

Павлов Л.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яганов П.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОРОГОВОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ

У статті висвітлюється оптимізація інтегрального порогового сенсора температури (ІПСТ), який покликаний захистити критичний вузол – потужний силовий транзистор стабілізатора напруги, лінійного чи імпульсного. Особливість такого сенсора полягає в тому, що його вихідний сигнал аналоговий і формується у вигляді істотного перепаду напруги, що надходить до блоку управління силовим елементом інтегральної мікросхеми. Якість такого сенсора оцінюється похибкою точки спрацювання за температурою. Точка спрацювання своєю чергою має початкову температуру наростання сигналу та температуру його завершення. Це певний інтервал температури, в якому формується вихідний сигнал ІПСТ. Відповідно, чим вужчий цей інтервал, тим вище якість сенсора. Нарешті третій фактор оцінки якості сенсора полягає в тому, яку площу на кристалі інтегральної мікросхеми займають елементи сенсора: чим менша площа – тим дешевша мікросхема, тим більша її конкурентоздатність. Отже, менше площа – вища якість. Ці три фактори складають критерій якості при оптимізації ІПСТ, що покладені в формування цільової функції процесу оптимізації. Цільова функція формується відповідно мінімаксного критерію оптимальності, що означає мінімальне значення цільової функції за максимуму значень відхилень компонентів вектора цільової функції оптимізації. Вагові коефіцієнти компонентів вектора компонентів цільової функції вибираються методом експертних оцінок. Функцію оптимізації конкретизують параметри елементів схеми моделі ІПСТ: значення електричних режимів роботи транзисторів, їх розміри, значення опору резисторів. Для пошуку оптимальної точки цільової функції запропоновано алгоритм, що передбачає пошуки локальних оптимальних точок і на їх основі зваженим усередненням отримання глобального оптимуму. Запропоновано перевірки в точці глобального оптимуму та рішення в разі порушення критерію якості. Алгоритм пошуку оптимального рішення в цьому випадку полягає в тому, що допустимі значення компонентів можуть приймати лише значення в рамках того інтервалу, що визначений як межа допуску на виготовлення за чинним технологічним процесом. Доцільність такого підходу полягає в тому, що цим враховуються обмеження на параметри компонентів з урахуванням конструктивно-топологічних обмежень технологічного процесу виготовлення зразків ІПСТ.

Ключові слова: інтегральний пороговий сенсор температури, похибка сенсора, оптимізація, критерій оптимізації, цільова функція, змінні оптимізації.

Постановка проблеми. Дослідження світового ринку температурних сенсорів [1] свідчить про те, що в передових країнах зростає потреба в різноманітних температурних сенсорах як для побутової, так і для військової техніки. Зокрема, в країнах з найвищими військовими витратами, рисунок 1, спостерігається відповідне зростання попиту і на напівпровідникові температурні сенсори. Водночас ці сенсори температури мають широке поле застосування в радіоелектронній апаратурі як у вигляді окремого виробу, так і в складі інтегральних мікросхем, в першу чергу стабілізаторів напруги, для захисту від впливу надлиш-

кової температури. В інтегральних мікросхемах точність спрацювання сенсора має велике значення. Проблема полягає в тому, що площа мікросхем з потужними вихідними каскадами в значній мірі визначає вартість цих мікросхем. Отже, чим менша площа, тим менша вартість інтегральної мікросхеми та більша конкурентоздатність. Тому істотне прагнення кожного виробника зменшити розмір кристала шляхом зменшення розмірів вихідних компонентів, що можуть займати 30...50% площі кристала. Але зменшення розмірів вихідних транзисторів своєю чергою сприяє їх перегріванню і, в наслідок цього, вигорянню

