

ДАТЧИКИ TE CONNECTIVITY ДЛЯ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

TE CONNECTIVITY SENSORS FOR INDUSTRIAL IOT SYSTEMS

У статті наведена коротка інформація про акселерометри компанії TE Connectivity, призначених для застосування в системах промислового Інтернету речей. Усі акселерометри характеризуються широким динамічним діапазоном і високою стабільністю характеристик у всьому робочому діапазоні температур..

Abstract – The article provides a brief introduction to TE Connectivity's accelerometers for industrial IoT applications. All accelerometers are characterized by a wide dynamic range and high stability of characteristics over the entire operating temperature range.

В. Макаренко

V. Makarenko

Індустрія 4.0 або промисловий Інтернет речей (IIoT) припускає використання традиційних виробничих і промислових методів у комбінації із сучасними технологічними досягненнями в області робототехніки й цифрових систем керування.

Для автоматизації будь-яких процесів необхідно використовувати датчики [1]. В TE Connectivity (TE) вважають, що в міру росту потреби в автоматизації промислових роботів датчики будуть як і раніше становити основу для систем збору даних, які дозволяють перетворити виробничі цехи в автоматизовані заводи майбутнього.

Фактично, TE готовий до майбутнього в робототехніці. Останні покоління промислових роботів можуть вирішувати складні завдання в автомобілебудуванні й авіабудуванні, фармацевтичній промисловості, металообробці, логістиці й у багатьох інших галузях.

Компанія TE пропонує велике число найрізноманітніших датчиків для виміру сили, температури, тиску, прискорення й положення, які забезпечують виміри з високою точністю для систем керування рухом і точного позиціонування компонентів систем, як при виробництві, так при профілактичному обслуговуванні устаткування.

У міру того, як революція в робототехніці набирає силу, більшості виробників потрібні усе більш точні датчики для вбудовування в роботизоване устаткування.

Наприклад, для виробництв, де одночасно працюють люди й роботи, системи датчиків повинні не тільки виявляти, чи перебуває поруч людей, але й запобігати будь-якому можливому зіткненню між роботом працівниками, що й перебувають поблизу. У більшості випадків потрібні датчики зі змінним діа-

пазоном і роздільною здатністю вимірів. Крім того, виробниче середовище може бути агресивної (сильне запилення, наявність водяної пари й інших несприятливих факторів), що утрудняє визначення відмінностей між людьми й роботами, що працюють на тій же майданчику.

Технології, використовувані TE для побудови датчиків

Для контролю температури поверхні промислового устаткування використовуються компактні дискретні термістори з негативним температурним коефіцієнтом (NTC), що забезпечують виміри з високою точністю й відмінну довгочасну стабільність. У температурних датчиках TE використовується залежність опору кераміки й металевих композитів від температури. Для високотемпературних процесів, коли необхідно контролювати температуру на відстані, використовуються інфрачервоних (ІК) датчики.

У датчиках положення використовується анізотропна магніторезистивна технологія (AMR). Датчики положення КМХР випускаються в різних формах факторах і забезпечують високу точність і надійність вимірів в екстремальних умовах, включаючи високі температури. Ці датчики відіграють усе більш важливу роль у багатьох промислових робототехнічних додатках. Для складних додатків у тяжких умовах експлуатації потрібні датчики, які добре працюють навіть при впливі масла, бруду й пилу. Ці датчики пропонуються у двох різних корпусах для різних варіантів орієнтації. Ці корпуси легко інтегруються практично в будь-який автоматизований процес складання.

Для датчиків сили TE використовує п'єзореzystивні тензодатчики. Подібно тому, як цифрові ваги

можуть вимірювати масу, п'єзореzystивні тензодатчики можуть вимірювати силу залежно від навантаження, що прикладається до датчика. У заводських умовах ці датчики можуть бути вбудовані в заводські килимки на підлозі, щоб визначати, чи перебуває людина в безпосередній близькості від небезпечно-го заводського устаткування, що допомагає запобігти травмам.

Тензодатчики також використовуються в деякому транспортному устаткуванні для забезпечення безпечного переміщення компонентів і збіркових одиниць по заводу. У цьому випадку тензодатчики зможуть визначити масу навантаження й зможуть запобігти несправності або стану помилки, якщо навантаження буде мати масу більше припустимої або буде незбалансованою.

Датчики тиску TE призначені для широкого спектра промислових застосувань, включаючи ті, які можуть використовуватися в небезпечних зонах. Компанія TE випускає датчики тиску, що монтуються на платі й ізольовані від середовища, з аналоговими або цифровими вихідними сигналами для систем, що вбудовуються, і OEM-додатків.

Перехід до цифрової інфраструктури з підтримкою Інтернету речей

Промисловий інтернет речей (IIoT) представляє величезний потенціал продуктивності, але повністю реалізувати переваги IIoT досить складно. Багато компаній починають усвідомлювати важливість датчиків і змін підходів до додатків IIoT, особливо коли відбувається злиття традиційних областей діяльності й інформаційних технологій.

