

УДК. 621.396.011

Вілен Петрович РОЙЗМАН,
*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки
та зв'язку Хмельницького національного університету,
м. Хмельницький*

Андрій Валерійович КЛЕПКОВСЬКИЙ,
*кандидат технічних наук, асистент кафедри біологічної фізики
та медичної інформатики Буковинського державного медичного
університету, м. Чернівці*

Валерій Олександрович КАРПЕНКО,
*магістр кафедри радіотехніки та зв'язку
Хмельницького національного університету, м. Хмельницький*

ТЕРМОСТАТУВАННЯ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ПЕЛЬТЬЄ

Стаття присвячена обґрунтуванню науково-методичних підходів щодо вдосконалення методів термостатування н'єзорезонансних елементів з використанням напівпровідникових термоелементів Пельтьє. Для досягнення цієї мети удосконалено метод термостатування н'єзорезонансного елемента з урахуванням температурної динаміки його внутрішнього струму та з використанням напівпровідникових термоелементів.

Ключові слова: термоелектричні модулі, елементи Пельтьє, кварцовий резонатор, н'єзорезонатор, термостатування, власна частота, синтезатор частоти.

© Ройзман В. П., Клепковський А. В., Карпенко В. О.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Стрімко зростаюча технічна складність сучасних електронних систем та пристроїв вимагає певного переосмислення існуючих методів забезпечення стабільності та надійності їх роботи, оскільки висока щільність розміщення елементів та суцільне інтегральне виконання цілих вузлів апаратури унеможлиблює достатню їх розв'язку за різними фізичними чинниками (електромагнітними, температурними, вібраційними і под.). На етапі проектування необхідно враховувати ще й велику кількість недетермінованих чинників, вплив яких по своїй суті носить комплексний характер і за своєю природою виникнення може бути віднесений як до внутрішніх, так і до зовнішніх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опираються автори. Проблема підвищення температурної стабільності п'єзореzonаторів досліджувалась у наукових роботах таких відомих українських і закордонних вчених: В. Я. Баржина, Ф. Ф. Колпакова, Ю. С. Іванченка, Ю. С. Шмалія, В. П. Багаєва, А. В. Косих, В. Ф. Самойленка, С. А. Зав'ялова та ін.

Метою статті є проведення аналізу методів термо- та вібростабілізації п'єзореzonансних коливальних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. У даній статті досліджується випадок, коли джерело механічних коливань являє собою пасивну коливальну систему, яка володіє певною частотною вибірковістю на власних частотах механічних коливань і, маючи значну питому вагу в широкому, рівномірному спектрі зовнішніх коливань, може створювати достатні для дестабілізації роботи коливання на найбільш "вразливих" (шкідливих) частотах. Прикладом такої системи є термоелектричні модулі Пельтьє, які знаходять широке застосування в радіоелектронній апаратурі, з огляду на їх переваги в порівнянні з повітряними та рідинними системами охолодження. У першу чергу, це можливість оперативного електронного керування температурою, що має велике значення при термостабілізації роботи термочутливих елементів в умовах епізодичного навантаження, висока конструктивна надійність, оскільки вони являють собою монолітні блоки без рухомих механічних елементів, невеликі габаритні розміри тощо.

Поряд з перевагами, термоелектричні модулі Пельтьє володіють ще й рядом недоліків, одним з яких є їх велика вага, що обумовлено великими розмірами теплообмінників і великою кількістю напівпровідникових термоелементів. Для досягнення необхідного перепаду температур термоелектричні елементи Пельтьє виготовляють у вигляді багатокаскадних блоків, що призводить до появи ще одного недоліку – появи чітко виражених резонансних частот. Виходячи з цього, при проектуванні радіоелектронних вузлів необхідно враховувати механічні властивості модулів, а саме резонансні частоти і вживати додаткових заходів для запобігання їх збігу з номінально “не бажаними”.

Для розрахунку резонансних властивостей термоелектричних елементів Пельтьє використано метод електродинамічних аналогій [2; 3]. Відповідно до даного методу індуктивність L пропорційна масі m , величина обернена ємності $\frac{1}{C}$ пропорційна жорсткості c , а електричний опір R пропорційний коефіцієнту, що входить у силу в'язкого тертя. Розглянемо електричний коливальний контур із послідовним з'єднанням елементів R, L, C (рис. 1), що містить активний елемент e .

