

ПРИЛАДИ

УДК 681.2

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.*Національний технічний університет України "КПІ"***А.Г. Ткачук, аспір.***Житомирський державний технологічний університет***СПОСОБИ КРІПЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ
НА ОБ'ЄКТАХ ДОСЛІДЖЕННЯ**

У статті розглянуто способи кріплення п'єзоелектричних вимірювальних пристроїв на об'єктах дослідження та надано оцінку їх переваг та недоліків.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність. Для вимірювання динамічних процесів, на сьогоднішній день, найчастіше використовують п'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі (ПВП), тобто перетворювачі, у яких чутливим елементом є монокристалічні чи полікристалічні матеріали, що наділені п'єзоелектричними властивостями.

П'єзоелектричні датчики дозволяють вирішувати завдання різних видів: для вимірювання механічних параметрів (зусиль, тисків, прискорень, деформацій), теплових пристроїв (термодатчиків, датчиків теплових потоків), пристроїв для контролю складу, концентрації газів, вологості тощо. За своєю точністю та областями застосування вони в багатьох випадках перевершують датчики, що виконані за іншими фізичними принципами. ПВП використовуються в машинобудуванні, медицині, промислових системах вимірювання та управління, інерціальних системах навігації, авіації, геологічних дослідженнях, телекомунікації та в багатьох інших сферах людського життя.

Принцип роботи ПВП оснований на використанні явища прямого п'єзо ефекту, тобто здатності деяких матеріалів (п'єзоелектриків) генерувати електричний заряд під дією на них механічних сил.

Найбільш широко використовуються ПВП як датчики для вимірювання механічних коливань та ударів, а саме, в ролі акселерометрів і, нарівні з напівпровідниковими датчиками, практично повністю витіснили перетворювачі інших типів. Це пояснюється, перш за все, тим, що експлуатаційні характеристики датчиків даного типу є найкращими серед існуючих.

П'єзоелектричні акселерометри (ПА) вирізняються з-поміж всіх видів датчиків прискорення та вібрацій – широкими робочими частотними та динамічними діапазонами, малою чутливістю до впливу магнітних полів, лінійними характеристиками в цих широких діапазонах, надійністю конструкції та відносно тривалою стабільністю параметрів. Оскільки ПА є активними датчиками, які генерують пропорційний механічним коливанням електричний сигнал, то при їх експлуатації не потрібне джерело живлення. Відсутність рухомих елементів конструкції виключає можливість зносу й гарантує довговічність ПА. До того ж, сигнал, який видає акселерометр, можна інтегрувати з метою вимірювання й аналізу швидкості чи зміщення механічних коливань. Основними недоліками ПА є неможливість вимірювання постійної складової динамічного процесу.

П'єзоелектричні акселерометри як і п'єзорезистивні, є датчиками контактного типу, тобто знаходяться у механічному контакті з об'єктом дослідження. Особливістю такого зв'язку є те, що він безпосередньо впливає на вихідний сигнал акселерометра. Тому дослідження способів кріплення ПА на об'єктах дослідження задля підвищення точності їх вимірювань є, безумовно, актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені дослідження показали, що розвиток теорії п'єзоелектричних перетворювачів пов'язано з іменами: Г.Тірстена, Л.Бергмана, В.В. Малова, А.А. Андреева, В.В. Ключова, В.В. Лаврінченко, О.П. Крамарова, А.Є. Колесникова, П.О. Грибовського, В.М. Шарапова та ін.

Інтенсивно проводять дослідження ПВП у багатьох відомих університетах і науково-технічних центрах: Масачусетський технологічний інститут, Черкаський державний технологічний університет, ННЦ "Інститут метрології" (м. Харків), ЦНДІ "Азимут" (м. Санкт-Петербург), ВВІАУ ім. проф. М.Є. Жуковського (м. Москва).

У літературі [1–3 та ін.] надано лише деякі відомості про п'єзоелектричні акселерометри, а саме: види їх конструкцій, найпоширеніші п'єзоелементи, галузі застосування датчиків даного типу та деякі характеристики. Майже відсутня інформація про види похибок акселерометра, шляхи їх зменшення чи ліквідації. Як наслідок, змістовної інформації про способи кріплення датчиків прискорення і вібрації на об'єктах дослідження та впливу способів цих кріплень на вихідні покази ПА не має.