Деякі великі виробники автомобілів використовують на своїх заводах тисячі підключених датчиків для збору даних про процеси на виробництві. Автомобільна промисловість – не єдина галузь, яка першою впровадила цей підхід, оскільки роботизовані технології можуть бути корисні в інших промислових додатках, таких як промислова печатка й упакування, а також у медицині, громадському харчуванні й правоохоронних органах.

Технологія IoT Start

Щоб допомогти компаніям впровадити нові продукти, TE розробила апаратно-програмний комплекс, який дає виробникам можливість розрахувати економію витрат і окупності інвестицій за рахунок підвищення ефективності й продуктивності при використанні датчиків, що випускаються компанією. Набір інструментів IoT Start являє собою комплексний розв'язок, що включає датчики, систему обробки сигналів датчиків, інтерфейси провідного й без-

дротового зв'язку, об'єднані в простому у використанні модулі. Цей модуль дозволяє експериментувати з додатками IIoT при тестуванні й оцінці створених систем, а також прискорити розробку додатків IoT.

Безпека персоналу при роботі з роботизованим устаткуванням

Безпека є головним пріоритетом для розроблювачів роботизованих систем автоматизації. Оскільки промислові роботи можуть створити багато нових погроз безпеки на робочому місці, підхід "не нашкодь" став одним з найбільш важливих, оскільки роботи все частіше використовуються для підйому важких деталей на автомобільних складальних лініях і інших промислових виробничих майданчиках. Існують строгі правила, пов'язані з безпекою роботів. Виробники повинні підготуватися до цього до того, як роботи будуть установлені, щоб забезпечити дотримання вимог безпеки й створити безпечне середовище для працівників.

Навчання виробничого персоналу також необхідно для забезпечення безпеки співробітників. При впровадженні роботизованого устаткування від працівників потрібен новий рівень знань. Багатьом прийдеться пройти навчання по керуванню новим роботизованим устаткуванням.

TE Connectivity пропонує розв'язки, які можуть допомогти одержати необхідні дані з точними вимірами в режимі реального часу від датчиків: тиску, вологості, сили, вібрації, температури, положення і т.д.

Датчики вібрацій

З ростом числа систем автоматизації росте попит на датчики для невеликих систем і окремих пристроїв, таких як шпинделі, конвеєрні стрічки, сортувальні столи або машинні інструменти, що вимагають регулярного профілактичного обслуговування. Час простою машини в цих додатках є критичним. Раніше акселерометри використовували в основному для моніторингу стану важкого устаткування, такого як вітряні млини, промислові насоси, турбіни, компресори й системи вентиляції й кондиціювання (рис. 1). Однак у цей час значне виріс попит на датчики для малих машин, породжуваний цифровою промисловою трансформацією [2].

П'єзоелектричні датчики вібрацій

П'єзоелектричні акселерометри (ПЕ) містять п'єзоелектричні кристали, які генерують сигнал при впливі зовнішнього механічного порушення, наприклад, вібрації механізмів.

Більшість п'єзоелектричних датчиків засновані

на кераміку титанату цирконату свинцю (PZT), яка поляризована для вирівнювання диполів. Кристали PZT ідеально підходять для додатків моніторингу стану, оскільки вони працюють у широкому діапазоні температур, широкому динамічному діапазоні й широкій смузі частот (можна використовувати до частот трохи вище 20 кГц).

При реалізації датчиків вібрацій використовуються найчастіше два основні режими роботи чутливих елементів (відповідно, і два типи конструкцій):

- режим стискання
- режим зрушення (режим вигину є рідко використовуваною альтернативою).

У датчиках стиски, що працюють у режимі, для стиску п'єзоелектричного кристала поверх кристала розташовують вантаж, який і створює попередній стиск (рис. 2,а). Датчики з такою конструкцією стають менш популярними через схильність деформації підстави при монтажі. Крім того вони мають

гіршу температурну стабільність у порівнянні з датчиками, що працюють у режимі зрушення.

Датчики, що працюють у режимі зрушення, звичайно мають кристал кільцевої форми й вантаж у формі кільця, прикріплений до опорної стійки (рис. 2,б).

Ця конструкція має значно кращі характеристики в порівнянні з конструкціями, що працюють у режимі стиску, оскільки вона ізольована від підстави й набагато менш чутлива до теплової напруги, що забезпечує підвищену стабільність параметрів. Більшість конструкцій акселерометрів для моніторингу стану, пропонує сьогодні, працюють у режимі зі зсувом, і їх слід вибирати для більшості установок моніторингу стану.

