

НОВА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦІЙ

Розглянуто розрахунки датчика деформацій за наступною методикою. Для вимірювання деформацій використовуються малопродуктивні методи та способи вимірювань. Аналіз літератури та експериментальних досліджень засобів вимірювання показує, що відомі засоби і методи вимірювання не задовольняють сучасним вимогам точності та швидкодії вимірювань.

Ключові слова: датчик деформацій, чутливість, похибка, прилад для вимірювання деформацій.

V.P. KVASNIKOV

National Aviation University

T.I. GANEVA

Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

NEW METHOD OF CALCULATION OF THE STRAIN SENSOR

The strain sensor calculations are considered according to the following methodology. For measuring the strain used are underproductive methods and ways of measurement. Analysis and experimental research of measurement shows that known tools and methods of measurement do not meet modern requirements of accuracy and performance measurements.

Keywords: strain sensor, sensibility, accuracy, the device for measurement of strain

Вступ

Вимірювання деформацій і механічних напружень широко застосовується при дослідженні фізичних властивостей матеріалів, міцністю випробуваннях різних деталей, машин, конструкцій транспортних засобів. Вимірювання деформацій використовують при технічній діагностиці, а також при вимірюванні фізичних величин, які перетворюються в деформацію пружного елемента. У більшості методів вимірювання механічних напружень датчиком сприймається абсолютне або відносне значення деформації, оскільки природною вхідною величиною застосовуваних при цьому перетворювачів є переміщення. Безпосередньо вимірювати механічні напруження можна термопружним, магнітопружним, ультразвуковим і фотопружним методами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Результати досліджень Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов [1], Е.П. Осадчий, А.И. Тихонов, В.И. Карпов [2], Л.С. Ильинская, А.Н.Подмарьков [3] присвячені дослідженню деформації і напруження в матеріалах, деталях машин і елементах конструкцій, а також розглянуті методи механічних випробувань матеріалів і обробки даних, а також проектування датчиків для вимірювання механічних величин електричними методами оцінки похибок і надійності датчиків.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка вимірювальних методів та засобів, які здатні забезпечувати високу точність і швидкодію в умовах вимірювання деформації у складних технічних системах.

Основна частина

Відомо, що чутливість пружних елементів може змінюватися в широких межах через зміну конструктивних коефіцієнтів чутливості. Кожному фіксованому значенню конструктивного коефіцієнта чутливості відповідає своє значення чутливості пружного елемента. Значення ж конструктивного коефіцієнта чутливості визначається не тільки типом пружного елемента, але й тим, яка зона деформації обрана в якості робочої, яка частина зони використовується в роботі, у якому місці пружного елемента вона розташована. Тому для визначеності доцільно конструктивний коефіцієнт чутливості вибирати рівним максимальному значенню його для відповідної зони. Це доцільно ще й тому, що при розрахунках простіше визначити максимальні значення напруження, які, визначають значення конструктивного коефіцієнта чутливості. Для ряду конструкцій пружних елементів (стержень, балка рівного опору, циліндрична оболонка, напівсферична оболонка) значення конструктивного коефіцієнта не залежить від координати перетину [1].

Враховуючи те, що вибір експериментальних методів і засобів дослідження деформацій і напружень у зв'язку із завданнями розрахунку на міцність залежить від особливостей поставленої задачі та її складності, умов вимірювання, необхідної точності, термінів отримання рішення. Отже, відносна ефективність кожного з розглянутих методів не може бути визначена для загального випадку, тому що залежить від різних умов, у тому числі від наявних засобів вимірювання і досвіду експериментатора (Таблиця 1).

