

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-46-05>

УДК 681.2.08

¹Мороз Сергій Анатолійович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

²Калесь Олексій Олегович, учень

¹Луцький національний технічний університет

²Волинський науковий ліцей

АНАЛІЗ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНОЇ ОХОРОННОЇ СИСТЕМИ

Мороз С.А., Калесь О.О. Аналіз побудови та функціонування тензометричної охоронної системи. В статті проведений аналіз способів застосування тензочутливих перетворювачів в охоронних системах. Описаний принцип роботи тензодатчиків та варіантів їх підключення для вимірювання зовнішніх зусиль. Досліджено функціонування діючого макету охоронної системи будинку, отриманні результати випробування під час навантаження зовнішнім навантаженням.

Ключові слова: тензометричний перетворювач, вимірювальний міст, тензорезистор, охоронна система.

Мороз С.А., Калесь Е.А. Анализ построения и функционирования тензометрической системы охраны. В статье проведён анализ способов применения тензочувствительных преобразователей в охранных системах. Описан принцип работы тензодатчиков и вариантов их подключения для измерения внешних усилий. Исследовано функционирование действующего макета охранной системы дома, полученные результаты испытания при нагрузке наружной нагрузкой.

Ключевые слова: тензометрический преобразователь, измерительный мост, тензорезистор, охранная система.

Moroz SA, Kales O.O Analysis of construction and operation of strain gauge security system. The article analyzes the methods of using strain-sensitive transducers in security systems. The principle of operation of strain gages and options of their connection for measurement of external efforts is described. The functioning of the current model of the security system of the house is studied, the test results are obtained during loading by an external load.

Keywords: strain gauge, measuring bridge, strain gauge, security system.

Постановка наукової проблеми.

Тензочутливі перетворювачі, зокрема тензорезистори відомі більше ста років і знаходять широке поширення в різних сферах життя людини. Технологія їх виготовлення та застосування відпрацьована, а вартість невелика. Вони працездатні в широкому діапазоні температур та зовнішніх впливів, тому цілком підходять в якості чутливих елементів. Охоронні пристрої на основі тензорезисторів – точкові, але можуть застосовуватися як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі.

Тензометричні датчики називаються також ваговими датчиками або вагочутливими датчиками. Вихідний сигнал чутливого елементу – зазвичай безперервний аналоговий, його величина пропорційна прикладеній силі. Якщо сила впливу, вага або їх зміна перевищують встановлений поріг, формується сигнал тривоги. Всі тензометричні датчики є пасивними.

Датчики ваги повністю перекривають діапазон вимірювання від одиниць грама до сотень тонн. Легко спроектувати та виготовити пристрій, на основі тензометричних перетворювачів, як для контролю за однією цінною монетою, так і для виявлення автомобіля, що під'їжджає. Часто виникає ситуація, коли в безпосередній близькості один від одного знаходиться безліч предметів, що охороняються. Експонати на виставці, зброя на стелажі, золоті зливки у банку – кількість окремих предметів може досягати сотень. В цьому випадку не має потреби кожен з них обладнати самостійним охоронним датчиком, що складається з чутливого елементу, блока обробки, реле тривоги та вести до кожного окрему сигнальну лінію. Значно спростити схему охорони безлічі компактних предметів дозволяє метод паралельного з'єднання тензочутливих перетворювачів у вимірювальні мости.

Зазвичай тензочутливий охоронний пристрій являє собою конструкцію з вимірювального елемента, що сприймає зовнішню силу, наклеєних на нього тензорезисторів і підсилювача сигналів. Вихідним сигналом у них може бути напруга, струм або цифровий логічний сигнал. Напруга посилюється до одиниць вольт, струм – до десятків міліампер, цифровий сигнал подається або паралельному двійковому коді, або відповідає інтерфейсам RS-232 або RS-485.

Вимірювальні перетворювачі на основі тензорезистора мають свої властивості, які характеризуються за допомогою наступних параметрів: механічний гістерезис, тензочутливість,

повзучість, температурна нестабільність, діапазон робочих температур, допустима потужність, власна частота.

Відомо [2, 3], що тензорезистору властиві незначні відхилення від лінійності під час циклічного деформування, водночас крива розвантаження розташовується нижче кривої навантаження, таким чином утворюючи петлю гістерезису (рис. 1.1).

Гістерезис є різницею значень сигналу тензорезистора, який є вихідним, при однакових рівнях вхідного сигналу, який отриманий під час навантаження і розвантаження об'єкта.