Ємнісні датчики вібрацій

Ємнісні датчики вимірюють прискорення використовуючи зміни ємності сейсмічного датчика – маси, що рухається між двома паралельними пластинами конденсатора. Зміна ємності прямо пропорційно



Рис. 1. Моніторинг стану важкого устаткування за допомогою датчиків вібрацій

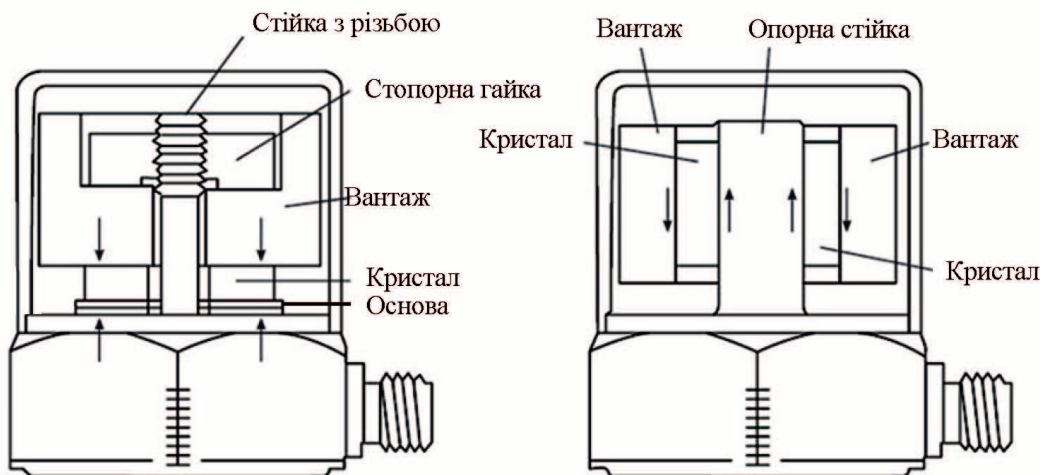


Рис. 2. Акселерометр, що працює в режимі стискання (а), і в режимі зрушення (б)

прикладеному прискорення. Для акселерометрів потрібно, щоб пристрій обробки розташовувався якнайближче до чутливого елемента для перетворення малих змін ємності у вихідну напругу. Такий процес перетворення часто приводить до малого співвідношення сигнал/шум і, як наслідок, до обмеженого динамічного діапазону. Такі датчики найчастіше виготовляють за технологією MEMS.

Для промислового моніторингу стану й профілактичного обслуговування устаткування, забезпечення довгострокової надійної, стабільної й точної роботи датчиків вважаються критично важливими наступні параметри:

- частотний діапазон
- роздільна здатність датчика і його динамічний діапазон
- довгострокова стабільність параметрів з мінімальним дрейфом
- діапазон робочих температур
- варіанти виконання й простота установки
- варіанти вихідного сигналу датчика (аналоговий або цифровий).

Компанія TE провела тестування робочих характеристик типового п'єзоелектричного акселерометра моніторингу стану й широкосмугового ємнісного акселерометра (VC MEMS) з діапазоном повної шкали ± 50 g.

Результати тестування ілюструє рис. 3. У якості смуги пропускання враховується діапазон частот у якому максимальне відхилення амплітуди сигналу не перевищує ± 1 дБ (часто використовується більш тверде відхилення $\pm 5\%$ для визначення смуги пропускання). Дані показують, що датчик VC MEMS має корисну смугу пропускання до 3 кГц, у той час як

п'єзоелектричний датчик має корисну смугу пропускання більше 10 кГц (конкретний ПЕ-датчик у тестуванні по специфікації має смугу пропускання до 14 кГц). Варто відзначити, що нижня частота смуги пропускання ПЕ-датчика дорівнює 2 Гц, у той час як датчик MEMS має лінійну АЧХ аж до 0 Гц.

На рис. 3 наведені типові амплітудно-частотні характеристики п'єзоелектричних і ємнісних акселерометрів.

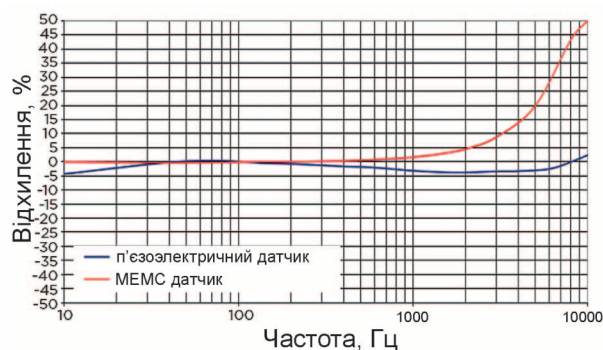


Рис. 3. Типові амплітудно-частотні характеристики п'єзоелектричних і ємнісних акселерометрів

Роздільна здатність і динамічний діапазон

Як показали випробування, проведені компанією TE, динамічний діапазон п'єзоелектричних датчиків у середньому на 20 дБ ширше, чим у MEMS-датчиків, а роздільна здатність в 8 разів вища (3 двійкових розряду).

Довгострокова стабільність із мінімальним дрейфом

Довгочасна стабільність ПЕ-датчиків добре відома завдяки більш ніж 30-літньому досвіду експлуа-

тації в польових умовах. П'єзоелектричні кристали по своїй природі стабільні й показали чудову стабільність із часом. Параметри довгочасного дрейфу також будуть залежати від матеріалу використовуваного кристалу, тому представити фактичне значення складно. Кварц має найкращу довгочасну стабільність, але він рідко використовується в додатках для моніторингу стану через вузьку смугу частот і високу вартість. Датчики на основі PZT (титанату цирконату свинцю) є найпоширенішими для більшості додатків.

