

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ КВАРЦЕВИХ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОСТАТУЮЧИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Проведений аналіз особливостей використання термостатуючих та термокомпенсуючих напівпровідникових термоелементів. Визначені та розглянуті режими роботи термостатуючих напівпровідникових термоелементів для стабілізації частоти кварцових генераторів. Оцінено чинники які визначають точність підтримання температури термостатування. Розглянуто підхід який ґрунтується на оцінці температурної стабільності кварцового резонатора в інтервалі температур залежністю частоти кварцового резонатора від температури, тобто частотно-температурну характеристику кварцового резонатора.

Ключові слова: термоелемент, стабільність частоти, частотно-температурна характеристика.

Проведенный анализ особенностей использования термостатующих и термокомпенсующих полупроводниковых термоэлементов. Определены и рассмотрены режимы работы термостатующих полупроводниковых термоэлементов для стабилизации частоты кварцевых генераторов. Оценены факторы определяющие точность поддержания температуры термостатирования. Рассмотрен подход основанный на оценке температурной стабильности кварцевого резонатора в интервале температур зависимости частоты кварцевого резонатора от температуры, т.е. частотно-температурную характеристику кварцевого резонатора.

Ключевые слова: термоэлемент, стабильность частоты, частотно-температурная характеристика.

Conducted analysis of features of the use of termofixing and termocompensation semiconductor thermo-couples. Certain and the considered modes of operations of termofixing of semiconductor thermo-couples for stabilizing of frequency of quartz generators. Factors are appraised which determine exactness of maintenance of temperature of termofixing. Approach is considered which is based on the estimation of temperature stability of quartz resonator in the interval of temperatures by dependence of frequency of quartz resonator on a temperature, that frequency temperature description of quartz resonator.

Keywords: thermoelement, stability of frequency, frequency and temperature characteristic.

Вступ. Температурна нестабільність кварцових генераторів та синтезаторів частоти, які працюють у визначених температурних інтервалах, є основною складовою нестабільності частоти. Вибором спеціальної орієнтації кварцових елементів резонаторів, зменшенням розкиду їх параметрів можна підвищити стабільність частоти кварцових генераторів. Однак, розв'язок питання подальшого підвищення температурної стабільності частоти може бути досягнутий застосуванням методів термостатування та термокомпенсації [1].

Слід зазначити, що схеми вимірювання, регулювання, реєстрації температури і передачі інформації про неї на

відстань мають бути достатньо прості у виготовленні і експлуатації. Всім цим вимогам можуть задовольняти напівпровідникові прилади. Низка їх параметрів володіє високою температурною чутливістю.

Існує велика кількість термодавачів біметалеві, ртутні, терморезисторні, на основі використання фазового переходу кристалічних речовин тощо. В основі роботи таких термостатуючих пристроїв, використовується нагрів для підтримання постійної температури [1,2]. Термостатуючі пристрої основані на використанні підігрівання мають температуру об'єкту термостатування, завжди вище крайньої додатної температури. Підвищення температури об'єкту термостатування може прискорити старіння термостатованих кварцових резонаторів і дещо збільшити їх температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) [3,4].

Основою напівпровідникових термоелектричних пристроїв є елементарний термоелемент, який представляє собою з'єднані послідовно дві напівпровідникові гілки з p - і n - провідностями рис. 1 [5].

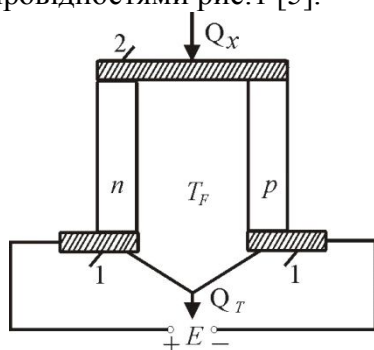


Рис. 1. Схема напівпровідникового термоелементу

На рис 1. комутаційні пластини 1 і 2, які утворюють спай термоелемента. При проходженні струму через термоелемент в напрямку який показано на рисунку стрілкою, виникає різниця температур: на спаї 1 – обумовлена виділенням тепла, а на спаї 2 (холодний спай) – його поглинання. При підтриманні постійної температури спаю 1 за рахунок тепловідводу можна понизити температуру спаю 2 до певного значення. При зміні напрямку струму місце виділення і поглинання тепла взаємно змінюється. Такий підхід дозволяє використати напівпровідникові термоелементи для підтримання

