

ISSN 2226-9150

Науковий журнал

**1.2013**

---

# **ВІСНИК**

**Хмельницького  
національного  
університету**

THE BULLETIN OF KHMELNITSKY NATIONAL UNIVERSITY  
Technical sciences

---

**Технічні науки**

**Хмельницький 2013**



## СТАБІЛІЗАЦІЯ ЧАСТОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ТЕРМОСТАТУЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

В роботі представлено дослідження впливу термостатування синтезаторів та генераторів частот на стабільність вихідної частоти. Показано що, активне термостатування має деяку затримку реакції охолоджуючої та системи підігріву, відносно внутрішньої температури мікроелектронного модуля. Запропоновано використовувати активну систему термостатування із передбаченням внутрішньої температури мікроелектронного модуля. Струм споживання модуля запропоновано використовувати як основний параметр для передбачення температури модуля. Запропоновано алгоритм роботи та структурну схему системи.

**Ключові слова:** частота, стабільність, термостатування.

*This paper presents the study of thermal effects and synthesizers oscillator frequency stability of the output frequency. Shown that, active thermal control has some delay reaction cooling and heating system, a relatively internal temperature microelectronic module. Active thermal control system with predictive internal temperature microelectronic module proposed to use. Current consumption of module offered to use as the main parameter to predict the temperature of the module. The algorithm operation and block diagram of the system proposed.*

**Keywords:** frequency, stability, stabilization of temperature.

**Вступ** Побудову радіоелектронних пристроїв різноманітного призначення на сучасному етапі розвитку техніки неможливо уявити без застосування мікроелектронних пристроїв. Такими є мікросхеми та мікросборки. Застосування саме таких пристроїв обумовлено їх масогабаритними параметрами, відмінною повторюваністю, покращеними електричними, часовими, частотними та тепловими характеристиками. Проте при вирішенні деяких задач окремі характеристики все одно не можуть забезпечити необхідної стабільності частоти, коефіцієнту підсилення, точності перетворення тощо. Значною мірою на нестабільність цих параметрів впливає температура мікроелектронного пристрою.

В багатьох роботах проводиться розробка та дослідження різних способів стабілізації частоти генераторів електричних сигналів. Серед усіх підходів до вирішення даної задачі є термостабілізація та термостатування. Термостатування передбачає забезпечення стабільної температури пристрою шляхом встановлення його у термостат із елементами підігріву та охолодження. Для контролю температури корпусу застосовуються відповідні задавачі температури [1,2]. Отже, найбільш перспективним способом є активне термостатування.

При активному термостатуванні навантажений радіокомпонент встановлюють у термостат обладнаний трьома необхідними елементами: термодавачем, пристроєм нагріву та пристроєм охолодження. Такий підхід дозволяє забезпечити точність підтримання до  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що дозволило досягнути значень температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ) близько  $10^{-7}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$  [1]. При цьому вихідна потужність збільшилась на 20-25%. Одночасно покращились інші характеристики модуля. Для подальшого покращення характеристик будь-якого генератора електричних сигналів особливо в області високочастотних пристроїв потрібно шукати методи, які б дозволили ще більше знизити ТКЧ.

**Основна частина** Розглянемо процес виділення тепла та теплопередачі мікроелектронного модуля. На рисунку 1 представлено графічне зображення мікроелектронного модуля в корпусі.

До подачі на модуль електричного живлення, його температура дорівнює температурі навколишнього середовища та корпусу:

$$T_{MM} = T_K = T_{nc}. \quad (1)$$

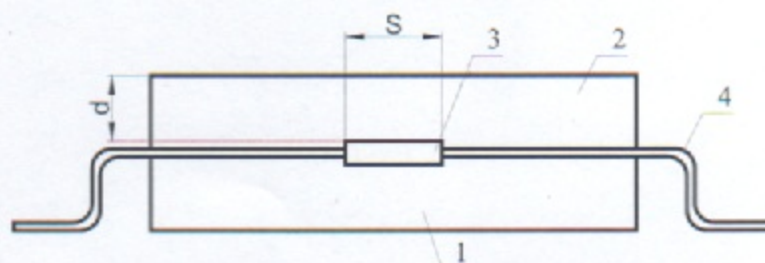


Рис. 1. Мікроелектронний модуль в корпусі (1 - основа корпусу, 2 - верхня частина корпусу, 3 - мікроелектронний модуль, 4 - вивода живлення та електричних сигналів)

