

УДК 621.317

В. Я. Татарин, канд. техн. наук

ЄМНІСНИЙ ДИЛАТОМЕТР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЛІНІЙНОГО ТЕРМІЧНОГО РОЗШИРЕННЯ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ТЕМПЕРАТУР

Анотація. Розглянута можливість створення дилатометра з лінійною передавальною характеристикою і високою чутливістю для роботи в широкому діапазоні температур. Запропонована будова ємнісного дилатометра з перетворювачем ємність – частота на базі релаксаційного RC генератора. Показано, що для адекватного визначення частоти цього генератора, а отже розміру зразка при зміні його температури, слід використовувати метод захоплення фронту коливань релаксаційного генератора. Це дозволяє отримати роздільну здатність дилатометра порядку $0,1 \text{ \AA}$. Результат підтверджений експериментально.

Ключові слова: ємнісний дилатометр, релаксаційний генератор, лінійне розширення, вимірювання, частота, температура, роздільна здатність

V. Tataryn, PhD.

CAPACITANCE DILATOMETER FOR MEASURING OF LINEAR THERMAL EXPANSION OVER WIDE TEMPERATURE RANGE

Abstract. It is considered a possibility of making a dilatometer with a linear transmission characteristic and a high sensitivity for a wide range of temperatures. The structure of the dilatometer with a capacitive transducer using a relaxation RC oscillator is proposed. It has been shown that an adequate determination of the frequency of the oscillator, and consequently the size of the sample changing its temperature, should be used a method of capturing the front relaxation oscillator oscillations. This allows getting resolution of the dilatometer in order $0,1 \text{ \AA}$. The result has been confirmed experimentally.

Keywords: Capacitive dilatometer, relaxation oscillator, linear expansion, measurement, frequency, temperature, resolution

В. Я. Татарин, канд. техн. наук

ЕМКОСТНОЙ ДИЛАТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Аннотация. Рассмотрена возможность создания дилатометра с линейной передающей характеристикой и высокой чувствительностью для работы в широком диапазоне температур. Предложено строение емкостного дилатометра с преобразователем емкость – частота на базе релаксационного RC генератора. Показано, что для адекватного определения частоты этого генератора, а следовательно размера образца при изменении его температуры, следует использовать метод захвата фронта колебаний релаксационного генератора. Это позволяет получить разрешение дилатометра порядке $0,1 \text{ \AA}$. Результат подтвержден экспериментально.

Ключевые слова: емкостной дилатометр, релаксационный генератор, линейное расширение, измерения, частота, температура, разрешение

Вступ

Вимірювання коефіцієнту лінійного термічного розширення (КТЛР) дозволяє отримати багато інформації про будову досліджуваного зразка. Тому цей метод дослідження властивостей речовини набув широкого поширення і, відповідно, є широкий спектр засобів вимірювання значень лінійного розширення зразків [1 – 4]. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки.

Наприклад, в роботі [5] показана можливість створити ємнісний дилатометр з чутливістю порядку $0,1 \text{ \AA}$. Але в такого дилатометра вихідний сигнал суттєво нелінійно залежить від лінійних розмірів зразка.

В роботі ж [6] розглядається дилатометр, де значення лінійного розширення зразка вимірюється за допомогою диференціального лінійного трансформатора [7]. В цьому випадку осердя перемагнічується змінним магнітним полем намагнічуючої обмотки, розташованої посередині диференціального трансформатора. У двох вимірювальних котушках, розташованих по краях трансформатора, від змінного магнітного поля осердя наводяться ЕРС індукції. Значення ЕРС на котушках в свою чергу залежать від величини перекриття обмотками магнітного поля осердя, тобто від його положення щодо котушок. Вимірювальні котушки включені в електричний ланцюг зустрічно одна до одної, тому при рівних ЕРС на вимірювальних

© Татарин В.Я, 2015

катушках сумарна напруга на виході схеми дорівнюватиме нулю. При зміщенні осердя вправо перекриття правої катушки зростає, а лівої зменшується, що призводить до появи різницевого сигналу на виході схеми. Важливим достоїнством такого датчика є його лінійність, тобто різницевий сигнал на виході схеми пропорційний зміщенню осердя в широкому діапазоні переміщень.