Ємнісні MEMC-акселерометри також мають значні відмінності характеристик залежно від конструкції MEMC.

Об'ємні мікромеханічні MEMC-датчики мають кращий довгостроковий дрейф у порівнянні з ПЕ-датчиками з поверхневою мікрообробкою, але значно дорожче й звичайно використовується тільки в інерціальних додатках. Для моніторингу стану виробники MEMC пропонують датчики з поверхневою мікрообробкою, які дешевше ПЕ-датчиків на основі титанату цирконату свинцю. Однак такі датчики мають меншу роздільну здатність і гіршу довгочасну стабільність.

Діапазон робочих температур

Діапазони робочих температур акселерометрів ПЕ й MEMS приблизно однакові. Як ті, так і інші, придатні для роботи в діапазоні від -40 до 125 °C. В екстремальних умовах може використовуватися п'єзоелектричний датчик у зарядному режимі, який може працювати при температурах, що перевищують +700 °C.

Розглянемо характеристики деяких датчиків ТЕ.

Одноосьові SMT-акселерометри серії 820M1 [3, 4].

У серії випускається 6 модифікацій одноосьових акселерометрів (рис. 4).

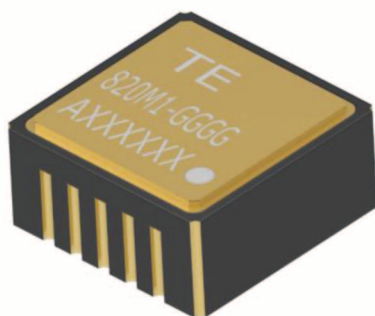


Рис. 4. Акселерометр серії 820M1

Основні параметри п'єзоелектричних акселеро-

метрів серії 820M1:

- динамічний діапазон від ± 25 до ± 6000 g
- максимально припустиме прискорення 10000 g
- поперечна чутливість 8%
- температурна чутливість (8% у робочому діапазоні температур)
 - смуга пропускання від 6 до 10 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 1 дБ
 - смуга пропускання від 2 до 15 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 3 дБ
- резонансна частота 30 кГц
- амплітуда вихідного сигналу $\pm 1,25$ В
- напруга живлення від 3 до 5.5 У постійного струму
 - струм споживання не більш 62 мкА
 - захист від електростатичних розрядів до ± 2 кВ
 - вихідний опір 100 Ом
 - час прогріву не більш 1 с
 - герметичний корпус LCC, відповідає IP68
 - габаритні розміри 8.89×8.89×4.2 мм
 - п'єзокерамічний кристал, що працює в режимі зрушення
 - діапазон робочих температур від -40 до 125 °C
 - монтаж на друковану плату, можливість пайки оплавленням
- низька вартість.

У табл. 1 наведені робочі діапазони вимірів і шум акселерометрів серії 820M1.

На рис. 5 наведено перелік модифікацій і марку-

820M1-xxxx

Діапазон измерений	Индекс
25 g	0025
50 g	0050
100 g	0100
200 g	0200
500 g	0500
6000 g	6000

Рис. 5. Модифікації й маркування акселерометрів серії 820M1

вання акселерометрів серії 820M1.

Структура акселерометрів 820M1 наведена на рис. 6.

На рис. 7 і 8 наведені типові характеристики залежності чутливості від частоти й від температури, відповідно.

Таблиця 1. Робочі діапазони вимірів і шум акселерометрів серії 820M1

Діапазон вимірів, g	Чутливість, мВ/g ($\pm 30\%$)	Нелінійність, % від повної шкали	Залишковий шум, мг с.к.з.	Спектральна щільність шуму, мг/ $\sqrt{\text{Гц}}$			
				10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц
± 25	50.0	± 2	2.9	0.15	0.07	0.03	0.02
± 50	25.0	± 2	5.9	0.29	0.13	0.05	0.05
± 100	12.5	± 2	11.7	0.58	0.27	0.09	0.09
± 200	5.00	± 2	23.2	1.16	0.53	0.18	0.18
± 500	2.50	± 2	58.8	2.92	1.34	0.52	0.45
± 6000	0.21	± 2	705	35.0	16.1	6.24	5.40