Оскільки, розгляд методів і засобів дослідження деформацій і напружень не може бути обмежено оцінкою особливостей, характеристик і способів застосування кожного з них, так як при проведенні досліджень, особливо складних завдань, виникає необхідність оптимального поєднання експериментальних і розрахункових методів. Таким чином, дослідження проводять у двох напрямках: вивчення деформацій і напружень (розрахунки, визначення вимог до методів і засобів вимірювань, аналіз результатів вимірювань); розробка і застосування засобів вимірювань, що задовольняють поставленим вимогам. У зв'язку з цим при виборі методів дослідження (розрахунок, експеримент або їх поєднання) враховують їх можливості та обмеження, перевага має більш економічний метод, що дає необхідну точність з меншими спрощеннями вихідних даних з геометрії, навантажень, властивостям матеріалів. Різні методи можуть застосовуватися на різних етапах дослідження, дублюватися з метою їх взаємної відпрацювання та перевірки [6].

Розглянемо приклади комплексного використання експериментальних методів.

1. Вивчення процесів деформування і руйнування матеріалів в зразках і деталях, що проводиться шляхом вимірювання деформацій за допомогою приладів тензометричного типу, вимірювально-інформаційних систем і реєстрацій полів пружно-пластичних деформацій; визначають розрахункові характеристики міцності. Одержувані результати складають основу інженерних розрахунків на міцність.

2. Дослідження на тензометричних моделях з полімерного матеріалу, як найбільш зручний і простий метод визначення напружень, переміщень і сил при заданих навантаженнях в складних конструкціях, коли чисельний метод з яких-небудь причин не застосовується. При малих навантаженнях забезпечується відсутність спотворень форми, умов контакту в сполученнях і створюються деформації, зручні для вимірювань.

3. Визначення деформацій та напружень експериментальними методами в поєднанні з чисельним розрахунком в процесі проектування, виготовлення і пуску обладнання. На стадії проектування для вибору оптимального варіанту конструкцій і обґрунтування проекту застосовують тензометричні моделі з матеріалу з низьким модулем пружності і моделі поляризаційно-оптичного методу з визначенням силових і температурних напружень і переміщень; на тензометричних металевих моделях з відтворенням режимів роботи конструкцій перевіряють надійність вузлів ущільнення і оцінюють температурні напруження в залежності від режимів розігріву і розхолодження.

Таблиця 1

Величини, що визначаються при вимірюванні деформацій

Величини, що визначаються	Методи та умови вимірювань
Діючі навантаження, зусилля, напруження, переміщення в деталях машин і конструкціях залежно від експлуатаційних режимів роботи машини	Тензометрія, реєстрація сил, тисків, вібрацій і переміщень (переважно електричними методами). При випробуваннях в умовах експлуатації машин і конструкцій і з застосуванням фізичного моделювання
Напруження і переміщення в окремих місцях деталей машин і конструкцій (при відомих навантаженнях)	Вимірювання на моделях, тензометрія і застосування тензочутливих покриттів і індикаторів переміщень на натурних конструкціях. При лабораторних та стендових випробуваннях, в умовах експлуатації
Концентрація і розподіл напружень; вибір оптимальної форми деталі і конструкції за умовами міцності	Тензометрія на моделях і натурних деталях і конструкціях, тензочутливості покриття, поляризаційно-оптичний метод із застосуванням моделей
Залишкові зональні напруження (технологічні, монтажні)	Тензометрія і вимірювання переміщень з розрізанням деталі; рентгенотензометрія без розрізання деталі. В умовах лабораторних та стендових випробувань обладнання
Жорсткість деталей і вузлів машин, оцінка стану конструкції після монтажу	Тензометрія і вимірювання переміщень на моделях в лабораторних умовах і на натурних конструкціях при стендових та експлуатаційних випробуваннях, при статичній та динамічній навантаженні
Характеристики міцності матеріалів, вузлів машин і конструкцій при різних умовах їх роботи; вивчення механіки деформування і руйнування	Тензометрія, методи вимірювання полів деформації і вимірювання переміщень при різних умовах випробувань (по швидкості деформування, температурі, тривалості, повторності навантаження)

Отже, за конструктивний коефіцієнт чутливості приймемо максимальне його значення для даної зони деформацій. Для характеристики ж зміни цього коефіцієнта залежно від значення використовуваної в роботі зони деформацій і положення її на пружному елементі введемо коефіцієнт використання деформації.