Після подачі на мікроелектронний модуль живлення, через нього починає протікати електричний струм, що призводить до виділення на ньому деякої кількості тепла, пропорційної струму, напрузі та часу проходження струму, відповідно до закону Джоуля-Ленца [3]. Це тепло збільшує температуру



мікроелектронного модуля на  $\Delta T_{MM1}$ . Внаслідок чого різниця температур між зовнішньою по верхню корпусу та внутрішньою поверхнею корпусу збільшується і відбувається процес теплопередачі до зовнішньої поверхні корпусу. Даний процес описується виразом [4,5]:

$$W = \lambda \frac{t_c^I - t_c^{II}}{d} S \tau, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $d$  – товщина зразка;  $t_c^I$  – температура першої сторони зразка;  $t_c^{II}$  – температура другої сторони зразка;  $S$  – площа теплопередачі;  $\tau$  – час теплопередачі.

З виразу (1) видно що для забезпечення стабільного температурного режиму, тобто забезпечення швидкої теплопередачі від нагрітого тіла до холодного, можна використати декілька підходів. По-перше, використати матеріал з більшою теплопровідністю. Але при забезпеченні температурного режиму мікроелектронного модуля це не виявляється можливим, тому як корпус пристрою виготовляють із матеріалів які забезпечують необхідну електричну і механічну міцність. По-друге, можна змінити геометричні розміри, тобто зменшити товщину і збільшити площу. Але і цей підхід не є можна реалізувати через те що і цьому випадку погіршаться і міцність корпусу, і збільшаться його габарити. По-третє, можна збільшити час теплопередачі, але в цьому випадку необхідно забезпечити повільний нагрів модуля, а, отже, і це призведе до погіршення експлуатаційних характеристик – зменшення швидкодії пристрою, зменшення навантажувальної спроможності тощо. Останнім способом є збільшення різниці температур між зовнішньою і внутрішньою частинами корпусу. Цей спосіб є єдиним який реалізуються для забезпечення термостатування електронних пристроїв.

Для забезпечення температурного режиму електронних модулів, на зовнішній стороні встановлюють термодавач, який сигналізує про необхідність ввімкнення елементів термостатування – охолодження чи нагріву. При застосування активної системи термостатування використовують напівпровідникові термоелектричні елементи, що працюють на ефекті Пельтьє, та активні нагрівальні елементи.

При нагріві мікроелектронного модуля тепловіддача відбувається до зовнішньої сторони не одразу, а через деякий час. Відповідно реакція охолодження на підвищення температури модуля відбувається не одразу а через деякий час  $\Delta \tau$ , яка визначається затримкою теплопередачі. Таким чином, застосування термодавача на зовнішній стороні корпусу мікроелектронного модуля не дозволяє значно підвищити ефективність активної системи стабілізації частоти.

Встановлення термодавача всередині корпусу мікроелектронного модуля не є виправданим з двох причин. По-перше, це призведе до подорожчання мікроелектронного модуля. По-друге, інерційність перетворення температура-електричний сигнал так саме буде призводити до затримки реакції системи термостатування на підвищення чи зниження температури модуля.

Найбільш ефективним є система активного термостатування із передбаченням зміни температури мікроелектронного модуля. Основною особливістю такої системи повинна бути можливість проводити оцінку майбутньої зміни температури, на відміну від ресстрації цих змін, і формування сигналів на термостатування.

Усі зміни температури електронних пристроїв відбуваються внаслідок споживання пристроєм електричної потужності. Уся електрична потужність споживана пристроєм використовується на виконання двох функцій. По-перше, на забезпечення роботи модуля. По-друге, на забезпечення навантажувальної спроможності пристрою.

Внаслідок того що усі синтезатори частоти є цифровими пристроями, а також більшість генераторів електричних сигналів мають елементи цифрової схемотехніки, споживана потужність яка використовується є змінною у часі. Зміна споживання електричної потужності, в цьому випадку пояснюється зміною тактової частоти, швидкодії пристрою, псевдовипадковим характером появи різних логічних рівнів. Усе це призводить до нерівномірного у часі споживання електричної енергії.

З іншого боку, підключення до виходу цифрового синтезатора частоти чи генератора частоти навантаження призводить до відбору електричної потужності з виходу. Для цього енергія відбирається по колам живлення від джерела живлення. Причому, відбір потужності з виходу є також випадковим процесом, тому як енергія синтезатора чи генератора використовується лише у час підключення зовнішніх кіл до виходу, які перетворюють сигнали з синтезатора або генератора для виконання функцій електронного пристрою в склад якого входить синтезатор або генератор.

