

## Особливості вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель при їх польових та лабораторних випробуваннях при дії статичних та динамічних навантаженнях

Василь Підлуцький<sup>1</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,  
<sup>1</sup>vasiliytsar@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1936-3990

DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.113-122

**Анотація.** Розглянуто особливості вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель при їх польових та лабораторних випробуваннях з використанням датчиків на основі тензорезисторів. Наведено огляд різних проблемних питань, які виникають в процесі проведення експериментальних випробувань та впливають на результати вимірювання. Найбільш поширені, які впливають на точність вимірювань, - це вплив температури, вологості, вібрації; складність калібрування та монтажу тензодатчиків на різних поверхнях елементів; складність обробки даних вимірювань; поєднання якісної роботи тензодатчиків, провідників-кабелів, вимірювальної апаратури, системи збору та обробки даних; вибір схеми з'єднання тензорезисторів у міст Уїтстона.

Розглянуто особливості організації експерименту по випробуванню несучих конструкцій будівлі, а саме пальових фундаментів, наведено основні проблемні питання при використанні тензодатчиків в якості вимірювачів деформації елементів будівлі.

Використання тензодатчиків для вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель є одним з поширених методів, який має багато переваг, які детально розглянуто в роботі. За допомогою тензорезисторів можна вимірювати деформації елементів, які механічно зв'язані з ними. Вони мають високу точність до вимірювань, чутливість до деформації елементів, широкий змінний діапазон вимірювань.

Висвітлено переваги використання саме моста Уїтстона для вимірювання зміни електричного опору, так як даний спосіб дозволяє вимірювати дуже малі величини зміни опору. Розглянуто способи підключення тензорезисторів за



**Василь Підлуцький**  
доцент кафедри  
геотехніки  
к.т.н., доц.

схемою Уїтстона, вибір яких залежить від мети дослідження та необхідної точності. Одним з найпростіших способів є підключення лише одного тензорезистора до джерела струму або напруги і вимірювання зміни опору. Але цей спосіб має низьку чутливість і не компенсує вплив температури. Більш точний спосіб - це підключення двох або чотирьох тензорезисторів у мостову схему Уїтстона, яка дозволяє вимірювати зміну напруги на діагоналі моста. Мостова схема має високу чутливість і може компенсувати вплив температури, якщо тензорезистори мають однаковий коефіцієнт температурної залежності опору.

Розроблено алгоритм вимірювання деформацій металеві труби, яка працює на стиск, за допомогою тензодатчиків.

**Ключові слова.** Тензодатчики, вимірювання, головні напруження, деформації, пальові фундаменти, несучі конструкції, міст Уїтстона.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При вимірюванні деформацій несучих конструкцій будівель при їх польових або лабораторних випробуваннях з використанням датчиків на основі тензорезисторів виникає ряд питань з організації даного експерименту.

Тензодатчики є одним з найбільш поширених інструментів для вимірювання деформацій несучих конструкцій. Однак, використання тензодатчиків може мати деякі проблеми. Найбільш поширені з них це вплив температури, вологості, вібрації на точність вимірювань; вплив тензодатчиків на розподіл напруження і деформацій у конструкції; складність калібрування та монтажу тензодатчиків на різних поверхнях [3].

При плануванні експерименту необхідно підібрати обладнання та сполучити його між собою, тобто поєднати роботу тензодатчиків, провідників-кабелів, під'єднати їх до вимірювальної апаратури, розробити схему передачі даних з тензодатчиків до приладу фіксування і обробки даних, вибрати схему з'єднання тензорезисторів у міст Уїтстона.

Необхідність використання моста Уїтстона при вимірюванні тензодатчиками виникає тому, що міст Уїтстона забезпечує точне вимірювання зміни значень електричного опору. Так як вимірювання його напруги омметром може бути менш точним, а в більшості випадків взагалі не можливим через дуже малі значення зміни сигналу (опору). Тому виникає необхідність у плануванні схеми підключення тензорезисторів у міст Уїтстона. Ця схема складається з чотирьох опорів, які утворюють мостоподібну конструкцію (Рис.6,а). Щоб досягти балансу моста, опір однієї гілки моста повинен бути регульований до тих пір, поки потенціали точок протилежних вузлів «1» і «4» не стануть рівними.

Також важливим етапом перед проведенням досліджень – це проведення тестування зібраної вимірювальної системи на спеціальному стенді.

#### АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На сьогоднішній час є багато наукових досліджень, які показують проблематику вимірювання деформацій конструкцій і напружень в них за допомогою тензодатчиків. Наприклад, в роботі [2] автори розробили принципи побудови, проектування та математичного моделювання вимірювальних засобів напружено-деформованого стану за

допомогою тензодатчиків. Вони використали методи оптимізації для покращення характеристик тензодатчиків, таких як чутливість, лінійність, точність тощо. На прикладах реальних конструкцій, таких як металева балка, бетонна плита і склопластиковий циліндр, автори провели експериментальну перевірку розроблених вимірювальних засобів.

В роботі [3] автор розробив методи та засоби вимірювання напружень та деформацій складних конструкцій за допомогою приладової системи, що складається з тензодатчиків, аналогових і цифрових пристроїв, комп'ютера та програмного забезпечення. В результаті досліджень було вдосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій, враховуючи вплив розташування тензодатчиків, їх характеристик, помилок вимірювання, тощо.

Автори у праці [4] описують принцип роботи тензодатчиків, їх типи, характеристики та методи калібрування. Також наводяться приклади застосування тензодатчиків для визначення напружень і деформацій у різних елементах конструкцій. Однією з проблем, яка виділяється у роботі, є вплив температури на роботу тензодатчиків, який може спричинити помилки у вимірюваннях. Для усунення цього впливу необхідно проводити температурну компенсацію або використовувати спеціальні тензодатчики з низькою температурною залежністю. Температурна компенсація - це процес корекції вимірювань тензодатчиків, що виникає внаслідок зміни температури за рахунок лінійного розширення матеріалу конструкції, а, відповідно, і до виникнення додаткових значень зміни опору.

Використання тензодатчиків знайшло широке відображення в будівництві при дослідженні деформацій несучих конструкцій, як надземних, так і фундаментних. В роботі [5] автори наводять результати натурних польових досліджень осідання паль, які розташовані одиночно та в кущі на реальному будівельному майданчику. Для визначення деформацій паль було встановлено

тензодатчики по довжині палі з кроком 1,0-1,2 м (див. Рис.1).

Також необхідно враховувати багато інших питань при організації експерименту по отриманні коректних даних з деформації несучих конструкцій будівель. Багато таких питань описані в сучасній літературі [1- 4].

### МЕТА РОБОТИ

Метою цього дослідження є аналіз особливостей вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель при їх польових та лабораторних випробуваннях при застосуванні тензодатчиків. Розглянути особливості організації експерименту по випробуванню несучих конструкцій будівлі, а саме пальових фундаментів, навести основні проблемні питання при використанні тензодатчиків та їх схеми підключення.

### ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Важливим елементом для проведення вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель при їх польових та лабораторних випробуваннях є не тільки сам процес його проведення. Вирішальну роль в отриманні достовірних даних відіграє організація та підготовка експерименту. Також важливим моментом є проведення тестування зібраної схеми на отримання коректних результатів дослідження. Тут виникає необхідність у якісному виконанні з'єднань всіх елементів. Важливим етапом є вибір схеми роботи тензодатчиків, яка залежить від обраного обладнання.

При проведенні замірів деформацій конструкцій використання тензодатчиків є поширеним серед науковців. Існують різні методи вимірювання напруження і деформації несучих елементів, які базуються на різних принципах і використовують різні прилади. Прикладом можуть бути наступні методи [1]:

- динамометрія – фіксування сил, які діють на конструкцію під зовнішнім навантаженням. Застосовують динамометри, тягоміри, кранові ваги та ін.

- розтягування - фіксування зміни

довжини або площі перерізу конструктивного елемента під дією сили, яка розтягує конструкцію. Застосовують мікрометри механічні або електронні, екстензометри, спеціальні стенди та ін.

- тензометрія - фіксування зміни електричного опору провідників або напівпровідників під дією деформації. Для цього використовують тензодатчики, тензометри, тензометричні мостики та ін.

- оптичні вимірювання - фіксування зміни положення поверхні конструкції або її кута за допомогою оптичних приладів. Застосовують теодоліти, нівеліри, лазерні дальноміри та інші спеціалізовані прилади та сканери.

а)



б)



Рис.1. Експериментальний майданчик для випробування групи палей «Pile test-2019»: а) загальний вид майданчика; б) встановлення тензодатчиків та датчиків переміщення на дослідні палі.

Fig.1. Experimental site for testing a group of piles "Pile test-2019": a) general view of the site; b) installation of strain gauges and displacement sensors on experimental piles.

- ультразвукове вимірювання – фіксування часу проходження хвиль ультразвукових через тіло матеріалу конструкції, який залежить від її деформації. Застосовують ультразвукові дефектоскопи, перетворювачі та ін.