Найбільший гістерезис спостерігається в період першого циклу навантаження. У наступних навантажувальних циклах петля гістерезису звужується та поступово стабілізується. На практиці рекомендовано робити попереднє «тренування» датчика, під час якого навантажують його чотирма-п'ятьма циклами деформації рівень якої становить 125% від максимально допустимої. Внаслідок цього вдається знизити нелінійність датчика в кілька разів.

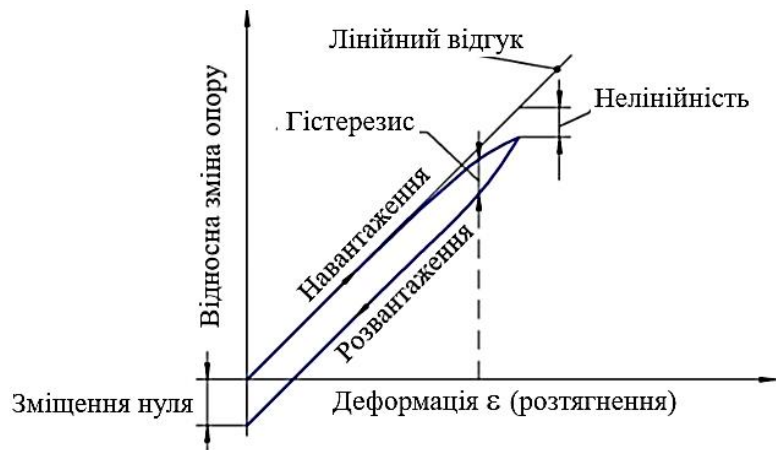


Рис. 1.1. Характеристика циклічного деформування тензорезистора

На наш погляд, негативною особливістю тензочутливих перетворювачів є те, що після монтажу на досліджуваній об'єкт вони не можуть бути демонтовані без пошкоджень і використані повторно, тому єдиним можливим способом визначення їх робочих характеристик є вибіркове градування.

Аналіз останніх досліджень.

Вимірювання деформації за допомогою тензорезисторів є складним завданням в техніці електричних вимірювань. Складність полягає у відносно малому діапазоні зміни опору тензорезистора під впливом деформації. Зміна величини опору тензорезистора досить малі і складають для датчика з параметром 100 Ом близько 0,0002 Ом на деформацію 1 мкм/м. Відомо, що деформація 1000 мкм/м, яка відповідає приросту напруження в метали приблизно 200 МПа, змінює опір 100 Ом датчика на 0,2 Ом. Для перетворення таких незначних змін опору в вихідні сигнали напруги, які здатні реєструватися, в вимірювальних пристроях здебільшого використовується в основному мостова схема (міст Уїтстона). Вимірювальний міст зазвичай подають у вигляді ромба, сторони якого мають назву «плече», а точки з'єднання плечей – «вершина» або «вузол моста». Міст Уїтстона складається з трьох функціональних частин: джерела напруги U , чотирьох резисторів (R_1, R_2, R_3, R_4), які утворюють міст, і реєструючої схеми, що включає резистор навантаження R_m (рис. 1.2).

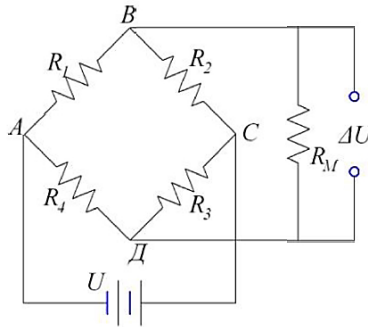


Рис. 1.2. Вимірювальний міст Уїтстона

Розглянемо рівняння, які описують вимірювальний міст. Прийmemo $R_m = \infty$, так, що струм, що протікає через міст, не впливає на навантаження. Така ситуація спостерігається, якщо сигнал з мостової схеми подається на вхід електронного підсилювача або аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Вихідна напруга на вимірювальному мості Уїтстона (різниця напруги точок В і Д) визначається рівнянням

$$\Delta U = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1.1)$$

З рівняння (1.2) випливає, що $\Delta U = 0$, якщо виконується умова

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ або } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (1.2)$$

При дотриманні рівності (1.2) міст називається збалансованим. Суть цього полягає у тому, що мала напруга розбалансу, яка викликана зміною опору, вимірюється відносно нульового або майже нульового рівня. Цей невеликий сигнал легко може бути підсилений до високого рівня і в подальшому може легко реєструватися.

