

## МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СХЕМ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВІС/НВІС

**С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський, С. І. Бойко**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;  
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки;  
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57*

*Розглянуто метод компенсації при функціональному моделюванні схем субмікронних структур ВІС. Запропоновано компенсаційний метод для переведення інерційних активних елементів в без інерційні.*

***Ключові слова:** функціональне моделювання, метод компенсації, субмікронні структури, без інерційні елементи.*

Одним із важливих завдань, які необхідно вирішувати при проектуванні складних радіоелектронних пристроїв (ВІС), є дослідження процесу перетворення сигналу в міру його проходження від входу до виходу пристрою чи системи. Такі дослідження можна проводити ЕОМ з різним ступенем точності або досить точно, що відповідно вимагає великих затрат машинного часу, або досить швидко, але вже в певній мірі наближено. В такому випадку РЕП/ВІС моделюють на основі фізичного підходу методом схемотехнічного (електрофізичного на основі тестових структур з використанням технологічної САПР) моделювання, а в другому – на основі інформаційного підходу методом функціонального (електроінформаційного) моделювання. Звичайно, що перший спосіб має перевагу, бо забезпечує інформаційність протягом всього етапу проектування.

Сутність функціонального моделювання (ФМ) полягає в розбитті РЕП/ВІС на окремі функціональні блоки, кожний із яких виконує те чи інше функціональне перетворення сигналу та розрахунок форми сигналу і його основних параметрів в кожній точці отриманої функціональної схеми.

То під формою сигналу розуміють або залежність сигналу як функції часу  $x(t)$  при моделюванні в часовій області, або еквівалентне представлення сигналу у вигляді зображення Лапласа  $x(p)$ , або залежності від комплексної частоти  $j\omega$  (спектральне подання Фур'є) при моделюванні в частотній області (так званий операторний або спектральний аналіз).

Основною вимогою при ФМ є забезпечення високої швидкості моделювання, яка є необхідною для того, щоб за короткий час можна

було дослідити велике число варіантів функціональних схем. А це потребує розробки спеціальних тестерів (наприклад, Т-4ГОЗ, АУК-TEST). Так як етап проектування функціональної схеми відноситься до початку загального процесу проектування, то при ФМ високої точності не вимагається, а головне забезпечити перевірку частотного діапазону.

Першим основним допуском, який є характерним для ФМ, є розв'язка окремих блоків функціональної системи-схеми, тобто незалежність характеристик окремих блоків від режиму роботи інших блоків. Умова розв'язки блоків еквівалентно виконанню умови, а кожного із блоків. Внаслідок цього перетворення сигналу залежить тільки від характеристик вхід-вихід кожного блоку, а не від їх взаємного впливу один на одного.

Другим основним допуском, характерним для ФМ, є допуск на одно спрямованість елементів, тобто сигнал на виході елемента не впливає на сигнал на його вході. Це дозволяє вважати, що сигнал у функціональних схемах поширюється односпрямовано – із входу на вихід кожного елемента схеми.

Характерним прикладом задач, що розв'язуються методом ФМ є дослідження поведінки системи автоматичного регулювання, функціонування схеми яких залежить від типових ланок – диференціюючих, інтегруючих, форсуючих, із затримкою та інших. Другим прикладом є задача дослідження часових діаграм роботи АЦП і ЦАП методами логічного моделювання як одного з видів функціонального моделювання.

Незважаючи на велику кількість функціональних елементів, усіх їх можна звести до таких 4-х типів, які називають базовими: генератори сигналів, безінерційні системи чи елементи, інерційні лінійні елементи, інерційні нелінійні елементи (рис. 1).