Метою даної роботи є аналіз способів кріплення п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів на об'єктах дослідження й оцінка їх переваг та недоліків.

Викладення основного матеріалу дослідження. П'єзоелектричний ефект широко використовується для дослідження різних механічних процесів. Принципова можливість використання п'єзоелементу для дослідження механічних коливань зображена на рисунку 1. На даній схемі п'єзоелемент 1, з електричною віссю X , направленою вертикально, слугує одночасно пружним елементом, який знаходиться під попереднім натягом внаслідок впливу сили тяжіння інерційного елемента 3. Під час вібрації у вертикальному напрямі до основи 4, на металевих прокладках 2, розташованих на гранях, перпендикулярних до електричної осі кристала, будуть з'являтися знакозмінні заряди, які пропорційні діючим силам i , як наслідок, прискоренню.

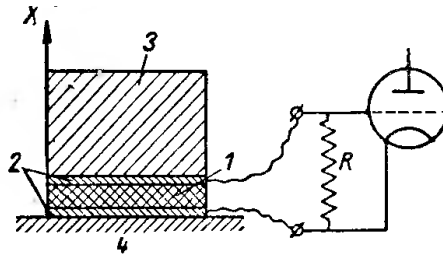


Рис. 1. Принципова схема п'єзодатчика: 1 – п'єзоелемент; 2 – металеві прокладки; 3 – інерційний елемент; 4 – основа

Широкі можливості ПВП можуть бути реалізовані лише за дотриманням правильних методів використання перетворювачів у складних умовах експлуатації.

На точність вимірювання впливають такі фактори: спосіб та якість кріплення перетворювача на об'єкті, вібрація вивідного кабелю, температура, змінні електричні та магнітні поля, механічні деформації, акустичні шуми, перепади тиску, проникнення до струмоведучих елементів ПВП вологи чи мастила.

Принципи, за яких ВП працює найкращим чином:

- 1) акселерометр має відтворювати, наскільки це можливо, рух об'єкта дослідження;
- 2) встановлення акселерометра має мінімально впливати на коливання досліджуваної конструкції;
- 3) власна резонансна частота акселерометра не повинна впливати на співвідношення вихідного сигналу акселерометра до коливань, які він сприймає.

Для реалізації вказаних принципів необхідно виконувати такі головні умови, а саме: закріплення ПВП має бути максимально жорстким, маса акселерометра та конструкції кріплення мають бути малими, порівняно з масою об'єкта дослідження.

Під час встановлювання перетворювача на досліджуваний об'єкт часто використовують різні перехідники. Приклади кріплення ВП надано на рисунку 2.

Якщо неможливо зробити отвори для кріплення на поверхні об'єкта, тоді для закріплення перетворювача рекомендується спосіб, який зображений на рисунку 2, б. Даний спосіб реалізовується шляхом приклеювання на об'єкт дослідження невеликої планки з отворами для кріплення ВП.

На рисунку 3 зображені еквівалентні механічні схеми перетворювача, що закріплені на об'єкті з та без перехідника. За умови наявності перехідника утворюється двомасова система, а без нього – одномасова.

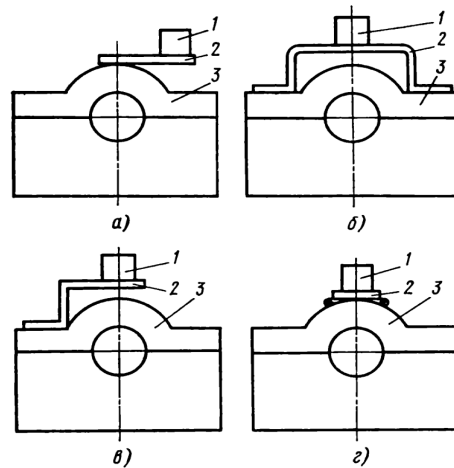


Рис. 2. Приклади кріплення п'єзоелектричного перетворювача на підшипнику:
 а – на консольній пластині; б – на П-подібному переходнику; в – на Г-подібному переходнику; з – на приклеєному чи привареному фланці; 1 – перетворювач; 2 – перехідник; 3 – підшипник