- акустичні вимірювання - фіксування зміни швидкості поширення хвиль акустичних у тілі конструкції, яка залежить від його деформації. Застосовують акустичні дефектоскопи, емітери, приймачі та ін.

- фотоеластичність - фіксування зміни поляризації світла, яке проходить через прозору конструкцію при дії деформації. Застосовують фотоеластичні моделі, полярископи, фотокамери та ін.

Використання тензорезисторів для вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель є одним з методів, який має свої переваги та недоліки. Тензорезистори - це практично звичайні резистори, електричний опір яких змінюється в залежності від їх деформації. Для того, щоб виміряти деформації елементів за допомогою тензорезисторів, необхідно їх надійно механічно зв'язати з поверхнею елемента.

Зібрану систему вимірювання з тензорезисторами необхідно калібрувати перед використанням для тестування значень, які будуть отримані в процесі випробувань. В межах даного дослідження для калібрування тензорезисторів було використано спеціальний стенд. На даному стенді створено тестові зразкові відносні деформації і оброблено результати за допомогою системи збору та обробки даних ESAM TRAVELLER Static та спеціальної комп'ютерної програми (Рис.2). Тестування необхідне для перевірки стану і правильності роботи зібраної системи вимірювання деформацій конструкцій, так як тензодатчики є найбільш вразливим компонентом вимірювальної системи, на які впливають різні фактори, про які описано вище.

В залежності від того, які параметри необхідно фіксувати в ході проведення експерименту існує багато різних датчиків, які працюють з використанням тензорезисторів. Деякі з них представлено на Рис. 3, які використовуються в експерименті по

a)



b)

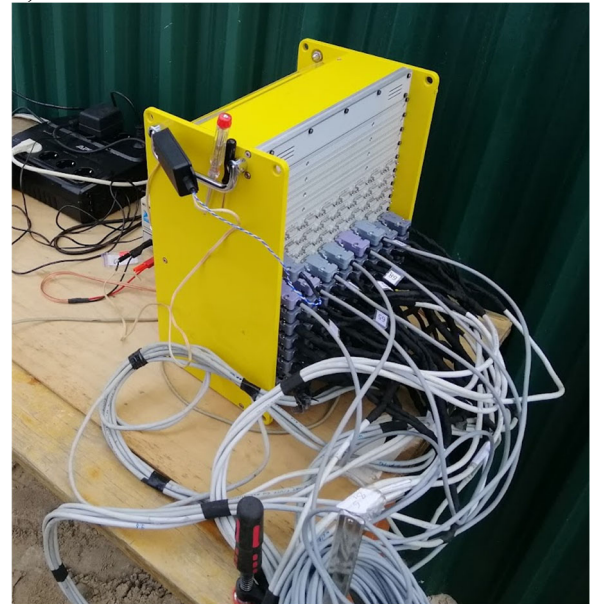


Рис.2. Калібрування тензорезисторів: а) тестовий стенд; б) система збору та обробки даних ESAM TRAVELLER Static.

Fig.2. Calibration of tensor resistors: a) test stand; b) data collection and processing system - ESAM TRAVELLER Static.

