

В.П. РОЙЗМАН, І.І. КОВТУН, О.К. БІЛИК
Хмельницький національний університет

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДРОТЯНИХ МАЛОБАЗНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДІЙСНИХ ЗНАЧЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Метою представлено дослідження є забезпечення завадостійкості дротяних малобазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки, які виникають під дією технологічних факторів та умов експлуатації. Для дротових тензорезисторів було виявлено технологічні та конструктивні фактори, що впливають на тензочутливість і спричиняють похибку вимірювання деформацій. Виявлено вплив температури на точність вимірювання деформації і запропоновано способи температурної компенсації. Створено установку для визначення допустимого струму живлення тензорезисторів. Експериментально встановлено допустимі значення струму живлення, відповідні допустимій зміні відносного опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення при збереженні чутливості апаратури, для тензорезисторів з різними базами, наклеєних на різні матеріали.

Ключові слова: електротензометрія, тензорезистор, деформація, напруження, електронний компонент, завадостійкість.

V.P. ROYZMAN, I.I. KOVTUN, O.K. BILYK
Khmelnitskyi National University

PROVIDING MEASUREMENT STABILITY FOR SMALL-BASE WIRE STRAIN GAUGES APPLIED TO ELECTRONIC COMPONENTS

The research represented in the paper is aimed at providing measurement stability for small-base wire strain gauges applied to measure strain of electronic components as those are exposed to external forces present in technological and operational conditions. The wire strain gauges were inspected in order to identify technological and design factors, that effect their gauge factor and cause measurement errors. The identified factors are governed by such properties of the gauges as physical and theological, fatigue strength, and shape and geometry. For the wire gauges the temperature effect that distorts strain measurement accuracy is defined and the thermal compensation methods are introduced to provide for using thermal compensation circuit, combined strain resistors and auto-compensation strain resistors. The experimental installation was designed to assess threshold limit level for the supply current of the strain gauges. The threshold supply current is limited by threshold of gauge mesh heating temperature, whose value is defined by amount of heat extracted by the current and also cooling conditions. The cooling conditions, in turn, depend on size of the material inspected and its thermal conduction, area occupied by the gauge mesh, ratio of wire surface to its volume, glue layer and its thermal conduction, environmental temperature and other factors. By using designed experimental installation the threshold limit levels for the supply current of the strain gauges were obtained with account for and in compliance with acceptable changes of gauge resistivity, caused by heating from supply current, and strain gauge factor retained for various sizes of strain gauges and various materials strain gauges are attached to for inspection.

Keywords: electrotensometry, strain gauge, strain, stress, electronic components, measurement stability.

Постановка проблеми

Тенденція до зниження ваги та отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки привела до того, що такі вироби, які володіють високими електронними характеристиками, виявились не достатньо механічно міцними. В наслідок дії статичних та динамічних статичних та динамічних навантажень елементи їх конструкцій руйнуються, що приводить до відмов окремих вузлів або апаратури в цілому. В зв'язку з цим проблема забезпечення механічної міцності стала в один ряд з традиційними задачами надійності в електроніці [1]. Важливим етапом рішення цієї проблеми є розробка нових та вдосконалення існуючих методів та засобів експериментального дослідження міцності і руйнування, які повинні застосовуватись при проектуванні, випробуванні та експлуатації електронної техніки.

