



Получена: 20.03.2019 г.

Приета: 29.07.2019 г.

## ТЕНЗОМЕТРИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА ДЕФОРМАЦИИ В ГЕОМРЕЖИ ЗА ПЪТНИ НАСТИЛКИ

И. Стайков<sup>1</sup>, Н. Керенчев<sup>2</sup>

*Ключови думи:* пътни настилки, геосинтетични материали, тензометрични датчици

### РЕЗЮМЕ

Тензометричните измервания намират широко приложение в областта на строителството, лекото и тежко машиностроене, при лабораторни изследвания. С помощта на тензометрични датчици могат да се определят деформации, посредством измерването на конкретни физични величини, като електрическо съпротивление, налягане, скорост на звука и др. Широката употреба на различни по вид геосинтетични продукти в елементите от транспортната инфраструктура поставя въпроса за необходимостта от изследване на напрегнатото и деформирано състояние на тези продукти, особено когато представляват съставна част от конструкцията на пътната настилка. Статията е фокусирана върху практическото приложение на мост на *Wheatstone* за измерване на деформациите в армираща геомрежа.

### 1. Въведение

Армиращите продукти, влагани с цел стабилизация на почвите, изпълняват армираща функция по два основни начина: посредством опънни усилия, предавани по цялата площ на мрежата, и посредством огъването на мрежата, т.е. посредством реализация на т.нар. „мембранен ефект“. Тензометрични датчици, монтирани в геомрежата, биха отчели деформации, които се дължат както на опънатата коравина на мрежата, така и на ло-

---

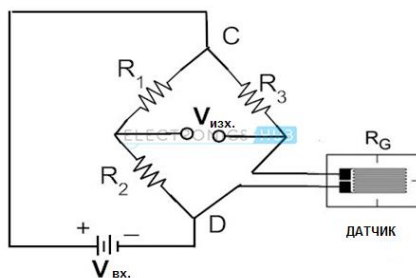
<sup>1</sup> Илиян Стайков, докторант инж., кат. „Пътища и транспортни съоръжения“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ilian.staikov@gmail.com

<sup>2</sup> Николай Керенчев, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kerenchev@hotmail.com

калното огъване в участъка от мрежата, където е разположено натоварването. В практиката геомрежите, влагани в пътните настилки, са разположени на значителна площ. Това определя и доминиращия показател, който способства за армиращия ефект. Този показател е опънната коравина на геомрежата. Ето защо е важно при тензометричните измервания да се определи деформацията, която се поема от опънната коравина на мрежата. За да се намали ефектът от локалното огъване на мрежата, е необходимо монтирането на датчиците да става по двойки под и над съответното ребро от геомрежата [1]. Средните стойности от записите на данните за двата датчика ще покажат приблизителната стойност на деформациите, зависещи от опънната коравина на мрежата.

## 2. Тензометрични измервания – мост на *Wheatstone*

Провеждането на подобни тензометрични измервания се предхожда от предварително изготвена за целта електрическа схема на мост на *Wheatstone*. Мостът на *Wheatstone* представлява електрическа верига с четири броя резистора (в класическия си вариант) за измерване на електрически съпротивления. Тази електрическа верига (фиг. 1) е подходяща също така и за измерване на малки изменения в съпротивлението, а това я прави приложима при определянето на измененията в съпротивлението на тензометрични датчици, с помощта на които се определят деформации [2].



Фиг. 1. Електрическа схема на моста на *Wheatstone*

Добре известен факт е, че при механични въздействия тензометричните датчици изменят пропорционално своето съпротивление с изменение на относителното удължение  $\varepsilon$ . Степента на пропорционалност се нарича коефициент на чувствителност на датчика. Той е основна негова характеристика и се определя експериментално.

