

ЕЛЕКТРОТЕПЛОВА SPICE – МОДЕЛЬ КАЛОРИМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Бойко О., Голяка Р., 2015

На основі концепції електротеплової аналогії розроблена SPICE модель калориметричного перетворювача. Модель реалізована на RC ланках, керованих джерелами струму та керованих ключах типу S(V-Swich). Розглянуто особливості модельних досліджень елементів із саморозігріванням. Продемонстровано типові приклади калориметричних досліджень з використанням запропонованої SPICE моделі.

Ключові слова: калориметричний перетворювач, SPICE модель.

The SPICE model of calorimetric transducer based on the concept of electrothermal analogy is developed. The model is implemented on the RC circuit, controlled current sources and controlled switches S (V-Swich). The features of modeling the elements with selfheating are considered. Typical examples of calorimetric studies with the help of proposed SPICE model are demonstrated.

Key words: calorimetric transducer, SPICE model.

Вступ

Робота стосується проблеми подальшого розвитку методів модельного дослідження калориметричних сенсорів. Інформативною величиною таких сенсорів є кількість тепла, яка поглинається чи виділяється в процесі фазового переходу досліджуваної речовини. Цей фазовий перехід забезпечується відповідним контрольованим нагрівом чи охолодженням вимірювальних перетворювачів [1].

Розвиток калориметричних сенсорів відбувається у напрямках підвищення чутливості та селективності, мініатюризації, розширення функціональності тощо. Значного прогресу досягнуто в реалізації калориметричних перетворювачів на базі інтегральної електроніки [2] та MEMs структур [3]. Розвиваються методи та засоби мікрокалориметрії [4] та нанокалориметрії [5]. Використовуються різноманітні методики дослідження, зокрема з модуляцією теплового потоку або температури [6].

Розроблення апаратури калориметричного аналізу та реалізація калориметричних досліджень передбачають широке використання математичних моделей та відповідного програмного забезпечення. У процесі розроблення апаратури проводять параметричний аналіз сенсорів, розрахунок теплових полів та модельний аналіз схем сигнальних перетворювачів, а в ході калориметричних досліджень визначають температури фазових переходів досліджуваних речовин та теплові потоки, що зумовлюють ці переходи [7, 8].

Сьогодні широкого застосування набули методи температурного дослідження на основі концепції електротеплової аналогії [9, 10]. Використовуючи ці методи, можливо поєднати теплове та схемотехнічне моделювання. Враховуючи, що основою більшості сучасних програмних засобів схемного моделювання є SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, розробляються гібридні SPICE моделі комплексного електротеплового дослідження [11, 12]. Особливої актуальності такі моделі набувають в пристроях, що використовують ефект саморозігрівання, зокрема в термоанемометрах [13, 14].

Актуальність цієї роботи зумовлена важливістю задач комплексного електротеплового дослідження структур калориметричних сенсорів, оптимізації їх конструктивних рішень та методик калориметричного аналізу. Особливо важливе значення цих задач у мікроелектронних калориметрах та у методиках з модуляцією температури.

Електротеплова аналогія та її використання

Концепція електротеплової аналогії полягає у заміщенні теплових характеристик на їх електричні аналоги: різниця температур $\Delta T(t)$ заміщається різницею напруг $\Delta V(t)$, тепловий потік F_T чи потужність P_T заміщаються електричним струмом I_T , а тепловий опір R_q та теплоємність C_q – еквівалентними їм електричним опором R_T та ємністю C_T конденсатора. Відтак, теплові перехідні процеси описуються еквівалентними схемами Фостера та Кауера у вигляді декількох $R_i C_i$ ланок. У разі використання схеми Фостера математичні вирази часової залежності температури $\Delta T(t)$ заміняють відповідними виразами залежності напруги $\Delta V(t)$:

в процесі нагрівання

$$\Delta T(t) = P_T \sum_{i=1}^n R_{qi} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \right) \Rightarrow \Delta V(t) = I_T \sum_{i=1}^n R_{Ti} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \right), \quad (1)$$

в процесі остигання

$$\Delta T(t) = P_T \sum_{i=1}^n R_{qi} \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \Rightarrow \Delta V(t) = I_T \sum_{i=1}^n R_{Ti} \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right), \quad (2)$$

де P_T – потужність; $t_i = R_i C_i$ – стала часу i -ї ланки; n – кількість ланок.

Залежно від складності структури з тепловою релаксацією та точності розрахунку використовують від однієї до п'яти ланок. Зокрема, для структур інтегральної електроніки такими ланками електротеплової моделі є: активна ділянка виділення тепла (p-n-перехід) – кристал інтегральної структури (здебільшого кремній); кристал – прокладка (клей, припій), прокладка – корпус, корпус – радіатор (за наявності); радіатор – навколишнє середовище (повітря).