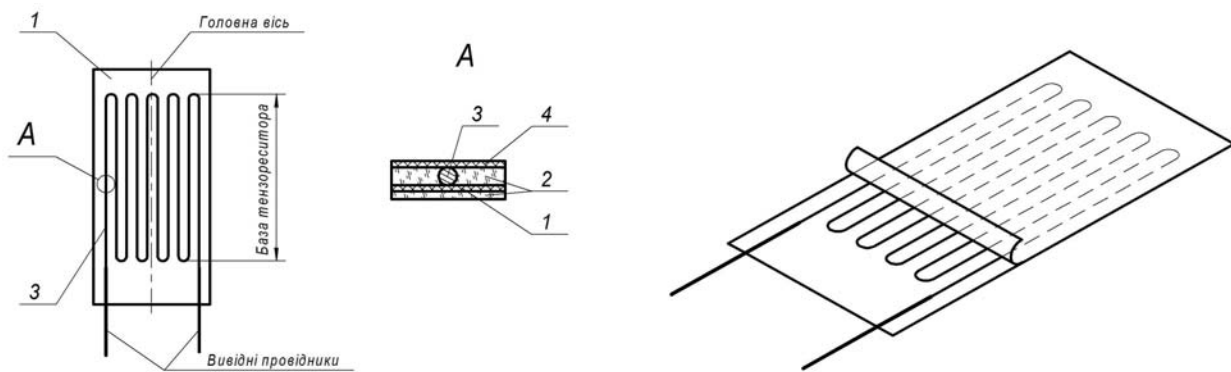
Методи вимірювання, що застосовуються для оцінки напружено-деформованого стану об'єктів, можна розділити на наступні групи: рентгенівські, поляризаційно-оптичні, муарових смуг, крихких покриттів, гальванічних покриттів і тензометрії [2–4]. Кожен з методів володіє певними перевагами і недоліками і призначений для використання в конкретних умовах. Проте, зважаючи на специфіку виробів електроніки, найбільш широке вживання для дослідження напружено-деформованого стану може отримати, після відповідного доопрацювання, метод електротензометрії [4, 5].

Електротензометрія відноситься до електричного методу вимірювання деформацій. Електричний метод засновано на заміні механічних величин електричними. Найбільш розповсюдженим пристроєм для перетворення неелектричних величин в електричні є тензорезистор опору. В теперішній час в експериментах широко використовуються дротяні, фольгові та напівпровідникові тензорезистори [4, 5] (тензодатчики). Хоча принцип їх дії ідентичний. Їх переваги: можливість виміру деформацій одночасно для великої кількості точок, різні розміри бази, можливість дистанційного виміру. Однак, використання тензорезисторів вимагає вирішення низки методологічних завдань, виконання спеціальних вимог та технологічних правил, отримання навиків та умінь при роботі з датчиками і апаратурою.

Тензочутливість дротяних тензорезисторів

В основу роботи тензорезисторів покладена властивість матеріалів (провідників) при їх розтягу або

стиску змінювати свій опір пропорційно існуючій деформації. Тому за зміною опору тензорезистора, наклеєного на деталь, можна визначати і саму деформацію. Дротяний датчик (рис. 1) являє собою тонкий петлеподібний, укладений на паперову основу дріт, що має товщину від 15 до 30 мкм. До кінців утвореної таким чином решітки приварені або припаяні виводи (провідник більшого перерізу) для підключення тензорезистора до апаратури.



1 – паперова або лакова підкладка; 2 – зв'язуючий шар; 3 – тензочутливий елемент; 4 – захисний елемент
Рис. 1. Дротяний тензорезистор

Зміну питомого опору провідника датчика при виникненні деформації розтягу або стиску називають тензорезистивним ефектом, який характеризується тензочутливістю і визначається за формулою [6]:

$$k = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho \cdot l}{\rho \cdot \Delta l}, \quad (1)$$

де $\Delta R/R$ – відносна зміна опору; $\varepsilon = \Delta l/l$ – відносна деформація деталі в місці наклеювання датчика; ν – коефіцієнт Пуассона; $\Delta \rho/\rho$ – відносна зміна питомого опору.

На величину цього коефіцієнта істотно впливають фізичні властивості матеріалів. Для матеріалів, що використовуються в тензорезисторах, величина k знаходиться в межах 2 .. 3,5: константан – 2,0 .. 2,1, ніхром – 2,1 .. 2,3, елінвар – 3,2 .. 3,5.

У дротяного датчика через заокруглення на кінцях петель виникає похибка вимірювання, пов'язана з бічною чутливістю, або чутливістю до поперечних деформацій:

$$\Delta R/R = k\varepsilon_x + S\varepsilon_y, \quad (2)$$

де k та S – коефіцієнти тензочутливості у поздовжньому та поперечному напрямках; ε_x та ε_y – відносні деформації у напрямках осей X та Y , де X – поздовжній напрям тензодатчика; Y – поперечний напрям тензодатчика.

