

УДК 681.26(045)

С.О. Іщенко, д.т.н., проф.
О.В. Бондар, асп.

БАГАТОКОМПОНЕНТНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розглянуто основні особливості проектування та виготовлення багатокомпонентної системи вимірювання аеродинамічних навантажень стрижневого типу. Проведено попереднє оцінювання метрологічних характеристик отриманої системи.

The basic features of projection and manufacture of multicomponent system of measurement of aerodynamic loads of beam type are observed. The previous estimation of metrology performances of the gained system is conducted.

аеродинамічне навантаження, багатокомпонентна система, вимірювання, калібрування

Постановка завдання

Грунтовні дослідження аеродинамічних навантажень на об'єкти дослідження (ОД) складної геометричної форми (наземні споруди, літальні об'єкти нетрадиційних схем) вимагають застосування найефективніших експериментальних засобів. Зазвичай для таких досліджень використовують аеродинамічні труби з тензометричними вагами (ТВ). Для зменшення взаємного впливу між компонентами виміру ваги проектують у вигляді складної просторової конструкції, що різко звужує як діапазон вимірювання за окремими компонентами (зокрема частотний), так і можливості задавати для моделі відповідні кути набігання потоку у повному обсязі (0–360°).

Суттєвою проблемою є проектування кріплення моделі ОД до аеродинамічних ваг. Моделі деяких ОД (несуча система гелікоптера, автожиру) генерують знакозмінні навантаження на систему кріплення в широкому діапазоні частот, що може викликати резонансні явища в конструкції ТВ і як наслідок зруйнувати їх.

Один із методів вирішення наведених проблем – це створення нових більш жорстких конструкцій системи вимірювання з високими метрологічними характеристиками. За таких умов пропонується конструкція ваг стрижневого типу, в якій зроблена спроба максимально зменшити взаємний вплив компонентів вимірювання.

Аналіз публікацій

Досить повний аналіз засобів для вимірювання аеродинамічних навантажень на моделі в аеродинамічних трубах показано в роботі [1], де значну увагу приділено типам аеродинамічних ваг залежно від розміщення:

– ваги, що розміщені поза моделлю ОД та робочою частиною аеродинамічної труби;

– ваги, розміщені всередині моделі або у державці, що підтримує її в потоці.

За основною характеристичною ознакою аеродинамічних ваг (кількістю вимірювальних компонентів) показано та розглянуто можливі схеми і конструкції ваг як механічного, так і тензометричного типу.

Детально розглянуто питання механізму розкладання повного аеродинамічного навантаження, що діє на модель ОД, на відповідні складові (компоненти) залежно від типу аеродинамічних ваг. Викладено переваги та недоліки тієї чи іншої схеми ваг, різного типу та конструкції.

У роботі [2] детально показано конструювання шестикомпонентних тензометричних аеродинамічних ваг із внутрішнім розміщенням відносно моделі ОД, з використанням типових конструктивних рішень для розподілу та вимірюванню компонент від повного аеродинамічного навантаження.

У роботі [3] розглянуто багатокомпонентні вимірювальні системи, системи збору та оброблення інформації вимірювань, подано методи метрологічного забезпечення, основи забезпечення єдності вимірювань та оцінювання похибки вимірювань.

Розглянутий матеріал є визначальним на етапі проектування подібної багатокомпонентної вимірювальної системи та дає змогу визначитись з конструкцією, типом, схемою такої системи і уникнути ряду помилок на певному етапі.

Проектування тензометричної ваги

Вирішення завдання – спроектувати та виготовити ТВ стрижневого типу з можливістю їх застосування в аеродинамічній трубі ГАД-2 Національного авіаційного університету.

Аеродинамічна труба ТАД-2 має закриту робочу частину восьмикутного перетину (рис. 1), з такими геометричними розмірами:

$$\ell_{p.ч} = 5 \text{ м};$$

$$b_{p.ч} = 4 \text{ м};$$

$$h_{p.ч} = 2,5 \text{ м}.$$

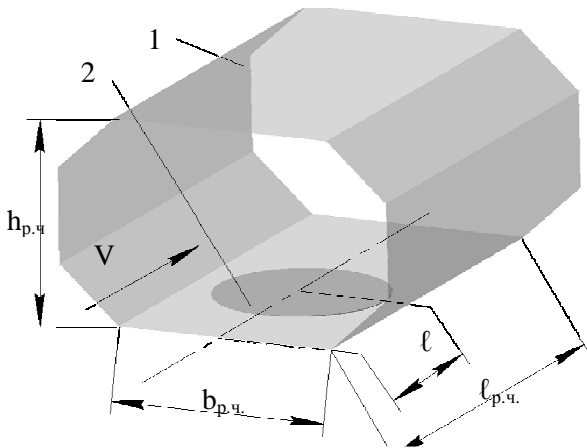


Рис. 1. Загальний вигляд аеродинамічної труби ТАД-2:

- 1 – робоча частина;
- 2 – поворотне коло;
- V – вектор швидкості потоку, що набігає;
- $h_{p.ч}$ – висота робочої частини;
- $b_{p.ч}$ – ширина робочої частини;
- $\ell_{p.ч}$ – довжина робочої частини;
- ℓ – відстань між зрізом передньої кромки робочої частини та центром поворотного кола

На підлозі робочої частини, на відстані $\ell = 2$ м від зрізу передньої кромки розміщено центр поворотного кола (діаметр кола становить 2 м), котре може змінювати своє кутове положення в діапазоні $\pm 360^\circ$.