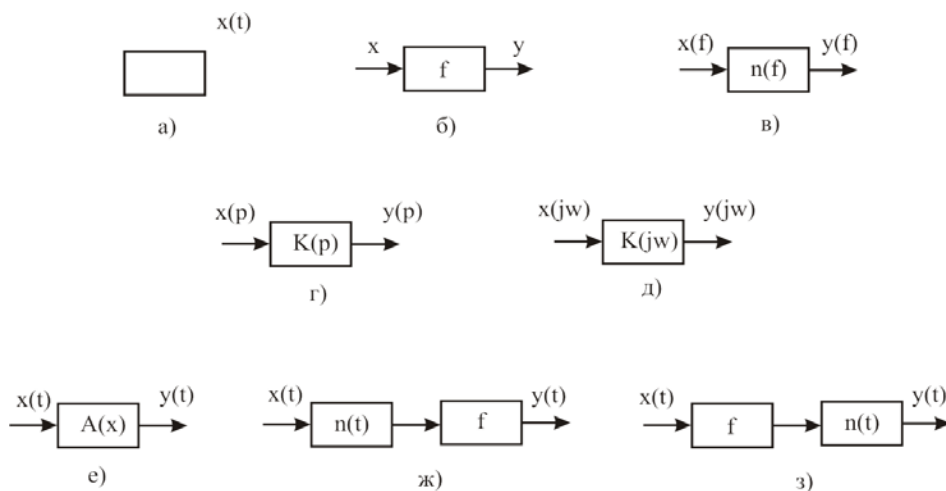


Рис 1. Базові елементи функціональних схем: а) оператор сигналу; б) безінерційний елемент; в), г), д) лінійні інерційні елементи; е) нелінійний інерційний елемент; ж), з) еквівалент перетворення нелінійного інерційного елемента

1. Генератори сигналів. Цей тип елементів включає дві різновидності – незалежні генератори, що задають сигнал  $x(t)$  на вході функціональної схеми і управляючі генератори, що формують сигнал на  $x(t)$  в залежності від управляючої дії.

Тут функція перетворення управляючого генератора має вигляд:

$$x(t) = (x_1(t) \text{ при } U = U_1) / (x_n(t) \text{ при } U = U_n). \quad (1)$$

До управляючих генераторів відносять різнопорогові пристрої – компаратори.

2. Безінерційні лінійні або нелінійні елементи. Функціональне перетворення такого елемента являє собою лінійку або лінійну функцію  $f$ , яка зв'яже вхідний сигнал  $x$  і вихідний сигнал  $y$ :  $y = f(x)$ .

Важливим частинним випадком є без інерційний елемент з пам'яттю, наприклад, тригер. Його функція перетворення є неоднозначною по відношенню до вхідного сигналу  $x$  і залежить не тільки від нього, але і від типу самого елемента:

$$f = y = f(x, y).$$

А без інерційний нелінійний елемент дозволяє перетворювати форму вхідного сигналу  $x(t)$  в будь-яку форму вихідного сигналу як  $k(t) = f(x(t))$ , наприклад, обмежити амплітуду  $x(t)$ , формувати з імпульсу  $x(t)$  імпульс іншої форми  $g(t)$ . Основні типи без інерційних елементів наведені в табл. 1.

3. Інерційний лінійний елемент. Його функція перетворення в часовій області – це перехідна характеристика  $h(t)$ , а в масовій області – коефіцієнт передачі  $K(p)$ . В цьому випадку математичні моделі описуються виразами:

$$g(t) = \int_0^t x(t)h(t - \tau),$$

$$y(p) = K(p)\alpha(p).$$

До інерційних лінійних елементів належить широкий клас пристроїв, наприклад, різні типи частотних фільтрів, лінійні високочастотні, смугові, і низькочастотні підсилювачі, операційні і диференційні підсилювачі, що виконують функції сумування, інтегрування, диференціювання, логарифмування та інші лінійні операції.

4. Інертний нелінійний елемент. Його функція перетворення представляється деяким лінійним оператором  $A(t)$ , наприклад, диференціальним рівнянням, яке ставить у відповідність кожній реалізації  $x(t)$  реалізацію  $y(t)$ .

Саме диференціальне рівняння є найбільш загальною і універсальною формою представлення моделей інерційних елементів будь-якого типу – лінійних та нелінійних. Така форма представлення є зруч-

ною при автоматизації функціонального проектування на ЕОМ, так як легко вписується в апараті числових методів, які використовують для функціонального моделювання.

