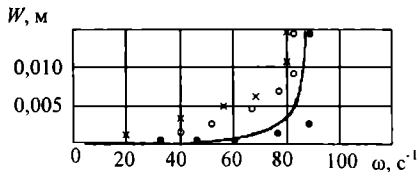


Рис. 4. Залежність переміщення краю оболонки  $W$  від швидкості обертання  $\omega$  при повороті навколо вертикальної осі:  $\times$  – дані дослідів для оболонок, в яких зовнішній діаметр контуру защемлення  $d = 9$  мм;  $\circ$  – для  $d = 12$  мм;  $\bullet$  – для  $d = 14$

Як видно із графіків, переміщення краю оболонки при збільшенні частоти обертання спочатку незначне, але після досягнення критичних значень  $\omega^*$  воно різко зростає (практично стрибком). Критичні значення  $\omega^*$  для різних діаметрів защемлення були такі: для  $d = 9$  мм  $\omega = 80$  с<sup>-1</sup>, для  $d = 12$  мм  $\omega^* = 82$  с<sup>-1</sup>, для  $d = 14$  мм  $\omega^* = 87$  с<sup>-1</sup>. Для теоретичних значень при  $d = 14$  мм  $\omega^* = 85$  с<sup>-1</sup>.

Таким чином, розроблено методику експериментального дослідження поведінки тонких сферичних сегментів, жорстко защемлених у вершині по круговому контуру різних діаметрів, які оберталися на горизонтальному валу при одночасному їх повороті навколо вертикальної осі.

Показано, що при складному обертанні в системі координат, зв'язаній з оболонкою, при визначених співвідношеннях частот обертання вала і повороту плити оболонка деформується поблизу контуру защемлення. При цьому вмістину зміщується протилежно напрямку обертання вала.

Поблизу теоретично визначених резонансних режимів коливань оболонки деформувалися стрибком, при цьому їх геометрія швидко змінювалася, що викликало руйнування в області защемленого контуру.

Отримані результати дослідження підтверджують правомірність розроблених математичних моделей, які враховують пружні властивості елементів роторів при їх складному обертанні і дозволяють визначати параметри резонансних режимів.

1. Гуляев В. И., Гром А. А., Снежко Н. А. Прецессионные колебания конических оболочек при сложном вращении // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1992. – № 2. – С. 156–163.

2. Гуляев В. И., Киричук А. А., Ясинский В. А. Устойчивость кинематически возбуждаемых колебаний вращающейся сферической оболочки // Прикл. механика. – 1991. – 27, № 9. – С. 39–47.

3. Гуляев В. И., Луговой П. Э., Соловьев И. Л. Теоретические и экспериментальные исследования динамики упругого сферического сегмента при сложном вращении // Прикл. механика. – 2001. – 37, № 6. – С. 111–117.

4. Смирнов А. Л., Товстик П. Е. Качественное исследование динамики вращающихся оболочек вращения // Современные проблемы механики и авиации. – М.: Машиностроение. – 1982. – С. 280–290.