температури статуювання в межах робочого інтервалу температур кварцових генераторів і синтезаторів. В якості матеріалу для термоелементів використовують тверді розчини на основі телуриду вісмуту. Вони мають задовільні механічні властивості і легко паяються сплавами на основі вісмуту. Збільшення ефективності і опору термоелементу може бути проведено шляхом з'єднання в термобатарей. Схема такої термобатарей представлена на рис.2.

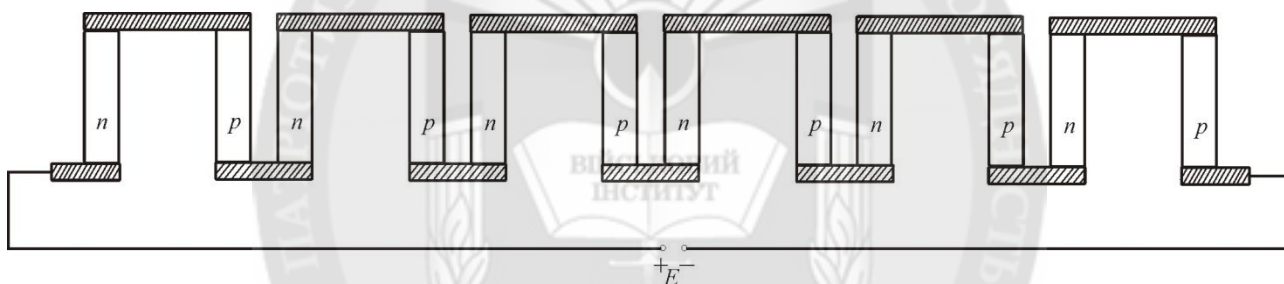


Рис. 2. Схема напівпровідникової термобатарей

Аналіз останніх досліджень і публікацій та аналітичний опис режимів роботи напівпровідникових термоелементів. Ефективність роботи термостатуючого елемента будемо характеризувати холодильним і отоплюючим коефіцієнтами, які виражають відношення відведеного і підведеного термоелементом тепла до витраченої електричної потужності [1].

Виділимо два режиму роботи термоелементу:

1. Режим максимального холодильного і отоплюючого коефіцієнтів, який, очевидно є найбільш економічним з точки зору споживання енергії.
2. Режим максимальної холодопродуктивності і теплопродуктивності, при якому термоелектричні прилади мають найменші габарити.

В залежності від того, яка вимога є переважною – висока економічність або малі габарити, слід вибирати відповідний режим термоелектричного приладу.

Розглянемо аналітично процеси які відбуваються в термостатуючому пристрої для кварцових резонаторів. Для визначення товщини стінок камери прямокутної форми скористуємось емпіричною формулою.

$$\delta_K = n_K \sqrt{\frac{S_2}{S_1} \frac{\lambda_{i3}}{\lambda_K} \frac{T_{c\max} T_{c\min}}{\Delta T_K}}, \quad (1)$$

де n_K - висота камери, S_1 - площа основи камери з боку термобатарей; S_2 - площа внутрішніх стінок камери без врахування площі S_1 ; λ_{i3} - теплопровідність матеріалу

теплоізоляції; λ_K - теплопровідність матеріалу камери; T_{cmax} - максимальна температура навколишнього середовища; T_{cmin} - мінімальна температура навколишнього середовища; ΔT_K - точність підтримання температури.

Визначимо теплоємність камери:

$$C_{KT} = C\gamma_K V_K, \quad (2)$$

де γ_K - питома вага матеріалу камери; C - питома теплоємність; V_K - загальний об'єм стінок камери.