Таблиця 1. Функція перетворення без інерційних елементів

№ п/п	Тип елементу	Виконання перетворення			Примітка
1	Аналого-аналоговий		$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$y = f(x)$
2	Аналого-імпульсний		$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$\tau = f(x(t))$
3	Імпульсно-аналоговий		$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$y(t) = K(A)t$
4	Аналого-цифровий		$x \rightarrow [f] \rightarrow y$	$N_y(t_n) = 1011$	$N_x(t) = R x(t)$
5	Цифро-аналоговий	$N_x(t_n) = 1011$	$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$y(t) = R N_x(t)$
6	Аналого-логічний		$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$y = 1, 1/2, 0$
7	Логіко-аналоговий	0, 1/2, 1	$x \rightarrow [f] \rightarrow y$		$y_1, y_2$ – електричні рівні, $y_2 = y_1(t)$ – форма сигналу
8	Цифровий	$N_x = 1011$	$x \rightarrow [f] \rightarrow y$	$N_y = 1011$	$N_y = f(N_x)$
9	Логічний	$(x_1, x_2)$	$x \rightarrow [L] \rightarrow y$	$x_1 \vee x_2$	$y = L(x_1, x_2)$ , $L$ – логічна функція
10	Логіко-цифровий	$(x_1, x_2)$	$x \rightarrow [L] \rightarrow y$	1101	$N_y = L(x_1, x_2)$
11	Логіко-імпульсний	$(x_1, x_2)$	$x \rightarrow [L] \rightarrow y$		$L(x_1, x_2) = 1$

У більшості випадків реальний інерційний елемент можна описати системно диференціальних рівнянь виду:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} + g_i(y(t)) = \frac{dx_i(t)}{dt} + f_i(x(t)), \text{ де } i = \overline{1..n}, \quad (3)$$

де  $x_i(t)$ ,  $y_i(t)$  – вхідні і вихідні сигнали елемента,  $n$  – порядок системи.

В загальному випадку диференціальне рівняння нелінійного інерційного елемента будь-якого порядку і містить будь-яку нелінійність і тому замість рівняння (3) можна подати у більш загальному вигляді:

$$F_i = (y^{(R)} t_1 * y^{(R-1)}(t...y(t), t)) = D_i = (x^p(t) x^{p-1}(t) ... x(t), t), \quad (4)$$

де  $R$ ,  $p$  – максимальний порядок вихідних і вхідних сигналів,  $i = \overline{1..n}$ .

У тих випадках, коли визначення моделі імітаційного нелінійного елемента у формі диференціальних рівняння є складною задачею, яку реалізувати важко, то цей елемент моделюють наближено послідовним з'єднанням інерційного лінійного і без інерційного нелінійного елементів, так що відповідна математична модель виразить системою рівнянь:

$$y(t) = f\left(\int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau\right), \quad (5)$$

$$g(t) = \int_0^t f(x(\tau))h(t-\tau)d\tau.$$

Тут слід зауважити, що вихідний сигнал суттєво залежить від послідовності включення нелінійного й інерційного елементів.

Активними елементами (АЕ) в структурах ВІС/НВІС виступлять біполярні або польові транзистори. Нами розроблений компенсаційний метод моделювання активних елементів, що дозволяє замінити інерційні елементи безінерційними та нелінійні елементи лінійними. Цей метод дозволяє значно спростити сигнальну САПР структур ВІС/НВІС. Зупинимось на особливостях роботи АЕ, (як приклад БТ) на високих частотах.

На відносно низьких частотах ( $f_p \leq 0,5f_\beta$ ) БТ рахується безінерційним АЕ, його реакція на можливі впливи є миттєвою, а для розрахунку результатів достатньо використати його статичні ВАХ ( $f_p = f_t(\infty)$ ,  $\beta = 50$ ). На високих частотах  $f_p > 0,5f_\beta$  проявляються:

- Інерційність транзистора, зв'язаних з кінцевим значенням часу прольоту носіїв через активну базу;
- Значні струми зміщення, що протікають через бар'єрні ємності емітерного і колекторного переходів ( $C_{дир}, C_e, C_{кп} = C_{сн} + C_{кп}$ ).
- Зростання напруги на індуктивностях виводів

Якщо емітерний  $p-n$ -перехід є закритим, то  $R_\beta \rightarrow \infty$ , а  $0$ , і головно роль відіграють бар'єрні ємності  $C_e$ .

Еквівалентні схеми БТ на частотах  $f_p > 0,5f_\beta$  а) при відкритому б) і закритому  $p-n$ -переході демонструє рис. 2а.