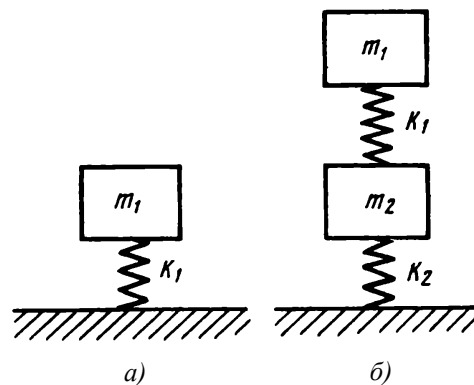


Рис. 3. Еквівалентні механічні схеми перетворювача, закріпленого без перехідника (а) та з перехідником (б): m_1 – маса інерційного елемента; m_2 – маса перехідника;
 k_1 – пружність п'єзоелемента; k_2 – пружність перехідника

Якість кріплення ВП визначається методом його кріплення, оптимальним значенням обертаючого моменту кріплення, з яким перетворювач закріплений на об'єкті та якістю й точністю виготовлення, власне, отвору для кріплення.

На рисунку 4 представлено схеми кріплення ВП на об'єкті, а саме: з опорою на буртик (рис. 4, а), з упором на торець (рис. 4, б); через прокладку (рис. 4, в) та найчастіше – з опорою на буртик та гвинтом через центральний отвір (рис. 4, з).

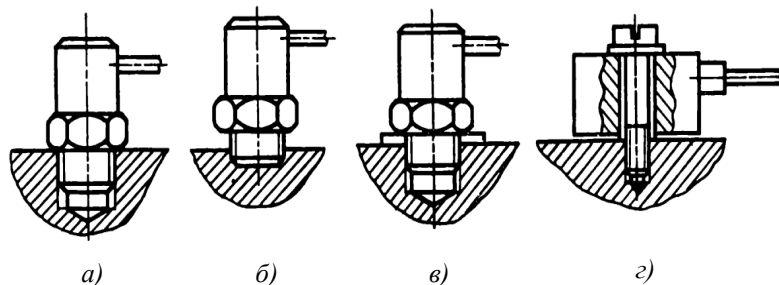


Рис. 4. Схеми кріплення перетворювачів на об'єкті: а – з опорою на буртик; б – з упором на торець; в – через прокладку; з – гвинтом

Кожен спосіб кріплення має свої переваги та недоліки. Якщо використовується кріплення з упором на торець, то в такому випадку значно змінюється відносний коефіцієнт поперечного перетворення. У деяких випадках він може зростати на 4–20 %.

Під час кріплення перетворювача з опорою на буртик результати є значно кращими за попередні. Але й за такого способу кріплення зміна коефіцієнта перетворення може становити 4–5 %. Однак, коли якість отвору для кріплення погана (заглиблення, забоїна та ін.), то відносний коефіцієнт поперечного перетворення зросте в 2–3 рази.

Поверхня, на яку встановлюють датчик, має бути максимально гладкою та чистою, а розбіжності між віссю чутливості акселерометра та напрямком вимірювань мають бути мінімальними [2].

Коли на конструкції об'єкта виконати свердлування отвору неможливо чи поверхня не є плоскою, а перехідники П- та Г-типів не можуть бути використані через підвищену точність вимірювання, тоді використовують з'єднання за допомогою клею, бджолиного воску, двосторонньої липкої стрічки, магніту тощо. Коротка характеристика даних способів кріплення представлена у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики способів кріплення ПВП на об'єкт дослідження

№ з/п	Кріплення	Резонансна частота	Температура	Маса датчика	Необхідність попередньої підготовки поверхні
1	Гвинт/шпилька	+++	+++	+++	+++
2	Клей	+++	+++	+++	++
3	Бджолиний віск	++	+	++	+++
4	Двостороння липка стрічка	+	++	+	+++
5	Магніт	++	+++	+	+++

Позначення: + – низьке; ++ – середнє; +++ – високе

Під час використання клею поверхня об'єкта має бути очищена відповідно до вимог виробника клею. Шар клею має бути максимально тонким, бо цей шар є еквівалентним пружині великої жорсткості. Здебільшого використовуються тверді види клею: терморективний чи каталітичний.

У даному випадку резонансна частота кріплення f_c визначається за формулою:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_c}{m}},$$

де K_c – комплексна жорсткість стиснення з'єднання за допомогою клею; m – маса датчика та кріплення.