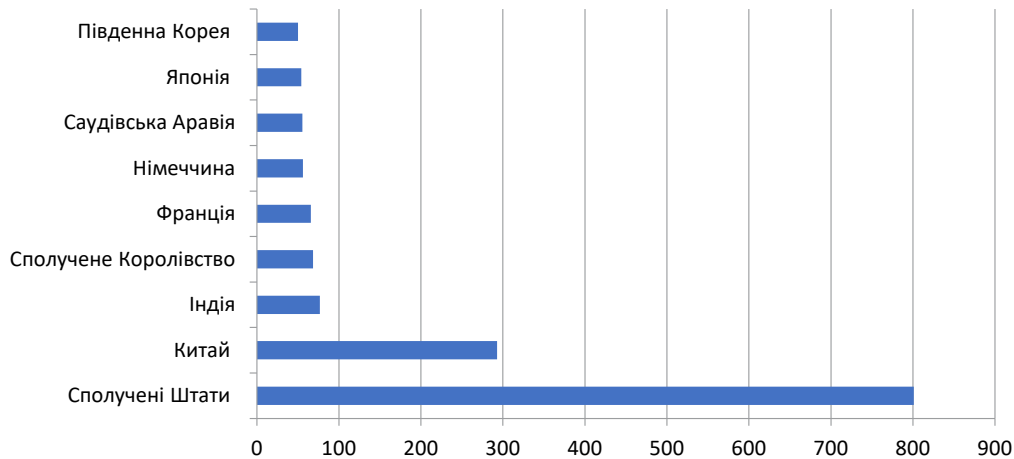


Рис. 1. Військові витрати в мільярдах доларів США

через збільшення щільності струму. Отже, в певний момент, що визначається критичною температурою, має спрацювати сенсор. В результаті, наприклад, в перетворювачах DC-DC, це дасть змогу знизити шпаруватість імпульсів запуску вихідного ключа, і навіть зменшити частоту його запуску, як це забезпечено в інтегральному перетворювачі DC-DC LM2596. Тож, чим точніший сенсор, тим меншим може бути вихідний ключ, бо не потрібно виконувати його топологію з запасами на велику похибку сенсора. В результаті – вища конкурентоздатність інтегральної мікросхеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз надійності сенсорних систем [2] доводить, що галузь температурних сенсорів є актуальною і стає частиною великих систем.

Моделювання температурних сенсорів за допомогою середовища LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) представлено в публікації [3]. Робота вказує на зацікавленість в моделюванні напівпровідникових сенсорів температури, що підкреслює необхідність обраного напрямку досліджень.

В роботі [4] досліджується перехід від аналогового датчика до цифрового та інтелектуального з метою виявлення температурних аномалій. Такий підхід наводить на думку, що пороговий сенсор температури власне і є певною мірою переходом від лінійного аналогового сенсора до приладу діагностики критичного стану, коли мусить спрацювати певний регулятор, що внесе зміну в температурний процес.

В дослідженні [5] представлено доказ концепції для нового підходу до вимірювання температури, який поєднує в собі теплове розширення та сумісний механізм. Для цього сумісного

механізму досягається температурна чутливість $28,5 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$. Ця робота лише частково перетинається з областю напівпровідникових сенсорів температури, де ефекти градієнта температури та деформацій кристала обов'язково мають бути враховані. Але сутність вимірювання температури в напівпровідникових сенсорах має іншу природу, а явище деформацій кристала може бути враховано у відповідних конструкторсько-топологічних обмеженнях на топологію та конструкцію мікросхеми.

В наступній роботі [6] розглянута матриця діодних давачів температури, що створена для вимірювання розподілу температури на невеликій поверхні з високою роздільною здатністю. Вона складається з масиву 32×32 діодів (1024 діодів) для визначення температури на площі поверхні $8 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$ і була виготовлена за допомогою техніки дуже великомасштабної інтеграції (VLSI).

Формулювання цілей статті. В роботах [1-6] вказано на зацікавленість в напівпровідникових сенсорах температури та на розвиток цієї тематики, що доводить актуальність даної роботи. Але теми дослідження порогових сенсорів температури в інтегральному виконанні (ІПСТ) в них не запропоновано. Тому мета даної роботи полягає у пошуку оптимальних номінальних значень елементів ІПСТ з урахуванням технологічного процесу створення інтегральної мікросхеми, що певною мірою доповнить дослідження з даної теми.

Для досягнення мети необхідно розв'язувати задачу центрування точки спрацювання ІПСТ. Така задача може бути вирішена застосуванням оптимізації параметрів моделі сенсора.