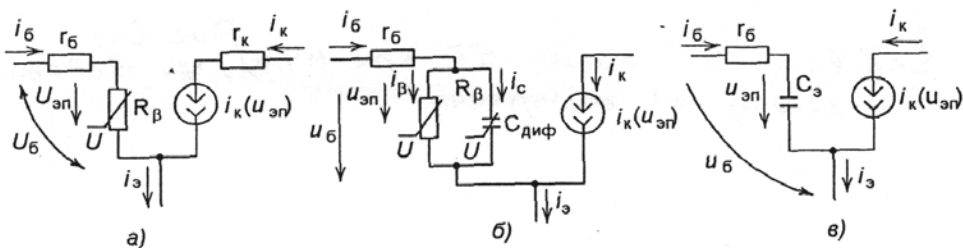


Рис. 2а. Еквівалентні схеми БТ при НЧ а), при відкритому б) і закритому в) емітерному переході

Інерційність БТ проявляється в наступних діях:

- з'являється фазовий зсув  $\varphi_\delta$  між  $U_\delta(t)$  і  $U_{сн}(t)$ , і відповідно, проходить відставання  $I_k(t)$  від напруги на базі  $U_\delta(t)$ ; таким чином залежність  $I_k$  та  $U_k$  уже не можуть визначатись статичними ВАХ;

- модуль коефіцієнта передачі за напругою  $|K_a|$  падає з ростом робочої частоти  $f_p$ , що приводить до зниження основних енергетичних характеристик підсилювачів потужності, як основи схемотехніки ( $f_p$ )

$$f_p \rightarrow \downarrow |K_a| \rightarrow \downarrow U_{\text{СПП}} \rightarrow I_{\text{к1}} \rightarrow \downarrow P_1;$$

- проходить спотворення форми і тривалості імпульсів в силу різниці тривалості перехідних процесів при відкриванні і закриванні емітерного переходу БТ.

Висказані вище дії приводять до того, що існуючі в САПРі методи розрахунку режимів роботи транзисторів є різними на різних робочих частотах для різних пристроїв ВІС. Усунення впливу частоти, а відповідно стає можливість використання даних методик САПР в розрахунках досягається в результаті застосування розробленого нами методу компенсації із застосуванням ланоккорекції, тобто корегуються характеристики БТ на високих частотах під характеристики і їх взаємозалежності на низьких частотах, а саме інерційні елементи перевести в безінерційні та нелінійні елементи в лінійні за допомогою корегуючи RC-ланок.

Мета такого компенсуючого методу – усунути залежність від частоти фазовий зсув між  $U_{\delta}(t)$  і  $U_{\text{ен}}(t)$ , зумовлений впливом елементів  $r_{\delta}$ ,  $R_{\beta}$  і  $C_{\text{диф}}$  при відкритому емітерному переході і  $r_{\delta}$ ,  $C_e$  – при закритому. Така корегуючи RC-ланка представляє собою паралельне з'єднання опору і ємності, які включені послідовно в базу і емітерну ланки БТ як це подано на рис. 2б.

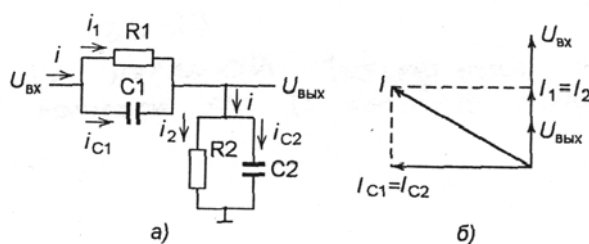


Рис. 2б. Схема корегуючої RC-ланки а) і векторна діаграма б), яка пояснює її дію

А. Базова корекція. Для того, щоб реалізувати базову корекцію при відкритому емітерному переході, потрібно виконати наступні умови (рис. 2в).

1. Забезпечити рівність постійних часу ланки  $R_{\beta} C_{\text{диф}}$  та корегуючої ланки  $R_{\text{кор}} C_{\text{кор}}$ :

$$R_{\text{кор}} C_{\text{кор}} = R_{\beta} C_{\text{диф}}.$$

2. Усунути вплив опору  $r_{\delta}$ .