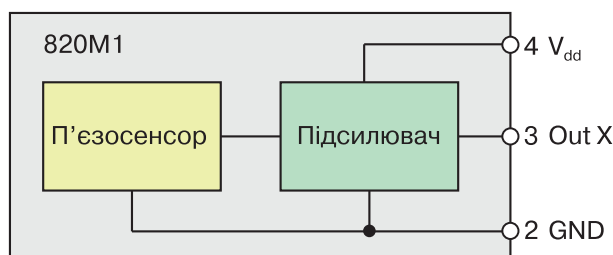


Рис. 6. Структура акселерометрів 820M1

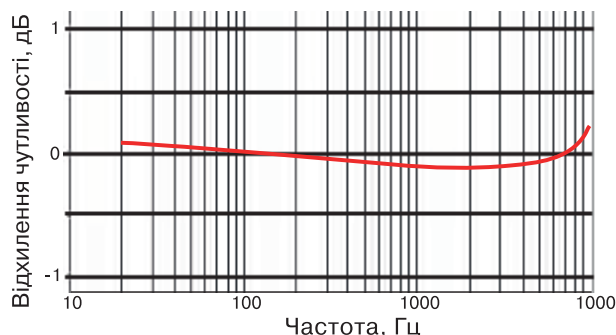


Рис. 7. Типова частотна характеристика акселерометра 820M1

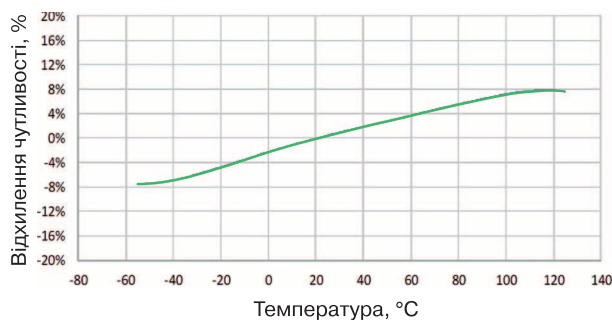


Рис. 8. Типова зміна чутливості акселерометра 820M1 залежно від температури навколишнього середовища

Триосьові SMT-акселерометри серії 830M1 [5]

У серії випускається 7 модифікацій триосьових акселерометрів (рис. 9).

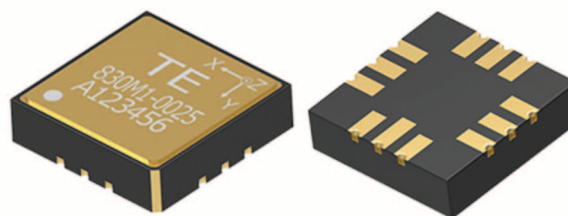


Рис. 9. Триосьовий акселерометр серії 830M1

Основні параметри п'єзоелектричних акселерометрів серії 830M1:

- динамічний діапазон від ± 25 до ± 2000 g
- максимально припустиме прискорення 5000 g
- смуга пропускання від 6 до 10 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 1 дБ
- смуга пропускання від 2 до 15 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 3 дБ
- резонансна частота 30 кГц
- амплітуда вихідного сигналу $\pm 1,25$ В
- напруга живлення від 1.5 до 5.5 У постійного струму
- струм споживання не більш 200 мкА
- захист від електростатичних розрядів до ± 2 кВ
- вихідний опір 100 Ом
- час прогріву не більш 1 с
- вбудований датчик температури на основі термістора
- герметичний корпус LCC, відповідає IP68
- габаритні розміри 15.2×15.2×4.2 мм
- маса не більш 1 г

- п'єзокерамічний кристал, що працює в режимі зрушення
- діапазон робочих температур від -40 до 125 °C
- монтаж на друковану плату, можливість пайки оплавленням
- низька вартість.

У табл. 2 наведені робочі діапазони вимірів і шум акселерометрів серії 830M1.

На рис. 10 наведено перелік модифікацій і маркування акселерометрів серії 830M1.

Структура акселерометрів 830M1 наведена на рис. 11.

На рис. 7 і 8 наведені типові характеристики залежності чутливості акселерометрів 830M1 від частоти й від температури, відповідно.

Акселерометри 830M1 зберігають працездатність при напрузі живлення 1.5 В, але при цьому звужується ефективний діапазон вимірів, як показано в табл. 3. Тому не рекомендується використовувати напругу живлення нижче 2.8 В (номінальне значення напруги живлення 3.3 В).

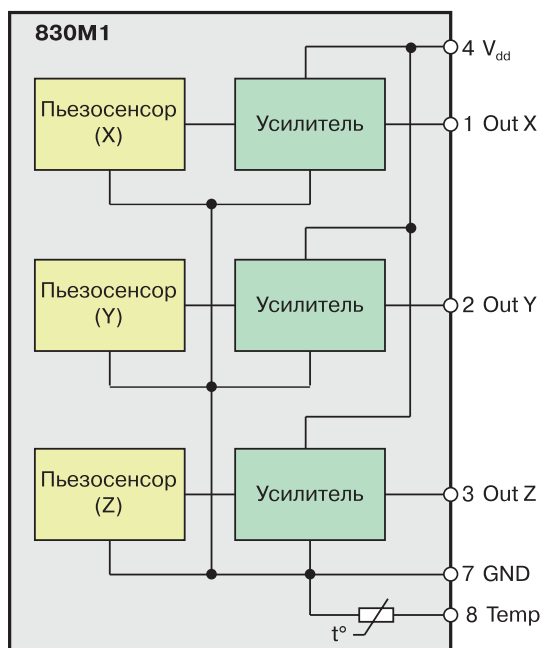


Рис. 11. Структура акселерометрів 830M1

Таблиця 2. Робочі діапазони вимірів і шум тривісних акселерометрів серії 830M1

Діапазон вимірів, g	Спектральна щільність шуму, мг/ Гц	Нелінійність, % від повної шкали	Залишковий шум, мг с.к.з.	Спектральна щільність шуму, мг/√Гц			
				10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц
±25	50.0	±2	2.9	0.15	0.07	0.03	0.02
±50	25.0	±2	5.9	0.29	0.13	0.05	0.05
±100	12.5	±2	11.7	0.58	0.27	0.09	0.09
±200	5.00	±2	23.2	1.16	0.53	0.18	0.18
±500	2.50	±2	58.8	2.92	1.34	0.52	0.45
±1000	1.25	±2	117	5.84	2.68	1.04	0.90
±2000	0.63	±2	234	11.7	5.36	2.08	1.80