Тоді функція перетворення «деформація — відносна зміна опори» може бути представлена в наступному виді

$$\varepsilon_R = C S \varepsilon, \quad (1)$$

де ε_R – відносна зміна опору тензорезистора;

ε – відносна деформація зони пружного елемента;

S – коефіцієнт тензочутливості;

C – коефіцієнт використання деформації.

Необхідно зауважити, що коефіцієнт використання деформації показує, яка частка максимальних деформацій зони використовується надалі в перетворенні. Оскільки використовується в роботі деформація прямо пропорційна чутливості (конструктивному коефіцієнту), тоді коефіцієнт використання деформації може бути розраховано, як відношення середніх чутливостей (середніх коефіцієнтів чутливості) до максимальної чутливості (максимальному конструктивному коефіцієнту)

$$C = \varepsilon_{cp} / \varepsilon_{max} = S_{cp} / S_{max} = B_{cp} / B_{max}, \quad (2)$$

де ε, S, B – використовується в роботі (робоча) відносна деформація, чутливість і конструктивний коефіцієнт пружного елемента, відповідні до робочої деформації;

$\varepsilon_{max}, S_{max}, B_{max}$ – максимальні деформація, чутливість і конструктивний коефіцієнт розглянутої зони деформацій пружного елемента [1, 2].

Крім того, еквівалентний коефіцієнт деформацій є середнім значенням середніх конструктивних коефіцієнтів зон деформацій, використовуваних під установку тензорезисторів

$$C = \frac{B_{1cp} + B_{2cp} + \dots + B_{ncp}}{n}, \quad (3)$$

де $B_{1cp} + B_{2cp} + \dots + B_{ncp}$ – середні конструктивні коефіцієнти зон деформацій пружного елемента;

n – число використовуваних у роботі пружних елементів зон.

Таким чином, як випливає з вираження $\varepsilon_{Rz} = nC_Z S \varepsilon$, значення еквівалентного коефіцієнта деформації характеризує ефективність перетворення деформації пружним елементом. Найбільша ефективність перетворення виходить у того елемента, у якого величина C_Z більше. Із цього погляду найбільш ефективною конструкцією є балка рівного опору вигину, затиснена одним кінцем, найменш ефективною — мембрана. Тому при проектуванні датчиків, коли мова йде про вибір пружного елемента або вибір зони деформацій, розрахунки еквівалентного коефіцієнта деформації є необхідним [2].

Структурна схема датчика деформацій може бути представлено двома послідовно з'єднаними вимірювальними перетворювачами: тензорезистором і вимірювальним ланцюгом (рис. 1).

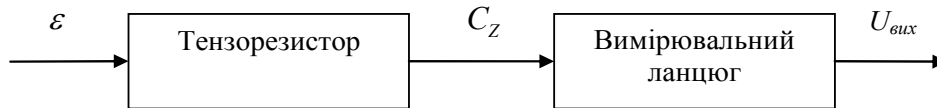


Рис.1. Структурна схема тензорезисторного датчика деформацій

Отже, основними характеристиками цих перетворювачів є чутливість. Чутливість тензорезистора (коефіцієнт тензочутливості) завжди більше одиниці й визначається властивостями матеріалу тензорезистора й здатністю його при деформуванні змінювати геометричні розміри (довжину й перетин) і питомий опір. Його значення можна визначити

$$S = (1 + 2\mu) + m, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

m – відносна зміна питомого опору, викликана дією відносної деформації рівна 1 [2, 3].