Комплексну жорсткість стиснення з'єднання за допомогою клею K_c знаходять таким чином:

$$K_c = E(1 + i\eta) A/t,$$

де E – комплексний модуль пружності для клею (модуль Юнга); η – тангенс кута втрат при стисненні для клею; A – площа з'єднання; t – товщина шару клею.

Інші альтернативні види з'єднання ВП та об'єкта дослідження за допомогою бджолиного воску, двосторонньої липкої стрічки, магніту тощо, характеризуються значними обмеженнями по амплітудному та частотному діапазонах. До того ж такі способи з'єднання розраховані на перетворювачі малих габаритів та є неефективними в екстремальних умовах експлуатації.

Як з'ясувалося, основними способами кріплення ПА на об'єктах дослідження є приклеювання та з'єднання за допомогою шпильки-гвинта. Однак в обох випадках, для зменшення впливу на ПВП змінного електричного поля необхідно ізолювати від корпусу всі його струмоведучі елементи чи встановити ПВП на об'єкті через ізоляційну прокладку.

Перехідники необхідно приклеювати через тонкі прокладки із склотекстоліту (0,5–1,0 мм) епоксидним клеєм, наприклад, ВК-9 чи К-300.

При закріпленні перетворювачів через ізоляційну прокладку електрична похибка на вході вимірювального пристрою зменшиться приблизно в 100 разів. Способи електричної ізоляції ПВП від об'єктів представлено на рисунку 5.

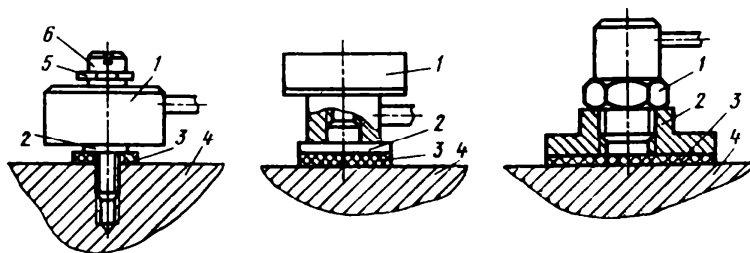


Рис. 5. Способи електричної ізоляції ПВП від об'єктів: 1 – перетворювач; 2 – перехідник; 3, 5 – ізолятори; 4 – об'єкт; 6 – гвинт

Джерелом виникнення похибок при вимірюванні ПА може бути також поява електростатичного заряду на внутрішній ізоляції вивідного кабелю. Це явище спостерігається за наявності великих переміщень кабелю і у більшості випадків проявляється на низьких частотах. Для зменшення цього явища кабель жорстко закріплюють на об'єкті. Також безпосередній вплив на ізоляцію має зміна температури. При зниженій температурі підвищується жорсткість ізоляції вивідного кабелю, збільшується допустимий кут його згину й небезпека пошкодження зовнішньої оболонки, а при підвищеній – кабель може просто розплавитись.

Висновки:

1. Для вимірювання динамічних процесів, на сьогоднішній день, найчастіше використовують п'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі.
2. Широкі можливості ПВП можуть бути реалізовані лише за дотриманням правильних методів використання перетворювачів у складних умовах експлуатації.
3. Закріплення ПВП на об'єкті дослідження має бути максимально жорстким, маса акселерометра та конструкції кріплення мають бути малими, порівняно з масою об'єкта дослідження.
4. Найоптимальнішим способом кріплення ПВП на об'єкті дослідження є кріплення за допомогою гвинта чи шпильки.
5. Якщо неможливо зробити отвори для кріплення на поверхні об'єкта, тоді для закріплення перетворювача рекомендується використовувати перехідники різних типів чи менш ефективні способи кріплення (приклеювання).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень : підручник / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2002. – 264 с.
2. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара : справочник. В 2-х кн. – Кн. 2 / под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1978. – 439 с.
3. Шарпов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарпов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарпова ; под ред. В.М. Шарпова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- гравіметричні системи та гравіметри;
- прилади та методи вимірювання механічних величин;
- комп'ютеризовані інформаційні системи.

ТКАЧУК Андрій Геннадійович – аспірант кафедри АіКТ Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання прискорень, вібрацій;
- п'єзоелектричні акселерометри;
- системи автоматизації.

Подано 22.11.2011