Обертальна платформа та механізм привода кола розміщені під підлогою робочої частини за її межами і дають можливість дистанційно керувати зміною кута повороту обертального кола з потрібною дискретизацією.

На етапі проектування до конструкції ТВ ставиться ряд вимог.

Вибір конструкції визначається [1]:

- кількістю вимірюваних компонентів;
 - їх граничними значеннями;
 - геометричними розмірами досліджуваних ОД.
- Оскільки ТВ мають експлуатуватись у режимі багаторазового використання, то максимальні напруження в пружних елементах мають бути меншими, ніж межа пропорційності матеріалу. Крім того, умови роботи пружних елементів мають відповідати вимогам міцності тензорезистора.

Сумарна деформація під ним має не перевищувати певне значення, котре визначається характеристиками відповідного тензорезистора.

Важливим питанням, яке потребує вирішення у процесі проектування ТВ, є забезпечення максимально можливої точності вимірювань. Перетворення аеродинамічних навантажень в електричний сигнал завжди відбувається з певною похибкою, причому відносне значення такої похибки росте зі зменшенням корисного сигналу. Відповідно для збільшення точності вимірювань слід підвищувати значення деформації, пропорційної навантаженню, яке вимірюється цим тензорезистором.

Однак таке збільшення не може бути безмежним, оскільки має виконуватись умова надійності ТВ. Розглядаючи сумісно вимоги міцності тензорезисторів та максимальної точності вимірювань, можна визначити спосіб досягнення максимально можливої точності.

Тензометричні ваги в місці розміщення тензорезисторів, які вимірюють певну групу компонентів від навантаження, за формою мають бути такими, щоб у місці, де будуть наклеєні тензорезистори, деформації від компонентів навантажень були максимальними, а вплив від інших компонентів мінімальним [2].

Типовим конструктивним рішенням для ТВ стрижневого типу є кругла форма їх перетину. Для передавання аеродинамічних сил від ОД на ТВ у них має бути тільки одне місце контакту (з'єднання), яке найчастіше конструктивно виконують у вигляді конусу.

Отже, місце розташування ТВ в ОД має форму циліндра, яка з точки зору технології виготовлення є простішим порівняно з іншими. У кінці циліндра розміщено посадочний конус під відповідний конус ТВ.

На основі розглянутого матеріалу було вирішено доцільним використовувати як базову балку для конструювання ТВ балку круглого перетину. Матеріал балки повинен забезпечувати межу текучості 80–90 кг/мм², також не має бути гістерезису при циклічних навантаженнях. Для його зменшення як матеріал пружних елементів слід вибирати високоміцну леговану сталь, якій притаманні високі пружні властивості, незначне жолоблення під час термообробки та досить значна межа втомлюваності. Саме такі характеристики і задовольняє сталь 30ХГСА.

Тензометричні ваги стрижневого типу можна розглядати як балку з жорстким кріпленням, до вільної частини якої прикладено аеродинамічну силу та момент, що діють на ОД (рис. 2).

Оскільки ОД жорстко з'єднаний з ТВ, то кут атаки ОД змінюється під час обертання поворотного кола ТАД-2.

Сили та моменти, які виникають від взаємодії ОД з потоком повітря, будуть передаватись через систему кріплення ОД з ТВ. Для визначення цих сил та моментів використовується швидкісна система координат [1]. Швидкісна система координат $Ox_a y_a z_a$ відносно ОД та ТВ має положення, як показано на рис. 2.