На рис. 1 наведено результат використання електротеплової аналогії в задачі моделювання температури в структурі з трьох $R_i C_i$ ланок. Моделювання проведено в середовищі пакета схемного моделювання MicroCAP [15]. Наведені на схемі позначення елементів відповідають вимогам бібліотечних елементів та синтаксису MicroCAP (зокрема, індекси в позначенні не передбачені). Крім вищезгаданих трьох ланок – $Rt1$, $Ct1$, $Rt2$, $Ct2$, $Rt3$, $Ct3$, схема містить джерело струму I_t , резистор Ra , що задає вихідний опір цього джерела струму, а також ключ $S1$, що керується джерелом імпульсної напруги Vt . Останні формують імпульсний режим нагрівання. Результат модельного дослідження часової залежності температури представлено відповідними імпульсами напруги $V(2)$ (напруга у вузлі 2). Крім того, напруги $V(Rt1)$, $V(Rt2)$, $V(Rt3)$ демонструють відповідні компоненти температури на окремих $R_i C_i$ ланках досліджуваної структури.

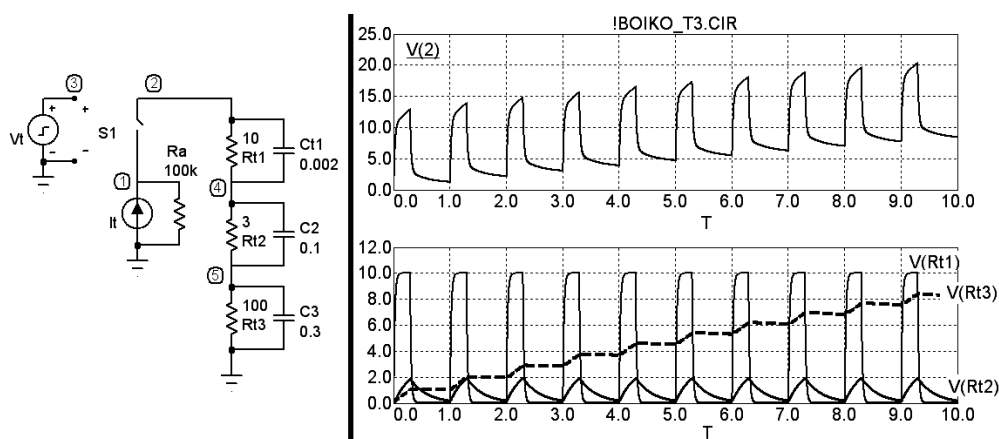


Рис. 1. Приклад моделювання з використанням електротеплової аналогії

Розглянемо елементарні приклади використання електротеплової аналогії у SPICE моделях елементів з саморозігріванням [13]. Перша з них (рис. 2, а) є схемою заміщення двополюсника (виводи 1, 2), зокрема терморезистора. Струм I_R через двополюсник задається функціональною

характеристикою керованого джерела струму CCS_R (Controlled Current Source). Аргументами цієї функціональної характеристики є опір R_0 двополюсника за початкової температури T_0 та напруга V_T . Ця напруга, відповідно до методу електротеплової аналогії, є інформативною величиною приросту температури ΔT , зумовлена саморозігріванням структури двополюсника.

Напруга V_T формується у допоміжному колі на $R_i C_i$ ланках, які представляють відповідні теплові опори та теплоємності структури. Для прикладу на рис. 2, б показано коло з двох ланок $R_{T1} C_{T1}$, $R_{T2} C_{T2}$, струм через які задається допоміжним керованим джерелом струму CCS_P . Аргументом функціональної характеристики цього джерела є потужність P_T , що виділяється на структурі двополюсника. В першому наближенні приймають $P_T = I_R^2 R_0$. Для підвищення достовірності результату розрахунків виконують ітераційним методом, в якому потужність кожного наступного циклу ітерації визначається після встановленого в попередньому циклі опору R_T двополюсника за температури T .

Приклад спрощеної SPICE моделі триполюсника (виводи 1, 2, 3), зокрема біполярного транзистора TR, показана на рис. 2, в. Електротеплова модель останнього доповнена керованим джерелом напруги CVS_{TR} (Controlled Voltage Source) та керованим джерелом струму CCS_{TR} . Перше з них CVS_{TR} описує температурний дрейф напруги емітерного p-n-переходу транзистора, а друге CCS_{TR} – температурний дрейф колекторного кола транзистора. Напруга V_T , як і в раніше розглянутій схемі двополюсника, формується допоміжним колом на $R_i C_i$ ланках (рис. 2, б).

