

УДК 536.5..121.385.8

Гаренко І.М.¹, Шайко-Шайковський О.Г.², Білов М.Є.³

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

³VAMP-AT Corporation, вул.Кармелюка, 99, Чернівці, Україна

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИН ВЛАСНИХ
ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ ПРИ КОНСТРУЮВАННІ
БАГАТОКАСКАДНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

У роботі розглянуто можливість теоретичного визначення на етапі проектування власних частот коливань термоелектричних охолоджувачів з різним числом каскадів і різної конфігурації. Визначення власних частот коливань паралельно проведено для виробів з урахуванням демпфірування, створюваного низкою конструктивних елементів, а також – без урахування демпфуючої здатності шарів припою по торцях термоелементів. Про аналіз і порівняння отриманих теоретичних результатів. Результати розрахунків визначення власних частот коливань термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) шляхом використання системи рівнянь Лагранжа 1-го роду зіставлені з розрахунковими величинами, отриманими з використанням способу електродинамічних аналогій.

Ключові слова: термоелектричні модулі, резонанс, власні частоти коливань, демпфірування.

The paper deals with the possibility of theoretical determination during design phase of natural oscillation frequencies of thermoelectric coolers with different number of stages and different configuration. The natural oscillation frequencies were determined in parallel for products with regard to damping created by a number of structural members, as well as without regard to damping capacity of solder layers along thermoelement ends. Analysis and comparison of the obtained theoretical results was performed. The results of determination of natural oscillation frequencies of thermoelectric coolers (TEC) by using the system of Lagrange's equations of the second kind were compared with the calculated values obtained by the method of electrodynamic analogies.

Key words: resonance, natural oscillation frequencies, damping.

Постановка проблеми

До складу електронних обладнань і систем з метою охолодження виробів електронної техніки, радіоапаратури для забезпечення нормальних умов їх роботи, для зменшення ваги й габаритів виробів використовуються термоелектричні охолоджувачі (ТЕО), робота яких

базується на ефекті Пельтьє. Залежно від призначення, специфіки і параметрів електронних пристроїв, їх потужності, величини виділеної теплової енергії використовуються ТЕО з різною кількістю каскадів.

Аналіз останніх досліджень

Як відомо, робота будь-якого виду носія характеризується певною частотою й амплітудою коливань, які є вимушеними для встановленої на ньому апаратури. Забезпечення нормальної роботи, зокрема ТЕО, їх механічної цілісності пов'язане з недопущенням виникнення явища резонансу із впливом на виріб певних спектрів частот вимушених коливань.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Таким чином, визначення власних частот коливань виробів ще на етапі їх проектування й розробки – важливе інженерно-технічне й наукове завдання. Для цього, крім експериментальних методів, використовується математичне моделювання, яке дає можливість із заданою точністю визначити розрахунковим шляхом шукані параметри (розміри, форма елементів конструкції, матеріали) при використанні моделей ТЕО різної конструкції й складності [1]. Загальний вид, наприклад, трикаскадної конструкції ТЕО показано на рис. 1.

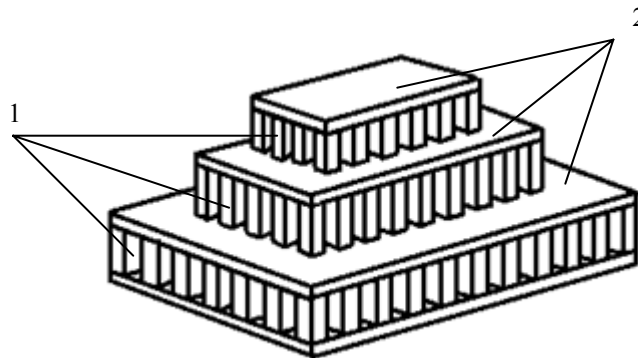


Рис. 1. Загальний вид трикаскадної конструкції:
1 – термоелементи; 2 – теплопереходи.

Формулювання мети дослідження. У роботі розглянуто розрахунок чотирикаскадної конструкції ТЕО, параметри якої зазначені нижче.

Число термоелементів у кожному з каскадів, досліджуваних у роботі виробів становить: $n_1 = 12$, $n_2 = 22$, $n_3 = 52$, $n_4 = 128$ (на рис. 1 як приклад показано трикаскадний охолоджувач). Довжина кожного термоелемента становила $l = 1.4$ мм; розміри поперечного перерізу – 0.7×0.7 мм. Матеріал, з якого виготовлено термоелементи, – телурид вісмуту Bi_2Te_3 , модуль пружності 1-го роду якого $E = 6 \cdot 10^5$ кг/см².