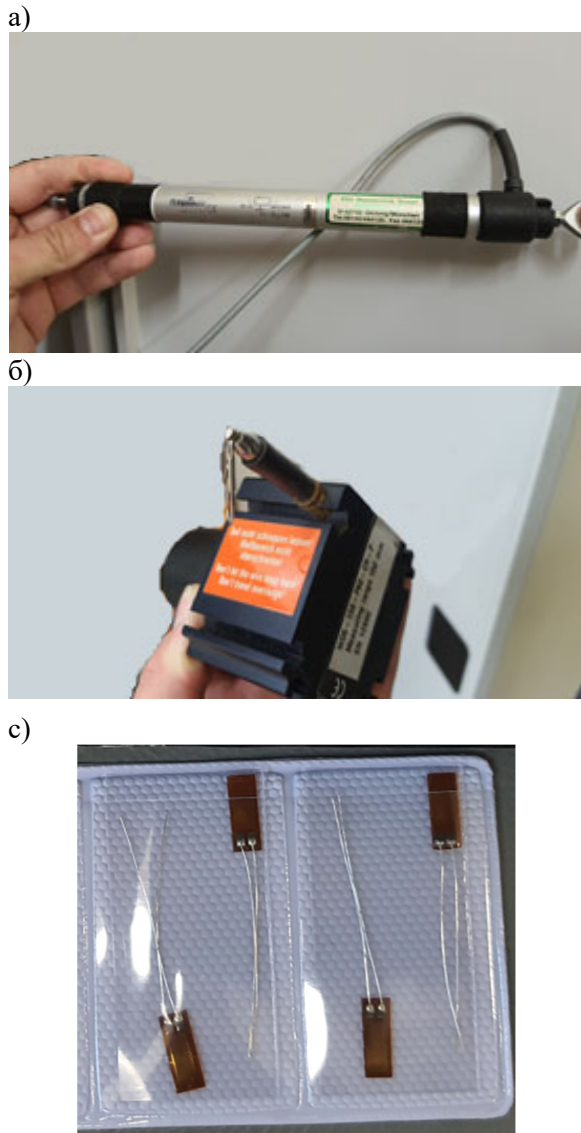


Рис.3. Види датчиків, що використовуються при випробуванні металевих паль: а) датчик переміщення; б) датчик переміщення; с) тензодатчик.

Fig.3. Types of sensors used in testing metal piles: a) displacement sensor; b) displacement sensor; c) strain gauge.

вимірюванню деформації сталевих паль. Для фіксування переміщення паль по вертикалі було використано датчик переміщення, які встановлювали на кожен палю по 2-3шт. Для фіксування деформацій паль по глибині (довжині металевого стовбура) було встановлено по парно з обох боків по два тензодатчики з кроком 1,0-1,2м (по довжині палі приєднано тензодатчики у 5-ти рівнях).

Перед проведенням експерименту необхідно ретельно спланувати сам процес

виконання експерименту та провести перевірку всіх етапів. До таких етапів відносять: підготовка приладу для збору даних та обробки інформації спеціалізованою програмою, яка встановлюється на персональному комп'ютері, що включає в себе застосування тензодатчиків з необхідними параметрами, використання якісних кабелів; виконання підключення всієї системи та контроль підключення роз'ємів тензодатчиків з перевіркою якості контактів та припайка необхідних з'єднань, також відпрацювання за допомогою спеціалізованої програми процесу вимірювання з використанням різної напруги для досягнення максимального результату від проведення досліджень з тестуванням працездатності всієї системи підключення тензодатчиків і отримання показників. На Рис.4 та на Рис.5 наведено окремі компоненти процесу підготовки до проведення досліджень.

Важливим моментом є врахування втрат сигналу при проведенні вимірювань. Одним з таких є врахування впливів на кабелі при підключенні тензодатчиків, які можуть бути спричинені різними факторами, такими як:

- Опір кабелю - залежить від довжини, перерізу і матеріалу кабелю. Чим більший опір кабелю, тим більше втрат енергії при проходженні струму.

- Затухання сигналу - зменшення амплітуди сигналу, що передається по кабелю, внаслідок впливу зовнішнього середовища, нелінійностей кабелю, перехресних зв'язків тощо.

Для зменшення втрат на кабелі при підключенні тензодатчиків слід вибирати кабель з маленьким опором і високою якістю передавання сигналу, скоротити довжину кабелю до необхідного максимуму. Використовувати однакову довжину кабелів, до яких приєднані тензодатчики.

Підключення тензорезисторів до електричної схеми може бути різними способами. Це залежить від мети дослідження та необхідної точності. Одним з найпростіших способів є підключення лише одного тензорезистора і вимірювання зміни опорів. Але цей спосіб має низьку чутливість і не компенсує вплив температури.

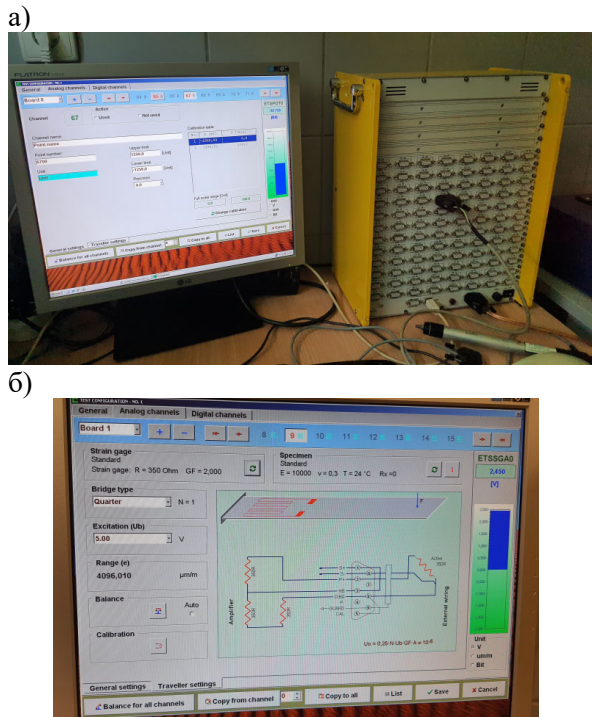


Рис.4. Експериментальні вимірювання: а) планування експерименту за допомогою системи збору даних та обробка інформації спеціалізованою програмою; б) діалогове вікно спеціалізованої програми в процесі тестування системи, планування системи підключення тензодатчиків.