Коефіцієнт тензочутливості датчика у поздовжньому напрямку через поперечну чутливість виявляється дещо нижчим ніж коефіцієнт тензочутливості датчика, який виготовлений з відрізка проволочки без заокруглень. Зі збільшенням бази датчика, тобто його довжини, ця різниця зменшується і для найбільш використовуваних тензорезисторів з базою 20 і навіть 10 мм – досить мала. Для датчиків з базою 1 чи 3 мм, величина S вже спів-розмірна зі значенням коефіцієнта тензочутливості k і повинна враховуватись при визначенні напружень.

Цього недоліку позбавлені тензорезистори, які виконані у вигляді одиночної нитки. Крім цього, провідники для тензометричних датчиків повинні мати великий питомий опір ρ , щоб отримувати датчики з малою базою для дослідження деформацій; добре приварюватись і паятись; не мати гістерезису для відтворюваності вимірів; характеризуватись постійним коефіцієнтом тензочутливості. Наприклад, у константановій проволочці він не змінюється, аж до його руйнування.

При прискореному навантаженні деталі з наклеєним дротяним тензорезистором і подальшою витримкою при постійному навантаженні зареєстроване початкове, після навантаження, значення відносної деформації з плином часу зменшується на декілька відсотків і потім за асимптотичним законом наближається до певного значення. Цей процес пов'язаний з явищем повзучості, коли деформації суттєво залежать від тривалості навантаження. Про такі матеріали говорять, що вони мають реологічні властивості.

Вигляд кривої повзучості тензорезисторів типу ПЗ-3Ц та П10-6Ц наведений на рис. 2, де на вертикальній осі відкладена відносна зміна опору тензорезистора dR (%), а на горизонтальній – час (год).

Однією із найважливіших характеристик тензорезисторів, що сприймають змінні деформації, є їх втомна міцність, тобто властивість витримувати при заданій деформації певне число циклів навантаження без пошкодження чутливого елемента резистора або інших деталей датчика. Так, наприклад, тензорезистори типу П10-6 з розвантажувальною петлею в місці приєднання чутливого елемента до вивідного провідника, при змінному навантаженні і деформацією $\varepsilon = 10^{-3}$ що здійснювалась із частотою $\nu = 50$ Гц, відпрацювали без руйнування більше 10^8 циклів. При цьому, після відпрацювання 10^8 циклів, спостерігалась зміна коефіцієнта тензочутливості тензорезистора в межах $\pm 0,1$ %.