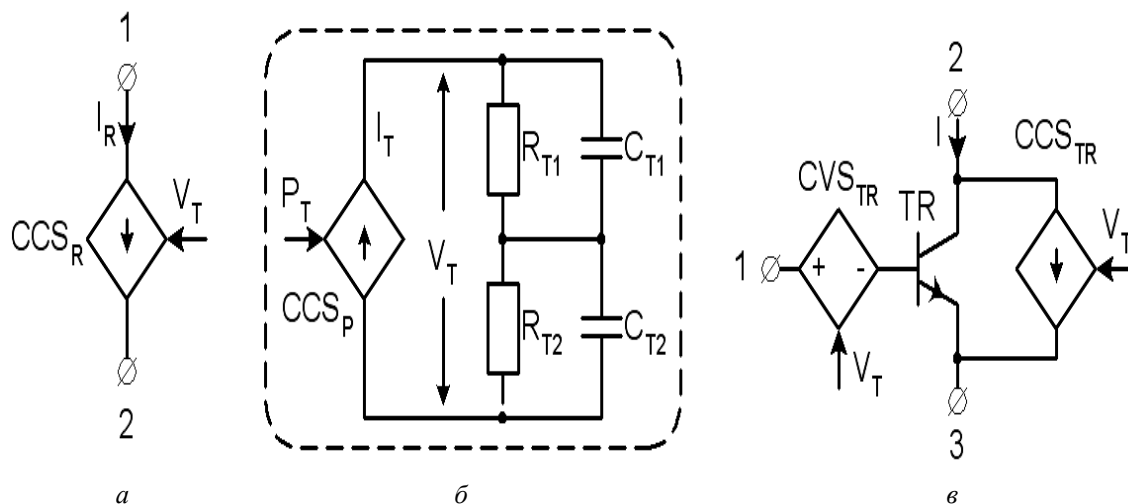


Рис. 2. Спрощені електротеплові SPICE моделі

Електротеплова SPICE модель калориметричного перетворювача

У роботі пропонується подальший розвиток методів електротеплової аналогії із синтезом SPICE моделей вимірювальних калориметричних перетворювачів. Основними інформативними величинами калориметричних перетворювачів є температура фазового переходу (зокрема, плавлення, стеклування, кристалізації тощо) досліджуваної речовини та кількість теплової енергії, яка поглинається чи виділяється в процесі такого переходу. Проблема синтезу моделей таких перетворювачів зумовлена необхідністю коректного представлення перехідних процесів, які виникають під час фазових переходів. Крім вже згаданих $R_i C_i$ ланок електротеплової моделі структури калориметра, повинні бути передбачені такі параметри моделі, як температура, кількість теплової енергії, гістерезис та швидкість фазового переходу досліджуваної речовини.

Електротеплова SPICE модель калориметричного перетворювача, що відповідає вказаним вимогам, наведена на рис. 3. Модель містить пасивне та активне кола.

Пасивне коло представляє теплові процеси в структурі калориметра, а активне – в досліджуваній речовині. Напруга V_{TA} є формальним аналогом температури навколишнього середовища T_A , напруга V_{TM} – температури фазового переходу T_M , а напруга V_{TH} – температури на межі між активною поверхнею перетворювача та досліджуваної речовини.

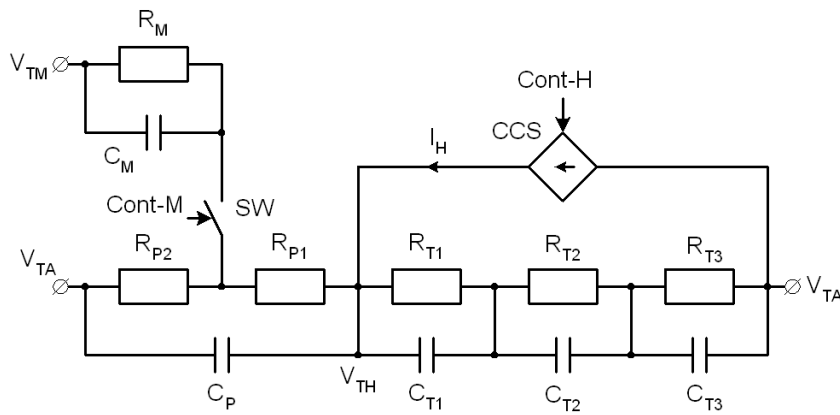


Рис. 3. Електротеплова SPICE модель калориметричного перетворювача

Залежно від конструкції калориметра пасивне коло може містити від однієї до трьох R_iC_i ланок (зокрема, $R_{T1}C_{T1}$, $R_{T2}C_{T2}$, $R_{T3}C_{T3}$). Нагрівання структури здійснюється струмом I_H керованого джерела CCS, яке, відповідно до заданої методики калориметричного дослідження, визначає режими роботи. Це можуть бути режими зі сталою енергією нагрівання, сталою швидкістю нагріву чи їх модуляцією. Параметри режимів нагрівання задаються керуючим сигналом Cont-H.

Активне коло представлено:

- ланкою $R_M C_M$, параметри якої визначають теплові процеси фазового переходу в досліджуваній речовині;
- ключем SW, який визначає граничні умови такого переходу;
- ланкою $R_{P1} R_{P2} C_P$, параметри якої визначають теплообмін досліджуваної речовини.

Ключ SW керується сигналом Cont-M. Цей керуючий сигнал встановлює температурний інтервал та кількісні параметри взаємозв'язку між активним та пасивним колами під час фазового переходу. Принципово важливими з погляду якості моделі є тип та параметри ключа.