Виклад основного матеріалу. Особливість такого сенсора полягає в тому, що його природа

має аналоговий характер, але вихідний сигнал формується у вигляді істотного перепаду напруги, що надходить до блоку управління силовим елементом інтегральної мікросхеми. Відповідно потрібно сформулювати критерій якості (оптимальності), визначити цільову функцію, змінні оптимізації, обмеження та метод пошуку оптимуму. Критерій оптимальності враховує те, що при виготовленні ПСТ параметри елементів приймають випадкові значення, які будуть відрізнятися від пластини до пластини, від партії пластин до наступної партії. Тому, в яких межах буде забезпечена точка спрацювання з температури, наприклад $170\text{ }^{\circ}\text{C} \pm \delta$, де δ – похибка ПСТ, потрібно визначити з урахуванням інтервалів допустимих значень елементної бази ПСТ.

Отже, якість ПСТ оцінюється похибкою точки спрацювання за температурою. Точка спрацювання своєю чергою має початкову температуру наростання сигналу та температуру його завершення. Це певний інтервал температури, в якій формується вихідний сигнал ПСТ. Відповідно, чим вужчий цей інтервал, тим вище якість сенсора. Нарешті третій фактор оцінки якості сенсора полягає в тому, яку площу на кристалі інтегральної мікросхеми займають елементи сенсора: чим менша площа – тим дешевша мікросхема, тим більша її конкурентоздатність. Отже, менше площа – вища якість.

Ці три фактори складають критерій якості ПСТ для оптимізації, що покладені в формування цільової функції процесу оптимізації. Цільова функція формується відповідно мінімаксного критерію оптимальності, що означає мінімальне значення цільової функції за максимуму значень відхилень компонентів вектора цільової функції процесу оптимізації. Вагові коефіцієнти компонентів вектора цільової функції вибираються методом експертних оцінок. В якості змінних Змінними оптимізації виступають параметри елементів схеми моделі ПСТ: значення електричних режимів роботи транзисторів, їх коефіцієнти підсилення та розміри, значення опору резисторів.

Для розв'язання поставленої задачі можна скористатися досвідом [8] з пошуку локальної оптимальної точки типової моделі ПСТ, що наведена на рисунку 2. Схема забезпечує критерій якості з точки зору швидкості наростання вихідного сигналу ПСТ в перехідній області внаслідок посилення за постійним струмом. Разом з тим схема містить лише три транзистори та цим відповідає вимогам критерію якості за мінімальною площею.

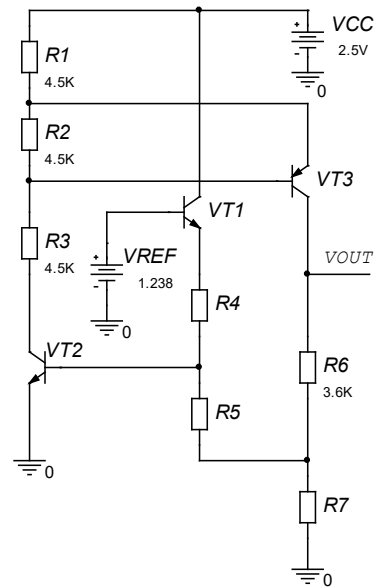


Рис. 2. Схема моделі інтегрального порогового сенсора температури

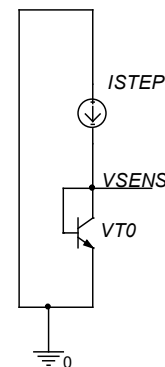


Рис. 3. Схема вимірювання напруги база-емітер

Для мінімізації цільової функції

$$\Delta \{R\} = \min \max [\delta_1(R4), \delta_2(R5), \delta_3(R7)]$$

потрібно визначити оптимальний вибір номінальних значень параметрів компонентів $R4$, $R5$ та $R7$, аби забезпечити точку спрацювання за температури, наприклад, $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ з найменшим відхиленням максимальних компонентів з δ_1 , δ_2 , δ_3 від цієї точки.

В основі роботи цієї схеми покладено залежність напруги переходу база-емітер $VSENS$ кремнієвого біполярного транзистора $VT0$ від температури при стабільному струмі $ISTEP$ у схемі вимірювання, рисунок 3. Відповідно до цього задача оптимізації може бути конкретизована за наступним алгоритмом:

1. Створити узагальнену термометричну характеристику ПСТ з урахуванням розсіяння напруги база-емітер транзистора-датчика температури в межах технологічного процесу.

