

УДК 944.577

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕГАТИВНОГО ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ЗМІННОМУ СТРУМІ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-09

Осадчук О.В., д.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Я.О., к.т.н. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. eosadchuk.j93@gmail.com

Думенко Д.О. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. edoomdenny@gmail.com

Анотація: у статті розглядається доцільності використання негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі для стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності. Проаналізовано транзисторні каскади із спільним колектором та внесеною реактивністю між базою та колектором. Розглянуто вплив паралельного, послідовного та паралельно-послідовного зворотнього зв'язку на них. Проведені розрахунки залежностей активного, реактивного опору, індуктивності та добротності в функції глибини паралельного негативного зворотнього зв'язку (НЗЗ), наведені графіки залежностей еквівалентної індуктивності і добротності. Доведено ефективність стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності (при змінному та постійному струмі) при взаємодії таких дестабілізуючих факторів як нестабільність джерел живлення, зміну температури в діапазоні до $+50^{\circ}$ для германієвих та $+70^{\circ}$ для кремнієвих транзисторів. Наведена базова схема транзистора для проведення аналізу впливу паралельного НЗЗ, на основі якої виведена спрощена еквівалентна схема з врахуванням впливу опору зворотнього зв'язку, а також розрахункова схема, отримана переутворюючи трикутник в еквівалентну зірку. Використовуючи метод контурних струмів і виконуючи неважкі перетворення отримані вирази для визначення вхідного активного та реактивного опорів, індуктивності, добротності окремих схем та узагальнених випадків.

Доведено, що температурна стабільність значно покращується при заміні постійних опорів температурно-чутливими елементами. Наведено одну із схем транзисторних аналогів індуктивності із використанням термочутливого елемента в колі живлення.

Ключові слова: зворотній зв'язок, транзисторний аналог індуктивності, еквівалентна схема, сигнал, струм, контур, вплив, стабілізація.

ANALYSIS OF THE EXPEDIENCY OF USING NEGATIVE FEEDBACK ON ALTERNATING CURRENT FOR STABILIZATION OF TRANSISTOR ANALOGS OF INDUCTANCE PARAMETERS

Oleksandr Osadchuk, Dr.habil., Prof. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. : osadchuk.av69@gmail.com

Iaroslav Osadchuk, Ph.D. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. osadchuk.j93@gmail.com

Denys Dumenko. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. doomdenny@gmail.com

Abstract: the article examines the expediency of using negative feedback on an alternating current to stabilize the parameters of transistor analogs of inductance. Transistor cascades with a common collector and introduced reactivity between the base and the collector are analyzed. The influence of parallel, serial and parallel-serial feedback on them is considered. Calculations of the dependences of active resistance, reactive resistance, inductance, and Q-factor as a function of the depth of parallel negative feedback are made, graphs of the dependences of equivalent inductance and Q-factor are given. The effectiveness of stabilizing the parameters of transistor analogs of inductance (at alternating and direct current) in the interaction of such destabilizing factors as instability of power sources, temperature changes in the range of up to $+50^{\circ}$ for germanium and $+70^{\circ}$ for silicon transistors has been proven. The basic diagram of a transistor for analyzing the effect of a parallel negative feedback is presented, based on which a simplified equivalent circuit is derived taking into account the influence of feedback resistance, as well as a calculation scheme obtained by transforming a triangle into an equivalent star. Using the method of loop currents and performing easy transformations, expressions are obtained for

determining the input active and reactive resistances, inductance, Q factor of individual circuits and generalized cases.

It has been proven that temperature stability is significantly improved when constant resistances are replaced by temperature-sensitive elements. One of the circuits of transistor analogues of inductance using a thermosensitive element in the power supply circuit is given.

Key words: feedback, transistor analogue of inductance, equivalent circuit, signal, current, circuit, influence, stabilization.

Вступ

Одним з найголовніших методів стабілізації параметрів транзисторних структур індуктивності є внесення каскад зворотнього зв'язку в систему. Таким чином, відбувається компенсація нестабільності вихідного сигналу, шляхом передачі його частини на вхід оброблюючого пристрою.

