

Г. І. Барило, В. В. Вірт, Р. Л. Голяка, З. Ю. Готра
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних приладів

SPICE МОДЕЛЬ КВАДРАТУРНОГО СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМПЕДАНСУ

© Барило Г. І., Вірт В. В., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., 2016

Представлена задача SPICE моделювання вимірювальних перетворювачів імпедансу, на яких оснований широкий ряд мікроелектронних сенсорів імпедансної спектроскопії, зокрема, для Інтернету речей. Запропоновано SPICE модель та методику параметричного аналізу синхронних детекторів пристроїв імпедансної спектроскопії, основою якої є поєднання двох типів аналізу – AC analysis та Transient analysis. На основі AC аналізу отримують номінальні значення активної ReZ та реактивної ImZ складових імпедансу. Натомість, на основі Transient аналізу отримують значення цих складових з урахуванням фактичних параметрів сигналів та елементної бази вимірювального перетворювача. Поєднання AC та Transient аналізів з порівнянням їх результатів забезпечує можливість подальшої оптимізації та покращення параметрів схем вимірювальних перетворювачів імпедансу.

Ключові слова: сигнальний перетворювач, синхронний квадратурний детектор, імпедансна спектроскопія, SPICE моделі.

G. Barylo, V. Virt, R. Holyaka, Z. Hotra
Lviv Polytechnic National University

SPICE MODEL OF QUADRATURE SYNCHRONOUS DETECTORS FOR IMPEDANCE MEASURING TRANSDUCER

© Barylo G., Virt V., Holyaka R., Hotra Z., 2016

The task of impedance measurement transducers' SPICE simulation is presented. Wide range of impedance spectroscopy microelectronic sensors, namely, for Internet of things, are based on such measurement transducers. One of the attractive aspect of impedance spectroscopy as a tool for investigating is the direct connection that often exists between the behavior of a real system and that of an idealized model circuit consisting of discrete electrical components. The paper describes the approach to Nyquist impedance plot calculation using SPICE models based on quadrature synchronous detectors. Based on AC analysis and Transient analysis combination a SPICE model and a technique for parametric analysis of impedance spectroscopy devices' quadrature synchronous detectors are proposed. Nominal values of impedance, namely its real ReZ and imaginary ImZ parts, are calculating using the SPICE models AC analysis. On the contrary, caused by factual parameters of signals and transducer circuit components the factual real and imaginary parts values of impedances are calculating using the SPICE model Transient analysis. A signal of impedances real part is detecting and integrating inphase with driving wave, namely, the sinusoidal current wave through object to be measured, while a signal of imaginary part is detecting and integrating with $p/2$ phase shift. Both of AC and Transient analysis combination and its data comparison is the key solution to further optimization and parameters improvement of impedance measurement transducer circuits.

Key words: signal transducer, quadrature synchronous detector, impedance spectroscopy, SPICE model.

Вступ

Сьогодні одним з напрямів розвитку інформаційних технологій, що найшвидше прогресують, є Інтернет речей (Internet of Things, IoT), чи Інтернет фізичного світу (Physical World Internet) [1, 2]. Розвиток у цьому напрямі передбачає вирішення значної кількості проблем, зокрема, подальше підвищення параметрів мікроелектронних сенсорів та вимірювальних перетворювачів, які забезпечують взаємодію цифрової мережі Інтернету з фізичним світом.

У цій роботі розглянуто задачі моделювання та параметричного аналізу вимірювальних перетворювачів сенсорів на основі методів імпедансної спектроскопії [3, 4] та діаграм Найквіста. Такі діаграми дають змогу, зокрема, представити складний об'єкт дослідження у вигляді схеми заміщення з набором елементарних резисторних, ємнісних та індуктивних елементів. Вимірювальні перетворювачі імпедансу використовуються в багатьох мікроелектронних сенсорних пристроях, зокрема, для моніторингу параметрів довкілля, вимірювання вологи, хімічного та біохімічного аналізу, безконтактного завадостійкого керування об'єктами тощо.

Сьогодні інтенсивно розвиваються елементна база та мікросхемотехніка вимірювальних перетворювачів, основними критеріями яких є відповідність до вимог мікроелектронних пристроїв нового покоління, а саме: розширення функціональних можливостей, підвищення точності сигнального перетворення [5, 6], мінімізації габаритів, забезпечення високої енергоефективності [7, 8] та низької собівартості. Саме ці критерії є визначальними в процесі розроблення мікроелектронних пристроїв імпедансної спектроскопії, зокрема, з урахуванням вимог сенсорної електроніки Інтернету речей [9, 10].