Визначаємо теплоємність об'єкту термостатування:

$$C_{об} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \gamma_i V_i. \quad (3)$$

Загальна кількість тепла Q_{1X} , яке необхідне для охолодження камери і об'єкту термостатування до температури статкування, представимо виразом:

$$Q_{1X} = (C_{KT} + C_{об})(T_{\text{cmax}} - T_K). \quad (4)$$

Тоді, загальна кількість тепла:

$$Q_{1T} = (C_K + C_{об})(T_K - T_{\text{cmin}}), \quad (5)$$

Розглянемо тепер втрати тепла через ізоляцію: Q_{i3} . Звичайно при проектуванні термостатуючих пристроїв кількість тепла Q_{i3} вибирається в $P=3-8$ раз менше кількості тепла, необхідного для охолодження і нагріву камери до вибраної температури.

Втрати тепла через теплоізоляцію за час Q'_{i3} :

$$Q'_{i3} = \frac{Q_{i3}}{t_{np}} = \frac{Q_1}{(t_{np}P)}, \quad (6)$$

де t_{np} - час встановлення заданої температури. Товщину теплоізоляції знайдемо з виразу:

$$\delta_{i3} = (\lambda_{i3} S_3 / Q'_{i3})(T_C - T_K), \quad (7)$$

де S_3 - площа внутрішньої поверхні теплоізоляції; λ_{i3} - коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції. Кількість теплоти Q_2 буде:

$$Q_2 = 0,5 C_{i3} \gamma_{i3} V_{i3} (T_C - T_K), \quad (8)$$

де C_{i3} - питома теплоємність матеріалу теплоізоляції; γ_{i3} - питома вага матеріалу теплоізоляції; V_{i3} - об'єм теплоізоляції.

Тоді кількість теплоти, яка віддається в навколишнє середовище через виводи:

$$Q'_B = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_{Bi} \lambda_{Bi}}{l_{Bi}} (T_C - T_K), \quad (9)$$

тут S_{Bi} - площа перерізу вивода; λ_{Bi} - коефіцієнт теплопровідності матеріалу виводу; l_{Bi} - довжина виводу; n - кількість виводів.

Розглянемо питання, щодо визначення потужності термобатарей $P_{новн}$, необхідну для компенсації усіх теплових втрат термостатуючого пристрою за заданий час встановлення температури статкування:

$$P_{новн} = 1,16 \left[(Q_1 + Q_2) / t_{np} + (Q'_{i3} + Q'_B) \right]. \quad (10)$$

Вибір конкретного типу термоелементу, дозволяє встановити оптимальний струм $I_{онм}$, напругу на ньому E , кількість термоелементів, максимальний температурний перепад на поверхні батареї ΔT , матеріал термоелементів і його параметри.

Встановимо від чого залежить опір термоелементу.

$$R = (E - \alpha \Delta T N) / I_{онм}. \quad (11)$$

де α - коефіцієнт термоерс термоелементу.

Розглянемо режим забезпечення максимального ккд термоелементів як в режимі охолодження, так і в режимі нагріву. Визначимо напругу на термобатареї режимі охолодження для випадку максимального ккд.

$$E_{onmx} = \alpha M_x (T_p - T_K)(M_x - 1), \quad (12)$$

де T_p - температура гарячого спаю термобатареї; M_x - коефіцієнт, рівний: $M_x = \sqrt{1 + 0,5Z(T_p + T_K)}$; Z - ефективність матеріалу термоелементу.

Струм через термобатарею в цьому випадку:

$$I_x = E_{onmx} N / R. \quad (13)$$

Холодопродуктивність термобатареї:

$$Q_x = \alpha I_x N - \frac{1}{2} I_x^2 R - \frac{\alpha^2 N^2}{ZR} (T_p - T_K). \quad (14)$$

Кількість термобатареї, необхідних для охолодження:

$$n_x = P_{повн} / 1,16 Q_x. \quad (15)$$

В режимі нагрівання для випадку максимального ккд напруга на термобатареї:

$$E_{onmT} = \alpha M_T (T_K - T_{px}) / (M_T - 1). \quad (16)$$

де T_{px} - температура холодного спаю термобатареї; $M_x = \sqrt{1 + 0,5Z(T_K + T_{px})}$. Тоді струм через термобатарею:

$$I_T = \frac{E_{onmT} N}{R}. \quad (17)$$

Теплопродуктивність для випадку максимального ккд:

$$Q_T = \alpha I_T T_K + \frac{1}{2} I_T^2 R - \frac{\alpha^2 N^2}{ZR} (T_K - T_{px}). \quad (18)$$