Вибір каскаду зворотнього зв'язку залежить від бажаного результату, та необхідного рівня сигналу. Так, застосувавши одні рішення, можна отримати високо стабільний сигнал, проте невеликої амплітуди, що буде потребувати внесення додаткового підсилювального каскаду. І навпаки, можна досягти ще більший коефіцієнт підсилення каскаду, але підвищено чутливий до чинників впливу.

В статті приведено аналіз доцільності використання основних видів зворотніх зв'язків на змінному струмі для стабілізації параметрів ТАІ(транзисторних аналогів індуктивності). Будемо розглядати каскади з спільним колектором із позитивною реактивністю між колектором і базою, охоплені паралельним, послідовним та паралельно-послідовним зворотнім зв'язком.

Розглядаючи стабілізуючу дію робочого режиму на параметри ТАІ[1] необхідно обов'язково приділити увагу аналізу доцільності використання основних видів зворотніх зв'язків на змінному струмі для стабілізації параметрів ТАІ. Будемо розглядати каскади з спільним колектором із позитивною реактивністю між колектором і базою, охоплені паралельним, послідовним та паралельно-послідовним зворотнім зв'язком.

При визначенні впливу зворотнього зв'язку на параметри ТАІ будемо використовувати спрощені еквівалентні схеми[2], тому аналіз буде нести більш якісний характер, окрім того будемо розглядати випадки, коли параметри ТАІ визначаються опором зворотнього зв'язку та навантаження. Для спрощення аналізу будемо вважати, що опір в колах негативного зворотнього зв'язку (H_{33}) є активним. Розглянемо кожну з видів H_{33} окремо.

А) ТАІ з паралельним H_{33} .

Каскад із паралельним H_{33} наведено на рис. 1

Для проведення аналізу впливу паралельного H_{33} представимо транзистор в схемі на рис. 1 у вигляді спрощеної еквівалентної схеми з врахуванням впливу R''_{33} (рис. 2)[3]. Переутворюючи трикутник утворений опорами Z_e , Z_δ та R''_{33} в еквівалентну зірку, отримаємо розрахункову схему рис. 3. :

$$\text{де } R_1 = \frac{Z_e R''_{33}}{R''_{33} + Z_e + Z_\delta}, \quad R_2 = \frac{Z_e Z_\delta}{R''_{33} + Z_e + Z_\delta}, \quad R_3 = \frac{R''_{33} Z_\delta}{R''_{33} + Z_e + Z_\delta}, \quad (1)$$

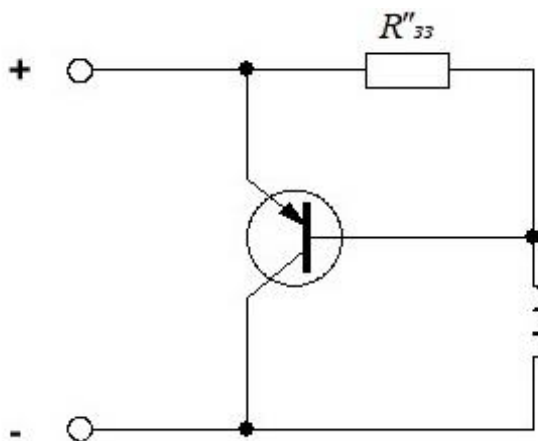


Рис. 1. Базова схема транзистора для проведення аналізу впливу паралельного H_{33}