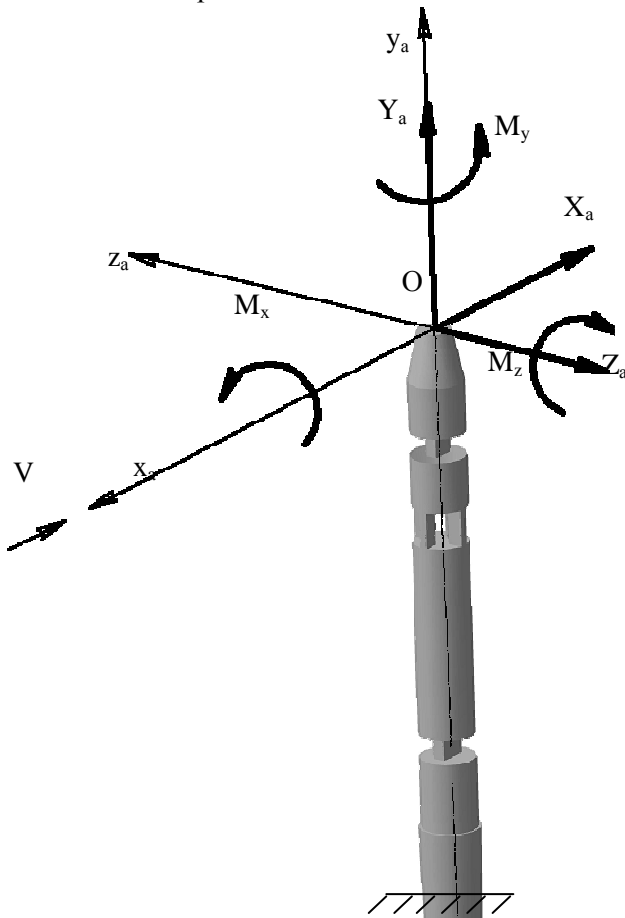


Рис. 2. Положення прийнятої системи координат відносно ТВ БСВАН

Вісь Ox_a зорієнтована назустріч потоку, що набігає. Вісь Oy_a зорієнтована вздовж стрижня ТВ та збігається з його поздовжньою геометричною віссю.

Вісь Oz_a орієнтована праворуч перпендикулярно площині $Ox_a y_a$.

Додатними значеннями сил вважають ті сили, напрямок дій яких збігається з напрямком відповідної осі.

Додатний напрямок моментів визначають за правилом гвинта, що вкручується за додатним напрямком тієї чи іншої осі.

Вимірювання компонентів сили та моментів на подібних ТВ проводять за допомогою кількох пружних елементів, розміщених послідовно. Досить відома значна кількість конструкцій пружних елементів для незалежного вимірювання сил (пружний елемент працює на згин), моментів (пружний елемент працює на кручення), а також і конструкції самих ТВ в поєднанні різних комбінацій таких елементів.

Для вирішення поставленого завдання для визначення складових сил X_a , Z_a та моментів M_x , M_z , котрі призводять до згину стрижня ТВ багатокомпонентної системи вимірювання аеродинамічних навантажень (БСВАН), використано відомий підхід, за якого силу та пару сил визначають за допомогою згинальних моментів у двох поперечних перетинах стрижня [1].

У такому випадку для вирішення завдання використовують те, що згинальний момент уздовж осі Oy_a , що виник під дією поперечної сили (X_a чи Z_a), зростає пропорційно відстані сили до цього перетину стрижня, в той час як згинальний момент від пари сил постійний уздовж стрижня.

Знаючи значення деформації у двох різних перетинах стрижня, можна отримати два незалежні рівняння, розв'язок яких дасть невідомі силу та пару сил.

На такому принципі ґрунтується конструкція стрижня ТВ БСВАН (рис. 3).

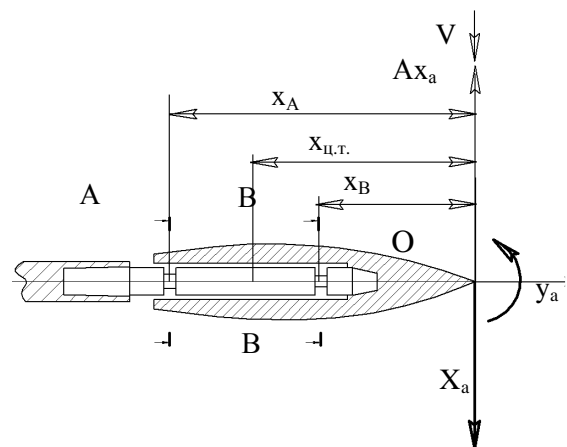


Рис. 3. Конструктивна схема ТВ БСВАН

У перетинах $A-A$ та $B-B$ (рис. 3) розміщені послаблені місця, які являють собою пружні елементи ТВ БСВАН.

Форму поперечного перетину $A-A$ показано на рис. 4, перетин $B-B$ має аналогічну форму за винятком геометричного розміру вздовж осі Ox_a .

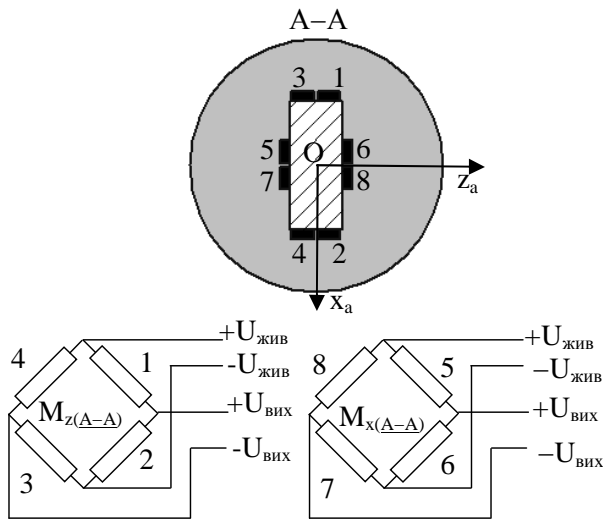


Рис. 4. Схема розміщення та підключення тензорезисторів у перетині $A-A$ ТВ БСВАН: 1–8 – розміщення тензорезисторів на пружному елементі

На стрижень у вказаних перетинах наклеєні тензорезистори, як показано на рис. 4, котрі сприймають деформації від моментів згину стрижня.