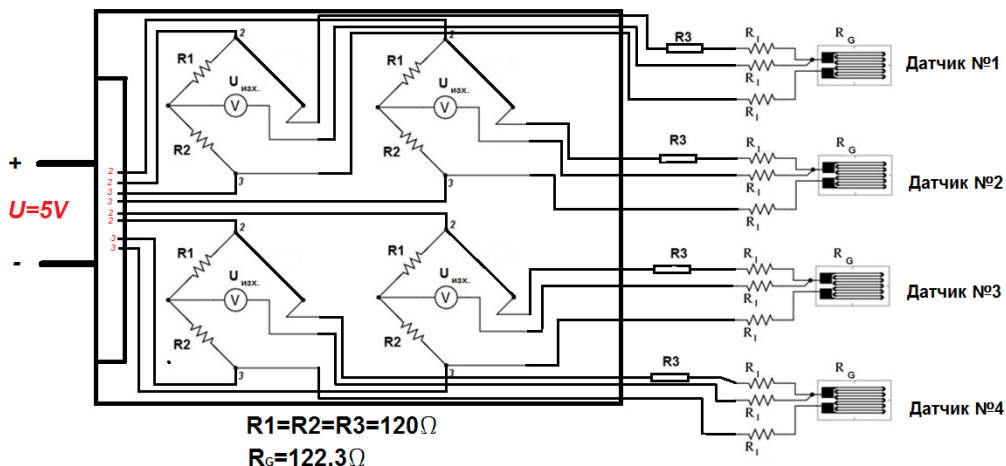
$$K_s = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\Delta R}{R \times \varepsilon}. \quad (1)$$

Четириите рамена на моста се формират от четирите резистора  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_G$ . Когато във възли С и D се подаде входно напрежение с известна стойност, то напрежението на изводите на другите два диагонални възела ще зависи от отношението на четирите резистора, като тази зависимост има следния вид:

$$V_{out} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_G}{R_3 + R_G} \right) \times V_{in}. \quad (2)$$

За нуждите на конкретния експеримент са използвани четири броя тензометрични електросъпротивителни датчика, които се разполагат в едно от рамената на четири отделни електрически моста. Така изготвената електрическа схема, показана по-долу, позволява измерване на деформациите в надлъжните и напречните ребра на геомрежата, както отгоре така и под нея. Резисторите в схемата на моста са със съпротивление  $R_{1,2,3} = 120 \Omega$  и чувствителност  $100 \text{ ppm/gradC}$ . Използваните в опитната постановка тензометрични датчици са със съпротивление  $R_G = 122.3 \Omega$  ( $116 \Omega$ ) и коефициент на чувствителност  $k = 2,12$  ( $2,09$ ). Четирите съпротивителни датчика се монтират върху и под ребрата на геомрежата.

### ЕЛЕКТРИЧЕСКА СХЕМА НА ОПИТНАТА ПОСТАНОВКА



Фиг. 2. Електрическа схема на опитната постановка

Важен етап при монтирането на тензометрични датчици е изборът на подходящ продукт, осигуряващ добра адхезия с повърхността, по която ще се извършват измерванията. Целесъобразно е при подобен род измервания да се използват продукти, които имат добра адхезия с полимери. Такива продукти са секундните лепила и двукомпонентната епоксидна смола [1].

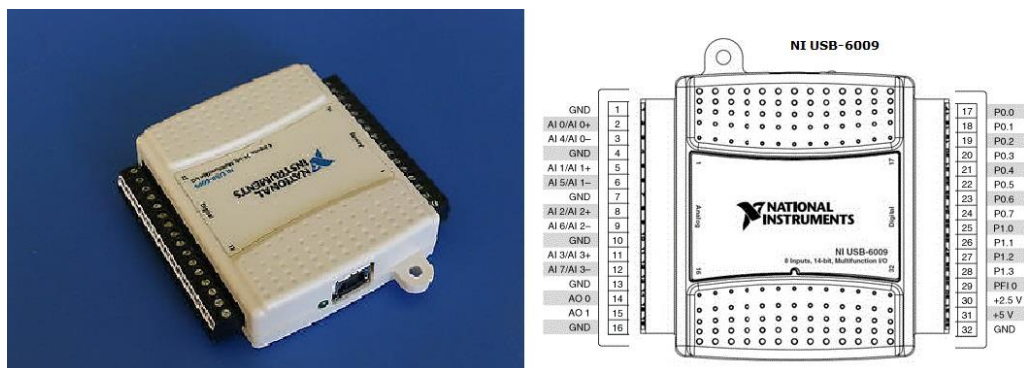
Друга важна особеност при провеждането на подобни експериментални изследвания на открито е влиянието на температурата върху електрическото съпротивление. Разликата в температурата на резисторите, намиращи се на открито, и тези, монтирани в настилката, влияе върху тяхното съпротивление и би довело до дебалансиране на моста. Ето защо резистор  $R_3$  се извежда извън общия модул, в който са поместени резисторите и потенциометрите, и заедно със съпротивителния датчик се полага в настилката. Целта е две по две рамената на моста да бъдат разположени в еднакви температурни условия, за да се избегнат температурни грешки при измерванията.