2. Знайти локальний оптимум «0» – за усередненою моделлю термометричної характеристики за умови середніх значень коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів.

3. Знайти локальний оптимум «1» – за усередненою моделлю термометричної характеристики та умови межового відхилення значення коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів в додатню область допуску.

4. Знайти локальний оптимум «2» – за усередненою моделлю термометричної характеристики та умови відхилення значення коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів у від'ємну область допуску.

5. За результатами досліджень за п. 1–4 визначити умови продовження дослідження, наприклад, за умови усереднених значень коефіцієнтів підсилення транзисторів і.

6. Знайти локальний оптимум «3» – за умови межового відхилення значення напруги U_{ce} у додатню область.

7. Знайти локальний оптимум «4» – за умови межового відхилення значення напруги U_{ce} у від'ємну область.

8. Обрахувати глобальний оптимум як усереднення локальних оптимумів.

9. Провести перевірку «0» температури спрацювання ПСТ глобального оптимуму на потрапляння у допуск за серединним значенням U_{ce} та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

10. Провести перевірку «1» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

11. Провести перевірку «2» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

12. Провести перевірку «3» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та межових відхилень опорів резисторів у додатню область.

13. Провести перевірку «4» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та межових відхилень опорів резисторів у додатню область.

14. Провести перевірку «5» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та межових відхилень опорів резисторів у від'ємну область.

15. Провести перевірку «6» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та

межових відхилень опорів резисторів у від'ємну область.

16. Якщо результати перевірки прийнятні, то обрахувати усереднене (типове) значення температури спрацювання ПСТ і завершити задачу, інакше внести зміни та перейти до п. 1.

Постає питання, які зміни можливі, коли виявлені порушення в контролі на інтервали допуску? Відповідь не однозначна і залежить від того, в якій мірі порушені обмеження. Відповідно рішення можуть бути і такими, що потребують узгоджень з експертами:

1) Визначити більший ваговий коефіцієнт для вектора змінних найгіршого випадку, провести перерахування вектора змінних для глобального оптимуму. За необхідності повторити цикл оптимізації.

2) Визначити критичний елемент та перевести його в категорію з вужчим допуском. Це може бути виконання резистора більш точним, але через це і більш габаритним.

3) Погодитись на певний відсоток виходу за межі допуску, визначити ознаки ризику порушень та перевести ці вироби в категорію з нижчими цінами. Наприклад з категорії військового стандарту до категорії промислового чи навіть побутового стандарту.

4) В складній ситуації перевести надкритичний елемент в розряд «тюнінг» – налаштування. Операція налаштування вартісна та уповільнює процес виготовлення. Тому вона не бажана і потребує експертної оцінки.

5) Змінити схему моделі. Радикальний і надзвичайний крок, інколи потребує експертної оцінки.

Створення узагальненої термометричної характеристики ПСТ з урахуванням розсіяння напруги база-емітер транзистора-датчика температури в межах технологічного процесу передбачає в даному разі визначення такого струму через сенсор та напруги переходу база-емітер за цим струмом, що вони визначають усереднену термометричну характеристику за середніми значеннями коефіцієнта підсилення транзистора, що відіграє роль сенсора. В схемі, рисунок 2, роль сенсора відіграє транзистор $VT2$. За початковим дослідженням [8] струм через транзистор в точці спрацювання складає 55 мкА. Це значення струму для транзистора $VT2$ покладено для вимірювання напруги U_{ce} за схемою вимірювання, рисунок 3, $I_{STEP} = 55$ мкА для виявлення середнього значення відхилень цього параметру. Усереднені результати цих вимірювань за моніторингом, що

охоплює 14 місяців, склали усереднену термометричну характеристику ІПТС.