Теплопереходи [2], рис. 1, виготовлено із сітлових пластин товщиною 0.1 мм із нанесени-

ми на них мідними струмопровідними комутаційними доріжками. Для кріплення термоелементів до струмопровідної доріжки на бічній поверхні теплопереходів застосовувався припій, товщина шару якого становить $\Delta = 1 \times 10^{-1}$ мм, модуль пружності 1-го роду прийнятий як $E_{II} = 1.2 \cdot 10^5$ кг/см².

Маса тепла переходів за зазначеним вище числом термоелементів становила: $m_1 = 10.92896 \times 10^{-5}$ кг, $m_2 = 4.55961 \times 10^{-5}$ кг; $m_3 = 1.95753 \times 10^{-5}$ кг; $m_4 = 1.31891 \times 10^{-5}$ кг. Такі вироби, незважаючи на досить малі габарити й масу, дають можливість досягти перепаду температур до 20 °С на кожному каскаді, уможлиблюють істотно охолодити працюючі електронні прилади та вироби. Установка ТЕО на рухомих носіях (наземних, підводних, авіаційних, космічних) дають можливість істотно зменшити загальну вагу радіоелектронної апаратури, габарити всієї установки в цілому.

Формулювання мети дослідження

Визначення власних частот коливань ТЕО (каскадного типу конструкцій) здійснювалося за допомогою розробленої математичної моделі, в основу якої покладено використання диференціальних рівнянь Лагранжа 2-го роду [2] –

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}, \quad (1)$$

де T – кінетична енергія системи;

Π – потенціальна енергія системи;

i – узагальнена координата;

x_i – переміщення i -го каскаду, $i = 1, 2, 3, 4$;

Φ – дисипативна функція;

t – час.

Кінетична енергія системи:

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i. \quad (2)$$

Потенціальна енергія системи:

$$\Pi = \sum_{i=1}^4 \Pi_i. \quad (3)$$

Дисипативна функція пропорційна швидкості переміщення мас системи

$$\Phi = \sum_{i=1}^4 \Phi_i, \quad (4)$$

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \beta_i \dot{x}_i^2, \quad (5)$$

де β_i – коефіцієнт згасання.

У роботі розглянуто випадок, коли конструкція складається із чотирьох каскадів термоелементів, які схематично можна зобразити в такому вигляді (рис. 2):

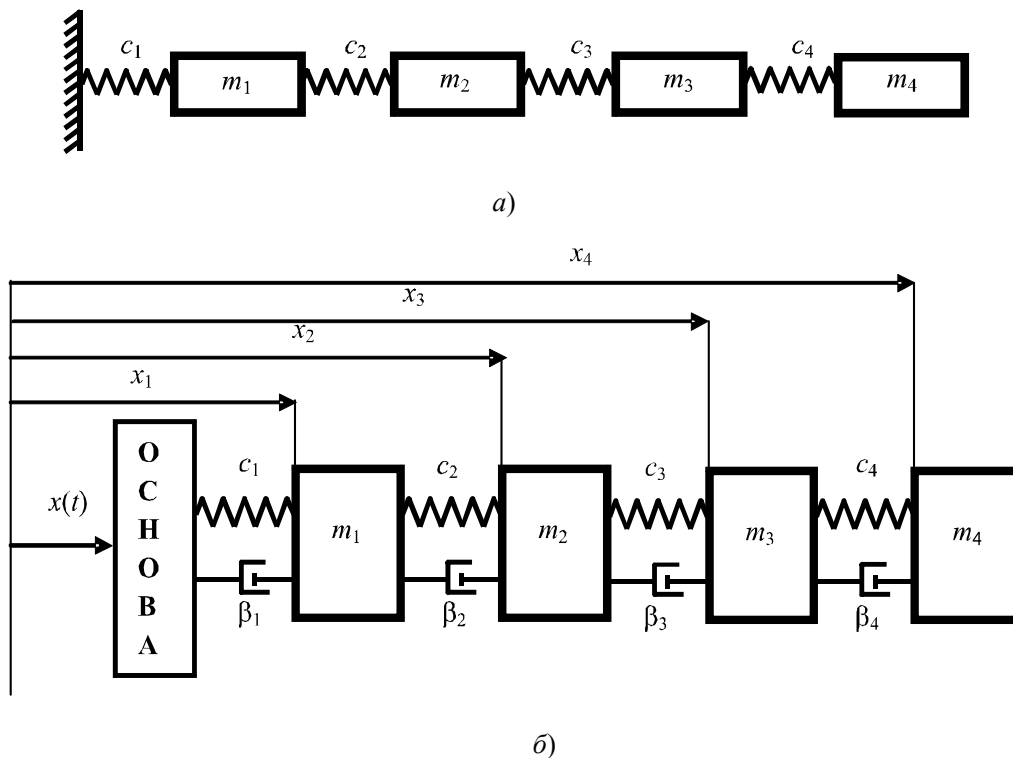


Рис. 2. Розрахункова схема чотирикаскадного ТЕО;
а) без урахування демпфірування; б) з урахуванням демпфірування.