Вихідна напруга ΔU у вимірювальному мості виникає при зміні опору резисторів R_1, R_2, R_3, R_4 , на величини $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$. Такі зміни опору виникають, як правило, внаслідок деформації або зміни зовнішньої температури в якій працюють тензорезистори.

Відповідно до рівняння (1.1) зміна вихідної напруги ΔU , яка викликана зазначеними малими змінами опорів, становить [3]

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) U \quad (1.3)$$

де η – коефіцієнт, що характеризує похибку (нелінійність моста), описується співвідношенням [3]

$$\eta = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + 2} \quad (1.4)$$

Розглянемо найбільш частий на практиці випадок, коли в вимірювальний міст Уїтстона включаються датчики з однієї партії, тобто мають однаковий номінальний опір $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ і однаковий коефіцієнт тензочутливості $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$.

Виразимо зміни відносних опорів тензодатчиків через діючі на них деформації:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k \cdot \varepsilon_i \quad (1.5)$$

де $i = 1, 2, 3, 4$.

Після підстановки (1.5) у вираз (1.3) та (1.4) отримаємо

$$\Delta U = k \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 (1 - \eta) U \quad (1.6)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + 2/k} \quad (1.7)$$

Оскільки зміни опору тензорезисторів досить малі, то і нелінійність функціонування вимірювального моста Уїтстона несуттєва. Відомо, при одному активному датчику нелінійність моста η не перевищує 1%, якщо деформація не перевищує 10 000 мкм/м.

З виразів (1.3), (1.4), (1.6) і (1.7) можна сформулювати корисні для практичного застосування властивості вимірювального моста Уїтстона:

« • Деформації, які діють на тензорезистори протилежних плечей, підсумовуються в межах вимірювального моста.

• Деформації, які діють на тензорезистори суміжних плечей моста, віднімаються в межах

вимірювального моста.

• Похибка моста η (нелінійність) пропорційна алгебраїчній сумі всіх деформацій, які сприймаються тензорезисторами » [3].

Залежно від кількості тензорезисторів, що включаються в вимірювальний міст, можливі три модифікації мостової схеми [3]: «чверть моста», «напівміст» і «повний міст» (рис. 1.4).

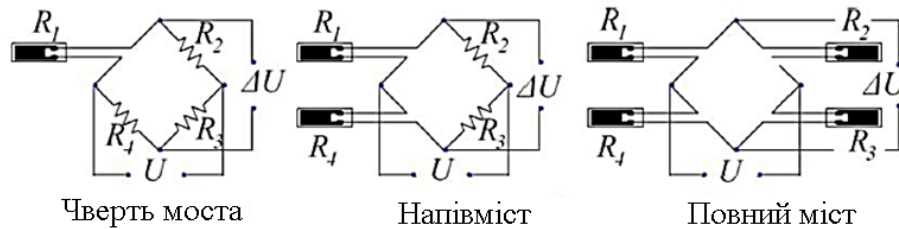


Рис. 1.3. Модифікації вимірювального моста

Під час практичного застосування тензорезистори виносяться за межі вимірювального приладу і розташовуються на об'єкті, який потрібно дослідити, тоді як резистори, що доповнюють міст, як правило, розташовані в вимірювальному приладі.

У плечі моста тензорезистори можна включати послідовно, паралельно і змішано.

Виклад основного матеріалу.

Для проведення дослідження функціонування макету системи охорони на основі тензорезистивних датчиків ми використовували такі електронні компоненти: мікроконтролер ARDUINO UNO; реле; RGB світлодіод; плата підсилення HX711; соленоїдний замок; пасивний зумер; тензорезистивний напівмостовий датчик (4 шт.)

Виготовлення корпусу для макету відбувалось з пресованої фанери, товщина якої становить 5 мм. Усі електронні елементи, які відповідають за обробку вимірювальної інформації, розміщені в середині корпусу макету у спеціально відведеному місці. Для живлення системи є можливість використати блок живлення на 12В або акумуляторну батарею на 12В, що дозволить макету охоронної системи працювати автономно.

З'єднання складових елементів відбувалося за схемою наведеною на рис. 1.4.