830M1-xxxx

Суффікс	Діапазон изм.	Номер для заказа	
		На катушке (150 шт)	В упаковке (50 шт)
0025	25 g	20011422-00	20011422-01
0050	50 g	20011423-00	20011423-01
0100	100 g	20011424-00	20011424-01
0200	200 g	20011425-00	20011425-01
0500	500 g	20011426-00	20011426-01
1000	1000 g	20018122-00	20018122-01
2000	2000 g	20019427-00	20019427-01

Рис. 10. Модифікації й маркування акселерометрів серії 830M1

Таблиця 3. Залежність діапазону вимірів від напруги живлення

Діапазон вимірів, g (при Vdd > 2.8 В)	Ефективний діапазон вимірів, g (при Vdd = 1.5 В)
±25	±15
±50	±30
±100	±60
±200	±120
±500	±300
±1000	±600
±2000	±1200

Схеми підключення термістора для формування сигналів датчика температури наведені на рис. 12.

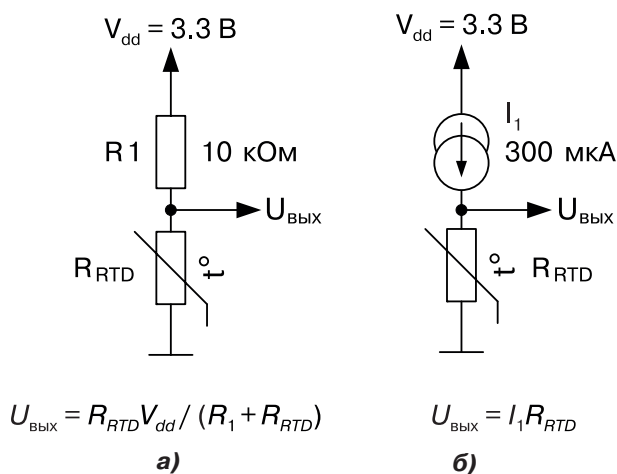


Рис. 12. Схеми підключення термістора з використанням резистора (а) і джерела струму (б)

Залежності вихідної напруги датчиків з різними схемами включення термістора наведені на рис. 13

Залежність опору термістора, вбудованого в акселерометри 830M1, від температури наведена на рис. 14..

Трьохпроводові одноосьові акселерометри 805M1 у корпусі TO-5 [6]

У серії випускається 7 модифікацій одноосьових акселерометрів (рис. 15).

Основні параметри п'єзоелектричних акселерометрів серії 830M1:

- динамічний діапазон від ±20 до ±500 g
- смуга пропускання від 1 до 8 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ±1 дБ
- смуга пропускання від 0.4 до 10 000 Гц при не-

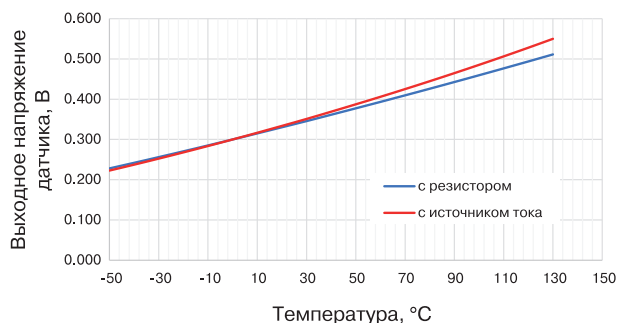


Рис. 13. Залежності вихідної напруги датчиків з різними схемами включення термістора

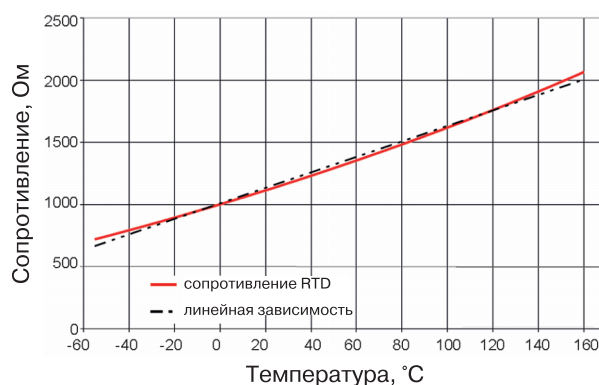


Рис. 14. Залежність опору термістора, вбудованого в акселерометри 830M1, від температури

