

С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук, А.М. Атаманюк, В.П. Перегінський
Температурна стабільність гіраторів на основі еквівалентів інтегральних транзисторних структур р-п-р-п – типу

*Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, вул. Шевченка 57,
м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

В даній статті подано аналіз температурної стабільності еквівалентної індуктивності (гіраторів), сформованих на основі інтегральних транзисторних еквівалентів р-п-р-п – структури з від’ємним диференціальним опором. На основі проведеного аналізу розроблені схемотехнічні та технологічні (топологічні) рішення, які дозволяють суттєво ($1 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹) зменшити температурний дрейф $L_{ЕКВ}(\omega)$ індуктивності. Це дозволяє використовувати такі гіратори в синтезі прецизійних інтегральних пристроїв, автогенераторів, тригерів в субмікронних структурах великих інтегральних схем (ВІС).

Ключові слова: Температурна стабільність гіраторів, транзисторні еквіваленти індуктивності інтегральних структур, методи і схеми температурної стабілізації гіраторів.

Стаття поступила до редакції 05.07.2009; прийнята до друку 15.03.2010.

При проектуванні систем радіоелектроніки, автоматики, інформаційно-виміральної техніки, телекомунікацій все більше поширення отримують поширення програмно і апаратно управляючі пристрої, в склад яких входять НВЧ-генератори, фільтрові пристрої, переналаштовувані контури, тригерні та реєстрові пристрої, лічильники. Виготовлення методами мікроелектроніки індуктивних елементів, які працюють в широкому частотному та температурному діапазонах, суттєво підвищують як надійність, так основні технічні характеристики і параметри сучасної апаратури, в т.ч. зменшують габарити і споживану потужність. Розробники (конструктори і технологи) намагаються синтезувати аналогічні індуктивності інтегральною мікроелектронікою з максимальною добротністю, бо при цьому вдається забезпечити високу селективність радіоелектронних пристроїв.

Нами уже проводився конструктивно-технологічний аналіз синтезу аналогів індуктивності у вигляді пристроїв та транзисторних еквівалентів у вигляді гіраторів із від’ємним диференціальним опором [2]. В цьому випадку добротність такого аналога індуктивності, що поданий на рис.1 визначається напругою:

$$Q = \frac{\omega L_{ЕКВ}(\omega)}{(R_0 - |R^-|)} \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi F$ – кругова частота, $L_{ЕКВ}$ – еквівалентна індуктивність, R_0 – опір, що визначає положення робочої точки і навантажувальної прямої, $|R^-|$ – еквівалентний від’ємний диференціальний опір транзисторного еквівалента, виконаний на

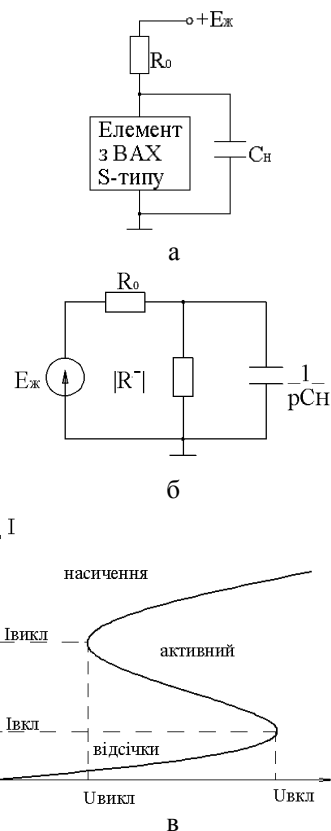


Рис. 1. Функціональна схема гіратора на основі транзисторного еквівалента (а), схема заміщення (б), і ВАХ S-типу (в).

структурах типу р-п-р-п.

Проте великий температурний дрейф індуктивності $\Delta L_{\text{ЕКВ}}(\omega)$, обумовлений сильним впливом додатнього оберненого зв'язку за струмом р-п-р-п – структури, суттєво обмежує широке практичне застосування таких пристроїв.

Тому робота, викладена в даній статті є актуальною, бо в певній мірі дає змогу підвищити температурну стабільність гіраторних схем на основі інтегральних транзисторних еквівалентів, використовуючи не тільки схемотехнічні рішення, але і технологічні способи формування таких структур.

В наших дослідженнях показано, що підключення зовнішньої ємності навантаження C_H паралельно двополюснику чи чотирьополіснику р-п-р-п – структури має індуктивність L_0 , яку практично змінювати не можна. Коефіцієнт передачі пристрою, що приведений на рис. 16 визначається із співвідношення:

$$K(p) = \frac{(-|R^-| + pL_0)}{p^2 L_0 R_0 C_H + p(L_0 R_0 C_H |R^-|) + (R_0 - |R^-|)} \quad (2)$$

де C_H – ємність навантаження, L_0 – індуктивність структури р-п-р-п.