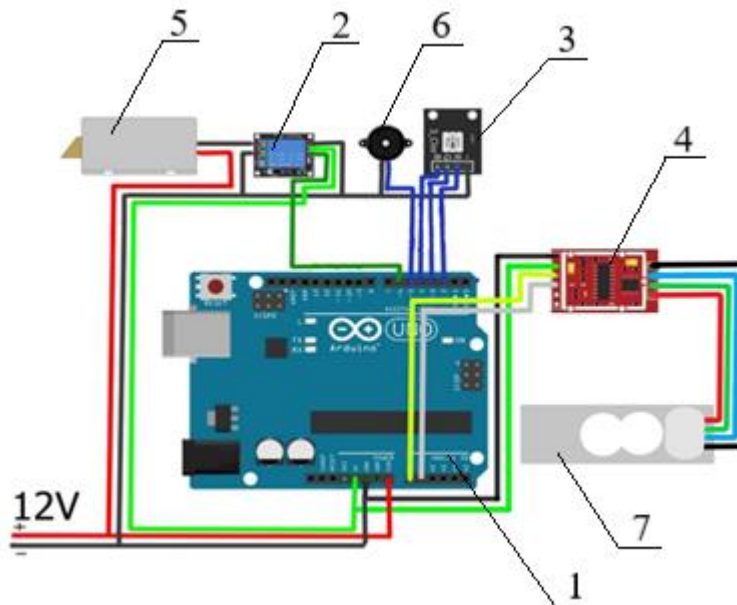


Рис. 1.4. Схема з'єднання елементів макету охоронної системи: 1) мікроконтролер ARDUINO UNO; 2) реле; 3) RGB світлодіод; 4) плата підсилення HX711; 5) соленоїдний замок; 6) пасивний зумер; 7) тензорезистивний напівмостовий датчик (4 шт.)

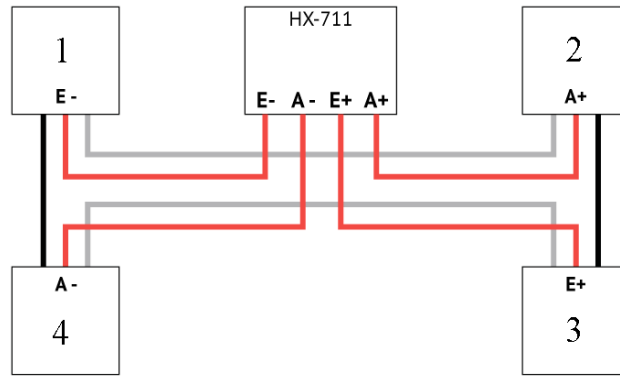


Рис. 1.5. З'єднання тензодатчиків у вимірювальну схему типу «повний міст»

Розглянемо принцип функціонування розробленого макету системи (рис. 1.6)

Головним елементом є збірка тензодатчиків, які з'єднанні у вимірювальну схему типу «повний міст» (рис. 1.5). В ньому розміщений чутливий елемент – тензорезистор. Він виготовлений у вигляді плівки наклеєний на основу датчика та при зміні зусилля змінює свій опір (зміна зусилля здійснюється шляхом дії певної ваги на тензодатчик). Саме цю властивість використано для контролю ваги різних об'єктів.



Рис. 1.6. Загальний вигляд діючого макету охоронної системи

Зміна опору напівпровідника зчитується за допомогою мікроконтролера Arduino (в нашому випадку Arduino Uno). Але зміни є незначними тому використано підсилювальну плату HX711. Тобто: сигнал з тензодатчика надходить до плати HX711, підсилюється і далі його зчитує мікроконтролер.

Мікроконтролер для правильного визначення ваги потрібно прокалібрувати за допомогою спеціального коду та використання еталонного вантажу. Після калібрування ми отримуємо калібровочний коефіцієнт, який необхідно додати в основний код для вимірювання. В основному коді зазначений діапазон ваги, яка повинна діяти на тензодатчики.

Тобто під час роботи охоронної системи можливі два випадки:

- 1) Значення збігаються і тоді мікроконтролер подає сигнал на реле, яке в свою чергу відчиняє соленоїдний замок.
- 2) Значення не збігаються і тоді мікроконтролер подає сигнал на світлодіод і зумер, які дають зрозуміти що двері не відчиняться.

Одним із поставлених завдань, які потрібно вирішити у роботі є проведення дослідження функціонування системи при дії певних чинників. Ми провели експеримент на вплив місця прикладання ваги до різних точок платформи вимірювання.