Използването на т.нар. „половин мост“ е схема, при която две от съпротивленията на моста са извън общия модул и са свързани с кабели. При тази конфигурация на моста кабелите с техните характеристики (сечение и специфично електрическо съпротивление) също са част от моста. При използването на еднакви проводници с еднаква дължина влиянието на температурата може да се пренебрегне [2].

Обект на изследването е полимерна биаксиална геомрежа Armatex G65/65 с размери на клетката  $35/35 \text{ mm}$ .

### 3. Аналогово-цифров преобразувател

Използването на моста на Wheatstone е свързано с измерването на електрическото напрежение на диагоналните изводи, показани в схемата на моста. При схема с четири резистора с еднакво съпротивление, независимо от големината на входното напрежение, на изхода винаги ще се генерира нулев потенциал. С други думи, мостът е балансиран. Дори съвсем малко отклонение на съпротивлението в един от резисторите (или рамената на моста) ще доведе до възникване на напрежение на изхода. Именно този факт позволява да се правят прецизни измервания на относително малки величини, като например деформации в метали, стъкло, бетон и др. При провеждането на измервания от подобен тип входната физична величина (в конкретния случай това е електрическо напрежение) постъпва като сигнал, който трябва да се представи във вид на цифров код [5]. За тази цел се използват аналогово-цифрови преобразуватели (ADC). Общият вид на такъв аналогово-цифров преобразувател е даден на фиг. 3.



Фиг. 3. Аналогово-цифров преобразувател (ADC) NI USB-6009

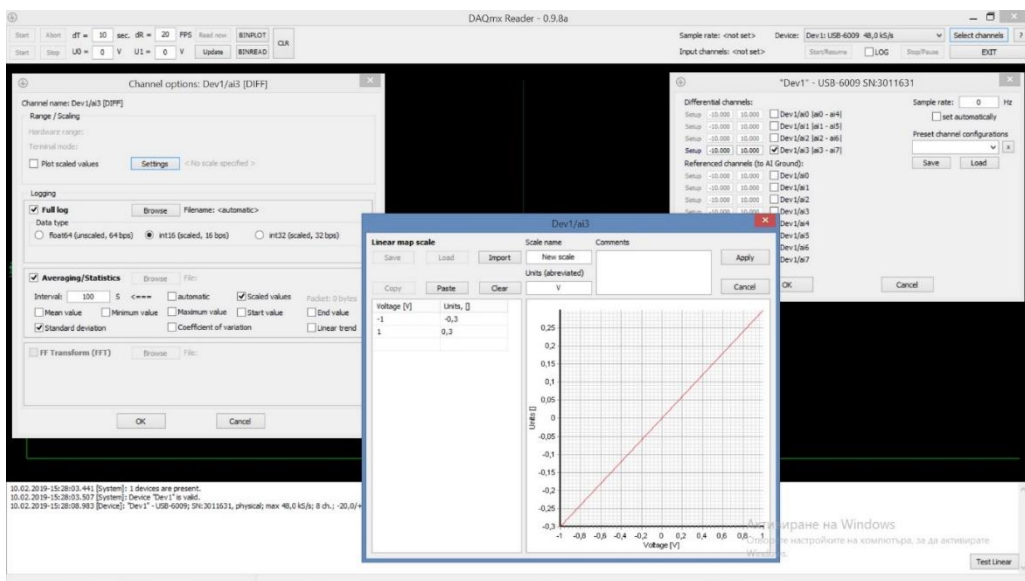
Преобразувателят се състои от 8 единични аналогови входа, два канала за аналогов изход, 12 цифрови входни канала с 32-битов брояч. Позволява обработката на 48000 входни сигнала в секунда при изходно напрежение +5 V и ток с големина 200 mA, [3]. От лявата страна на устройството (фиг. 3) са разположени аналоговите канали. Те са 8 на брой, номерирани от 0 до 7. При диференциални измервания се използват аналогови входове по двойки за положителни и отрицателни входни аналогови данни, както следва: AI 0 и AI 4, AI 1 и AI 5, AI 2 и AI 6, AI 3 и AI 7. От дясната страна са разположени цифровите канали и изходното захранване. Получената от конвертирането на аналоговия сигнал цифрова информация се предава посредством USB-кабел към персонален компютър или лаптоп.

