

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 681.2

¹Безвесільна О.М., д.т.н.²Ступак А.Г.

ОГЛЯД МАТЕРІАЛІВ СТРУНИ ТА СПОСОБІВ КРІПЛЕННЯ ЇЇ КІНЦІВ ПРИ ПОБУДОВІ СТРУННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

¹Національний технічний університет України "КПІ"²Житомирський державний технологічний університет

У статті розглянуто основні способи кріплення кінців струни датчика та основні види матеріалів, які використовуються для струн. Приведено вимоги до вибору матеріалу струн, а також вимоги щодо якості кріплення кінців струни.

Ключові слова: струнний датчик, способи кріплення.

Постановка проблеми

У даний час в практику технічних вимірювань все більш широко впроваджуються вимірювальні перетворювачі різних фізичних величин у частоту. Розробники інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) і АСУТП воліють використовувати вимірювальні перетворювачі з частотним вихідним сигналом замість традиційних перетворювачів з амплітудно-модульованим вихідним сигналом у вигляді напруги або струму.

Ця обставина не є даниною моді у техніці, а обумовлена низкою суттєвих переваг частотних перетворювачів (датчиків), сутність яких викладається нижче: 1. Точність відтворення еталона частоти є найвищою серед усіх еталонів відомих фізичних величин; 2. Побудова інформаційно-вимірювальних систем з використанням вимірювальних перетворювачів з частотно-модульованим сигналом дає можливість виключити зі складу системи аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 3. Перетворювач типу частота-код є універсальним і у поєднанні з комутаторами може обслуговувати значну кількість вимірювальних перетворювачів різних фізичних величин у частоту; 4. При використанні частотно-модульованого сигналу суттєво спрощуються вимоги до ліній зв'язку щодо стабільності опору, величин паразитних ЕРС і перешкодозахищеності; 5. Завадостійкість частотно-модульованого сигналу значно вище завадостійкості амплітудно-модульованого сигналу, що у ряді випадків має досить істотне значення при реалізації ІВС метрологічного забезпечення АСУТП.

З наведеного короткого аналізу переваг вимірювальних перетворювачів різних фізичних величин у частоту випливає, що їх розробка і впровадження в ІВС і АСУТП є досить доцільними і можуть дати значний технічний і економічний ефект.

Тому у даний час як у нашій країні, так і за кордоном ведуться інтенсивні роботи по створенню частотних вимірювальних перетворювачів, застосування яких у поєднанні з цифровою обчислювальною технікою дозволило б реалізувати високоточні і надійні ІВС [6, с.5].

Від вибору геометричних параметрів струн, механічних властивостей їх матеріалу, форми поперечного перерізу, способу закріплення їх кінців у значній мірі залежать рівень флуктуації частоти струнного автогенератора, а отже метрологічні характеристики струнних перетворювачів.

Тому дослідження способів кріплення кінців струн, вибір матеріалу з яких вони виготовляються задля підвищення точності їх вимірювань є, безумовно, актуальними.

Аналіз досліджень

Проведені дослідження показали, що великий внесок у дослідженнях щодо способу закріплення кінців струн, вибору матеріалів для їх виготовлення було зроблено низкою видатних вчених: Є.А.Карцевим, А.М. Лозинською, В.П. Коротковим, Є.П. Осадчим та іншими.

Інтенсивно проводять дослідження по створенню струнних вимірювальних перетворювачів у багатьох великих науково-технічних центрах, провідних інститутах та університетах: національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", севастопольський національний технічний університет, федеральне державне унітарне підприємство "Науково-дослідницький інститут "ПОЙСК", інститут фізики Землі ім. О. Ю. Шмідта РАН та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що у літературі недостатньо висвітлено питання вибору матеріалу струни та способу кріплення її кінців.

Мета роботи: аналіз способів кріплення кінців струни; надання рекомендацій щодо вибору матеріалу струни та способу закріплення її кінців.

Основна частина

Струна є найбільш відповідальною ланкою у ланцюзі перетворення сили її натягу у частоту поперечних коливань. Основними питаннями, які необхідно вирішити при виборі струни для конструювання датчика, є наступні: вибір конструкції струни і способу її закріплення в пружному елементі датчика; вибір матеріалу струни.