Основні результати дослідження

У роботі розглянуто випадок дослідження конкретного чотирикаскадного ТЕО, тобто $i = 1, 2, 3, 4$. Тут за m_i прийняті маси відповідних теплопереходів, а за c_i – твердості термоелементів кожного каскаду відповідно [1].

Шари припою по торцях термоелемента мають значення модуля пружності 2-го роду суттєво менше, ніж аналогічний параметр матеріалу самих термоелементів, тобто характеризуються меншою твердістю. Тому можна вважати, що шари припою по торцях термоелементів у кожному каскаді відіграють роль своєрідних демпферів, що знижують значення власних коливань виробу.

Відомо, що дисипативна функція має нелінійний характер [4]. Облік цієї нелінійності в складних технічних системах сполучений зі значними, у тому числі й математичними труднощами. Їхній облік у багатьох випадках може внести істотні уточнення в значення величин, що відшукуються, параметрів з урахуванням специфіки виробів і умов їх експлуатації.

У зв'язку з малими розмірами досліджуваних виробів, їх габаритами й специфікою їх викорис-

тання у роботі прийнято допущення про те, що на проектному етапі досліджень величину дисипативних сил можна не враховувати. (Введене допущення перевірене розрахунковим шляхом. Розбіжність величин, отриманих при цьому результатів, становила 5 %).

Отримані результати дають можливість ще на етапі проектування й розробки майбутніх виробів передбачити можливість виникнення випадків резонансу систем, вжити заходів для «відведення» власних значень коливань виробів убік від значень резонансних частот. Це особливо важливо при розробці відповідальних і дорогих систем, які працюють на рухливих носіях, що мають певні значення вимушених коливань.

Для перевірки вірогідності отриманих розрахунковим шляхом результатів проведено також визначення власних частот коливань розглянутих вище конструкцій ТЕО за допомогою незалежного підходу – відомого в теоретичній механіці методу електродинамічних аналогій (ЕДА).

Із цією метою розглянута механічна система замінюється відповідними електричними аналогіями [3].

Електрична схема чотирьохкаскадного термоелектричного охолоджувача буде мати такий вигляд (рис. 3):

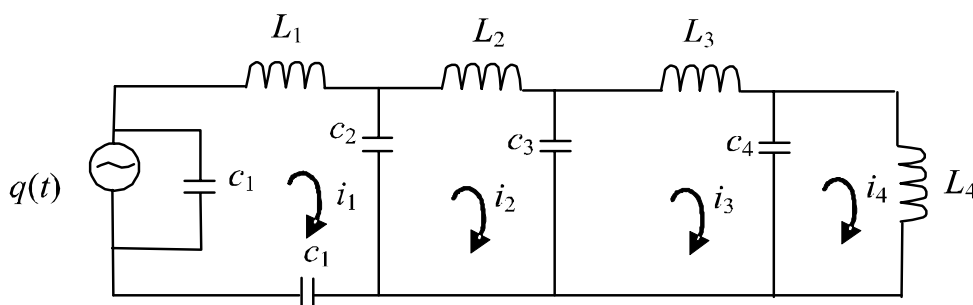


Рис. 3. Електрична схематизація чотирьохкаскадного ТЕО.

Отримані шляхом використання двох незалежних розрахункових методик результати для зручності аналізу й порівняння показано в табл. 1 – 4.