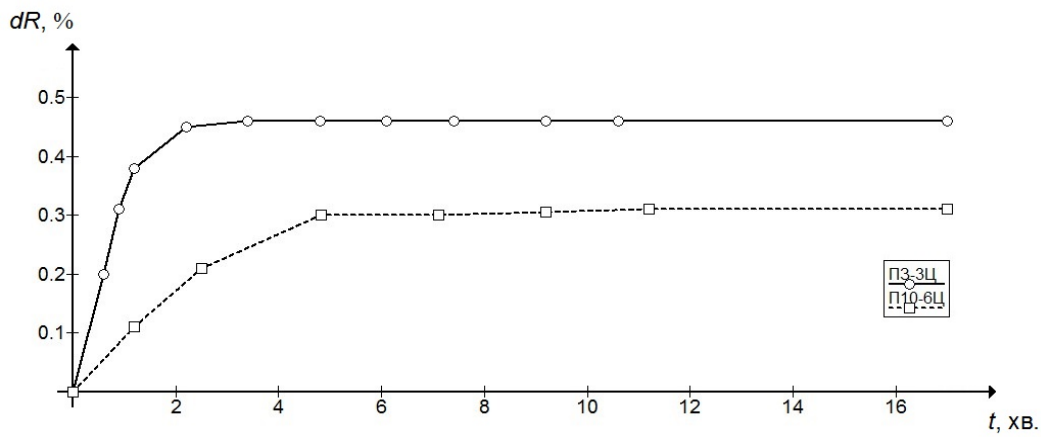


Рис. 2. Криві повзучості тензорезисторів

Вплив температури на точність вимірювання деформації тензодатчиком

У зв'язку з тепловим розширенням досліджуваної деталі і провідника тензорезистора, а також зміною опору тензорезистора від температури, необхідно відрізнити деформацію, яка реєструється при дії на досліджувану деталь тільки температурного впливу від деформації, викликаній зовнішніми зусиллями. При зміні температури деталі, в місці наклепки тензорезистора на ΔT , відносна деформація його дроту змінюється на $\Delta l_p/l = \alpha_1 \Delta T$, а відносна деформація деталі на довжині бази тензорезистора – на $\Delta l_s/l = \alpha_2 \Delta T$. Температурний коефіцієнт опору дроту (або фольги) тензорезистора змінюється на $\Delta R/R = \gamma \Delta T$ і тоді загальна зміна опору тензорезистора буде дорівнювати [5]:

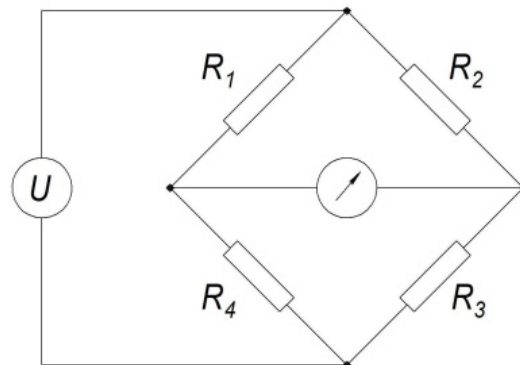
$$\Delta R/R = [(\alpha_2 - \alpha_1)S + \gamma] \Delta T, \tag{3}$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти температурного розширення матеріалу тензорезистора і деталі відповідно; γ – температурний коефіцієнт опору матеріалу тензорезистора; S – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора.

При відмінностях коефіцієнтів температурного розширення деталі α_1 і тензорезистора α_2 , можна фіксувати уявну (фіктивну) деформацію $\epsilon_f = (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$, яка еквівалентна деякій деформації від зовнішніх впливів, і поєднується з реальною деформацією і якщо не вжити спеціальних заходів, то можна отримати результати, які містять суттєві помилки.

При вимірюванні, вплив температури можна виключити наступними методами:

1. Використовуючи схему з температурною компенсацією (рис. 3). Два тензорезистори з однаковими параметрами вмикаються в різні плечі моста, при цьому активний тензорезистор сприймає дію зовнішніх сил і температури, а компенсаційний – тільки дію температури. Тензорезистори включені в різні плечі моста – цим і досягається термокомпенсація.



R_1 – активний тензорезистор; R_2 – компенсаційний тензорезистор; R_3, R_4 – резистори моста
Рис. 3. Схема температурної компенсації

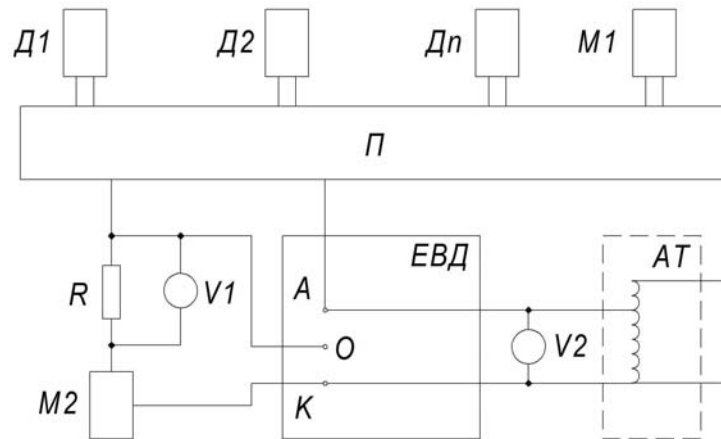
2) Компенсація за рахунок комбінованого тензорезистора. У цьому випадку ефект термокомпенсації досягається наступним чином. Чутлива решітка тензорезистора виготовляється з мікродроту з різними за знаком температурними коефіцієнтами β_1 та β_2 . Оперуючи довжиною відрізків l_1 та l_2 можна виготовити тензорезистори, термокомпенсовані для різних матеріалів.