Розв'язок характеристичного рівняння типу

$$\begin{aligned} \Delta L(w) &= \frac{\partial L_{\text{ЕКВ}}(10)}{\partial |R^-|} d|R^-| + \frac{\partial L_{\text{ЕКВ}}(w)}{\partial R_0} dR_0 + \frac{\partial L_{\text{ЕКВ}}(w)}{\partial (R_0 - |R^-|)} d(R_0 - |R^-|) = \\ &= \frac{2|R^-| R_0^2 C_H (R_0 - |R^-|) d|R^-|}{\left[(R_0 - |R^-|)^2 + w^2 C_H^2 |R^-|^2 \right]^2} - \frac{2R_0 |R^-|^2 C_H (R_0 - |R^-|) dR_0}{\left[(R_0 - |R^-|)^2 + w^2 C_H R_0^2 |R^-|^2 \right]^2} \\ &\quad - \frac{C_H R_0^2 |R^-|^2 (R_0 - |R^-|) d(R_0 - |R^-|)}{\left[(R_0 - |R^-|)^2 + w^2 C_H^2 R_0^2 |R^-|^2 \right]^2} \end{aligned} \quad (5)$$

де $\frac{\partial |R^-|}{\partial |R^-|} = \frac{\Delta |R^-|}{|R^-|}$; $\frac{\partial R_0}{\partial R_0} = \frac{\Delta R_0}{R_0}$;

$\frac{d(R_0 - |R^-|)}{d(R_0 - |R^-|)} = \frac{\Delta(R_0 - |R^-|)}{(R_0 - |R^-|)}$ – відносні зміни

відповідних параметрів.

Із співвідношення (5) випливає, якщо резистор навантаження R_0 зробити прецизійним, $\delta R_0=0$, то дрейф індуктивності $\Delta L_{\text{ЕКВ}}$ не компенсується і для зниження дрейфу $\Delta L_{\text{ЕКВ}}(\omega)$ необхідно зменшити дрейф $\delta |R^-|$ вхідного диференціального опору та

$1+K(p) = 0$ дозволяє визначити умову стійкості транзисторного еквівалента індуктивності за постійним і змінним струмом, яка визначається як:

$$|R^-| < \frac{R_0}{2}; \quad C_H = L_0 / (|R^-|) \quad (3)$$

В [2] приведено в загальному вигляді співвідношення для еквівалентної індуктивності $L_{\text{ЕКВ}}(\omega)$ для двополюсника з ВАХ S-типу:

$$L_{\text{ЕКВ}}(w) = \frac{C_H R_0^2 |R^-|^2}{(R_0 - |R^-|)^2 \left[1 + w^2 \frac{C_H^2 R_0^2 |R^-|^2}{R_0 - |R^-|^2} \right]} \quad (4)$$

Температурні варіації приводять до дрейфу опорів навантаження ΔR_0 і від'ємного диференціального $\Delta |R^-|$. Наявність оберненого додатнього зв'язку за струмом приводить до високої температурної нестабільності напруг і струмів включення і виключення та вхідного диференціального опору, який зв'язаний функціонально з глибиною додатнього оберненого зв'язку за струмом транзисторів $\Delta \beta$ і напруг $\Delta U_{\text{БЕ}}$, $\Delta U_{\text{КЕ}}$, $U_{\text{Б}}$. Температурні зміни параметрів приводять до дрейфу еквівалентної індуктивності $\Delta L_{\text{ЕКВ}}$. Диференціюючи вираз (4) за параметрами $|R^-|$, R_0 , $(R_0 - |R^-|)$, отримаємо:

збільшити різницю $(R_0 - |R^-|)$.

При цьому добротність зменшується згідно формули:

$$Q = \frac{w C_H R_0^2 |R^-|}{(R_0 - |R^-|) \cdot \left[(R_0 - |R^-|)^2 + w^2 C_H^2 R_0^2 |R^-|^2 \right]^2} \quad (6)$$

а чутливість $S_{L_{\text{ЕКВ}}}^{|R^-|}(w)$ до зміни від'ємного диференціального опору буде визначатись як:

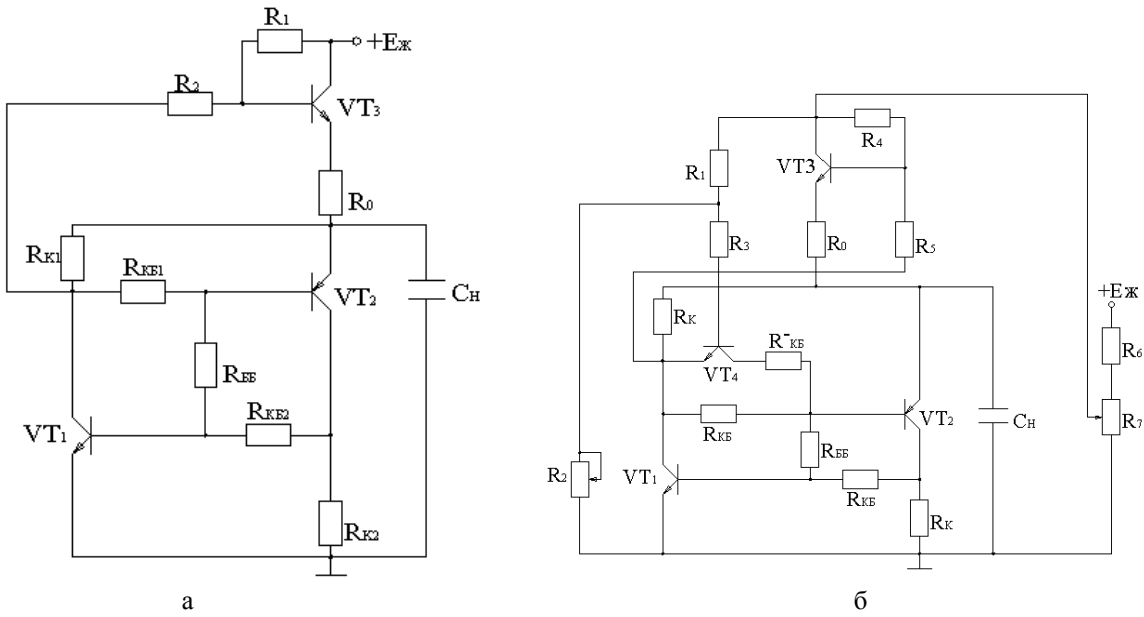


Рис. 2. Схеми термостабілізації гіраторів: а) за рахунок оберненого зв'язку для регулювання напруг U_{BE} , і коефіцієнта температурного підсилення, б) за рахунок термостабілізованої схеми Тевеніна.

$$S_{L_{EKB}}^{|R^-|}(w) = \frac{\Delta L_{EKB} / L_{EKB}}{\Delta |R^-| / |R^-|} = \frac{\partial \ln L_{EKB}}{\partial \ln |R^-|} = \frac{2(R_0 - |R^-|)R_0}{|R^-| \left[(R_0 - |R^-|)^2 + w^2 C_{EKB}^2 R_0^2 |R^-|^2 \right]} \quad (7)$$

Аналіз виразів для добротності (6) і чутливості (7) показує, що при зменшенні різниці $(R_0 - |R^-|)$ опорів добротність гіратора підвищується. Проте разом з цим збільшується його чутливість до зміни від'ємного диференціального опору $S_{L_{EKB}}^{|R^-|}$. Із виразу для ΔL_{EKB} умова компенсації дрейфу еквівалентної індуктивності записується у вигляді:

$$dR_0 = \left(\frac{R_0}{|R^-|} \right)^2 d|R^-| \quad (8)$$

Для роботи гіратора в лінійному режимі необхідно виконати умову $R_0 > |R^-|$. Приймаючи до уваги останні співвідношення, необхідно відзначити,

що для компенсації дрейфу індуктивності необхідно, щоб температурні зміни ΔR_0 опору, що задає положення робочої точки, були би більші температурного дрейфу $\delta |R^-|$. Але в реальних пристроях $\delta |R^-| \gg \delta R_0$, так як дрейф δR_0 суттєво зменшують вибором прецизійності резистора R_0 (приймаючи $\delta R_0 \approx 0$). Дрейф від'ємного диференціального опору $\delta |R^-|$ функціонально зв'язаний з температурними змінними параметрів транзисторів $\delta |R^-| = \Phi(\Delta\beta, \Delta U_{BE}, \Delta U_{KE})$.

На рис. 2 приведені схематичні рішення гіраторів на симетричному двополюснику p-n-p-n – структури.

- [1] А.А. Арефьев, Е.М. Баскаков, Л.Н. Степанова. *Радиотехнические устройства на транзисторных эквивалентах p-n-p-n – структуры*. Радио и связь, М. 316 с.(1982).
- [2] В.П. Дьяконов. Стабилизация релаксационных генераторов на приборах с S –образной ВАХ // *Радиотехника*, (4), сс. 25-30 (1972).
- [3] С.П. Новосядлий. *Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем*. Сімик, Ів.-Франківськ, 351с. (2003).
- [4] С.П. Новосядлий. Плазмова технологія формування субмікронних структур ВІС // *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, (60), сс. 57-63 (2002).
- [5] С.П. Новосядлий. Радіаційна технологія формування прецизійних тонко плівкових резисторів для ВІС // *Технологія приладобудування*, (3), сс. 11-13 (2000).
- [6] С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук. Багатозарядна радикальна імплантація при формуванні SOI- структур // *Фізика і хімія твердого тіла*, 9(3), сс. 559-667 (2008).

S.P. Novosyadliy, V.M. Vivcharuk, A.M. Atamanyuk, V.P. Pereginskiy

Temperature Stability of Gyrotors is on the Basis of Equivalents of Integral Transistor Structures of p-n-p-n – Type

*¹Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

The analysis of temperature stability of equivalent inductance (gyrotors) is given in this article, formed on the basis of integral transistor equivalents of p-n-p-n – structure with negative differential resistance. On the basis of the conducted analysis is developed circuit and technological (topology) decisions which allow substantially ($1 \cdot 10^4$ hails⁻¹) to decrease the temperature drift of $L_{\text{EKB}}(\omega)$ of inductance. It allows to utilize such gyrotors in the synthesis of sensitive integral devices, oscillators, triggers, in the submicron structures of large-scale integration circuit (LSI).