Таблиця 1

Значення величин власних частот коливань трикаскадного виробу (Гц)
за $n_1 = 124, n_2 = 54, n_3 = 24$ з урахуванням демпфірування

Кількість термоелементів у каскаді	124	54	24
Диференціальні рівняння Лагранжа 2-го роду	$2.177 \cdot 10^4$	$4.027 \cdot 10^4$	$5.50 \cdot 10^4$
ЕДА	$2.22 \cdot 10^4$	$4.234 \cdot 10^4$	$5.76 \cdot 10^4$

Таблиця 2

Значення величин власних частот коливань трикаскадного виробу (Гц)

за $n_1 = 124$, $n_2 = 54$, $n_3 = 24$ без обліку демпфірування

Кількість термоелементів у каскаді	124	54	24
Диференціальні рівняння Лагранжа 2-го роду	$2.949 \cdot 10^6$	$5.455 \cdot 10^6$	$7.45 \cdot 10^6$
ЕДА	$3.113 \cdot 10^6$	$5.878 \cdot 10^6$	$7.821 \cdot 10^6$

Аналіз даних таблиць 1 і 2 свідчить про те, що розкид значень власних частот залежить від кількості елементів у каскаді й змінюється в межах 1.94 % – 4.51 % (для виробів при обліку демпфірування). У розрахунках без обліку демпфірування цей розкид знаходиться відповідно у межах 5.27 % – 5.19 %. Зі зменшенням числа термоелементів у каскаді в обох випадках розбіжність в отриманих результатах зростає. Облік демпфірування дає значення власних частот, як і в попередніх випадках, на два порядки менше, що пояснюється істотним впливом демпферів на значення власних частот коливань виробу. Це робить можливим «регулювати» значення власних частот коливань, змінюючи їх значення у бік, потрібний конструктору.

Таблиця 3

Значення власних частот коливань (Гц) для системи з 4-ма ступенями

волі з урахуванням демпфірування

Кількість термоелементів у каскаді	124	54	24	12
Диференціальні рівняння Лагранжа 2-го роду	$1.797 \cdot 10^4$	$3.187 \cdot 10^4$	$4.682 \cdot 10^4$	$5.741 \cdot 10^4$
ЕДА	$1.842 \cdot 10^4$	$3.324 \cdot 10^4$	$4.791 \cdot 10^4$	$5.913 \cdot 10^4$

Таблиця 4

Значення власних частот коливань (Гц) для системи з 4-ма ступенями

свободи без обліку демпфірування

Кількість термоелементів у каскаді	124	54	24	12
Диференціальні рівняння Лагранжа 2-го роду	$2.434 \cdot 10^6$	$4.318 \cdot 10^6$	$6.344 \cdot 10^6$	$7.774 \cdot 10^6$
Метод ЕДА	$2.033 \cdot 10^6$	$4.93616 \cdot 10^6$	$6.872 \cdot 10^6$	$8.234 \cdot 10^6$

Аналіз даних табл. 2, 3 свідчить, що розкид значень власних частот коливань, отриманий двома незалежними шляхами з урахуванням демпфірування, лежить у границях 2.44 % – 2.91 %, а за умови, що демпфірування в розрахунковій методиці не враховується, ці значення будуть 6.49 % – 5.58 %.

Висновки

Отримані двома незалежними шляхами результати дали збіжність в 3 – 8 %, що підтверджує якість і вірогідність математичних моделей, використовуваних у роботі.

Аналіз і зіставлення отриманих розрахунковим шляхом результатів з використанням двох незалежних методик дає можливість ще на етапі проектування оцінити можливі величини значень власних частот коливань конкретних, використовуваних на практиці виробів, а також тих, які плануються випускати й використовувати.

Розроблені алгоритми й програми розрахунків на персональних комп'ютерах дають можливість визначити власні частоти коливань ТЕО різних конфігурацій, з різним конструктивним виконанням, оцінити доцільність застосування різних варіантів конструктивного виконання проєктованих виробів, визначити найбільш прийнятний варіант для кожного типу носія апаратури. Постійна розробка й поява нових конструкційних матеріалів, використовуваних в електроніці, робить можливим ще на етапі проектування оперативно підбирати потрібні комбінації матеріалів для кожного конкретного виробу, забезпечуючи якість і працездатність апаратури й складних технічних систем.

Література

1. Клепиковский А.В. Математическая модель оценки факторов, влияющих на значения собственных частот колебаний систем с несколькими степенями свободы / А.В. Клепиковский, Е.Н. Тимофеева А.Г. Шайко-Шайковский // Труды междунар. симп. «Надежность и качество 2009», (Пенза, 25 – 30 мая 2009 г.). – Т. 1. – С. 300 – 302.
2. Вибрации в технике. Справочник. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / [под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова]. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
3. Писаренко Г.С. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем / Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.Н. // – К.: Наукова думка, 1976. – 86 с.
4. Вибрации в технике. Справочник в 6 тт. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / [под ред. К.В. Фролова]. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 456.

Надійшла до редакції 20.10.2015