Тензорезистори збираються у схему вимірювального моста, який видає електричний сигнал залежно від деформації пружних елементів.

Процедура калібрування ТВ за відповідними компонентами дає можливість отримати моделі, які встановлюють зв'язок з моментом навантаження M_x , M_z та електричним сигналом з відповідного вимірювального тензометричного моста.

Щоб знайти невідомі сили та моменти, розглянемо схему навантаження ТВ БСВАН моментом M_z та силою X_a , як показано на рис. 3.

Для прикладу розглянуто площину $Ox_a y_a$.

Якщо вважати, що початок координат у точці O , то згинальні моменти у перетинах дорівнюватимуть:

$$\begin{cases} M_{z(A-A)} = M_z - X_a x_A; \\ M_{z(B-B)} = M_z - X_a x_B. \end{cases} \quad (1)$$

Аналогічно знаходимо згинальні моменти у перетинах $A-A$ та $B-B$ відносно осі Ox_a :

$$\begin{cases} M_{x(A-A)} = M_x - Z_a x_A; \\ M_{x(B-B)} = M_x - Z_a x_B. \end{cases} \quad (2)$$

Розв'язавши системи рівнянь (1), (2) відносно невідомих X_a , M_z , Z_a , M_x та замінивши згинальні моменти $M_{z(A-A)}$, $M_{z(B-B)}$, $M_{x(A-A)}$, $M_{x(B-B)}$ вимірними значеннями деформацій (напряга розбалансування тензометричного моста у вказаних перетинах $\Delta u_{M_{z(A-A)}}$, $\Delta u_{M_{z(B-B)}}$, $\Delta u_{M_{x(A-A)}}$, $\Delta u_{M_{x(B-B)}}$, отримаємо:

$$\begin{cases} X_a = \frac{\Delta u_{M_{z(B-B)}} - \Delta u_{M_{z(A-A)}}}{x_A - x_B}; \\ M_z = \frac{\Delta u_{M_{z(B-B)}} x_A - \Delta u_{M_{z(A-A)}} x_B}{x_A - x_B}; \\ Z_a = \frac{\Delta u_{M_{x(B-B)}} - \Delta u_{M_{x(A-A)}}}{x_A - x_B}; \\ M_x = \frac{\Delta u_{M_{x(B-B)}} x_A - \Delta u_{M_{x(A-A)}} x_B}{x_A - x_B}. \end{cases} \quad (3)$$

Для вимірювання моменту M_y використано пружний елемент, в якому момент кручення викликає згин поздовжніх пластинок (рис. 5, а).

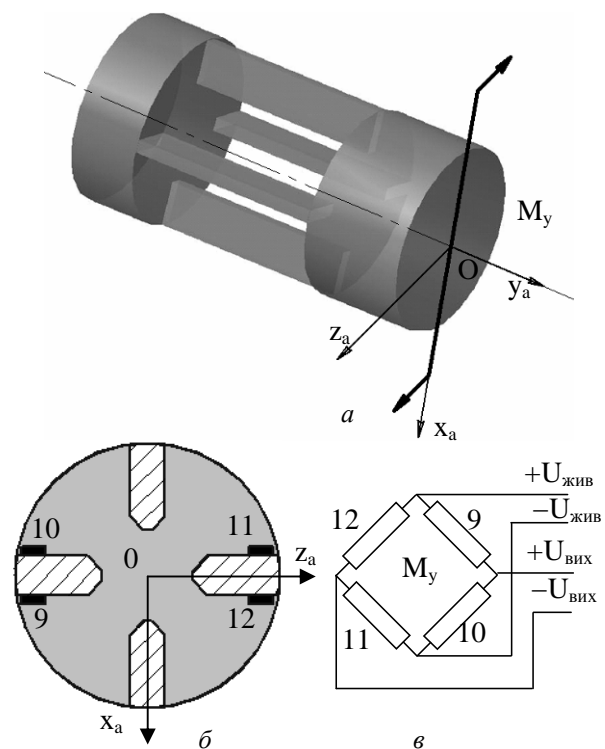


Рис. 5. Пружний елемент ТВ БСВАН для вимірювання моменту M_y ;

а – загальний вигляд пружного елемента;

б – схема розміщення тензорезисторів;

в – схема підключення тензорезисторів

За такої конструкції момент M_y призводить до S -подібного згину пластинок у тангенціальному напрямку.

Тензорезистори для вимірювання M_y розміщують у кореневій частині пластинок як показано на рис. 5, б.

У такому пружному елементі вплив інших компонентів, які викликають згин пластинок у радіальному напрямку, незначний.

Схему підключення тензорезисторів показано на рис. 5, в. У такій схемі підключення момент M_y визначається через напругу розбалансування моста:

$$M_y = \Delta u_{M_y}. \quad (4)$$

Конструктивно пружний елемент для вимірювання моменту M_y , розміщений між пружними елементами у перетинах $A-A$ та $B-B$.

Таким чином, отримана конструкція ТВ дає змогу проводити незалежне вимірювання п'яти компонентів від повного аеродинамічного навантаження, що діє на ОД.