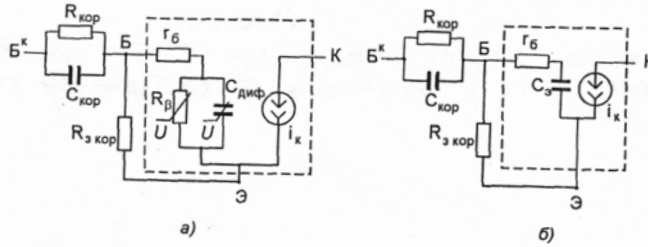


Рис. 2в. Схема базової корекції в БТ при відкритому а) і закритому б) емітерному переході

3. Виключити спотворення форми імпульсів  $I_k$ , які зв'язані з різною тривалістю перехідних процесів при відкриванні і закриванні емітерного переходу, що відповідно досягається корекцією частотної характеристики  $K_n = f(F)$ . Для цього поряд із ланкою  $R_{кор} C_{кор}$  паралельно до входу БТ потрібно включити опір  $R_{е_кор}$ , що утворює RC-ланку з бар'єрною ємністю  $C_e$  транзистора. Тут умова корекції при закритому емітерному переході. Опір бази  $r_б$  не порушує цю умову, якщо виконується рівність  $r_б \gg 1/(\omega C_e)$ .

Опір  $R_{е_кор}$  практично не впливає на умову корекції при відкритому  $p-n$ -переході, бо воно є суттєво більшим вхідного опору відкритого тиристора.

Отримані нами вирази дозволяють розрахувати параметри коригуючих RC-ланок при базовій корекції. Але така базова корекція є відносно ефективною тільки у випадку, коли  $R_{кор} < R_{е_кор}$ .

Б. Емітерна корекція БТ. Тут керуючу RC-ланку можна підключити до емітерного виводу БТ.

Емітерна корекція є високоефективною, при виконанні нерівності  $R_{кор} < R_{C_{кор}}$ .

Тому на практиці застосовують емітерну корекцію дещо в спрощеному вигляді. Тут замість двох корегуючих опорів включається один опір  $R'_{кор} = R_{кор} R_{е_кор} / (R_{кор} + R_{е_кор})$ .

Емітерна та базова корекції відновлюють форму імпульсів струму  $I_k$ , які є синфазні з напругою між базою і емітером. В подальшому розглядається вже БТ з електродами Б<sup>к</sup>, К, Е і Б, К, Е<sup>к</sup>. Схеми АЕ (БТ) подані на рис 2г.

Застосування компенсаційного методу за допомогою корегуючих RC-ланок дозволяє:

- вирахувати частотні залежності енергетичних параметрів підсилювачів потужності:  $P_1, \eta, K_p$ ;

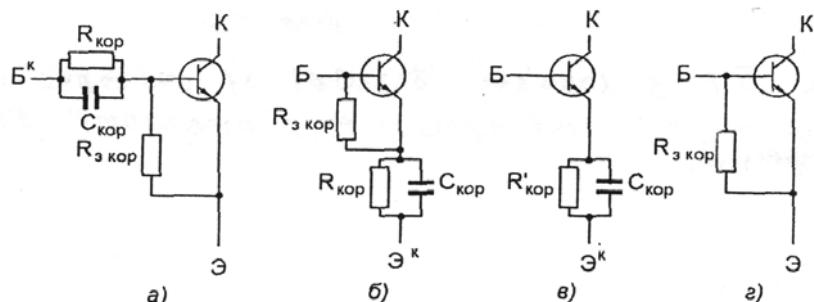


Рис. 2г. Схеми БТ з ланками базової а) емітерної б) та спрощеної емітерної в) і спрощеної базової г) корекцій

- послабити вплив підсилювача потужності на попередні каскади із-за зростання його вхідного опору;

- усунути ВЧ-спотворення колекторного струму, що дозволяє розрахувати режими роботи БТ за загальною методикою САПР з коефіцієнтами  $\alpha$  і  $\beta$ ;

Тоді вибір схем корекції (базової чи емітерної) проводять на основі таких умов:

- на більш низьких частотах емітерна корекція має перевагу перед базовою, бо при цьому послаблюється вплив на вихідну узгоджуючу ланку;

- на підвищених частотах більше ефективною є базова корекція, так як опір  $R_{екор}$ , що шунтує БТ, при емітерній корекції є суттєво меншим, ніж при базовій, і дещо губиться на фоні зростаючих опорів індуктивностей виводів. Тому доцільно з ростом частоти переходити на базову корекцію.