Вибір конструкції струни. Конструкції струни і способи їх закріплення вдосконалювали в міру розвитку струнних перетворювачів. Перші струнні датчики були дуже недосконалі. Так, наприклад, перший датчик М. М. Давиденкова представляв собою струну, натягнуту між фортепіанними кілками, укріпленими на об'єкті вимірювання. Недосконалість конструкції струни і способу її кріплення призводило до нестабільності показань датчика, непостійності довжини струни. На рис. 1 наведені різні способи кріплення струн, застосовувані в струнних датчиках.

Кріплення струни в отворі за допомогою гвинта (рис. 1, а), дуже просте у конструктивному виконанні, має ряд істотних недоліків: мінливість довжини струни в процесі коливання, нерівномірний розподіл напружень і вигин струни в місці кріплення. Це призводить до нестабільності частоти власних коливань.

Використання кріплення струни між площинами розрізаного конуса (рис. 1, б) дозволяє усунути вигин струни в місці закріплення, але, зважаючи на труднощі підгонки конусного отвору з клином, важко добитися високої стабільності натягу струни. Крім того, закручування струни при закріпленні спотворює форму коливань і може призвести до двозначності частоти.

Удосконаленням цього способу став спосіб кріплення струни в ніпелі (рис. 1, в). При цьому способі струну спочатку закріплюють у конічну втулку, конструкція якої була описана вище, а потім пропускають в ніпель і зачеканюють червоною міддю. Місце стикування ніпеля з конічною втулкою обпаяють. Недоліком даного способу є його конструктивна і технологічна складність.

Четвертий спосіб кріплення струни, наведений на рис. 1, г, – кріплення струни в призмі. Недолік його – вигин струни в місці виходу з кріплення, що призводить до зміни її довжини в процесі роботи.

Результатом подальшого розвитку способів кріплення було щілинне кріплення струни. Недоліком даного способу є наявність високих напруг в місці закріплення струни та виходу її з щілини. З метою зниження напружень було запропоновано покращене кріплення (рис. 1, д) круглої струни з потовщеними кінцями в місці закріплення. Струна затискається гвинтом через допоміжну розрізну втулку. Поверхні губок в місці закріплення допрацьовують під зовнішній діаметр втулок. Кріплення дозволило створити датчики з високими метрологічними характеристиками[3, с.289].

Найкращим способом кріплення стрічкової струни в даний час є затиск між добре обробленими і підігнаними паралельними площинами (рис. 1, е). Струна в місці закріплення переходить в широку лопаточку, яка закріплена на площині за допомогою притискної планки і двох гвинтів. Це кріплення дозволяє значно збільшити стабільність натягу струни протягом тривалого часу. Кріплення струн за допомогою пайки м'якими і твердими припоями і зваркою має досить високий дрейф частоти.

При розробці нових конструкцій кріплення струн слід враховувати наступні міркування:

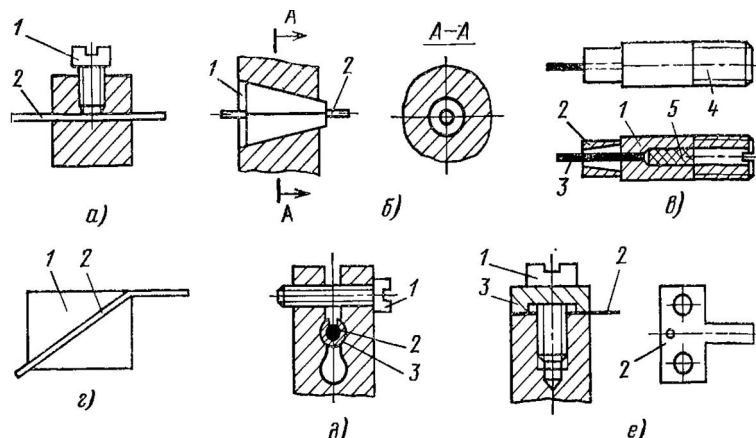


Рис. 1. Способи кріплення струн: а – в отворі (1 – гвинт; 2 – струна); б – розрізаним конусом (1 – розрізаний конус; 2 – струна); в – в ніпелі (1 – ніпель; 2 – конічна втулка; 3 – струна; 4 – контргайка; 5 – мідь); г – в призмі (1 – призма; 2 – струна); д – щілинне (1 – гвинт; 2 – струна; 3 – втулка); е – між площинами (1 – гвинт; 2 – струна; 3 – планка).