Пошук локального оптимуму «0» – за усередненою моделлю термометричної характеристики за умови середніх значень коефіцієнта підсилення p-p транзисторів проводився, як і в інших випадках, за методом Хука-Джівса. Алгоритм пошуку оптимального рішення в цьому випадку полягає в тому, що допустимі значення компонентів можуть приймати лише значення в рамках того інтервалу, що визначений як межа допуску на виготовлення за чинним технологічним процесом. Доцільність такого підходу полягає в тому, що цим враховуються обмеження на параметри компонентів з урахуванням конструктивно-топологічних обмежень технологічного процесу виготовлення зразків ІПТС. Водночас зменшується яружність цільової функції порівняно з тим, якби обмеження формулювались за допомогою нелінійних функцій на межах допустимих значень змінних оптимізації.

Щодо відхилень напруги $U_{\text{бс}}$. Для усталеного технологічного процесу середнє відхилення складає 1,5...2 мВ. Водночас в межах кристала може спостерігатись відхилення напруги $U_{\text{бс}}$ до ± 3 мВ. Такі флуктуації напруги $U_{\text{бс}}$ зазвичай нейтралізують, наприклад, виконанням відповідальних елементів у вигляді матриці. Але ретельне дослідження цього питання не входить в задачу даної роботи.

Результат пошуку локального оптимуму «0» за середнього значення напруги $U_{\text{бс}} = 661,8$ мВ, що відповідає усередненій термометричній характеристиці, відображає рисунок 4. Діаграму струму в області спрацювання наведена на верхньому графіку. Нижній графік відображає напругу на виході ІПТС. Вектор змінних оптимізації в точці локального оптимуму «0» складає

$$\{R4=5,6 \text{ кОм}, R5= 4,23 \text{ кОм}, R7=363 \text{ Ом}\}$$

Таким чином пункти 1–2 алгоритму виконано.

Дослідження за пунктами 3–4 алгоритму показало, що спрацювання ІПТС в локальному оптимумі «1» та «2» при відхиленні значення коефіцієнта підсилення p-p транзисторів у від'ємну чи додатну область допуску істотно не відрізняються від наведеного на рисунку 4 локального оптимуму «0». Тому надалі дослідження проводяться лише з середніми значеннями коефіцієнтів підсилення транзистора.

Виконання пункту 6 алгоритму «Знайти локальний оптимум «3» за умови межового відхилення значення напруги $\Delta U_{\text{бс}}$ у додатну область» до значення $U_{\text{бс}} = 663,8$ мВ надає наступні значення вектора змінних оптимізації:

$$\{R4=5,54 \text{ кОм}, R5= 4,3 \text{ кОм}, R7=346 \text{ Ом}\},$$

а пункту 7 – наступні:

$$\{R4=5,73 \text{ кОм}, R5= 4,26 \text{ кОм}, R7=346 \text{ Ом}\}.$$

Для виконання п. 8 алгоритму проводимо усереднення компонентів вектора змінних. Для першого проходу циклів оптимізації кожному вектору надаємо однаковий ваговий коефіцієнт 1,00 і отримуємо вектор у вигляді:

$$\{R4=5,6233 \text{ кОм}, R5= 4,26 \text{ кОм}, R7=342 \text{ Ом}\}$$

Вектори резисторів, номінальні значення яких відхилились на 5% у додатну та від'ємну області відповідно мають значення:

$$\{R4=5,9045 \text{ кОм}, R5= 4,4765 \text{ кОм}, R7=359,1 \text{ Ом}\};$$

$$\{R4=5,3421 \text{ кОм}, R5= 4,242 \text{ кОм}, R7=340,3 \text{ Ом}\}.$$

В цьому випадку розрядність компонентів не обмежено трьома знаками, бо в цьому разі вони означають не номінальні значення за топологічним рішенням, а наслідок технологічної реальності отриманих конструкцій.

Результати перевірки зведені в таблицю (табл. 1).

Проведемо оцінку на прийнятність отриманого результату.