Похибка результату вимірювання обумовлюється багатьма характеристиками вимірювального процесу, в тому числі і похибкою засобів вимірювання. До числа факторів, що викликають похибку вимірювання, крім похибки самих засобів вимірювання, відносяться: похибки методу вимірювання, властивості каналів зв'язку, зміна властивостей об'єкта дослідження внаслідок установки на нього перетворювачів, що обумовлює відміну значення вимірюваної величини, яка впливає на вхід перетворювача, від значення, що підлягає визначенню при вимірюванні; суб'єктивні похибки, що вносяться оператором.

Похибка засобу вимірювання відображає тільки певні властивості самого засобу і обумовлюється структурними, конструктивними або схемними особливостями засобів, властивостями використаних в них матеріалів та елементів, особливостями технології виготовлення, регулювання та градування.

До основних характеристик і показниками засобів електротензометрії відносяться наступні.

Статичні характеристики: коефіцієнт перетворення перетворювачів і чутливість приладів, номінальні статичні характеристики перетворювачів, градувальні характеристики приладів, вихідний код, кількість розрядів коду у цифрових приладів, діапазони показань і вимірювань, поріг реагування та статичні похибки.

Динамічні характеристики: частотний діапазон вимірювань і частотні характеристики (амплітудно-частотна, фазочастотна) або перехідна (у тензометричних засобів для дослідження імпульсних процесів) і

допустимі відхилення від них, а також час встановлення показів.

Похибка датчика деформацій визначається похибкою тензорезистора й похибкою вимірювального ланцюга. У похибку тензорезистора входять наступні складові: повзучість, нестабільність, гістерезис, нелінійність, температурні похибки нуля й чутливості, похибка від розкиду коефіцієнта тензочутливості (тільки для неградуйованих тензорезисторів). Основна похибка тензорезистора δ_T звичайно лежить у межах $(0,5 \div 5)\%$ і залежить від типу тензорезистора й умов експлуатації. Основна похибка вимірювального ланцюга може бути значно менше й обумовлена в основному стабільністю й точністю напруги живлення й елементів вимірювального ланцюга. Якщо її позначити через $\delta_{\text{Ц}}$, то формулу для розрахунків основної похибки датчика деформацій можна представити

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{\text{Ц}}^2}. \quad (5)$$

Розрахунки датчика деформацій може бути проведений за наступною методикою:

По заданій у технічному завданні номінальній деформації $\varepsilon_{\text{ном}}$ і номінальному вихідному сигналу $U_{\text{вих}}$ визначають номінальну чутливість датчика деформацій

$$S_{\text{д ном}} = U_{\text{вих}} / \varepsilon_{\text{ном}}. \quad (6)$$

Для датчика механічних напружень

$$\varepsilon_{\text{ном}} = \sigma_{\text{ном}} / E, \quad (7)$$

де $\sigma_{\text{ном}}$ – номінальне механічне напруження;

E – модуль пружності матеріалу об'єкта вимірювання.

1. Відповідно до вимог технічного завдання вибирають схему вимірювального ланцюга.
2. По номінальній чутливості датчика й заданій напрузі живлення виконують розрахунки коефіцієнта тензочутливості, використовуючи співвідношення

$$S_{\text{д}} = U \frac{knC_Z S}{(k+1)^2}. \quad (8)$$

3. За значенням коефіцієнта тензочутливості з урахуванням вимог технічного завдання вибирають тип тензорезистора.

4. Вибирають перетин тензочутливого матеріалу й припустимий струм живлення.

5. По заданій напрузі живлення й припустимому струму розраховують опір тензорезистора й за схемою вимірювального ланцюга вхідний і вихідний опір датчика.

6. По формулі $W = \frac{nt + \sqrt{n^2 t^2 + 4ntl}}{4nt}$ [1] розраховують число витків тензорезистора й визначають геометричні розміри тензорезистора.

7. Якщо буде потреба виконують розрахунки компенсаційних опорів.