Кількість термобатареї, необхідних для режиму нагріву:

$$n_T = P_{повн} / 1,16 Q_T. \quad (19)$$

Тоді, напруга джерела живлення:

$$E_{дж} = E_{onm} n. \quad (20)$$

Потужність джерела живлення:

$$P_{дж} = I E_{дж}. \quad (21)$$

Слід зазначити, що у випадку регулювання температури напівпровідниковими елементами, нагрів і охолодження змінюють, змінюючи полярність прикладеної напруги до термобатареї, тому оцінемо точність підтримання температури оберу термостатування. На цю температури впливають перепади температур джерела тепла (холоду), об'єктом термостатування і термодавачем. Величина запізнення теплового потоку:

$$\Delta T_{КАМ} = \frac{(Q'_A + Q'_B) x_d}{S_{тб} \lambda_K}, \quad (22)$$

де $S_{тб}$ - площа основи камери, яка дотикається до термобатареї; x_d - відстань між зовнішньою поверхнею основи камери і термодавачем.

Запізнення теплового потоку в ізолюючому шарі між термобатареєю і камерою:

$$\Delta T_E = (Q'_A + Q'_B) \delta_e / (S_{тб} \lambda_e), \quad (23)$$

де δ_e - товщина електроізолюючого шару; λ_e - коефіцієнт теплопровідності електроізолюючого шару.

Визначаємо зміну температури об'єму термостатування в інтервали робочих температур:

$$\Delta T_{TO} = \frac{(Q'_{i3} + Q'_B)}{\lambda_K} \left(\frac{\delta_K}{S_{m\delta}} + \frac{X - \delta_K}{S_C} \right) + \frac{R_{кам}(T_{cmax} - T_{cmin})}{R_{кам} + \frac{R_{i3}R_B}{R_{i3} + R_B}}. \quad (24)$$

де δ_K - товщина дна камери; X - відстань від зовнішньої поверхні основи і камери до об'єкту термостатування; S_C - площа перерізу бічних стінок камери; $R_{кам}$ - термічний опір матеріалу камери; δ'_{ko} - відстань між термобатареею і об'єктом термостатування; $R_{i3} = \frac{\delta_{i3}}{\lambda_{i3}}$ - термічний опір матеріалу теплоізоляції; R_B - термічний опір виводів.

Загальна результуюча точність підтримання температури термостатуючого пристрою дорівнює сумі всіх складових, які впливають на запізнення теплового потоку і зміну температури $\Delta T_{кам}$:

$$\Delta T_{рез} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta T_i. \quad (25)$$

Принципи термокомпенсації нестабільності частоти кварцових генераторів.

Одною з головних вимог до кварцових резонаторів є вимога щодо забезпечення високої температурної стабільності частоти [4]. Спеціальною орієнтацією кварцового елемента відносно кристалографічних осей можна добитись порівняно малих змін частоти кварцових резонаторів в широких інтервалах температур. Температурну стабільність кварцового резонатора в інтервалі температур можна оцінити залежністю частоти кварцового резонатора від температури, тобто частотно-температурною характеристикою кварцового резонатора. Частотно-температурну характеристику можна представити у вигляді степного ряду, причому для поширених температур можна знехтувати членами вище третього порядку. Отже вираз для частотно-температурної характеристики послідовного резонансу кварцового резонатора можна представити так:

$$f_{кет} = f_{кв0} \left[1 + a_{0\theta}(t - t_0) + b_{0\theta}(t - t_0)^2 + c_{0\theta}(t - t_0)^3 \right], \quad (26)$$

де t_0 - початкова температура; $f_{кв0}$ - частота послідовного резонансу при температурі

t_0 ; $f_{кет}$ - частота послідовного резонансу при температурі t , $a_{0\theta} = \frac{1}{f_{кв0}} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{t=t_0}$,

$b_{0\theta} = \frac{1}{2f_{кв0}} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right)_{t=t_0}$, $c_{0\theta} = \frac{1}{6f_{кв0}} \left(\frac{\partial^3 f}{\partial t^3} \right)_{t=t_0}$ - температурні коефіцієнти 1,2 і 3-го порядку

відповідно. Коефіцієнти $a_{0\theta}$, $b_{0\theta}$, $c_{0\theta}$ - залежать від орієнтації пластини, виду її коливань і від значень початкової температури.