Мета та об'єкт дослідження

Загальноприйнятим і сьогодні вже обов'язковим етапом розроблення та дослідження пристроїв електронної техніки є математичне схемотехнічне моделювання. Таке схемотехнічне моделювання забезпечує перевірку нових способів сигнального перетворення, функціональний аналіз схемних рішень, оптимізацію режимів роботи тощо. Стандартом схемотехнічного моделювання, особливо вузлів твердотільної електроніки на основі інтегральних схем, є SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis [11].

Метою роботи є адаптація методик математичного SPICE моделювання до задач дослідження параметрів мікроелектронних вимірювальних перетворювачів імпедансу. Більшість таких задач можна розв'язувати вже традиційним підходами аналізу схем, зокрема, їх перехідних процесів (Transient analysis) чи амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик (AC analysis). Проте, як показано далі, забезпечення високої ефективності аналізу імпедансних характеристик передбачає використання розширеного набору бібліотечних компонентів, що не входять у стандартний набір SPICE моделей, потребує розроблення нових моделей та методик аналізу тощо.

Розглянуті в цій роботі SPICE моделі та результати моделювання реалізовано в MicroCAP, який є одним з найпоширеніших програмних пакетів та підтримує роботу не лише зі стандартизованими SPICE моделями, але і зі спеціалізованими функціональними моделями, бібліотеками (Analog and Digit Library) та макросами (Macros) [12]. Зокрема, ефективними щодо поставлених в роботі завдань є моделі керованих ключів, функціональних джерел напруги та струму.

Об'єктом дослідження є SPICE модель та параметри основного вузла вимірювальних перетворювачів імпедансної спектроскопії – квадратурного синхронного детектора. Типово, крім такого детектора, вимірювальні перетворювачі імпедансного типу містять задаюче джерело гармонічного сигналу з програмно керованою частотою, вхідні вузли струмового перетворення, інтегратори, фільтри, аналого-цифрові перетворювачі.

Зокрема, на рис. 1 подано плату такого вимірювального перетворювача. Відповідно до вимог живлення пристроїв сенсорної електроніки Інтернету речей схема перетворювача реалізована на мікропотужних операційних підсилювачах, основою яких є КМДН (комплементарний метал-діелектрик-напівпровідник) структури. Спеціально оптимізована схемотехніка таких операційних підсилювачів забезпечує не лише мінімальне енергоспоживання, але і розширений розмах вхідних та вихідних напруг. Це, зокрема, мікропотужний низьковольтний Rail-to-Rail операційний

підсилювач AD8541/2/4 (де номери /1, /2, /4 відповідають кількості операційних підсилювачів у корпусі інтегральної схеми). Струм споживання кожного операційного підсилювача інтегральної схеми не перевищує 45 мкА. Функцію перемикання аналогових сигналів реалізовано на КМДН аналогових комутаторах AG736. Основою таких комутаторів є комплементарна пара n-канального та p-канального МДН транзисторів та двотактна схема керування. Вказані аналогові комутатори характеризує низький опір у відкритому стані – не більше ніж 4 Ом, широка смуга робочих частот – 200 МГц, швидке перемикання – не більше ніж 16 нс.

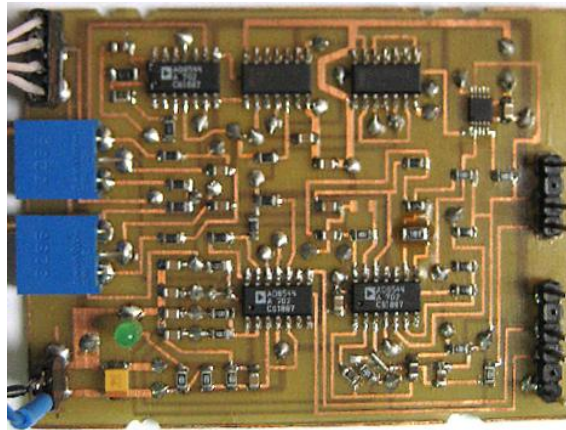


Рис. 1. Вимірювальний перетворювач на основі квадратурного синхронного детектора

Методика досліджень

Принциповою особливістю схемного SPICE моделювання сигнальних перетворювачів імпедансної спектроскопії є необхідність переходу від частотних діаграм до діаграм на комплексній площині. В деяких сучасних версіях пакетів програм схемного моделювання, зокрема, в MicroCAP, вже передбачено підходи імпедансного аналізу з використанням математичних функцій дійсних ReZ та уявних ImZ складових інформативного сигналу імпедансу Z . За допомогою цих функцій та з використанням комплексної площини видається можливим побудувати діаграму Найквіста.

Однак у ході проведеної апробації модельних досліджень вимірювальних перетворювачів імпедансної спектроскопії з використанням вищезгаданих функцій ми встановили недостатню інформативність отримуваних результатів. Ця проблема полягає в обмежених можливостях щодо проведення модельних досліджень схем вимірювальних перетворювачів з урахуванням реальних параметрів сигналів та елементної бази.