3) Використовуючи самокомпенсовані тензорезистори. Для цього типу тензорезисторів термокомпенсація на певному діапазоні температур досягається шляхом підбору мікродроту з заданими електрофізичними параметрами. Якщо відомий закон зміни температури і температурна характеристика тензорезистора, то застосовують різні пристрої вводу корегування в показники датчика.

Визначення допустимої величини струму живлення тензорезисторів

Гранична величина струму живлення для тензорезисторів обумовлена допустимою температурою

нагріву решітки, величина якої визначається кількістю тепла виділеного струмом та умовами охолодження. Умови охолодження залежать від розмірів деталі і її теплопровідності, площі поверхні, яку займають нитки решітки, відношення поверхні дроту до його об'єму, товщини клейового шару і його теплопровідності, температури навколишнього середовища і ряду інших факторів. Для визначення допустимої величини струму живлення була зібрана спеціальна установка, схема якої наведена на рис. 4.



Д1-Дn – тензорезистори типу МПТ, КФ4ПІ; М1, М2 – магазини опору МСР-60М; П – перемикач П10; ЕВД – електронний вимірювач деформацій; V1 – мікрвольтметр В3-57; V2 – цифровий вольтметр В7-57; R – точний (прицезійний) опір 10 Ом $\pm 0,05\%$; АТ – автотрансформатор ЛАТР-5-0-250V

Рис. 4. Блок-схема установки для визначення допустимого струму живлення тензорезисторів

За допомогою перемикача П в активне плече електронного вимірювача деформації (ЕВД), в якості якого застосовувалася тензостанція 8АНЧ-26) включався магазин опорів М1 або один з досліджуваних тензорезисторів Д1-Дn. Значення опорів на магазинах М1, М2 підбиралися приблизно рівними опору тензорезисторів. Автотрансформатором АТ встановлювалася певна напруга живлення мостової схеми ЕВД. За допомогою мілівольтметра V1 вимірювали падіння напруги на еталонному опорі $R = 10$ Ом, який включено послідовно з досліджуваним тензорезистором і розраховували струм живлення тензорезисторів.

Нульові показники ЕВД відраховувались на протязі від 3 до 5 с після включення тензорезистора. Подальший відлік показань по ЕВД проводили через 1, 3, 5, 10, 12 хв. За отриманими даними будували графіки залежності зміни опору тензорезисторів у часі при встановленому струмі живлення. Для прикладу на рисунку 6, а представлені залежності зміни відносного опору $\Delta R/R$ або «фіктивної» деформації ϵ_{ϕ} тензорезисторів типу МПТ з різними базами, наклеєними на керамічний зразок, а на рисунку 5, б – та ж залежність, але для тензорезисторів закритих 15-міліметровим шаром епоксидного компаунду.