8. Визначають фактичний номінальний вихідний сигнал й фактичну чутливість датчика. Якщо буде потреба (для цілей уніфікації вихідного сигналу) змінюють напругу живлення датчика або вводять у ланцюг живлення додатковий опір.

9. Калібрований опір R_K розраховують по формулі $R_K = (R + 2R_{\text{Л}}) / nC_Z S \varepsilon$.

10. Визначають основну похибку датчика.

Фактична чутливість датчика (калібрований опір), основна похибка, напруга живлення, вхідний і вихідний опору датчика є основним вихідними характеристиками датчика деформацій [4, 5].

На рисунку 2 приведена типова структурна схема одного каналу приладу для вимірювання деформації. Вимірювальний міст живиться змінною напруження від генератора несучої частоти. Модульований сигнал несучої частоти з вимірювальної діагоналі моста потрапляє на вхід підсилювача. Посилений сигнал демодулюється фазочутливим демодулятором і через фільтр поступає на цифрове табло. Підсилювач і генератор несучої частоти живиться від блока живлення. Для перевірки чутливості служить блок визначення чутливості, який в деяких приладах здійснюється автоматично, а для попереднього врівноваження моста - пристрій. Для одночасного визначення деформації в багатьох точках тензостанції виконуються багатоканальними.



Рис. 2. Структурна схема каналу вимірювача деформації

Висновки

В даній статті запропонована методика розрахунку датчика деформації, проведено аналіз приладу для вимірювання деформації. Динамічні властивості датчиків деформації визначаються динамічними властивостями об'єкта вимірювання. Верхня гранична частота вимірювання деформацій досягає 100 кГц. Амплітудний діапазон датчиків деформації визначається межею міцності тензочутливого матеріалу й становить для дротових тензорезисторів на паперовій основі, а також плівкових і фольгових тензорезисторів від $0,005\% \div 0,02\%$ до $1,5\% \div 2\%$.

Література

1. Касаткин Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов // Справочное пособие. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.
2. Проектирование датчиков для измерения механических величин / [Осадчий Е. П., Тихонов А. И., Карпов В. И.]; под ред. Е. П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
3. Ильинская Л. С. Полупроводниковые тензодатчики / Л. С. Ильинская, А. Н. Подмарьков // Библиотека по автоматике. – М. - Л.: Изд-во «Энергия», 1966. – Вып. 189.
4. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Аш Ж. [пер. с франц.]. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
5. Левина Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Левина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1980.
6. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. — М.: Машиностроение, 1983. —248 с., ил. (Основы проектирования машин.)

References

1. Kasatkin B. S. E'ksperimental'ny'e metody' issledovaniya deformacij i napryazhenij / B. S. Kasatkin, A. B. Kudrin, L. M. Lobanov // Spravochnoe posobie. – K.: Naukova dumka, 1981. – 584 s.
2. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mehanicheskix velichin / [Osadchij E. P., Tichonov A. Y., Karpov V. Y.]; pod red. E. P. Osadchego. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 480 s.
3. Il'inskaya L. S. Poluprovodnikovyye tenzodatchiki / L. S. Il'inskaya, A. N. Podmar'kov // Biblioteka po avtomatike. – M. - L.: Izd-vo «E'nergiya», 1966. – Vy'p. 189.
4. Ash Zh. Datchiki izmeritel'ny'ch sistem / Ash Zh. [per. s francz.]. – M.: Mir, 1992. – 480 s.
5. Levina E. S. Izmeritel'ny'e preobrazovateli / E. S. Levina, P. V. Noviczkiy. – L.: E'nergoatomizdat, 1980.
6. Prigorovskij N. Y. Metody' i sredstva opredeleniya polej deformacij i napryazhenij: Spravochnik. — M.: Mashinostroenie, 1983. —248 s., il. (Osnovy' proektirovaniya mashy'n.)

Рецензія/Peer review : 16.11.2014 р.

Надрукована/Printed :28.10.2015 р.