Проведений нами аналіз стандартної бібліотеки SPICE компонентів показав доцільність використання керованого чотириполосника типу S(V-Swich). Це керований напругою ключ (Voltage-controlled switch), функціональна характеристика якого, як показано далі, дає змогу синтезувати достатньо точні схеми заміщення калориметричного сенсора в процесі фазового переходу досліджуваної речовини.

Елементарна схема інвертора на ключі типу S(V-Swich) та вікно специфікації параметрів цього ключа наведені на рис. 4. Крім ключа S1, схема містить джерело напруги V_{in} , яке керує цим ключем, резистор кола навантаження R1 та джерело живлення V_e цього кола. Згідно з наведеною схемою вузол 2 визначає напругу V_{IN} у вхідному колі, а вузол 1 – напругу V_{OUT} у вихідному колі ключа.

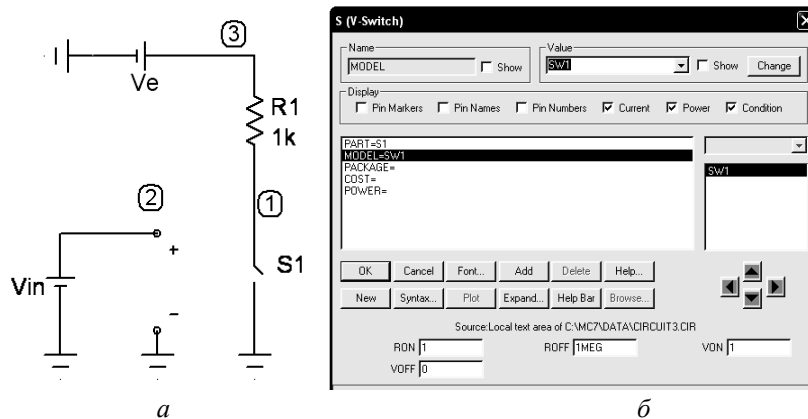


Рис. 4. Елементарна схема інвертора на ключі типу S(V-Swich) (а) та вікно специфікації його параметрів (б)

Параметрами ключа є:

- R_{ON} (On resistance) – опір у увімкненому стані;
- R_{OFF} (Off resistance) – опір у вимкненому стані;
- V_{ON} (Control voltage for on state) – напруга увімкненого стану;
- V_{OFF} (Control voltage for off state) – напруга вимкненого стану.

Функціональна характеристика ключа типу S(V-Switch) подається математичними виразами та псевдокодом логіки перемикавання:

$$\text{if } V_{ON} > V_{OFF} \ \& \ \text{if } V_C \geq V_{ON} \ \text{then } R_S = R_{ON}$$

$$\text{if } V_C \leq V_{OFF} \ \text{then } R_S = R_{OFF}$$

$$\text{if } V_{OFF} < V_C < V_{ON} \ \text{then } R_S = \exp\left(L_M + 3L_R \frac{V_C - V_M}{2V_D} - 2L_R \frac{(V_C - V_M)^3}{V_D^3}\right)$$

$$\text{if } V_{ON} < V_{OFF} \ \& \ \text{if } V_C \leq V_{ON} \ \text{then } R_S = R_{ON}$$

$$\text{if } V_C \geq V_{OFF} \ \text{then } R_S = R_{OFF}$$

$$\text{if } V_{OFF} > V_C > V_{ON} \ \text{then } R_S = \exp\left(L_M - 3L_R \frac{V_C - V_M}{2V_D} + 2L_R \frac{(V_C - V_M)^3}{V_D^3}\right),$$

$$\text{де } L_M = \ln \sqrt{R_{ON} R_{OFF}}; \ L_R = \ln \frac{R_{ON}}{R_{OFF}}; \ V_M = \frac{V_{ON} + V_{OFF}}{2}; \ V_D = V_{ON} - V_{OFF},$$

(if ... then – логічна умова типу “якщо ...то”, & – логічна операція “І”).

Приклади прохідних характеристик інвертора за декількох значень параметрів моделі ключа S(V-Switch) наведені на рис. 5. Можна бачити, що функціональні характеристики такої моделі є достатньо гнучкими та адаптивними, а відтак, можуть достатньо якісно описувати перехідні процеси в SPICE схемах заміщення калориметричних перетворювачів. Однак необхідно відзначити і певну проблематику синтезу таких схем заміщення. Розглянемо характерний приклад, в якому виникає проблема встановлення робочої точки схеми.