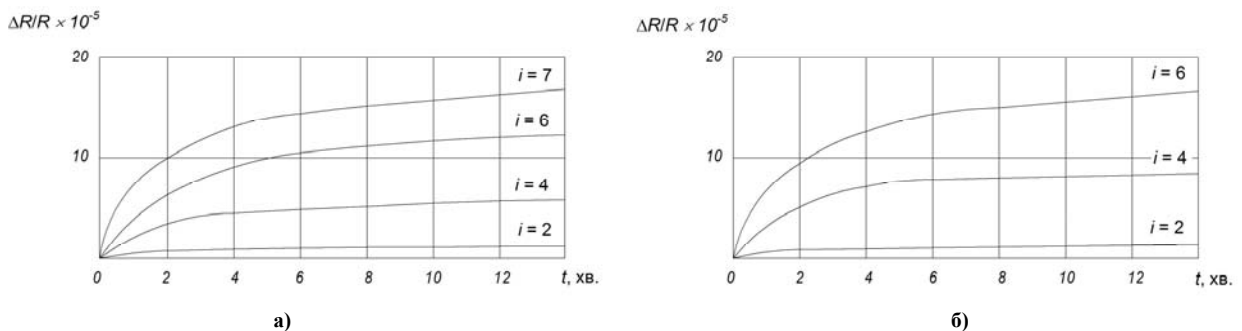


Рис. 5. Залежність зміни відносного опору тензорезисторів з базою від 0,5 до 3 мм, опором 100 Ом, виготовлених з мікродроту діаметром 4 мкм, від величини струму живлення і часу виміру, при монтажі тензорезисторів: а) на поверхні зразка; б) під шаром компаунда

Допустиму величину струму живлення тензорезисторів встановлювали, виходячи з роздільної здатності тензоапаратури і величини мінімальних передбачуваних деформацій. На підставі цієї вимоги припустима зміна опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення дорівнює $\epsilon_{\kappa} = 1 \cdot 10^{-5}$ одиниць відносної деформації. Відповідні їй допустимі значення струму живлення, визначені зазначеним способом, для різних матеріалів наведені в таблиці 1.

Ці ж значення струмів живлення придатні для інших матеріалів з близькими до кераміки теплофізичними характеристиками (склопластики, скло, компаунди).

Таблиця 1

Допустимий струм живлення тензорезисторів, наклеєних на кераміку (скло, компаунд)

| Параметр тензорезистора | | | Допустимий струм живлення тензорезисторів, наклеєних на зовнішній поверхні зразка, мА | |
|-------------------------|----------|--------------------|---|---------------------|
| Опір, Ом | База, мм | Діаметр дроту, мкм | Без компаунда | Під шаром компаунда |
| 50–300 | 0,5–3 | 4 | 2 | 1,9 |
| 50 | 5 | 30 | 16,2 | 14,2 |
| 100 | 5 | 15 | 6,6 | 5,8 |
| 100 | 5 | 20 | 9,44 | 7,7 |
| 100 | 10 | 15 | 7 | 6 |
| 100 | 10 | 20 | 10 | 8 |
| 100 | 10 | 30 | 18 | 15 |

Висновки

Для дрових тензорезисторів виявлено технологічні та конструктивні фактори, що впливають на тензочутливість і спричиняють похибку вимірювання малобазних тензодатчиків, зокрема їх фізичні властивості, геометрична форма, реологічні властивості та втомна міцність матеріалів.

Для дрових тензорезисторів виявлено вплив температури на точність вимірювання деформації і запропоновано способи температурної компенсації використовуючи схему з температурною компенсацією, компенсацію за рахунок комбінованого тензорезистора, самокомпенсовані тензорезистори.

Завдяки використанню розробленої установки було експериментально встановлено допустимі значення струму живлення, відповідні допустимій зміні відносного опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення при збереженні чутливості апаратури, для тензорезисторів з різними базами, наклеєними на різні матеріали.

Література

1. С.Т. Robertson, "Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics", Prentice Hall, 2003.
2. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський. – К. : Вища школа, 1993. – 655 с.
3. Clarke, C. Eberhardt Microscopy Techniques for Materials Science – CRC Press, 2002. – 424 p.
4. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. D. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel "MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures", Optics and Lasers in Engineering, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций / В.А. Мехеда – Самара : СГАУ, 2011. – 56 с.

References

1. T. Robertson, "Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics", Prentice Hall, 2003.
2. Pisarenko G.S. Strength of materials / G.S. Pisarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umanski – K.: High school, 1993. – 655 P.
3. Clarke, C. Eberhardt Microscopy Techniques for Materials Science – CRC Press, 2002. – 424 p.
4. Levshina E.S. Electrichekieskie ismereniya phisicheskikh velichin / E.S. Levshina, P.V. Novitsky – L.: Energoatomizdat, 1983. – 320 P.
5. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel "MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures", Optics and Lasers in Engineering, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Mekheda V.A. Tensometry method for strain measurement / V.A. Mekheda – Samara: SGAU, 2011. – 56 p.

Рецензія/Peer review : 20.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.