Таке обмеження полягає в тому, що імпедансні діаграми Найквіста отримують на основі діаграм Бode, використовуючи для цього метод аналізу за змінним струмом – AC Analysis. Однак цей метод за концепцією є малосигнальним, тобто в його процесі проводиться розрахунок амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик для ідеально гармонічних сигналів, амплітуда яких набуває гранично малих значень. Відтак, схемне моделювання на основі дійсних Re та уявних Im складових AC аналізу не дає змоги провести параметричні дослідження сигнальних перетворювачів з реальними сигналами.

Суть запропонованої в цій роботі нової методики досліджень перетворювачів імпедансної спектроскопії полягає в поєднанні двох типів аналізу – згаданого вище AC Analysis та Transient Analysis (перехідного аналізу). В ході AC аналізу отримують номінальні імпедансні діаграми Найквіста в ідеалізованому випадку. Натомість в ході Transient аналізу розраховують значення активного ReZ та реактивного ImZ імпедансу для фактичних параметрів сигналів та елементної бази. Такий розрахунок проводять за допомогою синхронного детектування вихідних сигналів та інтегрування результату детектування в часових інтервалах, що відповідають їх активним та реактивним складовим. Активна складова вихідного сигналу детектується та інтегрується синфазно із задаючим вхідним сигналом, а реактивна складова – з фазовим зміщенням на $\pi/2$. Результати проведених AC та Transient аналізів зіставляють та розраховують коефіцієнти кореляції. Ці

коєфіцієнти використовуються для кількісного оцінювання параметрів, схемного модифікування та оптимізації режимів роботи вимірювальних перетворювачів імпедансу. Саме розв'язання цих задач покладено в основу подальшого етапу розвитку мікросхемотехніки пристроїв імпедансної спектроскопії.

АС аналіз

Розглянемо елементарну схему дослідження імпедансних характеристик двополюсника з використанням методу АС аналізу (рис. 2, а). Схема містить задаюче джерело гармонічного коливання – Sine Source (Vi), перетворювач напруга-струм на основі макромоделі Dependent sources – Linear IofV (GI) та досліджуваний двополюсник – в цьому випадку паралельну R₁C₁ ланку. Інформативним сигналом є напруга у вузлі 2 – V(2). Використовуючи вже згадані функції Re а Im, отримують частотні залежності номінальних значень дійсної Re(V(2)) та уявної Im(V(2)) складових імпедансу цієї ланки (рис. 2, б). У цьому випадку дослідження проводилися за трьох значень опору резистора R1 (R1 = 0,5k, 1,0k, 2,0 k). Далі, перейшовши від частотного представлення до комплексної площини, отримують діаграму Найквіста – Im(V(2)) = function[(Re(V(2)))] (рис. 3). Ця діаграма відповідає ідеалізованому випадку, для якого не враховують реальні параметри сигналів та елементної бази схеми.

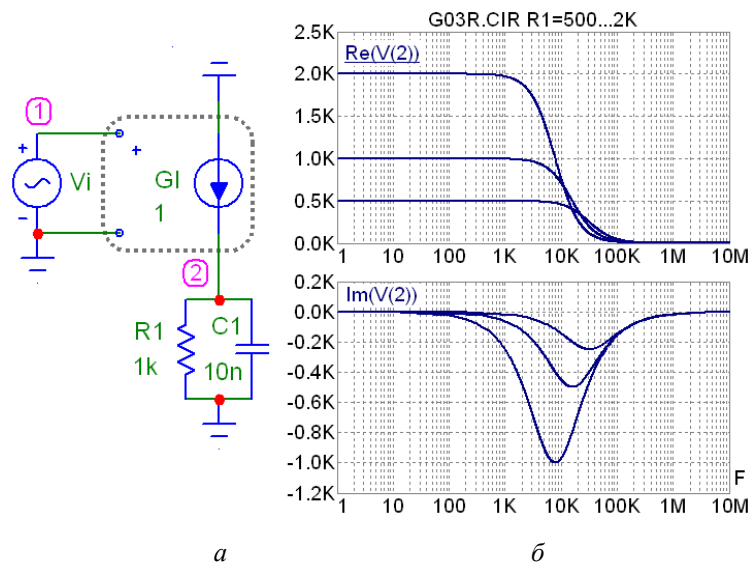


Рис. 2. Досліджувана схема та результат дослідження частотних залежностей дійсної $Re(V(2))$ та уявної $Im(V(2))$ складових сигналу, якщо $R_1 = 0,5k, 1,0k, 2,0 k$