В. Корекція індуктивностей виводів здійснюють за допомогою гіраторів, виконаних на операційному підсилювачі.

Г. Для збільшення швидкодії БТ нами розроблена технологія формування епітаксійних арсенідгалієвих структур на кремнієвих підкладах.

Д. Даний компенсаційний метод поширюється і на польові транзистори із введенням коригуючих RC-ланок до витоку, стоку, а даний метод потребує розробки бібліотеки елементів БТ і ПТ заданої граничної частоти і потужності з відповідними їм коригуючими RC-ланками.

Е. Розроблено відповідні тестові структури для проведення верифікації сигнальної САПР ВІС/НВІС.

Ж. Для реалізації КМДН ВІС на основі арсенідгалію розроблено оригінальну технологію формування КПТШ.

З. Для оброблення великого масиву інформації комп'ютерна система моделювання вимагає сигнальну САПР з використанням сигнальних мікропроцесорів з фіксованою і плаваючою комою.



**Висновок.**

1. З метою підвищення швидкодії сигнальної САПР розроблено нами компенсаційний метод переведення АЕ інерційних в безінерційні, нелінійних в лінійні з використанням РС-кореляторів.

2. Для якісного функціонування САПР необхідно для цього розробити бібліотеку АЕ (біполярних і польових транзисторів) з певною граничною частотою і потужністю та відповідних їм РС-кореляторів.

3. Для збільшення граничної частоти АЕ (БТ й ПТ) нами розроблена технологія формування епітаксійних арсенід-галієвих структур на кремнієвих підкладках.

4. В реалізації даного методу сигнальної САПР запропоновано провести еквівалентне перетворення індуктивностей виводів на гіратори, що реалізуються на ОП.

**Література**

1. Новосядлий С.П. Комп'ютерне моделювання арсенід галієвих супер-бета-транзисторів на гетероструктурах для швидкодіючих ВІС / С.П. Новосядлий, В.С. Гузік // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т.16, №3. – С. 592-598.
2. Новосядлий С.П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС / С.П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Місто НВ, 2010. – 455 с.
4. Розробка технології багатозарядної іонної імплантації GaAs для субмікронних структур ВІС / С.П. Новосядлий, С.І. Бойко, Л.В. Мельник, С.В. Новосядлий // Східно-Європейський журнал новітніх технологій. – 2015. – №6/5(78). – С. 32-40.
5. Новосядлий С.П. Шляхи підвищення швидкодії GaAs польових транзисторів Шоткі та селективно легованих гетеротранзисторів (СЛГТ) для формування сучасних НВЧ-схем / С.П. Новосядлий, І.М. Луцький // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т.16, №2. – С. 413-419.
6. Новосядлий С.П. Діагностика субмікронних структур ВІС: монографія / С.П. Новосядлий, А.І. Терлецький. – Івано-Франківськ: Сімик, 2016. – 478 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 20.01.2017 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Мойсишиним В.М.***

*д.т.н., професором **Оліником А.П.***

**COMPENSATION METHOD FOR FUNCTIONAL SIMULATION  
OF SUBMICRON VLSI CIRCUITS**

**S. P. Novosyadlyy, V. M. Berezhansyy, S. I. Boyko**

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;*

*Department of Computer Engineering and Electronics;*

*76018, Ivano-Frankivsk, Shevchenko str., 57*

*Designing complex electronic devices it is important to know how the signal is converted as it passes from input to output of device or system. There are two cases of such modeling, in the first case VLSI circuit is modeled based on physical approach by method of circuit simulation, in the second case – on the basis of information approach by functional modeling.*

*The goal of the compensation method is elimination of frequency dependent phase shift by using correcting RC-circuit. It transforms inertial circuit elements in non-inertial, non-linear in linear.*

*This method is developed with aim to increase performance of signal CAD. For proper operation of CAD it is necessary to develop a library of active elements with a certain cutoff frequency and power with corresponding RC-correlators.*

**Key words:** *functional modelling, compensation method, submicron structures, non-inertial circuit elements.*