1. Площа, на якій кріплять струну, повинна бути досить великою, щоб забезпечувати надійне кріплення струни без зминання;

2. Довжина коливальної частини струни при відхиленні її в обидві сторони від середнього стану повинна бути строго однаковою. Наприклад, при кріпленні струни між площинами це забезпечується шліфуванням і поліруванням поверхні, перпендикулярної до осі струни, в зібраному кріпленні перед установкою струни.

Вигин струни в точці виходу з кріплення не допускається, оскільки при цьому не виконується попередня вимога і виникають небажані напруги згину в струні.

3. Не рекомендується використання порогів за зразком музичних інструментів, по-перше, за вигину струни на поріжку, по-друге, через можливість прослизання струни, тобто появи значного гістерезису;

4. Фізичні властивості матеріалу струни не повинні значно відрізнятися від властивостей матеріалу кріплення. При різних температурних коефіцієнтах лінійного розширення струни і елементів кріплення спостерігаються ефекти «вповзання» і «виповзання» струни при зміні навколишньої температури. Крім того, кріплення значно більш м'яким матеріалом буде «розбите» при коливаннях струни, кріплення ж твердим матеріалом зімне струну;

5. Конструкція кріплення повинна забезпечувати простоту операції закріплення струни, центрування струни, рівномірність розподілу по ній напруг;

6. Повинно бути забезпечено надійне зчленування кріплення з корпусом та іншими деталями датчика, при магнітоелектричному збудженні повинна бути передбачена ізоляція, що деформується, одного або більше місць кріплення струни;

7. Перед закріпленням струна повинна перебувати під робочим натягом можливо тривалий час, величина цього натягу при закріпленні не повинна суттєво змінюватися;

8. Після виготовлення вузлів кріплення бажано піддати їх температурному старінню при 200–100 °С протягом 4–8 год для зняття механічних напружень.

Вибір матеріалу струн. Для забезпечення необхідної точності, чутливості та надійності струнних датчиків необхідно вибрати відповідний матеріал струни. Цей вибір визначається як умовами використання датчика, так і способами збудження коливань струни[4, с.143].

Для виготовлення струн використовують різноманітні матеріали. У залежності від режиму роботи струни і методу збудження коливань на вибір матеріалу накладають ряд обмежень.

У переважній більшості розроблених струнних перетворювачів використовуються струни з вуглецевої сталі, вольфраму, елінвара, олов'яно-цинкової і берилієвої бронзи круглої і прямокутної форми поперечного перерізу. Широке застосування в струнних перетворювачах отримали приладові розтяжки з бронз Бр ОЦ4-3, БрБ2, платино-срібного сплаву ПлСр-20, кобальтового сплаву К40НХМВ і вольфраморенієвого і молібденоренієвого сплавів ВР-20 і МР47-ВП[6, с.29].

Для роботи у режимі заданої довжини струни використовують, як правило, з того ж матеріалу, з якого виготовлений пружний елемент. Це викликано необхідністю отримання мінімальної температурної похибки. Матеріал пружного елемента вибирають, виходячи з умов експлуатації датчика. При використанні магнітоелектричних перетворювачів для збудження коливань необхідно звертати увагу на вибір матеріалу для електричної ізоляції струни, тому що в цьому режимі струна дуже чутлива до нестабільності її закріплення. Найчастіше у режимі заданої сили застосовують феромагнітні струни у вигляді стрічки і електромагнітні перетворювачі для збудження коливань струн. У ранніх розробках в якості струни використовували круглий сталевий дріт діаметром 0,15–0,20 мм з тимчасовим опором при розтягуванні 2400–2800 Н/мм², довжиною 60–100 мм, з частотою коливань 700–2000 Гц. В сучасних датчиках часто застосовують також сталеві стрічки, що піддаються більш надійному кріпленню, товщиною 0,05–0,1 мм, шириною 0,5–2 мм, з частотою коливань 3000–20 000 Гц.

Для роботи в режимі заданої сили використовують струни з малими величинами пружної післядії, високим значенням тимчасового опору при розтягуванні, малим питомим електричним опором матеріалу. Найбільш широко застосовують берилієву бронзу, вольфрамові сплави і залізо-кобальтові сплави.