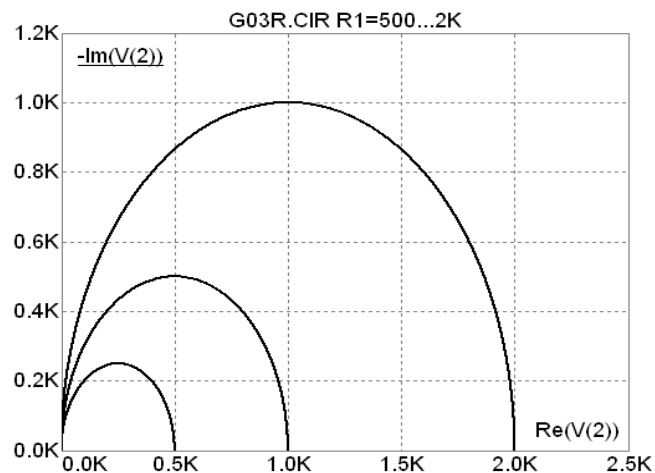


Рис. 3. Діаграми Найквіста, якщо $R_1 = 0,5k, 1,0k, 2,0 k$

Transient аналіз

Відповідно до запропонованої у цій роботі SPICE моделі та відповідної методики Transient аналізу значення активної Re та реактивної Im складових імпедансу з урахуванням фактичних параметрів сигналів та елементної бази проводять квадратурним синхронним детектуванням вихідних сигналів та інтегруванням результату детектування:

$$V_{SRE} = K_{RE} \int_{t_1}^{t_2} (V_Z(t) \cdot A_{RE}(t)) dt, \quad V_{SIM} = K_{IM} \int_{t_1}^{t_2} (V_Z(t) \cdot A_{IM}(t)) dt,$$

де V_{SRE} та V_{SIM} – напруги, що є інформативними сигналами дійсної та уявної складових імпедансу; K_{RE} та K_{IM} – коефіцієнти пропорційності функції перетворення; $V_Z(t)$ – напруга на досліджуваному двополоснику; $A_{RE}(t)$, $A_{IM}(t)$ – знакові функції, що, залежно від фази, набувають значення +1 чи -1; t_1 , t_2 – часові інтервали інтегрування (рис. 4).

Значення знакових функцій $A_{RE}(t)$, $A_{IM}(t)$ в кожному періоді T визначаються часовими інтервалами:

$$A_{RE}(t) = 1 \text{ при } t = [0 \dots \pi], A_{RE}(t) = -1 \text{ при } t = [\pi \dots 2\pi];$$

$$A_{IM}(t) = 1 \text{ при } t = [0 \dots \pi/2] \text{ та } [3\pi/2 \dots 2\pi], A_{IM}(t) = -1 \text{ при } t = [\pi/2 \dots 3\pi/2].$$

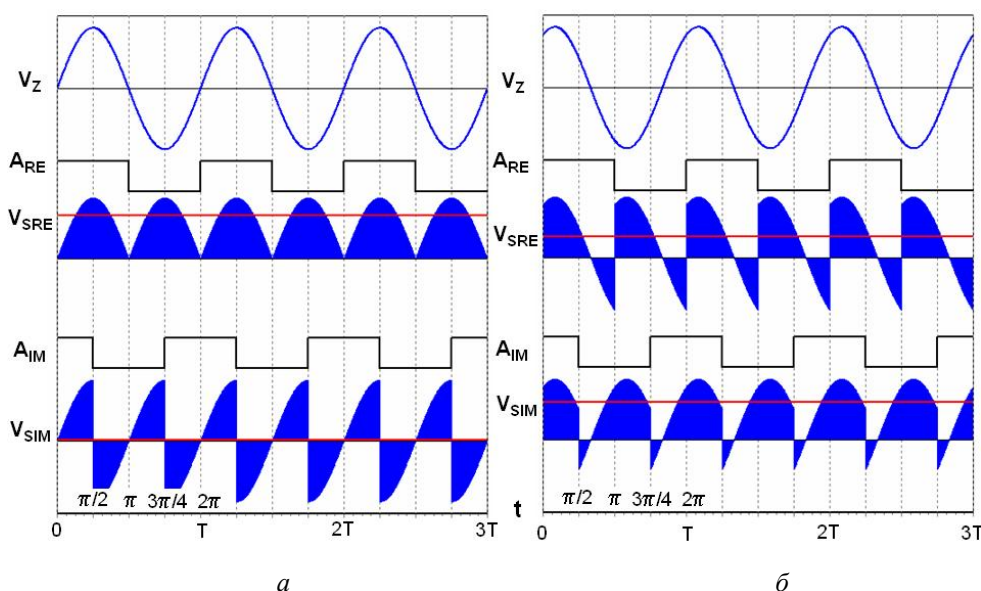


Рис. 4. Епюри сигналів перетворювача у разі зсуву фази напруги 0° (а) та 60° (б)