Представимо частотно-температурну характеристику компенсуючого елемента в вузькому інтервалі температур наступним рівнянням:

$$\left(\Delta f / f \right)_T = d(t - t_0) \quad (27)$$

де d - коефіцієнт пропорційності.

Тоді сумарну частотно-температурну характеристику запишемо так:

$$\left(\Delta f / f \right)_\Sigma = \left(\Delta f / f \right)_{кв} + \left(\Delta f / f \right)_{ме} = (a_{0\theta} + d)(t - t_0) + b_{0\theta}(t - t_0)^2 + c_{0\theta}(t - t_0)^3. \quad (28)$$

Отже, слід знайти таке значення коефіцієнту d , при якому температурна нестабільність в заданому температурному інтервалі буде мінімальною. Позначимо максимальну температуру робочого інтервалу температур t_a , а мінімальну - t_b . При розрахунку нестабільності слід враховувати більший з двох інтервалів температур $(t_a - t_0)$ і $(t_b - t_0)$. Зробимо скорочення $t_a - t_0 = \Delta t_{a0}$ і $t_b - t_0 = \Delta t_{b0}$, а також врахуємо $(t_a - t_0) > (t_b - t_0)$. Для отримання мінімальної нестабільності частоти кварцових резонаторів в інтервалі температур необхідно включення в генераторну схему термокомпенсуючого елемента з лінійною

частотно-температурною характеристикою (27) з коефіцієнтом d_{omn} . Знайдемо величину d_{omn} методом найменших квадратів. Величина d_{omn} знаходиться із рішення рівняння:

$$\frac{\partial \left(\int_{t_a}^{t_b} \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{\Sigma}^2 dt \right)}{\partial d} = 0. \quad (29)$$

Знаходимо значення інтегралу:

$$\int_{t_a}^{t_b} \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{\Sigma}^2 dt = \int_{t_a}^{t_b} \left[(a_{0\theta} + d)(t - t_0) + b_{0\theta}(t - t_0)^2 + c_{0\theta}(t - t_0)^3 \right]^2 dt = \frac{(a_{0\theta} + d)^2}{3} \Delta t_{b\theta}^3 - \frac{(a_{0\theta} + d)^2}{3} \Delta t_{a\theta}^3 + \frac{b_{0\theta}}{2} (a_{0\theta} + d) \Delta t_{b\theta}^4 - \frac{b_{0\theta}}{2} (a_{0\theta} + d) \Delta t_{a\theta}^4 + \frac{1}{3} b_{0\theta} c_{0\theta} \Delta t_{b\theta}^5 + \frac{2c_{0\theta}}{5} (a_{0\theta} + d) \Delta t_{b\theta}^5 + \frac{b_{0\theta}^2}{5} \Delta t_{b\theta}^5 - \frac{c_{0\theta}^2}{7} \Delta t_{a\theta}^5 + \dots \quad (30)$$

Диференціюючи цей вираз по d , отримаємо:

$$\frac{2(a_{0\theta} + d)}{3} \Delta t_{b\theta}^3 - \frac{2(a_{0\theta} + d)^2}{3} \Delta t_{a\theta}^3 + \frac{b_{0\theta}}{2} \Delta t_{b\theta}^4 - \frac{b_{0\theta}}{2} \Delta t_{a\theta}^4 + \frac{2c_{0\theta}}{5} \Delta t_{b\theta}^5 - \frac{2c_{0\theta}^2}{5} \Delta t_{a\theta}^5 = 0 \quad (31)$$

Розв'язуючи останній вираз відносно d , отримаємо:

$$d_{omn} = -a_{0\theta} - 3b_{0\theta} \frac{\Delta t_{b\theta}^4 - \Delta t_{a\theta}^4}{\Delta t_{b\theta}^3 - \Delta t_{a\theta}^3} - 0,6 \frac{\Delta t_{b\theta}^5 - \Delta t_{a\theta}^5}{\Delta t_{b\theta}^3 - \Delta t_{a\theta}^3}. \quad (32)$$

Для випадку симетричного інтервалу температур $|\Delta t_{a\theta}| = |\Delta t_{b\theta}|$, останній вираз спроститься:

$$d_{omn} = -a_{0\theta} - 0,6c_{0\theta} \Delta t_{b\theta}^2. \quad (33)$$

Вирази (32) і (33) дозволяють знайти величини d_{omn} в залежності від інтервалу температур і значень температурних коефіцієнтів 1,2 і 3-го порядків. Величину мінімальної нестабільності частоти кварцового резонатора у випадку лінійної компенсації можна визначити з виразу (28).