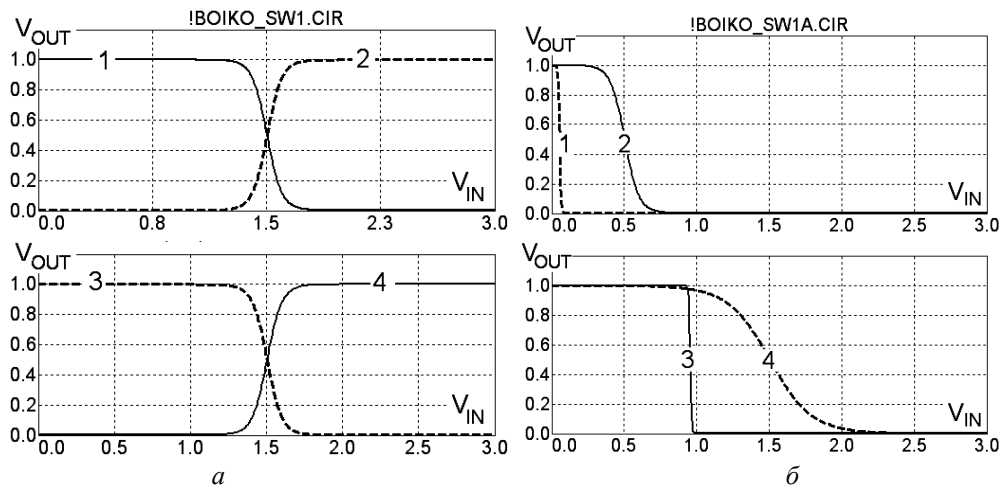


Рис. 5. Приклади прохідних характеристик інвертора на ключі типу S(V-Switch)

Відповідно до логіки функціонування моделі в температурному діапазоні фазового переходу, зокрема за температури плавлення досліджуваної речовини, ключ SW (рис. 3) приєднує ланку $R_M C_M$ до пасивного кола схеми заміщення. Керуючий сигнал Cont-M є функцією температури структури калориметра, а відтак, відповідно до електротеплової аналогії, – напруги V_{TH} . Замикання ключа здійснюється за V_{TH} певного порогового значення. Своєю чергою, таке замикання призводить до зменшення V_{TH} та сигналу Cont-M, а відтак ключ розмикається. Може встановитися паразитний ефект стаціонарного чи загасаючого автоколивання. Приклад такого паразитного ефекту проілюстровано на схемі (рис. 6).

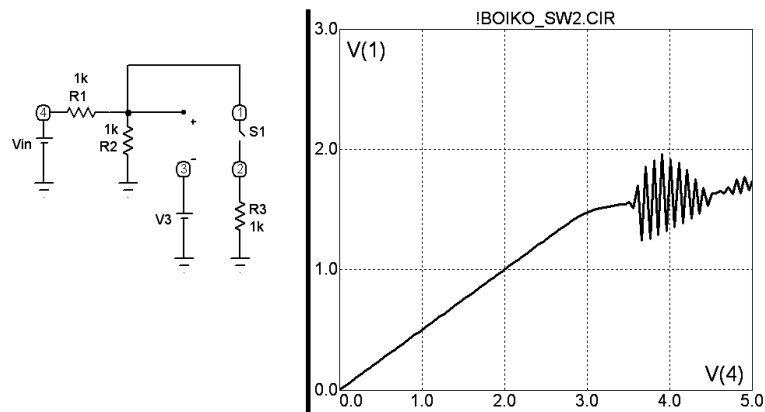


Рис. 6. Приклад проблематики встановлення робочої точки в схемі зі зворотним зв'язком

У схемі наявний зворотний зв'язок – після досягнення порогової напруги відкриття ключа S1 вихідне коло останнього приєднує до вхідного кола (подільника напруги на резисторах R1, R2) шунтувальний резистор R3. Цей резистор зменшує напругу вхідного кола, а відтак, за певних умов, ключ розмикається. Залежно від типу аналізу (DC – аналіз за постійним струмом чи TRANS – часовий аналіз перехідних процесів) іноді неможливі встановлення робочої точки чи паразитний автоколивальний процес.

Отже, у процесі синтезу та специфікації параметрів електротеплової SPICE моделі калориметричного сенсора необхідно не лише встановити функціональні взаємозв'язки між тепловими та електричними параметрами, але і вжити необхідних заходів, щоб запобігти нестабільності функціонування такої моделі.

Приклад схеми заміщення SPICE моделі, що відповідає вищезгаданим вимогам, наведено на рис. 7. Схема представляє калориметричний перетворювач диференціального типу, в якому вимірюється різниця температур чи теплових потоків між двома ідентичними перетворювачами. Досліджувана речовина розміщується на одному з перетворювачів, що формує інформативний сигнал. Натомість інший перетворювач без вказаної речовини чи зі “зразковою” речовиною з наперед відомими параметрами формує опорний сигнал. Електротеплова модель каналу опорного сигналу представлена елементами I1, S1, R11, C11, R12, C12, R13, C13 (аналогічно до рис. 1), а каналу інформативного сигналу – I2, S2, R21, C21, R22, C22, R23, C23. Вихідна напруга V_{TH} , яка формується на цих елементах, є функціональним аналогом температури структури калориметричного перетворювача. Параметри імпульсного режиму перетворювача задає джерело напруги V_t .

Елементи R_m та C_m відповідають ланці $R_m C_m$, параметри якої, як зазначено вище (рис. 3), визначають теплові процеси фазового переходу в досліджуваній речовині. В ході перехідного процесу на цій ланці формується напруга V_{CM} , граничні значення якої, як показано далі, формують гістерезис функціональної характеристики. Враховуючи, що зміна температури в процесі фазового переходу є незначною, доцільно встановити граничне значення напруги V_{CM} в межах $V_{CM_{MAX}} = 0,1 \dots 1$ В. Елементи R_{p1}, R_{p2}, C_p відповідають ланці $R_{p1} R_{p2} C_p$, параметри якої визначають теплообмін досліджуваної речовини. Напруга V_{TM} джерела напруги V_t є функціональним аналогом температури фазового переходу.