У процесі створення проекту такої системи було розроблено технічне завдання, згідно з яким до ТВ БСВАН поставлені такі вимоги:

- кількість компонентів, що вимірюються, дорівнює 5;
- матеріал балки – сталь 30ХГСА з термообробкою, що забезпечує межу текучості 80–90 кг/мм²;
- довжина стрижня не має перевищувати 630 мм;
- діаметр стрижня становить до 60 мм;
- максимальне напруження під тензорезистором від відповідного компонента – 200 МПа.

Точку прикладання зусиль показано на рис. 2. Розрахункові максимальні навантаження за компонентами БСВАН, наведені у табл. 1, такі:

$$X_a = 730 \text{ Н};$$

$$Z_a = 320 \text{ Н};$$

$$M_x = 25 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_z = 60 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_y = 240 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

На основі розрахованих габаритних геометричних розмірів стрижня, геометричних розмірів поперечних перетинів послаблених місць за робочим кресленням виготовлено стрижень ТВ БСВАН (рис. 6).

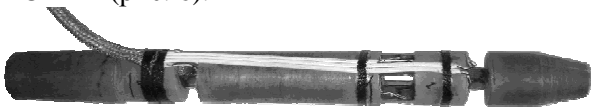


Рис. 6. Загальний вигляд стрижня ТВ БСВАН

Попереднє оцінювання метрологічних характеристик багатокомпонентної системи вимірювання аеродинамічних навантажень

На виготовлений стрижень ТВ БСВАН наклеєні у відповідних послаблених місцях тензорезистори, як показано на рис. 4, 5.

У цілому характеристики БСВАН визначаються характеристикою вимірювальних мостів

$$M_{z(A-A)}, M_{z(B-B)}, M_{x(A-A)}, M_{x(B-B)}, M_y.$$

Під такими характеристиками слід розуміти:

- фактори, що впливають на точність та визначають похибку вимірювань;
- гістерезисні ефекти пов'язані з механічними властивостями пружних елементів, тензорезисторів та основи, з допомогою якої вони наклеєні на пружний елемент;
- вплив асиметрії пружних елементів, самих тензорезисторів.

Для оцінювання названих характеристик проведено статичне навантаження та калібрування кожного з пружних елементів.

Під калібруванням розуміють процес визначення метрологічних характеристик БСВАН від ТВ до обладнання, що реєструє показання.

Структурну схему вимірювального тракту цього обладнання зображено на рис. 7.

Як підсилювачі сигналу використано тензопідсилювачі «SCAIME CMJ-CEB SERIES». В електронно-обчислювальну машину встановлено багатофункціональну плату аналогового виведення та цифрового введення-виведення інформації – «PCI-1002L», яка використана у цій схемі (рис. 7) як аналого-цифровий перетворювач.

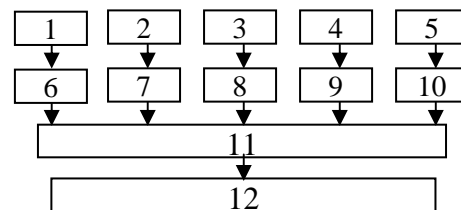


Рис. 7. Інформаційно-вимірювальне обладнання ТВ БСВАН:

1–5 – блок вимірювального моста $M_{z(A-A)}$, $M_{x(A-A)}$,

$M_{z(B-B)}$, $M_{x(B-B)}$, M_y ;

6–10 – підсилювач сигналу з вимірювального моста

$M_{z(A-A)}$, $M_{x(A-A)}$, $M_{z(B-B)}$, $M_{x(B-B)}$, M_y ;

11 – аналого-цифровий перетворювач;

12 – електронно-обчислювальна машина

Отже, отриманий сигнал проходив подальше оброблення у програмному середовищі «LabVIEW 8.5». Устаткування, використане для дослідження стрижня ТВ БСВАН, зображено на рис. 8.

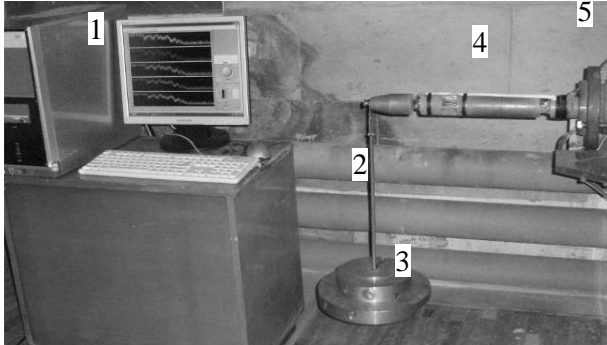


Рис. 8. Експериментальне обладнання для дослідження стрижня ТВ БСВАН:
 1 – електронно-обчислювальна машина;
 2 – платформа для навантаження стрижня;
 3 – еталонні гири;
 4 – стрижень ТВ БСВАН;
 5 – пристрій для кріплення стрижня 4

Час опитування, за який здійснено запис отриманого вихідного сигналу для вимірювального моста $M_{z(A-A)}$, $t = 0,3$ с, об'єм вибірки $n = 150$ (рис. 9).