Зокрема, за відсутності реактивної складової (рис. 4, а) зсув фази напруги $V_Z(t)$ на досліджуваному двополоснику є нульовим, що визначає максимальне значення інформативного сигналу дійсної складової ($V_{SRE} = \max$) та нульове значення сигналу уявної складової імпедансу ($V_{SIM} = 0$). Зі зростанням реактивної складової та за відповідної зміни зсуву фази (рис. 4, б) дійсна складова V_{SRE} зменшується, а модуль реактивної $|V_{SIM}|$ – зростає.

Для синтезу SPICE моделі вимірювального перетворювача, що виконує функцію квадратурного детектування, використано схемні вузли неінвертуючого та інвертуючого комутування. Для цього напругу на досліджуваному двополоснику спочатку транслюють (передають) в два канали – в неінвертуючий канал напруга передається без змін, а в інвертуючий – строго в протифазі. Реалізацію цієї функції здійснюють, зокрема, з використанням моделі формального підсилювача напруги. SPICE схема заміщення такого формального підсилювача така:

```
.SUBCKT Amp PINA PINB
+PARAMS: GAIN=1
E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
RE1 PINA 0 1G ; added by E1
.ENDS Amp
```

Комутування здійснюють з використанням керованих ключів, зокрема, типу S (Voltage-controlled switch). Параметри цих ключів та опис їх моделі такі:

Syntax: .MODEL <model name> VSWITCH([model parameters])

.MODEL SW1 VSWITCH (ROFF=1000MEG VON=0.01 VOFF=-0.01)

Model Equations:

VC - Voltage across the control nodes;

LM - Log-mean of resistor values = $\ln((RON*ROFF)^{.5})$;

LR - Log-ratio of resistor values = $\ln(RON/ROFF)$;

VM - Mean of control voltages = $(VON + VOFF)/2$;

VD - Difference of control voltages = $VON-VOFF$;

k - Boltzmann's constant;

T - Analysis temperature;

RS - Switch output resistance.

Мнемокод функції комутації ключа типу S є таким:

If $VON > VOFF \rightarrow$

If $VC \geq VON \rightarrow$

$RS = RON$

If $VC \leq VOFF \rightarrow$

$RS = ROFF$

If $VOFF < VC < VON \rightarrow$

$RS = \exp(LM+3*LR*(VC-VM)/(2*VD))-2*LR*(VC-VM)^3/VD^3$

If $VON < VOFF \rightarrow$

If $VC \leq VON \rightarrow$

$RS = RON$

If $VC \geq VOFF \rightarrow$

$RS = ROFF$

If $VOFF > VC > VON \rightarrow$

$RS = \exp(LM-3*LR*(VC-VM)/(2*VD))+2*LR*(VC-VM)^3/VD^3$

Функціональна SPICE схема заміщення квадратурного синхронного детектора, що ґрунтується на вищезгаданих моделях підсилювачів та ключів, наведена на рис. 5

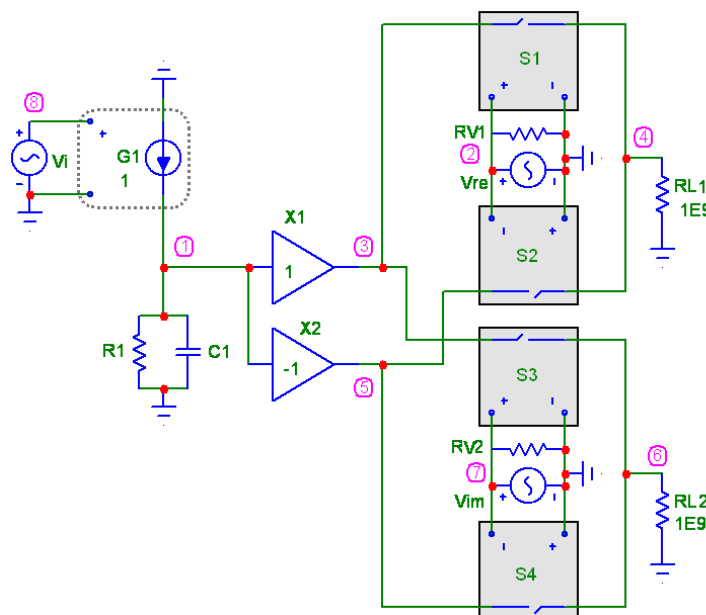


Рис. 5. Функціональна SPICE схема заміщення вимірювального перетворювача на квадратурному синхронному детекторі

Напруга на досліджуваному двополюснику R1C1, попередньо транслюючись без інверсії (X1) та з інверсією (X2) фази, комутується ключами S1 – S4. Перші два S1 та S2 керуються джерелом напруги Vre, фаза якого відповідає активній складовій імпедансу. Натомість, інші два ключі S3 та S4 керуються джерелом напруги Vim, фаза якого відповідає реактивній компоненті (зсув фази на $\pi/2$).