Проте в останньому випадку існує специфічна похибка, яку досить важко компенсувати. А саме, осердя переміщується завдяки контакту із штоком, що упирається в вимірюваний зразок. Внаслідок цього слід сподіватися і потоку тепла по цьому штоку, а значить і існування скінченного градієнту температури вздовж осердя диференціального трансформатора, що неодмінно призведе до систематичної похибки у вимірюваннях відносного видовження зразка. В результаті цієї та інших похибок, чутливість даного дилатометра складає тільки 0,2 мкм в діапазоні переміщень осердя порядку 1 мм.

Таким чином, постає проблема створення дилатометра з високою чутливістю і лінійною передавальною характеристикою.

Принцип вимірювання розширення матеріалів за допомогою ємнісного дилатометра. Конструкція ємнісного дилатометра наведена на рис. 1. Ємність конденсатора С можна вимірювати за допомогою вимірювача ємності і фіксуючи її зміни, можна порахувати зміни розміру досліджуваного зразка 3. Відстань між пластинами конденсатора d буде обернено пропорційна його ємності С, виходячи з формули $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$, де S – площа

меншої з пластин. В нашому випадку конденсатор був ввімкнений в частотозадаюче коло релаксаційного RC-генератора, частота якого залежить від ємності обернено пропорційно. Таким чином, зміна частоти є прямо пропорційна зміні віддалі між пластинами, тобто зміні розмірів досліджуваного зразка. Отже похибка вимірювання частоти вихідних імпульсів визначає роздільну здатність дилатометра, а тому має бути мінімальною. При цьому слід виходити з реально досяжної частоти релаксаційного генератора, що складає значення порядку 1 МГц.

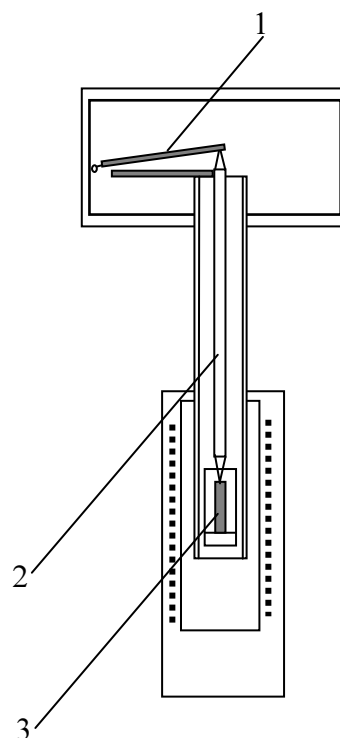


Рис. 1. Схема установки: 1 – ємнісний датчик; 2 – кварцовий шток; 3 – зразок.

Тут виникає проблема точного вимірювання частоти за обмежений проміжок часу. Обмеження по часу вимірювань виникає з двох причин.

По-перше, при вимірюваннях КТЛР зразків в широких діапазонах температур ми не можемо дозволити собі безмежно малу швидкість зміни температур зразка, і такої ж зміни вихідної частоти релаксаційного генератора, відповідно.

По-друге, все ж відомі нам способи вимірювання частоти імпульсів ґрунтуються на гіпотезі про постійність цієї частоти протягом часу вимірювання, що буде тим ближчим до реального стану справ, чим час вимірювання частоти буде меншим.

Дане протиріччя було вирішене шляхом вибору часу вимірювання частоти на інтервалі, де можна вважати температуру зразка постійною. А саме, при точності вимірювання температури в 0,1 градус і швидкості її зміни порядку 1 град/с був встановлений інтервал для вимірювання частоти 1 с.