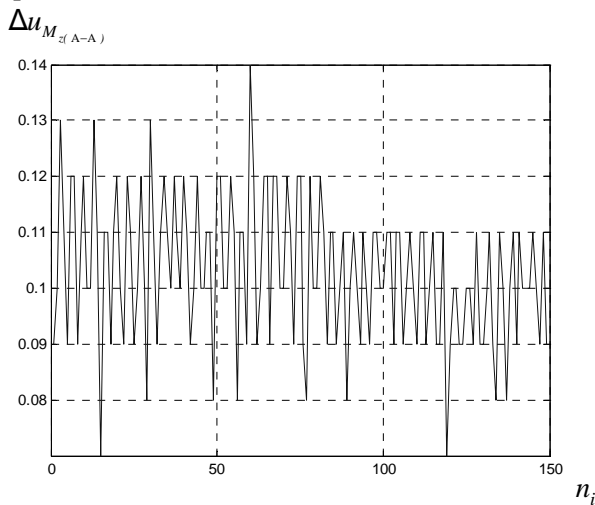


Рис. 9. Фрагмент запису вихідного сигналу для вимірювального моста $M_{z(A-A)}$:

$\Delta u_{M_{z(A-A)}}$ – напруга на виході з моста $M_{z(A-A)}$;
 n_i – кількість зафіксованих значень $\Delta u_{M_{z(A-A)}}$

Згідно з проведеною статистичною обробкою записаних даних вихідного сигналу побудовано експериментальні гістограми для записів $\Delta u_{M_{z(A-A)}}$.

Для прикладу на рис. 10 зображено отриману гістограму вимірювального моста $M_{z(A-A)}$ з нанесеною на неї теоретичною густиною розподілу за нормальним законом.

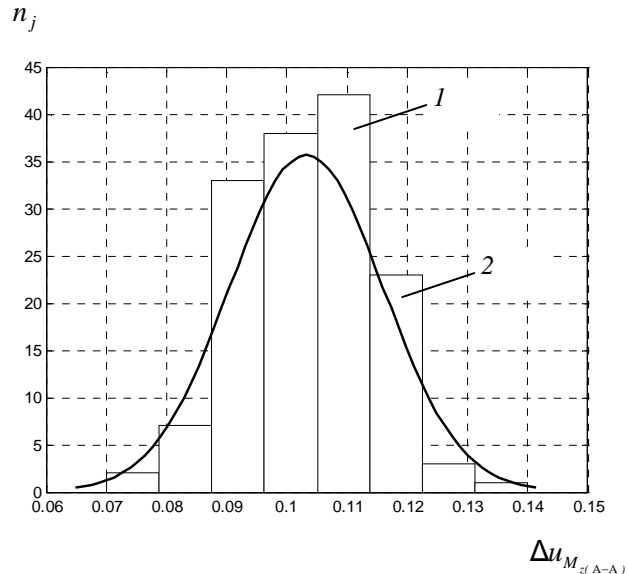


Рис. 10. Експериментальна гістограма та теоретичний розподіл вихідного сигналу для вимірювального моста $M_{z(A-A)}$:

1 – експериментальні гістограми для записів $\Delta u_{M_{z(A-A)}}$;
 2 – теоретичний розподіл за нормальним законом;

n_j – кількість значень $\Delta u_{M_{z(A-A)}}$, що потрапили у відповідний стовпчик гістограми

Як видно з рис. 10 вибіркового розподілу не відповідає нормальному закону розподілу та має певну асиметрію та ексцес. Це явище можна пояснити особливістю роботи тензопідсилювачів, аналого-цифрового перетворювача, котрі у сукупності впливають на вихідний сигнал.

Навантаження пружних елементів у перетинах $A-A$ та $B-B$ (вимірювальні мости $M_{z(A-A)}$, $M_{z(B-B)}$, $M_{x(A-A)}$, $M_{x(B-B)}$) виконано за схемою, як показано на рис. 3, пружного елемента вимірювального моста M_y (рис. 5).

Взаємний вплив компонентів сил та моментів прийнято визначати як будь-яку зміну показань певного компонента в разі навантаження ТВ іншими компонентами.

Напруження в елементах пружного елемента, на якому наклеєні тензорезистори для вимірювання окремого компонента, виникають не тільки від навантажень, на які вони розраховані, але й від інших компонентів навантаження.

У разі навантаження ваг тільки одним компонентом і на інших компонентах реєстратори показують наявність навантаження. Розроблена в ЦАГІ методика калібрування дає змогу врахувати взаємовплив компонентів [4].

Розглянемо методику, за допомогою якої можна отримати такі формули, які враховують взаємовплив між компонентами. У загальному випадку калібрувальна формула для будь-якого компонента має вигляд:

$$P = k_p (\Delta u - \Delta u_0) + \Delta P,$$

де

P – вимірювальне навантаження;

k_p – коефіцієнт підсилення;

Δu – показання під час дослідження;

Δu_0 – показання до дослідження;

$\Delta P = \sum N_i P_i + \sum N_{i,k} P_i P_k$ – сума взаємних впливів від інших компонентів.