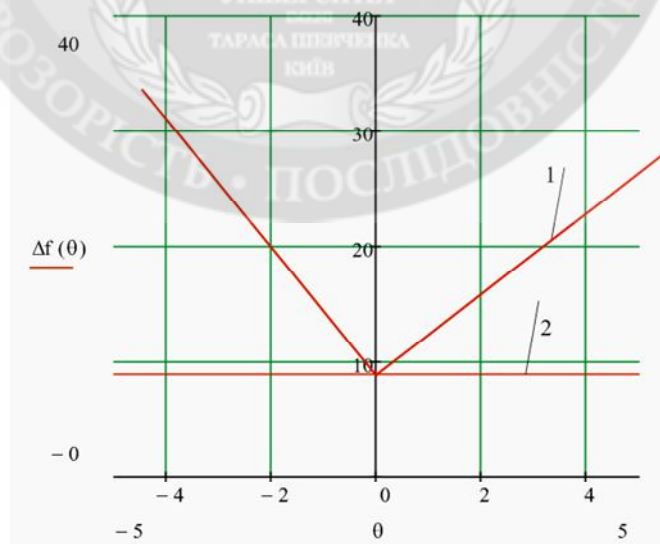


Рис. 3. Залежність температурної нестабільності

На рис. 3 для прикладу побудовано теоретичні залежності нестабільності частоти резонаторів АТ зрізу в інтервалі температур від -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$ від неточності орієнтації до компенсації (крива 1) і після лінійної компенсації (крива 2).

Висновки:

- термокомпенсація та термостатування частоти кварцових генераторів дозволяє підвищити її стабільність без збільшення часу готовності і потужності споживання, що особливо важливо в мобільній апаратурі;

- ефективність роботи термоелектричних приладів в холодильних та нагрівних пристроях характеризується відповідно холодильним та отоплюючим коефіцієнтами;

- загальна результуюча точність підтримання температури термостатуючого пристрою рівна сумі всіх складових, які впливають на запізнення теплового потоку і зміну температури;

- температурну стабільність кварцового резонатора в інтервалі температур можна оцінити залежністю частоти кварцового резонатора від температури, тобто частотно-температурною характеристикою кварцового резонатора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ащеулов А.А. Исследование термоупругих свойств ветвей термоэлектрических модулей Пельтье / А.А. Ащеулов, О.Н. Маник // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 3. – С. 26-29.

2. Клепиковський А.В. Конструктивно-технологічні шляхи керування параметрами термоелектричного охолоджувача на модулях Пельтье / А.В. Клепиковський, О.Г. Шайко-Шайковський // Термоелектрика. – 2003. – № 3. – С. 80-83.

3. Определение собственных частот колебаний термоэлектрических охладителей с разных числом каскадов методами ЭГДА и Лагранжа / Т.О. Царик, А.Г. Шайко-Шайковский, Е.Н. Тимофеева, А.В. Клепиковский // Термоэлектричество. – 2004. – № 3. – С. 66-69.

4. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

5. Методика визначення власних частот коливань термоелектричних охолоджувачів за допомогою математичного моделювання / А.В. Клепиковський, Е.М. Тимофієва, Т.О. Царик, О.Г. Шайко-Шайковський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2005. – Т. 2, ч. 1. – № 4. – С. 209-215.

6. Методика підвищення надійності систем з кількома степенями свободи з допомогою математичного моделювання / А.В. Клепиковський, В.Г. Камбург, Т.О. Царик, А.Г. Шайко-Шайковский: труды Междунар. симп. [“Надежность и качество 2007”], (Пенза, 20-31 мая 2007 г.). – Т. 1. – 212 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Шинкарук О.М.