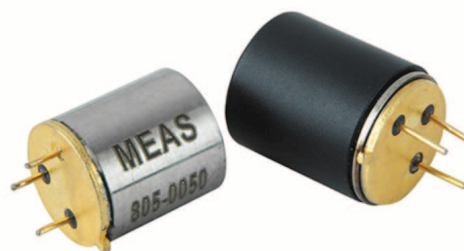


Рис. 15. Трьохпроводові одноосьові акселерометри 805M1 у корпусі TO-5

рівномірності АЧХ не більш ±3 дБ

- резонансна частота 34 кГц
- амплітуда вихідного сигналу ±2 В
- напруга живлення від 3 до 5.5 В постійного струму

струму

- струм споживання не більш 800 мкА
- вихідний опір 100 Ом
- габаритні розміри Ø8.89×11.5 мм
- маса не більш 5 г
- можлива поставка з додатковою ізолюючою оболонкою

- п'єзокерамічний кристал, що працює в режимі зрушення
- діапазон робочих температур від -40 до 100 °C
- монтаж в отвори.

У табл. 4 наведені робочі діапазони вимірів і шум акселерометрів серії 805M1.

Маркування акселерометрів серії 805M1 аналогічна маркуванню 830M1 – цифри суфікса показують діапазон виміру прискорень.

Безпроводовий акселерометр 8911 [7]

Зовнішній вигляд акселерометра наведений на рис. 16.



Рис. 16. Безпроводовий акселерометр 8911

Акселерометр призначений для роботи в мережах LoRaWAN™ 868/915 МГц.

Безпроводовий акселерометр TE моделі 8911 для РОС містить датчики для виміру вібрацій і тем-

ператури, цифровий сигнальний процесор і прийомопередавач в одному корпусі. Живлення акселерометра здійснюється від вбудованої батареї.

Безпроводовий акселерометр моделі 8911 використовує протокол зв'язку LoRaWAN™, що пропонує простий, надійний і безпечний спосіб контролю стану промислового устаткування й призначений для установки в таких місцях, де вартість установки промислових систем є непомірно високою.

Датчик 8911 включає п'єзoeлектричний акселерометр зі смугою пропускання до 10 кГц, високою роздільною здатністю і високою довгочасною стабільністю. Завдяки вбудованому цифровому процесору датчик формує й передає по радіоканалу наступні дані:

- центральну частоту в спектрі вібрацій
- пікове значення вібрацій
- смугу частот обмірюваних вібрацій
- спектральний склад вібрацій у восьми смугах.

Основні параметри датчика 8911:

- динамічний діапазон від 0.001 до ± 40 g
- роздільна здатність 12 біт при вимірі вібрацій і температури

• смуга пропускання від 1 до 10 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 1 дБ

• смуга пропускання від 1 до 15 000 Гц при нерівномірності АЧХ не більш ± 3 дБ

- максимально припустиме прискорення 2000 g

• резонансна частота 30 кГц

• поперечна чутливість 5%

• температурна чутливість від -10 до 5% у робочому діапазоні частот

• температурна чутливість від -10 до 5% у робочому діапазоні частот

• температурна чутливість від -10 до 5% у робочому діапазоні частот

Таблиця 4. Робочі діапазони вимірів і шум акселерометрів серії 805M1

Діапазон вимірів, g	± 20	± 50	± 100	± 200	± 500	Примітка
Чутливість, мВ/g	100	40	20	10	4	$\pm 10\%$
Діапазон частот, Гц	1-8000	1-8000	1-8000	1-8000	1-8000	± 1 дБ
Діапазон частот, Гц	0.4-10000	0.4-10000	0.4-12000	0.4-12000	0.4-12000	± 3 дБ
Частота резонансу, Гц	34000	34000	34000	34000	34000	–
Нелінійність, % від повної шкали	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1	–
Поперечна чутливість, %	5	5	5	5	5	–
Максимально допустиме прискорення, g	5000	5000	5000	5000	5000	–
Залишковий шум, g (с.к.з.)	0.001	0.001	0.003	0.003	0.005	в діапазоні 1-10000 Гц

- нелінійність не більш $\pm 1\%$ від повної шкали
 - залишковий шум не більш 0.06 г (середньоквадратичне значення)
 - погрішність виміру температури не більш $\pm 1.5^\circ\text{C}$
 - напруга живлення не більш 3.5 У постійного струму
 - середнє значення струму споживання 35 мкА
 - піковий струм споживання в режимі передачі 50 мА
 - строк автономної роботи без заміни батарей не менш 5 років
 - захист від електростатичних розрядів до $\pm 2\text{ кВ}$
 - потужність передавача 14 дБм
 - чутливість приймача -137 дБм
 - п'єзокерамічний кристал, що працює в режимі зрушення
 - діапазон робочих температур від -20 до 60°C
 - відносна вологість не більш 95%
 - габаритні розміри $\varnothing 31.75 \times 78\text{ мм}$
 - маса не більш 5 г
 - монтаж (залежно від модифікації) на клейку монтажну шпильку (AC-D04210), шпильку М6 із зовнішнім різьбленням (AC-D03665), шпильку М5 із зовнішнім різьбленням (AC-D03664), магнітну монтажну шпильку (AC-A04209).
- На рис. 17 наведений приклад спектру, обмірюваного датчиком, а в табл. 5 – приклад переданих даних.