Специфікація SPICE моделей цих компонентів така:

```
X1 1 3 Amp PARAMS: GAIN=1
X2 1 5 Amp PARAMS: GAIN={-1}.
VI 8 0 SIN (0 1E-3 1K 0 0 0)
VIM 7 0 SIN (0 1 1K 0 0 90)
VRE 2 0 SIN (0 1 1K 0 0 0).
```

Інформативним сигналом активної складової імпедансу є напруга V(4), а реактивної складової – напруга V(6). Інтегрування сигналу можна здійснити трьома основними підходами: перетворення вихідної напруги на струм для подальшого його перетворення на заряд ємності аналогового інтегратора, перетворення з використанням фільтрів низьких частот чи перетворення числовим (математичним) інтегруванням. Перші два підходи повинні використовуватися для дослідження точності вимірювальних перетворювачів загалом.

Перевагою третього підходу є відсутність похибок перетворення, спричинених неточностями функціонування вищезгаданих вузлів інтеграторів чи фільтрів. Саме на основі цього підходу розкриємо суть запропонованого методу параметричної оцінки точності.

У сучасних версіях пакета MicroCap передбачена можливість використання низки математичних функцій, зокрема, в цьому випадку визначальною є функція числового інтегрування – SD та SDT:

SD(y[,start]) – running integral of y with respect to T in transient, F in AC, or DCINPUT1 in DC, with an optional start parameter.

SDT(y) – running integral of y with respect to T (Time).

Приклад використання функції SDT на прикладі схеми елементарного однопівперіодного діодного детектора представлено на рис. 6, де V(1) – напруга на виході елементарного діодного детектора, SDT(V(1)) – інтеграл цієї напруги.

Приклад результату використання запропонованої SPICE моделі та методики визначення значень активної ReZ та реактивної ImZ складових імпедансу з урахуванням фактичних параметрів сигналів та елементної бази вимірювального перетворювача представлено на рис. 7, де: V(4) та SDT(V(4)) – вихідна напруга активної складової та її інтеграл, а V(6) та SDT(V(6)) – відповідно, вихідна напруга реактивної складової імпедансу та її інтеграл. Інтегрування проводять упродовж певного часового інтервалу, тривалість якого кратна до періоду задаючого сигналу.