Fig.4. Experimental measurements: а) experiment planning using a data collection system and information processing with a specialized program; б) a dialog window of a specialized program in the process of testing the system, planning the connection system of strain gauges.

Для збільшення точності вимірювання бажано підключати два або чотири тензорезистори у мостову схему Уїтстона, яка дозволяє вимірювати зміну напруги на діагоналі моста. Мостова схема має високу чутливість і може компенсувати вплив температури, якщо тензорезистори мають однаковий коефіцієнт температурної залежності опору. Мостова схема може бути симетричною або асиметричною, залежно від кількості та розташування тензорезисторів. Підключення тензорезисторів у мостову схему є одним з найпоширеніших і найточніших методів вимірювання деформацій.

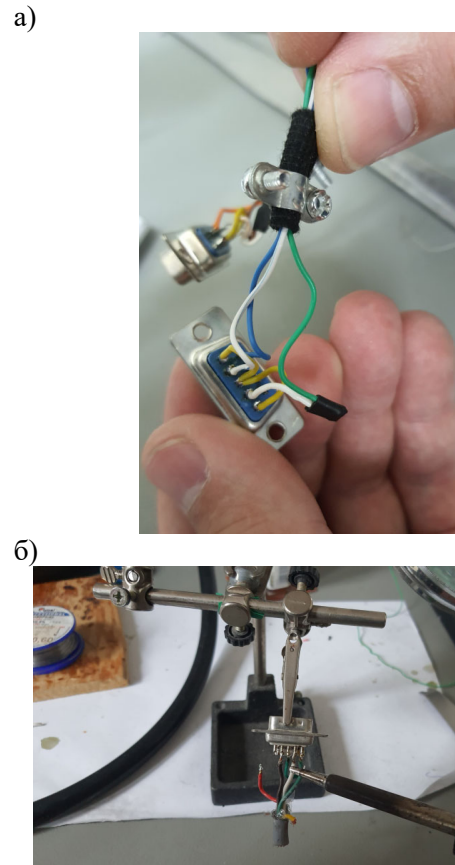


Рис.5. Підготовка до експериментальних вимірювань: а) контроль підключення роз'ємів тензодатчика; б) перевірка якості контактів та припайка необхідних з'єднань.

Fig.5. Preparation for experimental measurements: а) control of the connection of strain gauge connectors; б) checking the quality of contacts and soldering the necessary connections.

Цей метод має свої переваги, такі як висока чутливість, температурна компенсація, можливість вимірювання різних типів деформацій (поздовжніх, поперечних, кутових тощо), а також недоліки, такі як складність підключення, необхідність калібрування тощо. В залежності від задач вимірювання в точці вимірювання використовується один або кілька тензодатчиків. Використовують спосіб підключення як «повний міст», «напівміст» або «четверть мосту» для позначення такого розташування (Рис.6). Хоча міст Уїтстона, який використовується для вимірювання, завжди повний і повністю або частково утворений тензодатчиками та зразком (Рис.6а). Потім його доповнюють

постійні резистори, які вбудовані в прилади. Для розрахунку опорів тензорезисторів у мості Уїтстона існує багато літератури та онлайн-калькуляторів, за допомогою, яких це просто розраховується в залежності від прийнятої схеми підключення тензорезисторів у мості Уїтстона.

Мостову схему Уїтстона згідно [6,7] пояснюють наступним чином: мостова схема утворюється опорами  $R_1 - R_4$ , які створюють чотири плеча або гілки. Точки 2 і 3 моста Уїтстона відповідають за приєднання напруги збудження  $V_s$ . В точках 1 і 4 вимірюють сигнал вихідної напруги моста  $V_0$ . Напруга живлення моста  $V_s$ , яка прикладена до точок 2 і 3, розподіляється на дві половини моста  $R_1 - R_2$  і  $R_4 - R_3$  як відношення відповідних опорів моста, тобто кожна половина моста утворює дільник напруги.