Значення температури спрацювання $166,1^\circ\text{C}$ істотно відрізняється від перших трьох результатів. Звичайно, можна застосувати «Рішення 1») з алгоритму та провести повторну оптимізацію зі збільшенням вагового коефіцієнта саме для випадку зменшення напруги база-емітер і відхилень значень резисторів в сторону зменшення. Але, з точки зору експертної оцінки похибка становить 2,3%, що прийнятно. Крім того, така величина спрацювання при від'ємному відхиленні значень резисторів позитивно вплине на захист потужного транзистора. Особливість такої ситуації полягає в тому, що зазвичай кожну комірку матриці потужного транзистора захищають від випадкових флуктуацій напруги $U_{\text{бс}}$ невеликим за опором резистором, що включений послідовно з емітером. У випадку перегріву і неконтрольованого збільшення струму коміркою внаслідок від'ємного зворотного зв'язку за струмом захисний резистор запобігає руйнуванню комірки від перегріву. Отже, при зменшенні опору захисних резисторів, що може ста-

Таблиця 1

Перевірка №	0	1	2	3	4	5	6
Температура спрацювання ІПТС, $^\circ\text{C}$	168,65	170,0	167,35	171,22	168,6	168,7	166,1

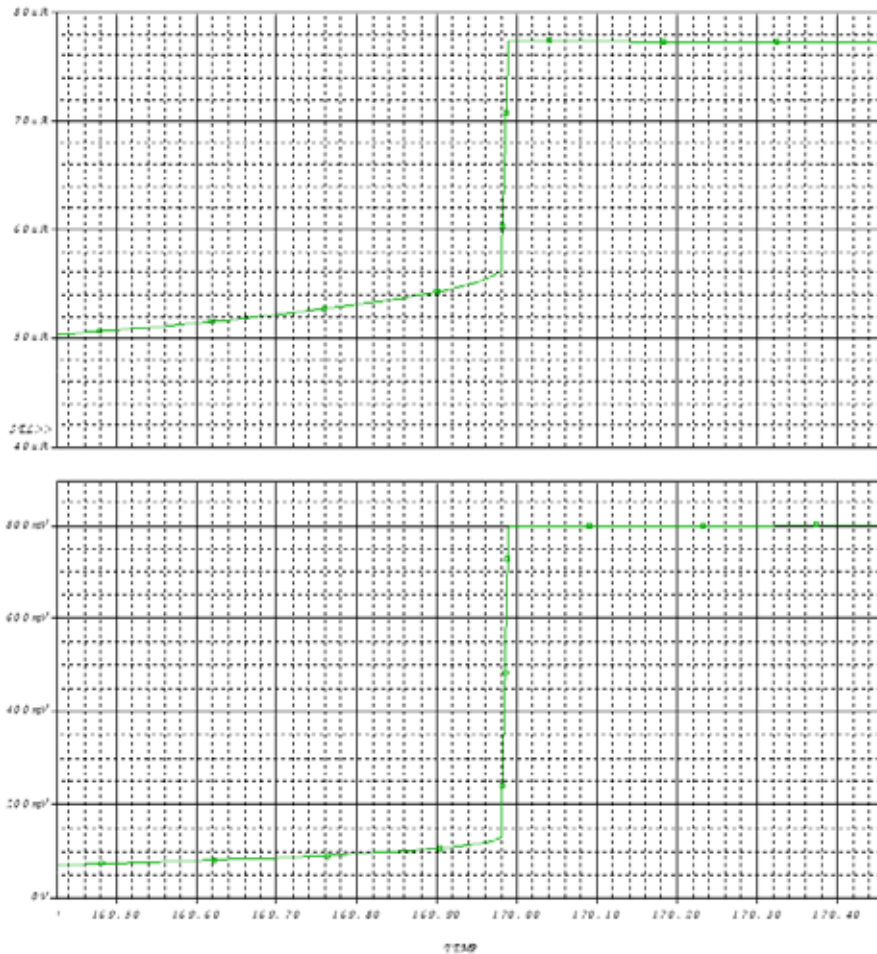


Рис. 4. Діаграма струму та напруги ПСТ

тися в результаті варіації технологічного процесу, бажано зсувати точку спрацювання ПСТ в сторону нижчої температури. В даному разі це виконується без додаткових зусиль. Тому процес оптимізації на цьому можна вважати завершеним.

Висновки.

1. Запропоновано критерій якості інтегрального порогового сенсора температури для оптимізації точки спрацювання (ПСТ).
2. Сформовано цільову функцію на основі змінних оптимізації.

3. Запропоновано визначення глобального оптимуму на основі зважених результатів пошуку локальних оптимумів точки спрацювання ПСТ.