Для досягнення високої точності вимірювання частоти протягом коротких проміжків часу був використаний метод захоплення фронту коливальних релаксаційного генера-

тора [8], який полягає в підрахунку кількості M імпульсів генератора опорної частоти f_0 за час формування N імпульсів частоти f_x , що вимірюється. Оскільки добуток кількості імпульсів опорної частоти M на період повторення цих імпульсів повинен бути рівним добутку N імпульсів частоти f_x , що вимірюється на її ж період, то між цими частотами буде очевидне співвідношення:

$$\frac{N}{f_x} = \frac{M \pm 1}{f_0},$$

звідки маємо $f_x = \frac{N}{M \pm 1} \cdot f_0$.

Невизначеність кількості M імпульсів генератора опорної частоти пов'язана з тим, що фази імпульсів опорної і невідомої частоти є випадковими одна відносно іншої. Оскільки вимірювання цієї кількості задається часовими воротами тривалістю N імпульсів частоти, що вимірюється, то якраз N визначається точно.

Перевагою такого методу є підвищення точності вимірювань в порівнянні з методом постійних часових воріт, коли протягом відрізка часу тривалістю M імпульсів генератора опорної частоти підраховується кількість N імпульсів частоти, що вимірюється.

В цьому випадку має місце співвідношення

$$\frac{N \pm 1}{f_x} = \frac{M}{f_0},$$

звідки маємо $f_x = \frac{N \pm 1}{M} \cdot f_0$.

З цих співвідношень видно, що похибка вимірювання в першому випадку становить

$$\delta_1 f_x = \frac{N}{M} \cdot \frac{1}{M} \cdot f_0 = \frac{f_x}{f_0} \cdot f_0 \cdot \frac{1}{M} = \frac{f_x}{M},$$

а в другому випадку

$$\delta_2 f_x = \frac{f_0}{M}.$$

Оскільки опорна частота зазвичай, а в нашому випадку дійсно, значно перевищує частоту, що вимірюється, то перший метод вимірювання має значно меншу похибку вимірювання за той же час. Наприклад, при частоті $f_x = 1$ МГц і $f_0 = 16$ МГц похибка вимірювань на інтервалі 1 секунда складе $1/16$ Гц.

Результати експериментальної перевірки. Для реалізації даного методу вимірювання частоти був використаний мікропроцесор ATMEGA8 з тактовою частотою 16 МГц. Цей мікропроцесор має функцію захоплення фронту по перериванню [9]. Це дозволяє реалізувати вимірювання кількості імпульсів тактового генератора протягом заданої наперед кількості імпульсів релаксаційного генератора. Ці дані передаються в персональний комп'ютер, де і проводиться розрахунок частоти коливань релаксаційного генератора. На рис. 2 приведені експериментальні дані по вимірюванні розширення зразка з міді довжиною 15,453 мм при температурі 20°C.

Зразок поміщають в пічку, у якій за допомогою регулятора-програматора плавно змінюють температуру (в нашому випадку температуру піднімали-опускали з швидкістю 1 град./хв). При вимірюваннях в області низьких температур пічку поміщали в горловину дуара і температуру понижували за допомогою пропускання парів азоту і контролювали за допомогою того ж регулятора-програматора.

Видовження зразка розраховується за співвідношенням:

$$\Delta l = \Delta l_{\text{вим}} + \Delta l_{\text{кв}},$$

де $\Delta l_{\text{вим}}$ – сумарна зміна розмірів зразка і комірки; Δl – видовження зразка в температурному інтервалі ΔT ; $\Delta l_{\text{кв}}$ – видовження частини кварцової трубки, яка рівна довжині зразка в температурному інтервалі ΔT (видовження штока компенсується видовженням відповідної частини кварцової трубки).

Знаючи Δl , можна розрахувати коефіцієнт теплового розширення зразка за співвідношенням:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T},$$

де l – довжина зразка.