### 4. Калибриране на опитната постановка

Шумът е неизбежен в системите за събиране на данни. Отделни физични процеси пораждат отклонения от реалните стойности на измерваните величини. Тези отклонения е прието да се определят с понятието „шум“. Шумът в даден сигнал може да се дължи както на електромагнитни, така и на радиочестотни смущения по дължината на свързващите проводници. Съществува и шум в самия източник на сигнал. Всички тези източници на шум се комбинират, за да създадат регион на неточности и отклонения около

стойностите на даден сигнал, обект на измерването. В кабелите, осигуряващи преноса на сигнала от датчика към преобразувателя, също възникват смущения. Техният ефект може да се намали значително при използването на многожилни усукани проводници с екранираща метална оплетка. Такъв тип кабели е използван при реализацията на опитната постановка. Друг източник на шум е самият ADC. Влиянието на резисторите в интегралната платка на преобразувателя води до отклонения при конвертирането на аналоговия сигнал. Прието е този вид шум да се нарича шум на входа. При измервания, при които ADC обработва сигнали, изменящи се във времето, се получава така нареченият шум от квантуване [4].

За визуализация и обработка на измерваните сигнали, както и за генерирането им в текстов вид, се използват различни програмни продукти (DAQmx Read, Monitor, LabView NI Device Monitor и др.), които позволяват коригирането на определени параметри, с цел филтрация на шума и получаване на коректни стойности от измерванията. При визуализацията на сигнала от измерването е използван програмният продукт DAQmx Read (разработка на гл. ас. д-р инж. Т. Танев, УАСГ София). На фигурата по-долу е показан общият интерфейс на програмата.



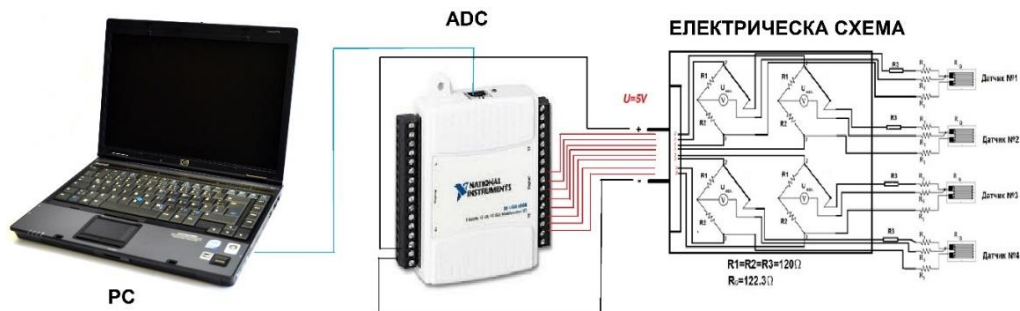
Фиг. 4. Интерфейс на програмния продукт DAQmx Reader