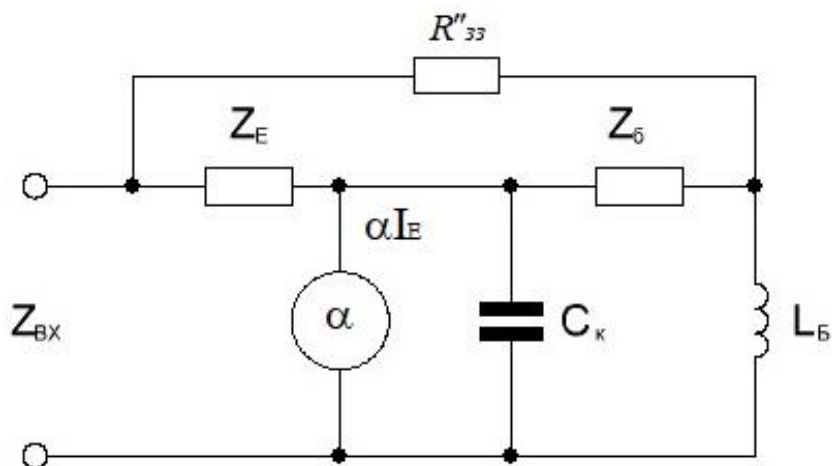


Рис. 2. Спрощена еквівалентна схема з врахуванням впливу R''_{33}

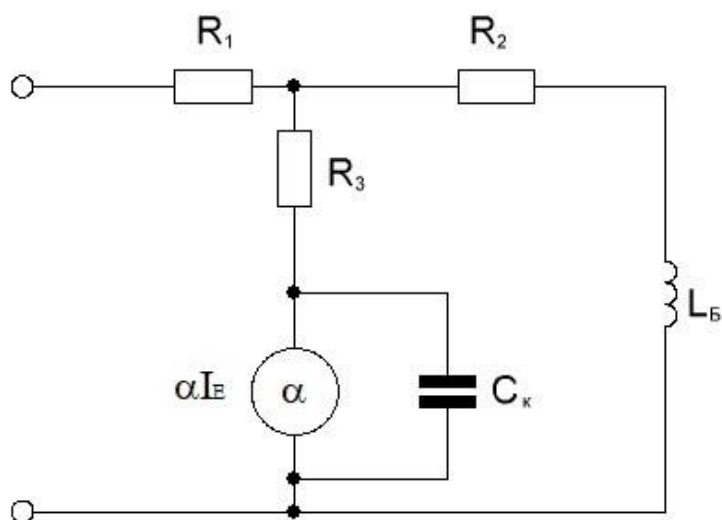


Рис. 3. Розрахункова схема, отримана переутворюючи трикутник в еквівалентну зірку

Застосовуючи метод контурних струмів для рис. 2 з врахуванням, що $I_e = I$, отримаємо

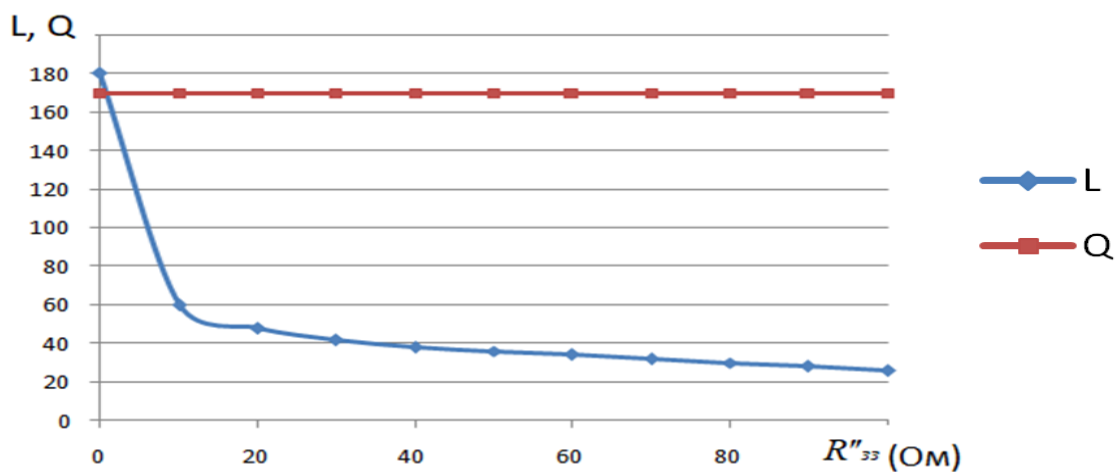


Рис. 4. Графіки залежностей еквівалентної індуктивності і добротності в функції глибини негативного зворотнього зв'язку

$$U_{\text{ex}} = I_1(R_1 + R_3 + j\omega L_\delta) - I_2(j\omega L_\delta - R_3), \quad (2)$$

$$U = I_2 \left(R_3 + R_2 + j\omega L_\delta + \frac{1}{j\omega C_\kappa} \right) - I_1 \left(R_3 + j\omega L_\delta - \alpha \frac{1}{j\omega C_\kappa} \right), \quad (3)$$