Ключі SA, SB, SC та SD типу S(V-Swich) задають функціональну характеристику фазового переходу і разом в комбінації реалізують логічну функцію F_T . Якщо $F_T = 0$ фазовий перехід відсутній і ланка $R_m C_m$ від'єднана, а якщо $F_T = 1$, фазовий перехід існує і ланка $R_m C_m$ приєднана. Таку логічну функцію можна подати псевдокодом:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } V_{TH} < V_{TM} \ \& \ V_{CM} < 0 \ \text{then } F_T = 0 \\
 & \text{if } V_{TH} < V_{TM} \ \& \ V_{CM} > 0 \ \text{then } F_T = 1 \\
 & \text{if } V_{TH} \geq V_{TM} \ \& \ V_{CM} < V_{CM_{MAX}} \ \text{then } F_T = 1 \\
 & \text{if } V_{TH} \geq V_{TM} \ \& \ V_{CM} \geq V_{CM_{MAX}} \ \text{then } F_T = 0.
 \end{aligned}$$

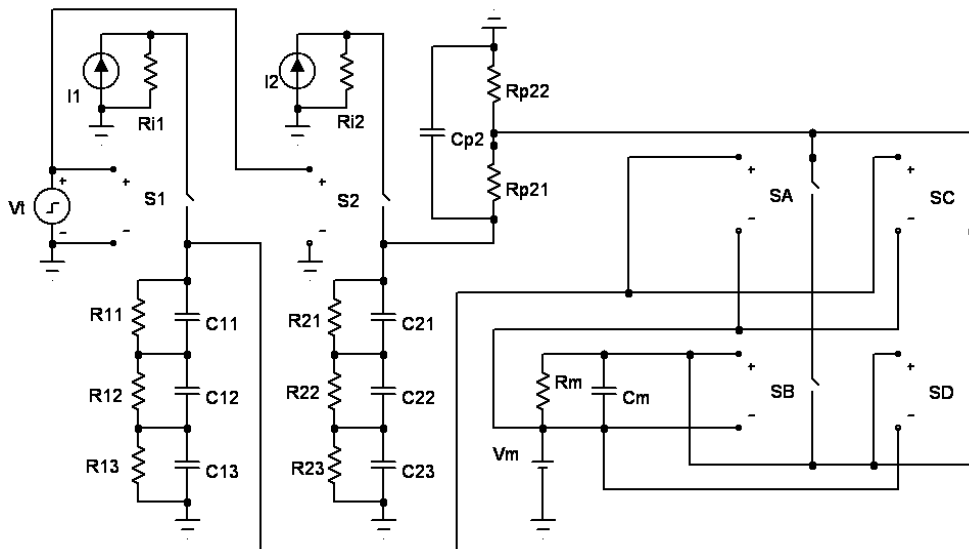


Рис. 7. Схема заміщення SPICE моделі диференціального калориметричного перетворювача

Приклади результатів модельних досліджень

Розглянемо два характерні приклади використання вищезгаданих підходів електротеплової аналогії та відповідної SPICE моделі в задачах параметричного аналізу калориметричних сенсорів.

Перший приклад представляє результат параметричного аналізу з програмованою швидкістю нагрівання. В такій методиці дослідження вимірювальне коло калориметра охоплено зворотним зв'язком, що, змінюючи теплову потужність, яка виділяється в структурі перетворювача, забезпечує задану швидкість зміни температури. Для проведення модельних досліджень створюють гібридну SPICE модель, яка доповнює подані на рис. 2 та 3 електротеплові моделі вузлом керування з колом зворотного зв'язку.

Приклад такої гібридної моделі наведено на рис. 8. Температурний режим роботи калориметра, зокрема швидкість наростання температури, задається програмованим джерелом напруги VG. За фіксованої швидкості наростання температури $dV_R(t)/dt = \text{const}$. Вузол керування реалізовано на операційному підсилювачі OA та силовому каскаді PU, який формує струм нагрівання структури калориметра. Остання, аналогічно до рис. 2, а, представлена двополюсником CCS_R . Якщо перетворювач калориметра реалізовано на транзисторі, за допомогою якого проводять кероване нагрівання та вимірювання температури, використовують електротеплову модель триполюсника (рис. 2, в).