В програмата се задават редица параметри, необходими за коректното събиране и обработване на данни. Необходимо е да се знае входното напрежение на веригата, както и диапазонът на работното напрежение в системата. Задава се за какъв интервал от време ще се събират данните, каква част от тях се осредняват и през какъв интервал, каква е скоростта на запис на данните. Дава се възможност на потребителя да избере кои данни от измерването ще бъдат записани (максимална и минимална стойност, осреднени стойности). Програмата може да визуализира осреднени стойности, като максималната скорост на измерване може да достигне до 12 000 отчета в секунда на един канал. Скоростта на осредняване на измерените стойности се получава като се раздели скоростта на запис на данните на интервала на осредняване. За нуждите на експеримента е избрана скорост от 1 осредняване в секунда. Важно предимство е възможността данните от измерването

да бъдат скалирани в реално време. При направена калибровка на датчици (или сензори, в зависимост от изследването) и при въведен мащабен коефициент могат да се събират данни не само за напрежението, но и да се получат готови данни за изследваната величина, например деформации.

## 5. Приложения на опитната постановка

Обобщената принципна схема на необходимата апаратура за провеждането на измервания има следния вид:



Конфигурацията се състои от преносим компютър, аналогово-цифров преобразувател (ADC) и общ модул с резисторич свързани в схема на мост на *Wheatstone*. Подходяща е за определянето на деформации на бетонни и стоманени конструкции и елементи, деформации, възникващи в геомрежи под пътни и железопътни настилки. Така описаната конфигурация по същество представлява система за събиране на данни (Data Acquisition System), която в конкретния случай дава възможност за определяне на деформации на различни видове материали. Аналоговите входни данни от измерването се конвертират в цифров код посредством преобразувателя (ADC). Така събраните данни могат да се визуализират посредством цитираните по-горе програмни продукти, както и да се получат данни в текстов вид, подходящи за последваща обработка и интерпретация.

Важно предимство е мобилността на системата за измерване, и възможността за определяне на деформации на открито в процеса на строителство. Необходимото оборудване включва преносим компютър, USB-кабел, аналогово-цифров преобразувател и модула с електрическите вериги, част от който са и тензометричните датчици [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gnanendran, C. T., Selvadurai, A. P. S.* Strain measurement and interpretation of stabilizing force in geogrid reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 177-194, 2001.
2. *Hoffmann, K.* Applying the Wheatstone Bridge Circuit. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
3. NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device User guide. 2015.
4. *Кестер, У.* Входной шум АЦП: хороший, плохой и опасный. Хорошо ли, когда его нет? Компоненты и технологии, 2008.

5. Керенчев, Н. Разработване на опитна постановка за измерване на параметри, описващи деформационното поведение на строителни почви. // Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, том XLVI, 2013-2014.

6. Танев, Т. Моделиране на почви с отчитане на изотропно деформационно уякчаване. Дисертационен труд, УАСГ, София, 2015.

## **Благодарности**

Екипът по настоящата тема изказва благодарност към Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ за оказаната финансовата и интелектуална подкрепа по време на провеждане на изследването (договор БН-212/2018).

## **TENSOMETRIC MEASUREMENTS OF ROAD PAVEMENTS GEOGRIDS STRAINS**

**I. Staykov<sup>1</sup>, N. Kerenchev<sup>2</sup>**

***Keywords:** road construction, geosynthetic materials, strain gauges*

### **ABSTRACT**

Tensometric measurements are widely used in the field of civil engineering. With the help of strain gauges, deformations can be determined by measuring specific physical quantities such as electrical resistance, pressure, sound velocity, etc. The widespread use of different geosynthetic products in transport infrastructure raises the question for investigation the stress-strain condition of these products, especially when they are part of a road structure. The paper focuses on the practical application of a Wheatstone bridge for measuring the deformations in a reinforced geogrid material using data acquisition system.

---

<sup>1</sup> Ilian Staikov, Eng., Dept. "Road construction and transport facilities", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ilian.staikov@gmail.com

<sup>2</sup> Nikolay Kerenchev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: kerenchev@hotmail.com