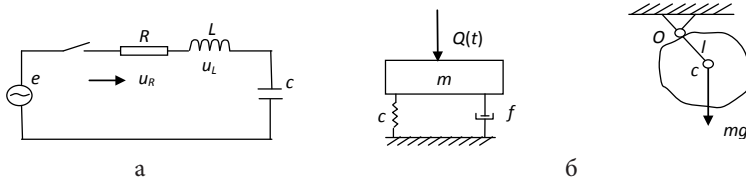


Рис. 1. Загальний вигляд електричного коливального контуру із послідовним з'єднанням елементів (а) і коливального контуру механічних систем з одним ступенем свободи (б)

Згідно з другим законом Кірхгофа, сума падінь напруги на окремих ділянках кола дорівнює різниці потенціалів на кінцях затискачів, тобто електрорушійній силі $e(t)$ джерела напруги:

$$e(t) = U_R + U_L + U_C. \quad (1)$$

Таким чином, для цього кола другий закон Кірхгофа об'єднав усі три аналогії з другим законом Ньютона.

Розкриємо значення U_R , U_L і U_C в (1).

Згідно з другим законом Кірхгофа запишемо у формі:

$$L \frac{di}{dt} + R_i + \frac{1}{C} q^e = e(t), \quad (2)$$

або, з урахуванням виразу (1), матимемо

$$L \frac{d^2 q^e}{dt^2} + R \frac{dq^e}{dt} + \frac{q^e}{C} = e(t). \quad (3)$$

Рівняння (3) є рівнянням коливального руху системи з одним степенем свободи. Узагальненою координатою в (3) виступає заряд конденсатора ($q = q^e$).

Рівняння коливального руху механічних систем з одним степенем свободи (рис. 2, б) має вигляд:

$$\alpha \ddot{q} + \beta \dot{q} + cq = Q(t). \quad (4)$$

Очевидно, що рівняння (3) та (4) мають однакову структуру, тобто вони аналогічні.

Порівнюючи ці рівняння між собою, бачимо, що узагальненому коефіцієнту інерції α (маса, осьовий момент інерції) механічної системи відповідає індуктивність L ; узагальненому коефіцієнту розсіювання енергії β (коефіцієнту демпфування) – опір R , на якому електрична енергія аналогічно механічній перетворюється на теплоту; узагальненій жорсткості c механічної системи відповідає інверсна (обернена) ємність конденсатора $\frac{1}{C}$. Узагальненій силі механічної системи $Q(t)$ в рівнянні (4) відповідає електрорушійна сила $e(t)$ джерела напруги [1; 4].

Виходячи з таких міркувань, у таблиці наведено аналогічні величини в електромеханічних системах з одним степенем свободи.

Відповідно до рис. 2 $x(t)$ – переміщення основи; $x_1(t)$ – переміщення тіла масою m ; β – коефіцієнт демпфування.

Ураховуючи всі відповідності, рівняння Лагранжа для випадку двокаскадного модуля запишеться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + 2c_1 x_1 - cx_2 &= cx, \\ m_1 \ddot{x}_2 - cx_1 + cx_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Переходячи до електричної аналогії “сила – напруга”, отримаємо рівняння:

$$\begin{cases} L_1 \ddot{q}_1 + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) q_1 - \frac{1}{C_2} q_2 = \frac{1}{C_1} q(t), \\ L_1 \ddot{q}_2 + \frac{1}{C_2} q_2 - \frac{1}{C_2} q_1 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогічні величини в системах з одним ступенем свободи

Система	Узагальнена координата	Коефіцієнти диференціальних рівнянь			Кінетична енергія	Потенціальна енергія	Функція розсіювання	Узагальнена сила
		a	β	c				
Механічна	q	a	β	c	$T = \frac{1}{2} a \dot{q}^2$	$\Pi = \frac{1}{2} c q^2$	$\Phi = \frac{1}{2} \beta \dot{q}^2$	$Q(t)$
Аналогія “сила – напруга”	q^e	L	R	$\frac{1}{C}$	$T_1^e = \frac{L}{2} (\dot{q}^e)^2$	$\Pi_1^e = \frac{1}{2C} (q^e)^2$	$\Phi_1^e = \frac{R}{2} (\dot{q}^e)^2$	$e(t)$
Аналогія “сила – струм”	U	C	$\frac{1}{R}$	$\frac{1}{L}$	$T_2^e = \frac{C}{2} \dot{U}^2$	$\Pi_2^e = \frac{1}{2L} U^2$	$\Phi_2^e = \frac{1}{2R} \dot{U}^2$	$\frac{di}{dt}$

Електрична схема двокаскадного охолоджувача буде мати вигляд (рис. 3).