Суцільна чорна лінія на рис. 2 відповідає експериментально виміряній частоті релаксаційного генератора, а пунктирна лінія – лінійному наближенню за формулою

$$f = A + B \cdot t,$$

де A і B – константи; t – температура.

Розрахунок показує, що

$$A = 1.00282 \cdot 10^6 \pm 10.70072 \\ \text{і } B = 1603,72402 \pm 0.1773.$$

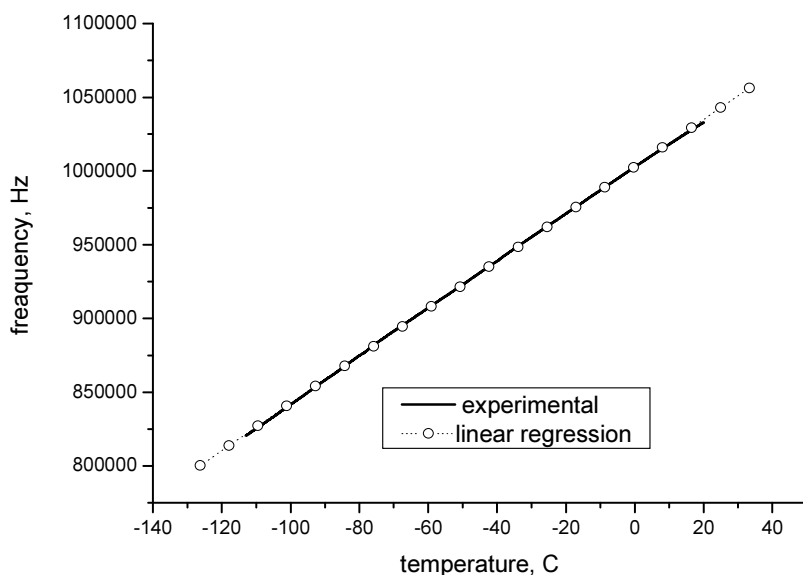


Рис. 2. Експериментальна залежність частоти релаксаційного генератора від температури зразка з міді

Оскільки КТЛР міді в даному температурному діапазоні є постійним [10], то ці результати показують, що даний принцип перетворення лінійного розширення матеріалів в частоту має відносну похибку порядку однієї десятитисячної. Щоб знайти роздільну здатність дилатометра, розрахуємо видовження зразка при зміні його температури на 1 градус.

$$\Delta l_{1\text{grad}} = \Delta l - \Delta l_{\text{кв}} = 234,08 \text{ нм}.$$

В такому випадку чутливість дилатометра складає

$$\frac{B}{\Delta l_{1\text{grad}}} = 6.85 \frac{\text{Гц}}{\text{нм}},$$

а роздільна здатність – 0.09 Å, оскільки похибка вимірювання частоти релаксаційного генератора складає 1/16 Гц, як було показано вище.

Висновки. Запропоноване в роботі використання додаткового перетворювача ємності – частота дозволяє лінеаризувати передавальну характеристику ємнісного дилатометра. Це вирішує проблему створення дилатометра з високою чутливістю і лінійною передавальною характеристикою. Для рішення цієї проблеми пропонується ввести допоміжний перетворювач на базі релаксаційного RC-генератора. Оскільки вихідна частота такого генератора обернено пропор-

ційна до значення ємності, то вона є лінійно пропорційною до розмірів зразка, принаймні в першому наближенні.

Для досягнення високої чутливості необхідно забезпечити високу точність вимірювання цієї частоти при умові досить значної швидкодії. Для цього був використаний метод захоплення фронту коливань релаксаційного генератора, що дозволяє отримати роздільну здатність дилатометра порядку 0,1 Å. Результати були підтверджені експериментально.