Для визначення коефіцієнта підсилення k_p потрібно провести калібрування кожного компонента окремо без додаткових навантажень ТВ іншими компонентами.

Коефіцієнт k_p визначають за формулою

$$k_p = \frac{P_{\text{ет}}}{\Delta u - \Delta u_0},$$

де

$P_{\text{ет}}$ – навантаження, задане еталонними гирями.

Під час проведення калібрування без додаткових навантажень визначають взаємовплив типу $N_i P_i$.

Для визначення коефіцієнтів підсилення проводиться калібрування кожного компонента, якщо інші навантаження дорівнюють нулю. Для підвищення точності визначення коефіцієнтів підсилення калібрування проведено три рази з реєстрацією показань під час навантаження та розвантаження відповідного компонента (прямим та зворотним ходом).

Коефіцієнт підсилення визначають так. За останньою точкою калібрування знаходять наближене значення коефіцієнта. Далі знаходять різницю між розрахованим значенням за наближеним коефіцієнтом та прикладеним навантаженням ΔP_i . Точне значення коефіцієнта обчислюють за формулою

$$k_i = k_{i,\text{набл}} + \Delta k_i,$$

де

$$\Delta k_i = \frac{\Delta P_i}{(\Delta u - \Delta u_0)}.$$

Під час проведення калібрування навантаження задавали за одним із компонентів X_a , Z_a , M_x , M_z , M_y . При цьому показання реєструвались на всіх компонентах, що дало змогу отримати залежності взаємного впливу одного компонента на інший.

У результаті оброблення даних калібрування отримано для кожного компонента коефіцієнт k_i та визначено взаємний вплив компонентів вигляду $N_i P_i$.

За результатами проведеного калібрування ваг та відповідних розрахунків отримано калібрувальні формули компонентів БСВАН:

$$\begin{aligned} X_{a_k} &= 7,5157 X_a + Z_a 0,0409 + M_x 0,0823 + \\ &\quad + M_y 0,001198; \\ M_{x_k} &= 3,7008 M_x + X_a 0,1007 + M_z 0,0169 + \\ &\quad + M_y 0,00349; \\ Z_{a_k} &= 3,2627 Z_a + X_a 0,0229 + M_z 0,0372 + \\ &\quad + M_y 0,0051; \\ M_{z_k} &= 5,288 M_z + Z_a 0,01709 + M_x 0,0235 + \\ &\quad + M_y 0,001011; \\ M_{y_k} &= 2,1044 M_y + X_a 0,005371 + Z_a 0,001489 + \\ &\quad + M_z 0,008384 + M_x 0,003124, \end{aligned} \quad (5)$$

де

X_a, Z_a, M_x, M_z, M_y – величини, обчислені за формулами (3), (4).

Отримані калібрувальні формули (5) не враховують взаємного впливу компонентів вигляду $N_{i,k} P_i P_k$.

Подальше уточнення отриманих формул (5) заплановано провести з допомогою калібрувального пристрою, котрий даватиме можливість навантажувати кілька компонентів одночасно.

Крім розрахованих характеристик, пружні елементи ТВ БСВАН було досліджено за такими ознаками, як повзучість та гістерезис. Обидва явища суттєві при оцінюванні характеристик досліджуваної системи.

Під повзучістю розуміють зміну вихідного сигналу вимірювального моста в часі за фіксованого значення деформації, котра викликала цей сигнал та за фіксованих значень величин, які впливають з урахуванням на дрейф вихідного сигналу [5].

Зазвичай величину повзучості для тензометричних датчиків подають у відсотковому відношенні до значення вихідного сигналу Δu_{\max} за максимальної деформації тензорезисторів:

$$\Pi = \frac{\Delta u - \Delta u_0}{\Delta u_{\max}} 100,$$

де

Δu – вихідний сигнал навантаженого тензорезистора після витримки у часі τ ;

Δu_0 – вихідний сигнал відразу після навантаження;

Δu_{\max} – вихідний сигнал за максимальної деформації тензорезисторів.

Приклад дрейфу вимірювального моста $M_{z(A-A)}$ показано на рис. 11.

$(\Delta u - \Delta u_0)_{M_{z(A-A)}}$

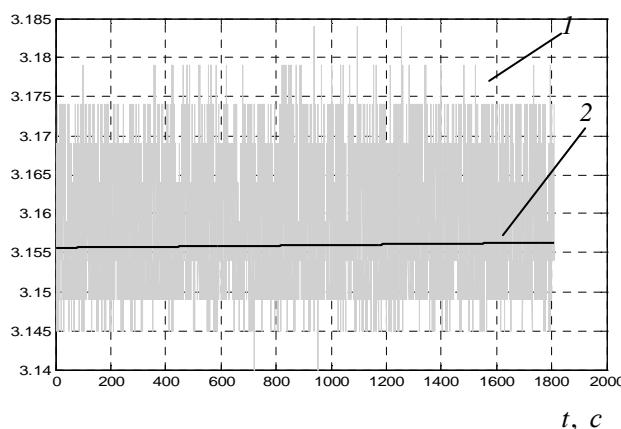


Рис. 11. Запис дрейфу вихідного сигналу з вимірювального моста $M_{z(A-A)}$:

1 – вихідний сигнал;

2 – згладжений сигнал

Згладжування вихідного сигналу виконано шляхом наближення методом найменших квадратів. Як поліноміальну функцію для наближення даних використано поліном першого степеня.