Для експерименту ми взяли еталонну вагу 10 кг в вигляді гири. Платформа має форму квадрата 20*20 см. Розділимо платформу на деякі зони, а саме кола з різницею в радіусі 5 см, як на

рисунку 2.5. Результати вимірювань наведено в таблиці 2.1

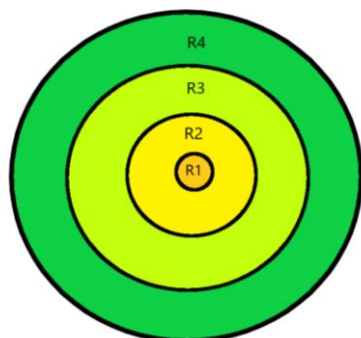


Рис. 1.7. Зони випробування

Табл. 1.1. Результати випробувань

Вага, г	5000	10000	15000	20000
Зона випр.				
R 1	5019	10054	15053	20071
R 2	5011	10050	15058	20062
R 3	5056	10056	15054	20080
R 4	5029	10057	15063	20085

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

На основі аналізу інформаційних джерел проведений аналіз застосування тензодатчиків в охоронній сфері. Встановлено, що основними перевагами таких датчиків є висока надійність, низька вартість, хороші маскувальні властивості, простота монтажу та обслуговування. Однак присутній і недолік, який полягає у складності автоматичної перевірки працездатності чутливих елементів.

Найбільш ефективним способом вимірювання тензодатчиками зовнішніх зусиль є вимірювальний міст Уїтстона у модифікації «повний міст».

На основі напівмостових тензометричних датчиків, які об'єднали у вимірювальну схему типу «повний міст», мікроконтролера Arduino UNO та інших електронних компонентів було спроектовано та виготовлено діючий макет охоронної системи.

Проведено дослідження особливостей функціонування тензометричних давачів в діючому макеті охоронної системи. Виявлено що похибка вимірювання ваги об'єкта тензочутливими датчиками не перевищує 1%. Встановлено, що місце розташування вантажу не впливає на точність вимірювань.

Встановлення діапазону спрацювання охоронної системи здійснюється у мікроконтролері Arduino через безкоштовне середовище програмування Arduino IDE.

Оскільки технічні рішення у сфері безпеки завжди потребують нових, часто нестандартних рішень конструкцій охоронних пристроїв, то запропонований спосіб використання тензодатчиків є перспективним для додаткового рубежу охорони приміщення.

В подальшій перспективі пропонується оснастити охоронну систему мобільними передатчиками, які мають постійний зв'язок з господарями приміщення, яке охороняється або з центральними пунктами охорони.

Список бібліографічних посилань

1. Груба И.И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения. М.: Солон-Пресс. 2012. 220 с.
2. Знаймо // Тензометричний датчик. URL: https://znaimo.com.ua/%D0%A2%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA (дата звернення: 10.12.2021).
3. Учебні Матеріали для студентів і школярів України // Тензорезистори опору і вимірювальні схеми. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-22811.html> (дата звернення: 15.12.2021).
4. IARDUINO // Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя. URL: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo/ (дата звернення: 12.11.2021).
5. Заметки электрика // Тензодатчик: принцип работы, устройство, типы, схемы подключения. URL: <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html> (дата звернення: 12.11.2021).
6. Электронные компоненты и оборудование // Тензорезистивный датчик. URL: <https://voron.ua/catalog/038097> (дата звернення: 16.10.2021).
7. Вільна енциклопедія «Вікіпедія» // Arduino. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Arduino> (дата звернення: 11.11.2021).
8. Информационный портал «ARDUINOMASTER» // Подключение тензодатчика HX711 к Arduino. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/tenzodatchiki-i-vesy-na-arduino-i-nh711/> (дата звернення: 10.11.2021).

References

1. Hrubá I.I. Alarm systems. Technical means of detection. М .: Solon-Press. 2012. 220 p.
2. Know // Strain gauge. URL: https://znaimo.com.ua/%D0%A2%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA (application date: 10.12.2021).
3. Educational Materials for students and schoolchildren of Ukraine // Tensor resistors and measuring circuits. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-22811.html> (access date: 15.12.2021).
4. IARDUINO // Strain gauges and NH711. User guide. URL: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo/ (access date: 12.11.2021).
5. Notes of an electrician // Strain gauge: principle of operation, device, types, connection diagrams. URL: <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html> (access date: 12.11.2021).
6. Electronic components and equipment // Strain gauge sensor. URL: <https://voron.ua/catalog/038097> (access date: 16.10.2021).
7. Free encyclopedia "Wikipedia" // Arduino. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Arduino> (access date: 11.11.2021).
8. Information portal "ARDUINOMASTER" // Connection of strain gauge HX711 to Arduino. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/tenzodatchiki-i-vesy-na-arduino-i-nh711/> (access date: 10.11.2021).