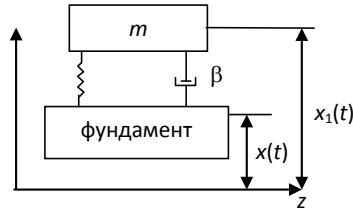


Рис. 2. Механічна схематизація коливної системи з одним степенем свободи з врахуванням демпфування

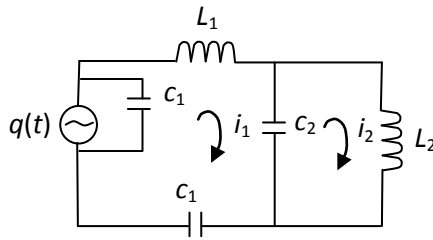


Рис. 3. Електрична схематизація двокаскадного термоохолоджувача

Ураховуючи, що $m_1 = m_2$, $c_1 = c_2$, а, отже, $L_1 = L_2$, $C_1 = C_2$, то рівняння (6) перепишуться після ділення на індуктивність L так:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q}_1 + 2\omega_0^2 q_1 - \omega_0^2 q_2 &= \omega_0^2 q(t) = \frac{1}{L} e(t), \\ \ddot{q}_2 + \omega_0^2 q_2 - \omega_0^2 q_1 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Звідси знаходимо, що

$$q_1(t) = \frac{\omega_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{\omega^4 - \omega_0^4 - 3\omega^2 \omega_0^2} q(t), \quad (8)$$

$$q_2(t) = -\frac{\omega_0^4}{\omega_0^4 - \omega^4 + 3\omega^2 \omega_0^2} q(t). \quad (9)$$

Розглянемо одноступінчасту систему із n елементів, що мають жорсткість C_1^* і з'єднані за допомогою пайки підкладкою маси m .

Оскільки матеріал з'єднань має значно більшу піддатливість, ніж інші ділянки перетворювача, то необхідно ввести в систему n демпферів зі сталою демпфування β_1^* . Система збуджується через основу, а отже, таке збудження буде кінематичним. Запишемо рівняння руху маси m_1 , замінивши n елементів жорсткостями C_1^* на одну еквіваленту $C_1^* = n C_1$, а демпфери – одним з $\beta_1^* = \beta_1^*/n$. Основа діє на жорсткі та на демпферні елементи, тому:

$$m\ddot{x} + \beta_1 \dot{x}_1 + c x_1 = \beta_1 \dot{x}_1 + c x_1. \quad (10)$$

Запишемо рівняння

$$(p^2 + 2hp + \omega_0^2) \dot{x}_1 = (2hp + \omega_0^2), \quad (11)$$

де введено позначення $p = p/dt, h = \beta_1/2m_1, \omega_0^2 = c_1/m_1$.

Тоді

$$x_1(t) = \frac{2hp + \omega_0^2}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} x(t). \quad (12)$$

Застосувавши аналогію, отримаємо:

$$g_1(t) = \frac{2hp + \omega_0^2}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} g(t). \quad (13)$$

Таким чином, отримані співвідношення (8), (9), (12), (13), що дають змогу не тільки визначати власні резонансні частоти термоелектричних елементів Пельтьє, а й у випадку багатокаскадних конструкцій оцінювати різні співвідношення частот. У випадку елементів Пельтьє керування жорсткістю можна здійснювати вибором різних температурних режимів, а, отже, якщо не вдається досягти або передбачити конструктивно появу небажаного резонансу, то його можна компенсувати зміною температури. На рис. 4, а, б наведено результати розрахунку власних резонансних частот для чотирикаскадних конструкцій термоелектричних елементів.

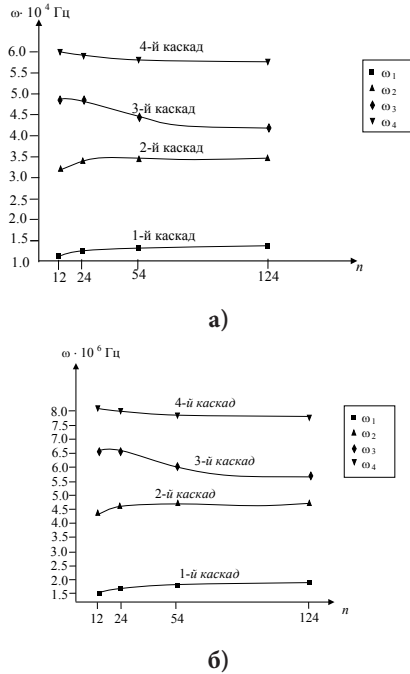


Рис. 4. Залежність величини власних коливань чотирикаскадних термоелементів з урахуванням демпфування:

а – 1-й каскад $n_1 = 124$, 2-й каскад $n_2 = 12, 24, 54, 124$, 3-й каскад $n_3 = 12, n_4 = 12$ термоелементів; *б* – 1-й каскад $n_1 = 124$, 2-й каскад $n_2 = 124$, 3-й каскад $n_3 = 12, 24, 54, 124$, $n_4 = 12$ термоелементів

Висновки. Як видно з графіків, резонансні частоти каскадів нелінійно залежать від механічної жорсткості між ними. Цілеспрямовано змінюючи жорсткість кожного каскаду (кількість елементів у каскаді, їх геометричні параметри) або матеріал, можливо “регулювати” (за потреби) частоту власних коливань кожного каскаду, зсуваючи їх у той чи інший бік, з метою неприпущення співпадіння власних частот коливань виробу зі змушуючими коливаннями носія для уникнення явища резонансу та подальшого руйнування виробу. Кількісна оцінка механічного впливу термоелектричних елементів показала, що на ре-

зонансних частотах досліджувані зразки здійснюють підсилення гармонійних зовнішніх механічних коливань на рівні 20 дБ, що є вкрай не бажаним для роботи електромеханічних резонансних систем.

Список використаної літератури

1. Анатычук Л. И. Термоэлектричество / Л. И. Анатычук. – К., Черновцы : Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
2. Офіційний сайт ЗАО “Промэлектроника”. – Режим доступу : http://www.promelec.ru/catalog_info
3. Офіційний сайт ООО НПП “Метеор-Курс”. – Режим доступу : <http://www.meteor-kurs.ru/products.html>
4. Пьезоэлектрические резонаторы : справочник / В. Г. Андросова, Е. Г. Бронникова, А. М. Васильев и др. ; под ред. П. Е. Кандыбы и П. Г. Позднякова. – М. : Радио и связь, 1992. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2015.

Ройзман В. П., Клепиковский А. В., Карпенко В. А. Термостатирование кварцевых резонансных систем с использованием термоэлектрических модулей Пельтье

Работа посвящена теоретико-прикладному исследованию вопросов совершенствования методов термостатирования пьезорезонансных элементов с использованием полупроводниковых термоэлементов Пельтье. Для достижения этой цели усовершенствован метод термостатирования пьезорезонансного элемента с учетом температурной динамики его внутреннего тока и с использованием полупроводниковых термоэлементов.

Ключевые слова: *термоэлектрические модули, элементы Пельтье, кварцевый резонатор, пьезорезонатор, термостатирование, собственная частота, синтезатор частоты.*

Roizman V. P., Klepikovskiy A. V., Karpenko A. V. Thermostating of quartz resonance system with the use of Peltier thermoelectric modules

The article substantiates scientific and methodical approaches to improvement of methods of thermostating of piezoelectric elements with the

use of Peltier semi-conducting elements. We have found that the possibility of operative electronic management of temperature, high constructive reliability, small overall sizes are considered to be the advantages of Peltier thermoelectric modules as opposed to air and liquid cooling systems. The disadvantages include, first of all, their large weight and emergence of clearly expressed resonance frequencies. While designing the radio-electronic knots we offer to take into consideration mechanical properties of modules, namely resonance frequencies, and to take additional measures for prevention of their coincidence with those which are not desired.

In the article we used the electrical analogue method to calculate resonance properties of Peltier thermoelectric elements. The obtained correlations gave us the possibility not only to determine own resonance frequencies of Peltier thermoelectric elements but also estimate different frequency correlations in case of many-stage constructions. If we use Peltier elements of hardness management, we can choose different temperature regimes. But if we cannot achieve or forecast the emergence of undesired resonance, temperature changes can compensate it.

In the article the authors made a conclusion that resonance frequencies of stages depend on mechanical hardness between them nonlinearly. If we change hardness of each stage or material intentionally, we can regulate (if necessary) frequency of own fluctuations of each stage. It means that they it will shift them this or other way with the purpose to prevent from coincidence of own fluctuation frequencies of an item with forced fluctuation of a bearer and to avoid resonance phenomenon and further item destructions.

Quantitative estimation of mechanical effect of thermoelectrical elements showed that harmonious interior mechanical fluctuations have been amplified resonance frequencies at the level of 20 dB. We admit that it is very important for the work of electromechanical resonance systems.

Keywords: *thermoelectric modules, Peltier elements, quartz resonator, piezoelectric resonator, thermostating, own frequency, frequency synthesizer.*