Таблиця 5. Приклад даних, переданих безпроводовим датчиком 8911

Частота пікового викиду, Гц	Амплітуда пікового викиду	% від загальної енергії
2056	168	23
2882	46	10
694	25	5
8	23	3
4122	20	5
5994	15	2
3805	12	4
1713	10	2
Загальна енергія		2.605 g

На рис. 18 показаний безпроводовий датчик 8911 без захисної кришки.

Для індикації режимів роботи на платі датчика розміщено 2 світлодіоди:

- синій світлодіод:
 - ♦ загоряється на дві секунди, коли датчик запитує підключення до мережі LoRaWAN™ і приєдну-

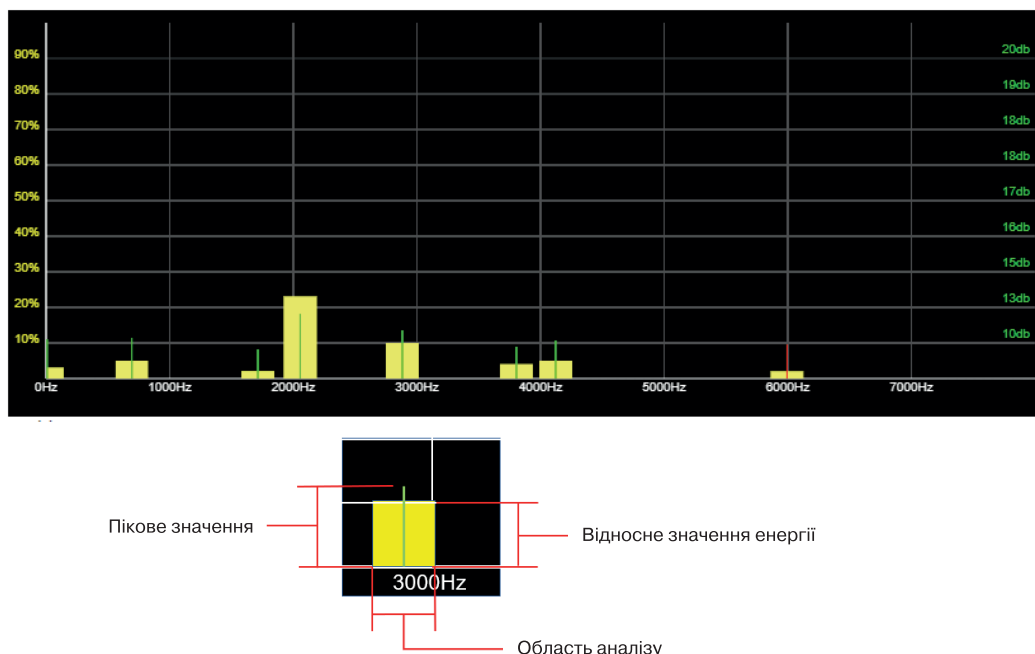


Рис. 17. Спектр, формований у результаті БПФ аналізу, безпроводовим датчиком 8911



Рис. 18. Беспроводной датчик 8911 без защитной крышки

ється до неї

- ◆ загоряється на короткий час, коли датчик робить вибірку даних, передає дані, одержує підтвердження

- червоний світлодіод:

- ◆ загоряється на дві секунди, якщо запит на підключення до мережі LoRaWAN™ не прийнятий

- ◆ загоряється на короткий час, якщо передані дані не підтверджені

Світіння кольорових світлодіодів можна побачити через напівпрозору кришку, коли вона прикріплена. Щоб одержати доступ до кнопки скидання й початкової ініціалізації, необхідно відгвинтити верхню кришку.

З наведеного короткого огляду акселерометрів компанії TE Connectivity можна зробити висновок, що їх застосування може забезпечити контроль вібрацій різних механізмів у дуже широкому діапазоні

значень, у широкій смузі частот і широкому діапазоні температур, зберігаючи при цьому високу стабільність параметрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. The Role of Sensors in the Evolution of Robotics // <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/sensors/global/te-sensor-solutions-evolution-of-robotics-trend-paper.pdf>

2. Predictive maintenance with vibration sensors // <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/sensors/global/vibration-condition-monitoring-whitepaper.pdf>

3. <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-EAC0021.html>

4. 820M1 single axis condition monitoring accelerometer // https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F820M1_Accelerometer%7FA4%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_820M1_Accelerometer_A4.pdf%7FCAT-EAC0021

5. Model 830M1 Triaxial SMT Accelerometers // <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-EAC0023.datasheet.pdf>

6. Model 805M1 TO-5 3-Wire Accelerometer // https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F805M1_Accelerometer%7FA3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_805M1_Accelerometer_A3.pdf%7FCAT-EAC0009

7. 8911 Wireless Accelerometer for Proof of Concept // https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F8911_Wireless_Accelerometer%7FA3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_8911_Wireless_Accelerometer_A3.pdf%7FCAT-PPA0123