Отже є пряма залежність між споживаною потужністю та температурою мікроелектронного модуля. А на споживану потужність впливають струм, що протікає через модуль по колам живлення та напруга живлення. Тому як напруга живлення модуля є постійною, то можна вважати що температура модуля знаходиться залежно від споживаного по колам живлення електричного струму:

$$T_{MM} \sim i(\tau). \quad (3)$$

Враховуючи те що нагрівання модуля не відбувається миттєво при зміні споживано струму, а з деякою затримкою, то прирости струму якій протікає по колам живлення можна використовувати для передбачення змін температури модуля.



Одним з найважливіших параметрів електрорадіоелементів є тепловий імпеданс  $\dot{Z}_T(\omega)$ , що характеризує здатність електрорадіоелемента відводити тепло, що виділяється в ньому, при розсіюванні електричної потужності [4]. Тепловий імпеданс (за аналогією з електричним імпедансом) визначає амплітуду змінної складової температури активної області елемента  $\tilde{T}_m$  при зміні потужності що розсіюється за гармонійним законом  $P(t) = P_0 + P_m \sin \omega t$ .

$$\dot{T}_m = \dot{Z}_T \dot{P}_m. \quad (4)$$

Тепловий імпеданс  $\dot{Z}_T(\omega)$  є комплексною функцією частоти  $\omega$  і пов'язаний з функцією відгуку температури елемента  $\Theta(t)$  на  $\delta$ -подібний імпульс потужності відомим співвідношенням

$$\Theta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_T(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Вид функції  $\dot{Z}_T(\omega)$  визначається конструкцією і теплофізичними параметрами конструкційних матеріалів електрорадіоелемента. Для елементів, що мають складну конструкцію (наприклад, напівпровідникових приладів) тепловий імпеданс зазвичай записується у вигляді [5]:

$$\dot{Z}_T(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{R_{T_i}}{1 + j\omega\tau_{T_i}}, \quad (6)$$

де  $R_{T_i}$  – тепловий опір  $i$ -го шару,  $\tau_{T_i} = R_{T_i} C_{T_i}$  – теплова постійна часу  $i$ -го шару, а  $C_{T_i}$  – відповідно, теплоємність  $i$ -го шару. Зазначимо, що в силу інерційності теплових процесів  $|\dot{Z}_T| \rightarrow 0$  при  $\omega \rightarrow \infty$ . З іншого боку, при  $\omega \rightarrow 0$  тепловий імпеданс наближається до значення теплового опору приладу:

$$\dot{Z}_T(\omega) \cong R_T = \sum_{i=1}^n R_{T_i}. \quad (7)$$

Виходячи з виразу (7) випливає що, при розробці системи термостатування для пристроїв із нешвидкою зміною температури, можна використовувати поняття теплового опору замість теплового імпедансу. Для радіоелектронних пристроїв та мікроелектронних модулів тепловий опір є довідковим параметром.

В загальному випадку, при зміні у часі потужності яка розсіюється модулем, змінюється і температура модуля у часі:

$$T_{MM}(t) = R_T P_m(t). \quad (8)$$

У загальному випадку при невеликій зміні температури  $\Delta T$  робочого тіла модуля щодо деякого стаціонарного значення  $T_0$  ( $T_0 \gg \Delta T$ ) активний опір модуля можна описати лінійною функцією виду:

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (9)$$

де  $R_t$  – опір модуля при температурі  $T_0 + \Delta T$ ,  $R_0$  – опір модуля при заданій температурі навколишнього середовища  $T_0$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (ТКО) модуля [1/К].

Для таких елементів можна запропонувати інший спосіб перетворення в електричний сигнал, заснований на ефекті множення частоти [6].

При пропусканні через модуль струму що змінюється і який гріє модуль,  $I(t)$  зміна температури робочого тіла модуля в результаті саморозігріву буде «відслідковувати» зміна миттєвої потужності, що розсіюється модуля:

$$\Delta T = Z_T P(t) = Z_T R_t I^2(t), \quad (10)$$

де через  $Z_T$  позначено тепловий опір (у загальному випадку – модуль теплового опору) модуля. Підставляючи (10) в (9), і розв'язавши отримане рівняння відносно  $\Delta T$ , отримаємо:

$$\Delta T = \frac{Z_T R_0 I^2(t)}{1 - Z_T R_0 \alpha I^2(t)}. \quad (11)$$

Якщо  $Z_T R_0 \alpha I^2(t) \ll 1$ , тоді зміну температури можна записати з точністю до членів другого порядку малості по  $\Delta T/T$ :

$$\Delta T = Z_T R_0 I^2(t) (1 + Z_T R_0 \alpha I^2(t)) = Z_T R_0 I^2(t) + Z_T^2 R_0^2 \alpha I^4(t). \quad (12)$$

Отже, перегрів кристала модуля має залежність четвертого ступеню від споживаного струму. Залежність (12) можна використовувати для передбачення перегрів кристалу та формування відповідних сигналів на охолодження модуля в корпусі.