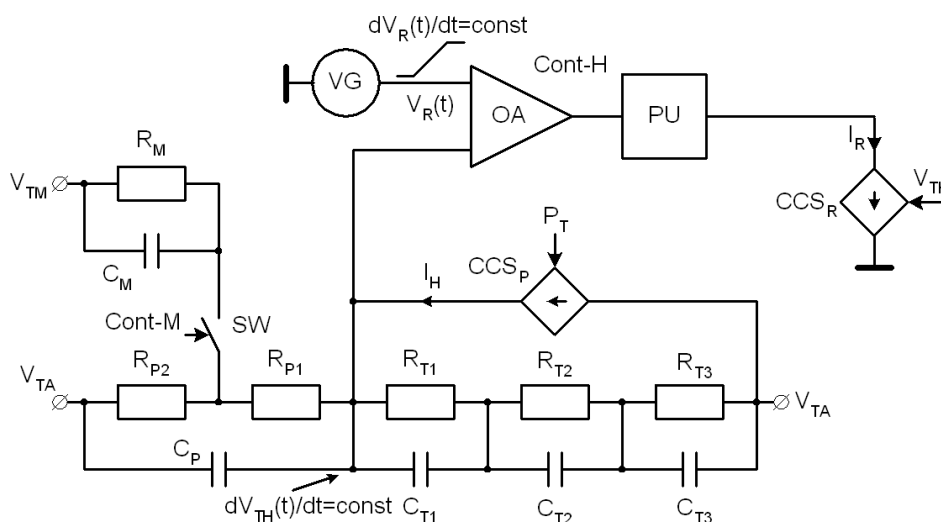


Рис. 8. Гібридна SPICE модель калориметричного перетворювача

Приклади результатів модельних досліджень перехідних характеристик з програмованою швидкістю нагрівання наведено на рис. 9. Бачимо, що в ході нагрівання після досягнення температури фазового переходу досліджуваної речовини спостерігається пікове зростання струму I . Після завершення такого переходу швидкість наростання струму повертається до попереднього значення. Криві 1, 2, 3 відображають варіанти з різними параметрами досліджуваної речовини, зокрема, теплою плавлення.

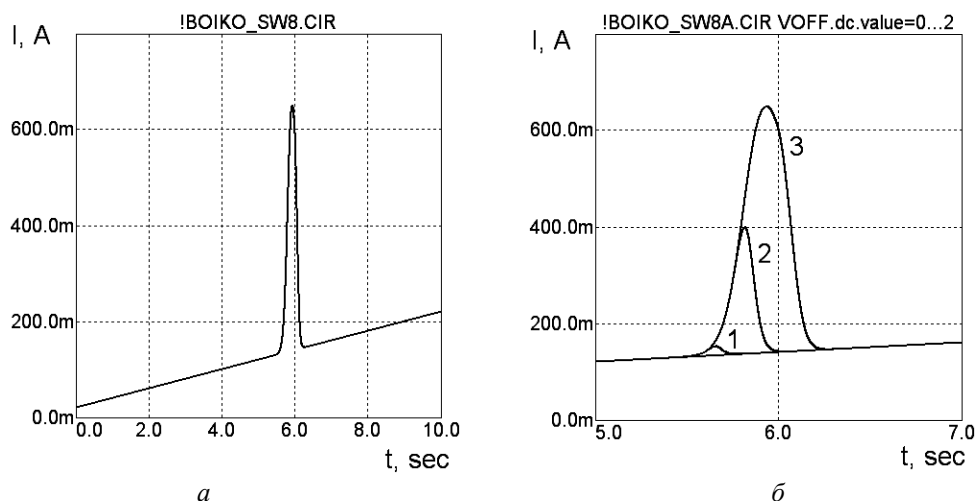


Рис. 9. Приклади перехідних характеристик з програмованою швидкістю нагрівання

Другий приклад представляє модельні дослідження калориметра в режимі імпульсної модуляції теплового потоку чи температури. Такий режим реалізується, зокрема, у методиці StepScan DSC MTDSC (Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry) диференціальних сканувальних калориметрів компанії PerkinElmer [6]. Отримані результати (рис. 10) демонструють перехідні процеси під час імпульсного нагрівання та інтенсивного відведення теплової потужності в околі точки фазового переходу.

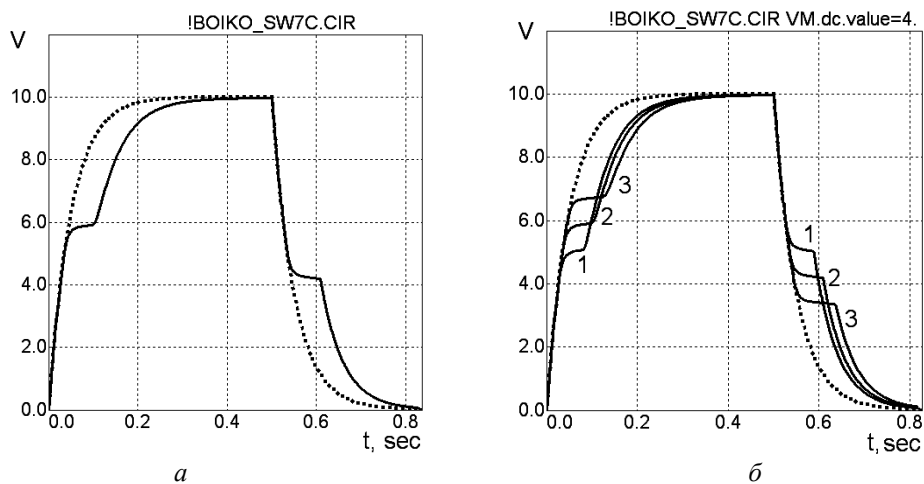


Рис. 10. Приклади перехідних характеристик за імпульсної модуляції теплового потоку