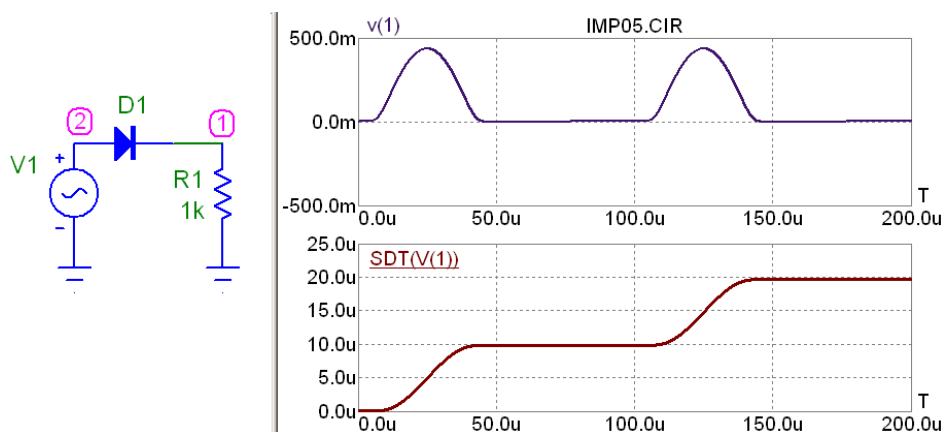


Рис. 6. Приклад результату використання функції числового інтегрування SDT

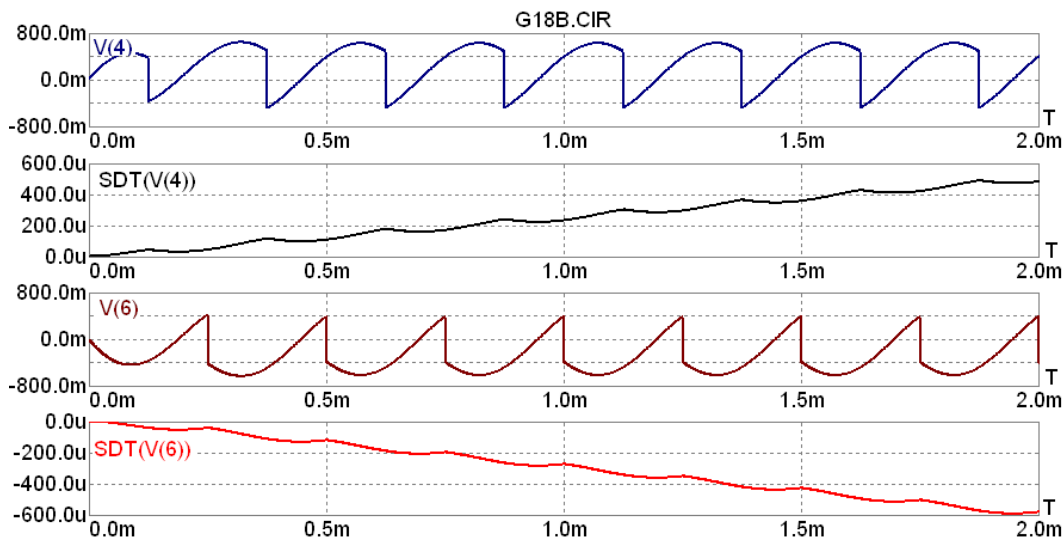


Рис. 7. Еюри сигналів квадратурного детектора з числовим інтегруванням

Отримані результати такого інтегрування вихідних напруг квадратурного детектора за допомогою Transient аналізу зіставляють з результатами розглянутого вище АС аналізу та розраховують коефіцієнти кореляції. Аналіз залежності коефіцієнтів кореляції від параметра сигналів та елементної бази схеми дає змогу визначати похибки вимірювального перетворювача імпедансу, а відтак є основою для подальшого їх схемного модифікування та оптимізації режимів роботи.

Висновки

Розглянуто задачу схемного SPICE моделювання та параметричного аналізу вимірювальних перетворювачів імпедансу. Такі вимірювальні перетворювачі є основою широкого кола сенсорних пристроїв на основі методів імпедансної спектроскопії, зокрема для Інтернету речей. Принциповою особливістю схемного SPICE моделювання сигнальних перетворювачів імпедансної спектроскопії є необхідність переходу від частотних діаграм до діаграм на комплексній площині.

У роботі запропоновано SPICE модель та методику параметричного аналізу пристроїв імпедансної спектроскопії, основою якої є поєднання двох типів аналізу – АС та Transient. В ході АС аналізу отримують номінальні імпедансні діаграми Найквіста схеми перетворювача (його SPICE моделі) в ідеалізованому випадку. Натомість, в ході Transient аналізу визначають значення активного ReZ та реактивного ImZ імпедансу для фактичних параметрів сигналів та елементної бази.

Методика Transient аналізу реалізується синхронним квадратурним детектуванням вихідних сигналів та інтегруванням результату детектування в часових інтервалах, що відповідають їхнім активним та реактивним складовим. Активна складова вихідного сигналу детектується та інтегрується синфазно з задаючим вхідним сигналом, а реактивна складова – з фазовим зміщенням на $\pi/2$. Результати проведених АС та Transient аналізів зіставляють та розраховують коефіцієнти кореляції. Ці коефіцієнти використовуються для кількісного оцінювання параметрів, схемного модифікування та оптимізації режимів роботи вимірювальних перетворювачів імпедансу. Отримані результати актуальні для розроблення та схемотехнічної оптимізації мікроелектронних пристроїв імпедансної спектроскопії нового покоління.

1. Bo Cheng, Da Zhu, Shuai Zhao, Junliang Chen. Situation-Aware IoT Service Coordination Using the Event-Driven SOA Paradigm // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2016. Vol. 13, Issue 2. P. 349–361. 2. Chonggang Wang, Mahmoud Daneshmand, Mischa Dohler. Guest Editorial – Special Issue on Internet of Things (IoT): Architecture, Protocols and Services // *IEEE Sensors Journal*. 2013. Vol. 13, Issue 10. P. 3505–3510. 3. Maria L. Lopez Rodriguez, Rossana Madrid, Carla Giacomelli. Evaluation of Impedance Spectroscopy as a Transduction Method for Bacterial Biosensors // *IEEE Latin America Transactions*. 2013. Vol. 11, Issue 1. P. 196–200. 4. Kiseok Song, Unsoo Ha,