Відомим фактом є те, що необхідно досягати збалансування мосту [6,7]. Так можна виміряти зміну опору в гілках. Якщо міст розбалансований через різницю напруг від опорів на  $R_1 - R_2$  і  $R_4 - R_3$ , то це можна розрахувати за формулою (1):

$$V_0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1)$$

У випадку, якщо міст збалансований і відповідні опори пропорційні (2), то вихідна напруга  $V_0$  дорівнює нулю:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2)$$

При виникненні деформації опір тензодатчика змінюється і цю величину позначають  $\Delta R$ . Це виражено у рівнянні (3):

$$V_0 = V_s \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad (3)$$

Для того, щоб виміряти деформацію

конструкції, необхідно щоб опори  $R_1$  і  $R_2$  були рівними в мосту Уїтстона. Це також необхідно і для опорів  $R_3$  і  $R_4$ , тобто по обох гілках опори мають бути рівними.

В роботі [6] автором Карлом Хофманом наведено детальні викладки по деяким припущенням і спрощенням у виразі (3) для отримання наступного рівняння (4):

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4)$$

На останньому етапі розрахунку термін  $\Delta R/R$  автор у [6] замінює наступним:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5)$$

де  $k$  - коефіцієнт  $k$  тензодатчика,  $\varepsilon$  - деформація. Це дає наступне (6):

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (6)$$

В результаті проведеного аналізу літературних джерел та наукових досліджень по організації випробування несучих конструкцій будинку, а саме пальових фундаментів з металевих паль було розроблено алгоритм вимірювання деформацій металеві труби, яка працює на стиск, за допомогою тензодатчиків:

- вибір тензодатчиків, які підходять для вимірювання поздовжніх деформацій металеві труби. Необхідно врахувати фактори, такі як діапазон деформацій, чутливість, температурна стабільність, розмір, спосіб кріплення тощо.

- підключити тензодатчики до мостової схеми, яка має забезпечити високу точність вимірювання зміни напруги на діагоналі моста. Для цього можна використати симетричну мостову схему з двома тензодатчиками на одному боці моста і двома резисторами на іншому боці. Забезпечити однаковий коефіцієнт температурної залежності опору для всіх елементів моста.

- прикріпити тензодатчики до металеві труби, яка працює на стиск, за допомогою спеціального клею. Розташувати тензодатчики так, щоб вони були паралельні осі