4. Запропоновано алгоритм оптимізації, що включає перевірку результату пошуку глобальної оптимальної точки спрацювання ПСТ з урахуванням відхилень параметрів елементної бази.

5. Проведено експертну оцінку найгіршого випадку результату перевірки та обґрунтовано рішення про завершення оптимізації за першим проходом.

Список літератури:

1. Mordor Intelligence. The Temperature Sensors market -, growth, trends, Covid-19 impact, and forecast (2023 - 2028). - Temperature Sensors Industry Report. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/temperature-sensors-market-industry>
2. Panchangam S.P., Naskan V. N. A. Realleability analysis of temperature. Sensor System. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering Vol. 20, No. 1 (2013) 1350003 (20 pages) World Scientific Publishing Company. DOI: 10.1142/S0218539313500034
3. IEEE. LabVIEW based modelling and analysis of temperature sensors. 2014 First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCS) Date Added to IEEE Xplore: 16 February 2015. INSPEC Accession Number: 14931729. DOI:10.1109/COMPSC.2014.7032662

4. Jing W., Wang P., Zhang N. Study on Temperature Sensor Data Anomaly Diagnosis Method Based on Deep Neural Network. – Hindawi Scientific Programming. - Volume 2022, Article ID 9662374, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/9662374>
5. Design and performance analysis of a novel displacement-based temperature sensor// Hassena M.A.B. Ghommem M. Aly A. Hamdan M. Najar F. From the journal tm - Technisches Messen <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0104> (<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/teme-2022-0104/html>)
6. Han I. Y., Kim S. J. “Diode temperature sensor array for measuring micro-scale surface temperatures with high resolution,” Sens. Actuators A Phys., vol.141, no.1, pp. 52–58, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.07.020>
7. Pavlov L.M. Yaganov P.O. Termometric model of diode temperature sensor / KPI Science News,- № 1-2 (2022), 52-68. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.251016>
8. Павлов Л.М. Пороговий сенсор температури. «Світ наукових досліджень. Випуск 15» 19-20 грудня 2022 року, м. Тернопіль (Україна) – м. Переворськ (Польща), <http://www.economy-confer.com.ua/full-article/4125/>

Pavlov L.M., Yaganov P.O. OPTIMIZATION OF THE INTEGRAL TEMPERATURE THRESHOLD SENSOR

The article highlights the optimization of the integrated threshold temperature sensor (IPST), which is designed to protect a critical node - a powerful power transistor of a voltage stabilizer, linear or pulsed. The peculiarity of such a sensor is that its output signal is analog and is formed in the form of a significant voltage drop that enters the control unit of the power element of the integrated microcircuit. The quality of such a sensor is evaluated by the temperature error of the trigger point. The trigger point, in turn, has the initial temperature of the rise of the signal and the temperature of its termination. This is a certain temperature interval in which the IPST output signal is formed. Accordingly, the narrower this interval, the higher the quality of the sensor. Finally, the third factor for assessing the quality of the sensor is the area on the crystal of the integrated microcircuit occupied by the elements of the sensor: the smaller the area, the cheaper the microcircuit, the greater its competitiveness. So, less area means higher quality. These three factors make up the quality criterion in the optimization of the IPST, which are included in the formation of the target function of the optimization process. The objective function is formed according to the minimax optimality criterion, which means the minimum value of the objective function at the maximum of the deviation values of the components of the optimization objective function vector. The weight coefficients of the components of the vector of components of the objective function are selected by the method of expert evaluations. The optimization function is specified by the parameters of the circuit elements of the IPST model: the values of the electrical operating modes of the transistors, their sizes, and the resistance values of the resistors. To find the optimal point of the objective function, an algorithm is proposed, which involves searching for local optimal points and, based on them, obtaining the global optimum by weighted averaging. Checks at the point of the global optimum and solutions in case of violation of the quality criterion are proposed. The algorithm for finding the optimal solution in this case consists in the fact that the allowable values of the components can only take values within the interval defined as the production tolerance limit according to the current technological process. The expediency of this approach is that it takes into account the limitations on the parameters of the components, taking into account the structural and topological limitations of the technological process of manufacturing IPST samples.

Key words: integral threshold temperature sensor; sensor error; optimization, optimization criterion, objective function, optimization variables.