Час витримки такого навантаження зазвичай нормується в межах 30 хв.

Значення Π для подібних тензорезисторів повинне перебувати у межах 0,01...0,6 [6].

Як видно з таблиці, значення повзучості за вимірювальними мостами не перевищує 0,022 %.

Розрахункові значення повзучості та гістерезису за вимірювальними мостами БСВАН

Показник	$M_{z(A-A)}$	$M_{x(A-A)}$	$M_{z(B-B)}$	$M_{x(B-B)}$	M_y
$\Pi, \%$	0,022	0,012	0,0071	0,0023	0,002
$\Gamma, \%$	0,0448	0,048	0,1189	0,0805	0,112

Механічний гістерезис визначають як різницю вихідного сигналу Δu_n у разі збільшення (навантаження – прямий хід) та Δu_p у разі зменшення (зворотний хід) деформації, отриманої за однакових значень деформації деталі, на якій встановлено тензорезистор [6]:

$$\Gamma = \frac{\Delta u_p - \Delta u_n}{\Delta u_{\max}} 100.$$

Залежність прямого та зворотного ходу для вимірювального моста M_y показано на рис. 12, яка наочно демонструє наявність гістерезису.

Визначення гістерезису за вимірювальними мостами проведено при навантаженні кожного до номінального.

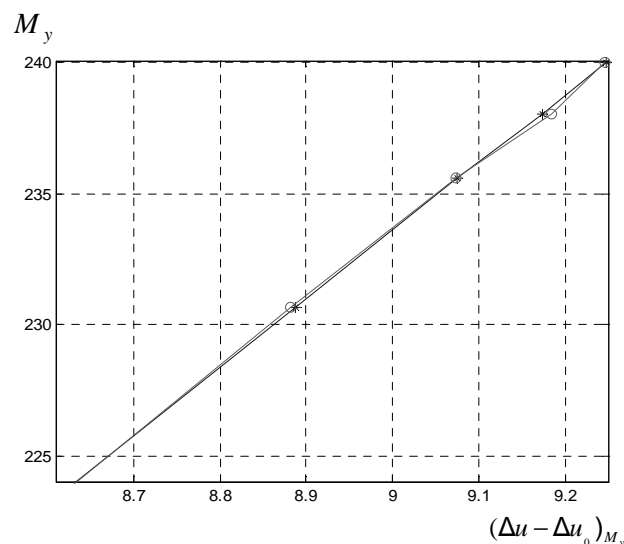


Рис. 12. Калібрувальна залежність для визначення гістерезису вимірювального моста M_y :

* – прямий хід;

o – зворотний хід

Для тензOMETричних датчиків зусилля параметр G може досягати значень до 0,5 %, для подібних тензорезисторів – 0,05–0,1.

Висновки

Розроблена система БСВАН натеper має конструкцію, що дає змогу проводити незалежне вимірювання п'яти компонентів повного навантаження.

У майбутньому заплановано збільшити кількість компонентів до шести.

Проведені дослідження та використання методи калібрування за оцінюванням взаємовпливу компонентів вигляду $N_i P_i$ у цілому дали позитивні результати.

За отриманими калібрувальними формулами (5) проведено перевірку, яка показала, що максимальна сумарна зведена похибка вимірювань по п'яти компонентах, виражена у відсотках до діапазону вимірювань, не перевищує значення 1 %.

Отримані дані за оцінюванням повзучості та гістерезису БСВАН загалом вказують на якісне виконання робіт з виготовлення стрижня ТВ та наклеювання тензорезисторів, а також на відповідність характеристик БСВАН до подібних вимірювальних датчиків зусиль.

У подальшому заплановано провести уточнення калібрувальних формул за допомогою спеціального калібрувального обладнання та використавши їх, отримати робочі формули для визначення повного аеродинамічного навантаження, що діє на ОД під час експерименту.

Література

1. Горлин С.М. Аэромеханические измерения / С.М. Горлин, И.И. Слезингер. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
2. Лавров М.Г. Автоматизированное конструирование внутримодельных аэродинамических тензометрических весов / М.Г. Лавров, Н.П. Левицкий, А.И. Постнов. – М.: ЦАГИ, 1983. – 30 с.
3. Дубов Б.С. Основы обеспечения качества испытаний в аэродинамических трубах / Б.С. Дубов. – М.: Бумажная Галерея, 2003. – 320 с.
4. Бертынь В.Р. Методика тарировок и обработки результатов испытаний на многокомпонентных весах тензометрического типа в аэродинамических трубах / В.Р. Бертынь, Н.А. Овсянников, И.И. Юшков // Технические отчеты Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: ЦАГИ, 1963. – 12 с.
5. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки / Н.П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 10.04.09.