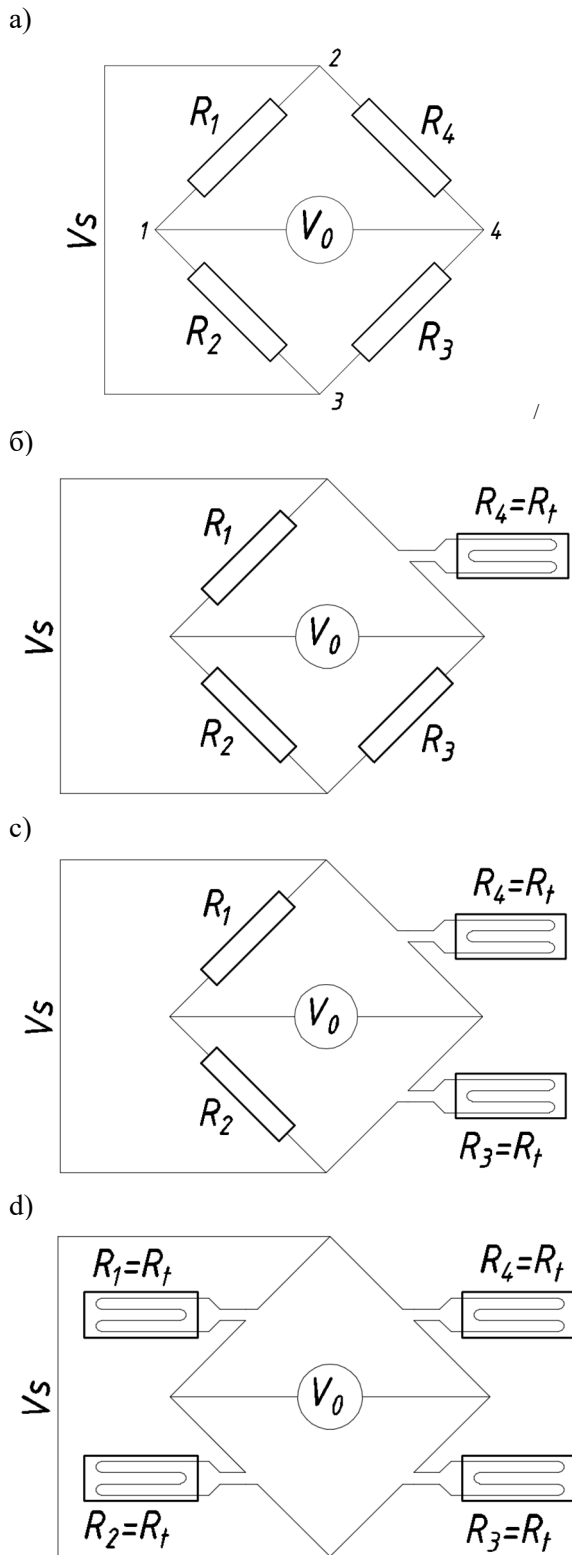


Рис.6. Підключення тензодатчиків за схемою Уїтстона: а) загальний вигляд; б) чверть мосту; в) напівміст; г) повний міст.

Fig.6. Connection of strain gauges according to the Wheatstone scheme: a) general view; b) a quarter bridge; c) half bridge; d) full bridge.

труби і розміщені на протилежних сторонах труби. Забезпечити надійний контакт тензодатчиків з поверхнею труби і захист від зовнішніх впливів.

- провести випробування металевої труби на стиск за допомогою спеціального пресу, який створює задану силу стиску. Вимірювати зміну напруги на діагоналі моста за допомогою вольтметра або осцилографа. За допомогою коефіцієнта перетворення моста обчислити вимірювану деформацію труби. Порівняти отримані результати з теоретичними або експериментальними даними інших методів вимірювання деформацій.

- оцінити точність і надійність методу вимірювання деформацій за допомогою тензодатчиків. Врахувати можливі похибки, такі як нелінійність тензодатчиків, дрейф напруги, вплив температури, електромагнітних полів, механічних напружень тощо.

- зробити висновки щодо результатів вимірювання, а також навести переваги і недоліки методу вимірювання деформацій за допомогою тензодатчиків.

### ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Вивчення питання щодо організації вимірювання деформацій несучих конструкцій будівель за допомогою тензодатчиків дозволило зробити наступні висновки:

Організація експерименту по вимірюванню деформації несучих конструкцій будівель потребує особливої уваги до його підготовки. Належну увагу слід приділяти до приладів та деталей, за допомогою яких виконується збір даних та їх обробка.

Показано, що використання тензорезисторів в якості датчиків вимірювання деформацій несучих конструкцій вимагає їх чіткої і запланованої орієнтації по відношенню до напрямку дії сил; вибір якісних матеріалів для з'єднання несучої конструкції та тензодатчиків; виконання якісного припаювання провідників до тензодатчиків; вибір схеми підключення тензодатчиків до основної системи, яка використовується в разі з приладом, за допомогою якого відбувається збір та обробка даних та ін.

Встановлено, що використання



тензорезисторів, які враховують температурну похибку дозволяє отримати більш достовірні дані.

Обґрунтовано, що тензометрія є ефективним і точним методом визначення зміни електричного опору при деформації тензодатчиків, що дозволяє оцінити напружено-деформований стан несучих конструкцій.

Для подальшої роботи заплановано проводити подальшу оптимізацію параметрів тензодатчиків та кабелів для зменшення втрат при підключенні тензодатчиків. Також заплановано розширити спектр типів навантажень, під якими працюють несучі конструкції будинків, та порівняти результати тензометрії з іншими методами вимірювання деформацій.

Автор висловлює подяку керівництву Інституту будівництва Університету Зеленогурського за надання можливості проводити наукові дослідження на базі сучасного програмного забезпечення та лабораторного обладнання. Також автор дякує колегам з лабораторії за надання необхідного обладнання та консультацій.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд: ДСТУ Б В.3.1-2:2016. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 68 с.
2. Кузьмич Л.В. Оптимізація вимірювальних засобів напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчиків / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // *Науково-технічний журнал «Авіаційно-космічна техніка і технологія»*. – Харків: ХАІ, 2019. – Вип. 3(155). – С.50-56. doi: 10.32620/aktt.2019.3.06.
3. Кузьмич Л.В. Методи та засоби вимірювання напружень та деформацій складних конструкцій приладовою системою: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.01 / Кузьмич Людмила Володимирівна. – К.: КПІ, 2019. – 335с.
4. Долгов М.А., Пискунов С.О. Міцність та руйнування елементів конструкцій. Частина 1. Фізичні основи міцності та використання тензометрії для визначення напруженого стану елементів конструкцій: Навч. посіб. – Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2022. – 44 с.