Бронзові струни використовують при малих напругах. Малий питомий електричний опір бронзи дозволяє підвищити стабільність струнних генераторів.

Вольфрамові сплави мають малий коефіцієнт лінійного розширення, високу межу міцності, але висока густина ρ не дозволяє отримати високі значення власної частоти на одиницю довжини порівняно з іншими матеріалами. У зв'язку з цим великий інтерес представляють

матеріали, що володіють малою ρ : титан, алюміній, плавлений кварц, покритий шаром срібла, кремній і ін.. Дані матеріалів, що використовуються для струн, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Дані матеріалів, що використовуються для струн[1]

Матеріал струни	Марка	Густина, г/см ³	Межа міцності, кг/мм ²	Модуль пружності, кг/мм ²	Питомий опір, Ом/мм ²	Температурний коефіцієнт подовження, 1/град
Сталь вуглецева	–	7,8	200–300	20000	0,5–0,8	12×10^{-6}
Вольфрам	–	19,3	320–400	39000	0,055	4×10^{-6}
Бронза берилієва	Бр.Б2	8,23	100–120	12000	0,068	$15,4 \times 10^{-6}$
Бронза олов'яно-цинкова	Бр.ОЦ4-3	8,5	115	11500	0,09	$15,5 \times 10^{-6}$
Платино-срібний сплав	Пл.Ср.20	–	200	17500	0,3	$14,5 \times 10^{-6}$
Сплав	K40HMB	8,25	300	21000	1,0	15×10^{-6}

Загальні вимоги до вибору матеріалу для струн наступні: 1) малі пружна післядія, густина, питомий електричний опір; 2) високі значення межі міцності при вібраційних навантаженнях; 3) певні значення коефіцієнта лінійного розширення і температурного коефіцієнта модуля пружності (або малі, або рівні аналогічним температурним коефіцієнтам пружного елемента датчика); 4) високе значення коефіцієнта – чутливості до сили при заданих геометричних розмірах струни; 5) високий питомий коефіцієнт – значення власної частоти на одиницю довжини.

Серед наведених у таблиці 1 матеріалів, для побудови високоточних струнних перетворювачів найчастіше використовують берилієву бронзу, тому що берилієві бронзи є унікальними сплавами по сприятливому поєднанню в них хороших механічних, фізико-хімічних і антикорозійних властивостей. Ці сплави після гартування і облагороджування мають високу межу міцності, пружності, текучості і втоми, відрізняються високою електропровідністю, теплопровідністю, твердістю, володіють високим опором повзучості, високою циклічною міцністю при мінімальному гістерезисі, високим опором корозії і корозійної втоми. Нарешті, ці сплави є морозостійкими, немагнітними і не дають іскри при ударах. Тому берилієві бронзи застосовуються для виготовлення пружин і пружних деталей відповідального призначення, зокрема для виготовлення плоских пружин, мембран, деталей часових механізм, пружин Бурдона та інші.

Висновки

1. Розглянуто основні способи кріплення кінців струни, а саме: в отворі, розрізаним конусом, в ніпелі, в призмі, щілинне, між площинами. Встановили, що найкращим способом кріплення кінців струни є затиск її між добре обробленими і підігнаними паралельними площинами (див. рис. 1, е).

2. З огляду основних видів матеріалів, які використовуються для виготовлення струн, виявлено, що берилієва бронза має найкращі фізико-хімічні властивості для побудови високоточних струнних перетворювачів.

3. Приведено основні вимоги до виду матеріалу струн, а також вимоги щодо якості кріплення кінців струни.

Список літературних джерел

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н. Н. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. — М.: Машиностроение, 1995. — 310 с.
2. Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник. — Житомир: ЖДТУ, 2002. — 264 с.
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин/Под ред. Е.П.Осадчего. — М.: Машиностроение, 1979. — 480 с.
4. Келим Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления. Учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. — 384 с. : ил. — (Серия «Профессиональное образование»).
5. Милохин Н. Т. Частотные датчики систем автоконтроля и управления. М., «Энергия», 1968. — 128 с. — с илл. (Б-ка по автоматике. Вып. 310).
6. Карцев Е.А., Коротков В.П. Унифицированные струнные измерительные преобразователи.—М.: Машиностроение, 1982. — 144 с. : ил. — (Б-ка приборостроения).