Seongwook Park. *An Impedance and Multi-Wavelength Near-Infrared Spectroscopy IC for Non-Invasive Blood Glucose Estimation* // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2015. Vol. 50. Issue 4. P. 1025–1037. 5. Hotra Z., Holyaka R., Marusenkova T., Potencki J. *Signal transducers of capacitive microelectronic sensors* // *Elektronika*. Rzeszow. Poland. 2010. No. 8. P.129–132. 6. Hotra Z., Holyaka R. *Structural and circuit design for enhancement of thermal flow sensors effectiveness* // *Advanced Numerical Modeling. IIPhDW*. 2011. Zielona Gora. Poland. P. 129–130. 7. Holyaka Roman, Kostiv Natalya. *Energy-efficient signal converter of thermocouple, temperature sensors*. *Informatyka, Automatyka, Pomiar*. 2011. № 4. P. 26–28. 8. Holyaka R., Yurchak I., Marusenkova T., Ilkanych V. *Microprocessor noise-immune signal transducer for galvanomagnetic smart sensor devices* // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the 11th International Conference. TCSET'2012*. 2012. P. 34–35. 9. Jaeho Kim, Jaeseok Yun, Sung-Chan Choi. *Standard-based IoT platforms interworking: implementation, experiences, and lessons learned* // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54. Issue 7. P. 48–54. 10. Aparna M. Dhirde, Nilesh V. Dale, Hossein Salehfar. *Equivalent Electric Circuit Modeling and Performance Analysis of a PEM Fuel Cell Stack Using Impedance Spectroscopy* // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010. Vol. 25. Issue 3. P. 778–786. 11. Karpaty David. *Modeling Amplifiers as Analog Filters Increases SPICE Simulation Speed* // *Analog Dialogue*. URL: <http://www.analog.com/analogdialogue>. Vol. 47. N. 1. 2013. P.18–22. 12. MICRO-CAP. *Electronic Circuit Analysis Program*. Spectrum Software. 2014. 8 p. URL: <http://www.spectrum-soft.com>.

References

1. Bo Cheng, Da Zhu, Shuai Zhao, Junliang Chen. *Situation-Aware IoT Service Coordination Using the Event-Driven SOA Paradigm* // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. – 2016. Vol. 13, Issue 2. – P. 349–361. 2. Chonggang Wang, Mahmoud Daneshmand, Mischa Dohler. *Guest Editorial - Special Issue on Internet of Things (IoT): Architecture, Protocols and Services* // *IEEE Sensors Journal*. – 2013. – Vol. 13, Issue 10. – P. 3505–3510. 3. Maria L. Lopez Rodriguez, Rossana Madrid, Carla Giacomelli. *Evaluation of Impedance Spectroscopy as a Transduction Method for Bacterial Biosensors* // *IEEE Latin America Transactions*. –2013. – Vol. 11, Issue 1. – P. 196–200. 4. Kiseok Song, Unsoo Ha, Seongwook Park. *An Impedance and Multi-Wavelength Near-Infrared Spectroscopy IC for Non-Invasive Blood Glucose Estimation* // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2015. – Vol. 50. – Issue 4. – P. 1025–1037. 5. Z. Hotra, R. Holyaka, T. Marusenkova, J. Potencki. *Signal transducers of capacitive microelectronic sensors* // *Elektronika*. Rzeszow. Poland. – 2010. – No. 8. P. 129–132. 6. Z. Hotra, R. Holyaka. *Structural and circuit design for enhancement of thermal flow sensors effectiveness* // *Advanced Numerical Modeling. IIPhDW*. – 2011. Zielona Gora. Poland. – P. 129–130. 7. Roman Holyaka, Natalya Kostiv. *Energy-efficient signal converter of thermocouple, temperature sensors*. *Informatyka, Automatyka, Pomiar*. – 2011. – № 4 – P. 26–28. 8. R. Holyaka, I. Yurchak, T. Marusenkova, V. Ilkanych. *Microprocessor noise-immune signal transducer for galvanomagnetic smart sensor devices* // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the 11th International Conference. TCSET'2012*. – 2012. P. 34–35. 9. Jaeho Kim, Jaeseok Yun, Sung-Chan Choi. *Standard-based IoT platforms interworking: implementation, experiences, and lessons learned* // *IEEE Communications Magazine*. –2016. Vol. 54, Issue 7. – P. 48–54. 10. Aparna M. Dhirde, Nilesh V. Dale, Hossein Salehfar. *Equivalent Electric Circuit Modeling and Performance Analysis of a PEM Fuel Cell Stack Using Impedance Spectroscopy* // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2010. – Vol. 25, Issue 3. – P. 778–786. 11. David Karpaty. *Modeling Amplifiers as Analog Filters Increases SPICE Simulation Speed* // *Analog Dialogue*. <http://www.analog.com/analogdialogue>. – 2013. – Vol. 47. – No. 1. – P. 18–22. 12. MICRO-CAP. *Electronic Circuit Analysis Program*. Spectrum Software. – 2014. – 8 p. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.spectrum-soft.com>.