5. Sakharov V. In situ Pile tests – 2019 project. Methodology and results / V. Sakharov, W.Szajna, I.Boyko // *Proceedings of the Third International Conference «Challenges in geotechnical engineering» and of the Project «PILE TESTS – 2019»*. – Zielona Góra, 2019. – С.49-50.
6. Hoffmann K. An Introduction to Measurements using Strain Gages. – Publisher: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989 – 258с.
7. Інтернет-ресурс: <https://www.hbm.com/fr/7163/wheatstone-bridge-circuit/>

#### REFERENCES

1. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд: DSTU B V.3.1-2:2016 [Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures]. (2017). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 68 (in Ukrainian).
2. Kuzmych, L.V., Ornatskyi, D.P., Kvasnikov, V.P. (2019). Optymizatsiia vymiriuvalnykh zasobiv napruzhenno-deformovanoho stanu za dopomohoiu tenzodatchyiv [Optimization of the instruments of the measurement of a stressed-deformed state by tensors]. *Naukovotekhnichniy zhurnal «Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia»*, Kharkiv: KhAI, 3(155), 50-56. (in Ukrainian). DOI: 10.32620/aktt.2019.3.06.
3. Kuzmych, L.V. (2019). Metody ta zasoby vymiriuvannya napruzhen ta deformatsii skladnykh konstrukttsii prykladovoiu systemoiu [Methods and tools of measuring stresses and deformations of complex structures by instrument system]. *Dys. doktora tekhn. nauk: 05.11.01*. Kyiv: KPI, 335 (in Ukrainian).
4. Dolhov, M.A., Pyskunov, S.O. (2022). Mitsnist ta ruynuvannya elementiv konstrukttsii. Chastyna 1. Fizychni osnovy mitsnosti ta vykorystannia tenzometrii dlia vyznachennia napruzhenoho stanu elementiv konstrukttsii [Strength and destruction of structural elements. Part 1. Physical foundations of strength and the use of tensometry to determine the stress state of structural elements]. *Navch. posib*. Kyiv: NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho», 44. (in Ukrainian).
5. Sakharov, V, Szajna, W, Boyko, I. (2019). In situ Pile tests – 2019 project. Methodology and

results. *Proceedings of the Third International Conference «Challenges in geotechnical engineering» and of the Project «PILE TESTS – 2019»*. Zielona Góra, 49-50.

6. Hoffmann, K. (1989). An Introduction to Measurements using Strain Gages. *Publisher: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt*, 258p.
7. Internet resource:  
<https://www.hbm.com/fr/7163/wheatstone-bridge-circuit/>

### **Features of measuring deformations of load-bearing structures of buildings during their field and laboratory tests under the action of static and dynamic loads**

*Vasyl Pidlutskyi*

**Summary.** The peculiarities of measuring the deformations of load-bearing structures of buildings during their field and laboratory tests using strain gauge-based sensors are considered. An overview of various problematic issues that arise in the process of conducting experimental tests and affect the measurement results is given. The most common, which affect the accuracy of measurements, are the effects of temperature, humidity, and vibration; the difficulty of calibrating and mounting strain gauges on different surfaces of elements; complexity of measurement data processing; combination of high-quality work of strain gauges, cable conductors, measuring equipment, data collection and processing system; the selection of the connection scheme of tensor resistors in the Wheatstone bridge.

The peculiarities of the organization of the experiment for testing the load-bearing structures of the building, namely pile foundations, are considered, and the main problematic issues when using strain gauges as strain gauges of building elements are given.

The use of strain gauges to measure deformations of load-bearing structures of buildings is one of the common methods, which has many advantages, which are discussed in detail in the work. Strain gauges can be used to measure deformations of elements that are mechanically connected to them. They have high measurement accuracy, sensitivity to element deformation, and a wide variable measurement range.

The advantages of using the Wheatstone bridge to measure the change in electrical resistance are highlighted, as this method allows measuring very

small values of the change in resistance. Methods of connecting tensor resistors according to the Wheatstone scheme are considered, the choice of which depends on the purpose of the study and the required accuracy. One of the easiest ways is to connect just one strain gauge to a current or voltage source and measure the change in resistance. But this method has low sensitivity and does not compensate for the effect of temperature. A more accurate way is to connect two or four tensor resistors in the Wheatstone bridge circuit, which allows you to measure the voltage change on the diagonal of the bridge. The bridge circuit has a high sensitivity and can compensate for the effect of temperature if the tensor resistors have the same coefficient of temperature dependence of the resistance.

An algorithm for measuring the deformations of a metal pipe working under compression using strain gauges has been developed.

**Key words.** Strain gauges, measurements, principal stresses, deformations, pile foundations, load-bearing structures, Wheatstone bridge.