Список використаної літератури

1. Barron T.H.K., and White G.K., (1999), *Heat Capacity and Thermal Expansion at Low Temperatures* Kluwer Academic, New York.
2. Yates B., (1972), *Thermal Expansion* Plenum, New York.
3. Kanagaraj S., and Pattanayak S., (2003), *Cryogenics* 43, 399.
4. Andres K., (1961), *Cryogenics* 2, 93 1961; K. Andres, and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* 34, 398 1961.
5. Neumeier J.J., Bollinger R.K., Timmins G.E, C.R. Lane, R.D. Krogstad, and J. Macaluso, (2008), "Capacitive-based Dilatomter cell Constructed of Fused Quartz for Measuring the Thermal Expansion of Solids", *Review of Scientific Instruments* 79, 033903

6. Шарипов И. З. Дилатометр для измерения теплового расширения образцов малых размеров. / И. З. Шарипов, Х. Я. Мулюков // Вестник УГАТУ. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2011. – Уфа : – Т. 15. – № 3 (43). – С. 109 – 111.

7. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие / К. Бриндли – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 113 с.

8. Johansson Staffan, (2013), “New Frequency Counting Principle Improves Resolution”. Spectracom. Retrieved 24 July 2013. Available at: <http://www.spectracomcorp.com/SearchResults/tabid/1551/Default.aspx/Default.aspx?q=Johansson> (assessed 06.04.2015).

9. 8-bit Atmel Microcontroller with 8KB In-System Programmable Flash. Available at: http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf (assessed 06.04.2015).

10. Обзор: Коэффициент теплового линейного расширения для некоторых распространенных материалов, таких как: алюминий, медь, стекло, железо и многое другое. Available at: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials/> (assessed 06.04.2015).

Отримано 23.03.2015

References

1. Barron T.H.K., and White G.K., (1999), *Heat Capacity and Thermal Expansion at Low Temperatures*, Kluwer Academic, New York.

2. Yates B., (1972), *Thermal Expansion* Plenum, New York.

3. Kanagaraj S., and Pattanayak S., (2003), *Cryogenics* **43**, 399.

4. Andres K., (1961), *Cryogenics* **2**, 93 _1961_; K. Andres and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* **34**, 398.

5 Neumeier J.J., Bollinger R.K., Timmins G.E., Lane C.R., Krogstad R.D., and Macaluso J., (2008), “Capacitive-based Dilatometer cell Constructed of Fused Quartz for Measuring the

Thermal Expansion of Solids”, *Review of Scientific Instruments* **79**, 033903 (2008).

6. Sharipov I., and Mulukov H. Dylatometr dlya izmereniya teplovogo rasshyreniya obrazcov malogo razmera [Dilatometer for Measurements of Thermal Expansion of the Small Size Samples], (2011), *Vestnik UGATU, Elektronika, Izmeritelnaya Tehnika, Radiotekhnika I Svyaz'*, UFA, Vol. 15, No. 3(43), pp. 109 – 111 (In Russian).

7. Brindli K. Izmeritelniye preobrazovateli. [Measuring Transducers], (1991), *Spravochnoye posobiye*. Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 113 p. (In Russian).

8. Johansson, Staffan, (2013), “New Frequency Counting Principle Improves Resolution”. *Spectracom*. Retrieved 24 July 2013. Available at: <http://www.spectracomcorp.com/SearchResults/tabid/1551/Default.aspx/Default.aspx?q=Johansson> (accessed 06.04.2015).

9. 8-bit Atmel Microcontroller with 8KB In-System Programmable Flash. Available at: http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf (accessed 06.04.2015).

10. Обзор: Коэффициент теплового расширения для некоторых распространенных материалов, таких как: алюминит, мед', стекло, железо, I mnogoe drugoye. [Overview: the Coefficient of Linear Thermal Expansion for Some Common Materials, such as Aluminum, Copper, Glass, Iron and More.], (In Russian) Available at: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials/> (accessed 06.04.2015).



Татарин
Василь Ярославович,
канд. техн. наук, доцент
Національного ун-ту
«Львівська політехніка»,
12, вул. С. Бандери,
м. Львів, 79013, Україна,
+38 (095) 602-39-66.
E-mail:
vasyltataryn@gmail.com