Відповідно до (2) прискорення відводу тепла можна робити за рахунок збільшення різниці температури  $t_c^I - t_c^{II}$ . І саме в той час коли температура тільки починає підвищуватись в середині корпусу, необхідно зменшувати температуру на його зовнішній поверхні. Тоді можна досягнути постійності відводу надлишкового тепла  $W = const$ .

Отже, можна запропонувати наступний алгоритм роботи термостатуючої системи для забезпечення стабільності частоти синтезаторів та генераторів частот.

1) В режимі холостого ходу стабілізується температура в середині корпусу мікроелектронного модуля шляхом вимірювання температури на зовнішній поверхні корпусу та вихідної частоти.

2) Змінюючи температуру всередині корпусу шляхом нагріву чи охолодження зовнішньої поверхні корпусу, досягаємо необхідного значення вихідної частоти сигналу.

3) Підключаємо навантаження до синтезатора чи генератора частоти.

4) Вимірюємо зміну струму споживання по колам живлення за невеликий проміжок часу.

5) Розраховуємо зміну температури в середині корпусу.

6) Формуємо сигнали на зміну зовнішньої температури корпусу для досягнення постійності різниці температур на зовнішній чи внутрішній поверхнях корпусу.

7) Повертаємось до пункту 4).

В загальному структурна схема термостатуючої системи може бути представлена наступним чином (рис. 2).

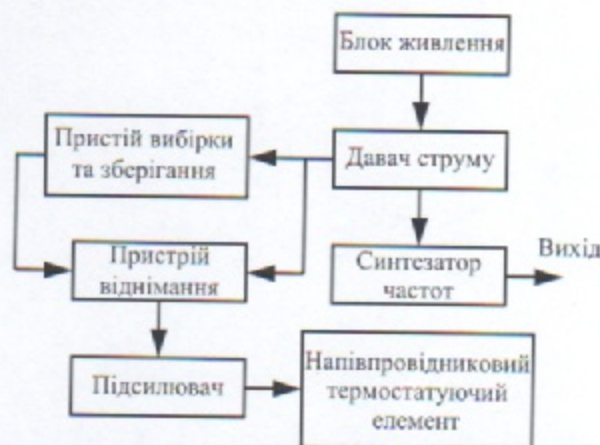


Рис. 2. Структурна схема активної термостатуючої системи із передбаченням

Дана структурна схема виконує вимірювання струму за два періоди часу, який визначається часом запам'ятовування у пристрої вибірки та зберігання. Знаходячи різницю струму і підсилюючи відповідно до виразу (12), формуються сигнали на охолодження чи нагрівання напівпровідникового термостатуючого елемента. Стабілізація температури кристалу на постійному рівні дозволяє стабілізувати вихідну частоту синтезатора частоти чи генератора.

**Висновки** Для подальшого покращення алгоритму активної системи термостатування із передбаченням необхідно контролювати не тільки струм споживання, але і температуру на зовнішній поверхні корпусу та вихідну частоту.

### Література

1. Кравченко А.В. Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов / А.В. Кравченко, С.В. Плаксин, И.И. Соколовский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005, № 3, С.63-64.
2. Хоменко И.В. Терморегулятор термостатированного генератора и способ настройки данного терморегулятора. Патент России № 2463700, 20.04.2011, Опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.
3. Закс Д. И. Параметры теплового режима микросхем / Д. И. Закс. – М.: Радио и связь. 1983. – 176 с.
4. Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергия, 1972– 120 с.
5. Сергеев В.А. Измерение параметров теплоэлектрической модели мощных полупроводниковых приборов / В.А. Сергеев, Н.Н. Горюнов, А.А. Широков. – Электронная техника, сер. 8, вып. 6., 1982. – С. 40-41.
6. Сергеев В.А. Умножитель частоты инфранизкочастотных сигналов на терморезисторе / В.А. Сергеев, А.Н. Васильев. Тезисы докладов II ежегодной школы семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» – Ульяновск, УлГТУ, 1999 – с.37-38.

Надійшла 14.1.2013 р.  
Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.