Загалом модельні дослідження, приклади яких наведено вище, дають змогу підвищити ефективність розроблення калориметричних перетворювачів, оптимізації їх структур та методик дослідження. Особливо це актуально в процесі розроблення мікро- та нанокалориметрів, зокрема з використанням MEMEs технологій, та інтегрування функцій керованого нагрівання – вимірювання температур на основі транзисторних структур.

Висновки

SPICE модель калориметричного перетворювача у вигляді схеми заміщення ґрунтується на концепції електротеплової аналогії. Концепція полягає в заміщенні теплових характеристик на їх електричні аналоги: різниця температур $\Delta T(t)$ заміщається різницею напруг $\Delta V(t)$, тепловий потік Φ_T чи потужність P_T заміщаються електричним струмом I_T , а тепловий опір R_θ та теплоємність C_θ – еквівалентними їм електричним опором R_T та ємністю C_T конденсатора. Модель реалізована на RC ланках, керованих джерелами струму та керованих ключах типу S(V-Switch). Розглянуто особливості модельних досліджень елементів (двополюсників та триполюсників) із саморозігріванням. Використовуючи запропоновану SPICE модель, демонструють типові приклади калориметричних досліджень – перехідні характеристики з програмованою швидкістю нагрівання та імпульсною модуляцією теплового потоку.

1. Brown M. E. *Introduction to Thermal Analysis. Techniques and Applications.* [Text] / M. E. Brown. – Kluwer., 2001. – 310 p. 2. A.W. van Herwaarden. *Overview of calorimeter chips for various applications* [Text] / A.W. van Herwaarden // - *Thermochimica acta.* – 2005. – N. 432. – P. 192 – 201. 3. Youssef S., Podlecki J., Asmar R. *MEMS scanning calorimeter with serpentine-shaped platinum resistors for characterizations of microsamples* [Text] / S. Youssef, J. Podlecki, R. Asmar // *Journal of Microelectromechanical Systems.* – 2009. – № 18. – P. 414–423. 4. Анатычук Л. И., Лусме О. Я. *Микрокалориметрия* [Текст] / Л. И. Анатычук, О. Я. Лусме – Л.: Вища школа, 1981. – 160 с. 5. Kunal Lulla. *Highly sensitive nanocalorimeter* [Електронний ресурс] / *The laureates of nanoART 2013. Fondation Nanosciences.* – Режим доступу: <http://www.fondation-nanosciences.fr/RTRA/en/659/2013-nanoart-laureates.html>. 6. Cassel B. *Differential Scanning Calorimetry. Modulated Temperature DSC and the DSC 8500: A Step Up in Performance* [Електронний ресурс] / B. Cassel, R. Packer // *Technical Note.* – 2010. – 6 p. – Режим доступу: www.perkinelmer.com 7. Програма теплового розрахунку SEMISEL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.tsdrive.com.ua>. 8. Lerchner J. *Accuracy in integrated circuit (IC) calorimeters* [Text] / J. Lerchner, G. Wolf, C. Auguet, V. Torra // *Thermochimica Acta.* – № 382. – 2002. – P.65–76. 9. Помонов Ю. *Тепловое моделирование* [Текст] / Ю. Помонов // *EDA Expert.* – 2002. – № 10. – С. 60–62. 10. Кондратьев В. *Методы теплового расчета микросхем и дискретных устройств силовой электроники* [Текст] / В. Кондратьев // *Электронные компоненты.* – 2010. – № 1. – С.14–17. 11. Mohammadi F. A., Attar S. *Development of an electrothermal simulation tool for integrated circuits: Application to a two-transistor circuit* [Text] / F. A. Mohammadi, S. Attar // *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering.* – 2008. – Vol. 33. Issue: 3/4. – P. 191–200. 12. Priyadarshi S., Harris T. R., Melamed S. *Dynamic electrothermal simulation of three-dimensional integrated circuits using standard cell macromodels* [Text] / S. Priyadarshi, T. R. Harris, S. Melamed // *IET Circuits, Devices & Systems.* – 2012. – Vol. 6. Issue 1. – P. 35–44. 13. *Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку: монографія* [Текст] / З. Ю. Готра, С. В. Павлов, Р. Л. Голяка та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с. 14. Готра З. Ю. *Принципи електротеплового моделювання електронних схем з динамічним саморозігрівом елементів* [Текст] / З. Ю. Готра, Р. Л. Голяка, С. В. Павлов, С. С. Куленко // *Електроніка. Вісник Національного університету „Львівська політехніка”.* – 2009. – № 646. – С. 57–65. 15. MICRO-CAP. *Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software.* – 2014. – 8 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com>