Виходячи з (3) визначимо I_2 :

$$I_2 = \frac{I_1 \left(R_3 + j\omega L_\delta - \frac{\alpha}{j\omega C_\kappa} \right)}{\left(R_3 + R_2 + j\omega L_\delta - j \frac{1}{\omega C_\kappa} \right)}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{I_1} = R_1 + R_3 + j\omega L_\delta - R_3 + \frac{j \left(\omega L_\delta + \frac{\alpha}{\omega C_\kappa} \right)}{R_1 + R_3 + j \left(\omega L_\delta - \frac{1}{\omega C_\kappa} \right)}, \quad (5)$$

Виконавши необхідні перетворення і розділивши дійсні та уявні частини отримаємо вираз для визначення еквівалентного активного та реактивного опорів, індуктивності та добротності:

$$R = \frac{A_1 P + K A_2}{P^2 + K^2}, \quad (6)$$

$$X = \frac{A_2 P - A_1 K}{P^2 + K^2}, \quad (7)$$

$$L = \frac{A_2 P - A_1 K}{\omega(P^2 + K^2)}, \quad (8)$$

$$Q = \frac{A_2 P - A_1 K}{A_1 P - A_2 K}, \quad (9)$$

де $A_1 = NP + \omega L_\delta(e - k) + R_3^2$; $A_2 = NK - R_3 e + \omega L_\delta(p - R_3)$;

$A_3 = R''_{33} + Z_\delta + Ze$; $N = R_1 + R_3$; $P = R_3 + R_2$.

На основі виразів (6 - 9) були проведені розрахунки залежностей R, X, L, Q в функції глибини паралельного негативного зворотнього зв'язку.

Графіки залежностей еквівалентної індуктивності і добротності в функції глибини негативного зворотнього зв'язку представлені на рис. 4. Як видно з рисунків збільшення глибини НЗЗ призводить до зменшення добротності, а індуктивність практично не змінюється. А відповідно паралельний НЗЗ може бути використаний для стабілізації добротності, при чому опір НЗЗ має незначну величину.

В) Каскад з послідовним зворотнім зв'язком по змінному струмі і спрощена еквівалентна схема для розрахунку зображена на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

Використовуючи метод контурних струмів і виконуючи неважкі перетворення отримаємо вираз для визначення вхідного активного та реактивного опорів, індуктивності, добротності:

$$R = \frac{(Z_\delta + R_{33})[(Z_\delta + R_{33})m - \delta] + K(\tau - \omega L_\delta R_{33})}{(Z_\delta + R_{33})^2 + K^2}, \quad (10)$$

$$X = \frac{(Z_\delta + R_{33}) + [\tau + \omega L_\delta(R_{33} + 2Z_\delta)] - K[(Z_\delta + R_{33})m - \delta]}{(Z_\delta + R_{33})^2 + K^2}, \quad (11)$$

$$L = \frac{X}{\omega}, \quad Q = \frac{X}{R},$$

де $K = \omega L_\delta - \frac{1}{\omega C_\kappa}$; $m = Z_\delta - Ze$; $l = \omega L_\delta + \frac{1}{\omega C_\kappa}$;

$$\delta = \omega L_{\delta}(K + e) - Z_{\delta}^2; \quad \tau = Km + Z_{\delta}e;$$

На рис. 7 представлені графіки залежностей L, Q в функції глибини послідовного негативного зворотнього зв'язку при змінному струмі.

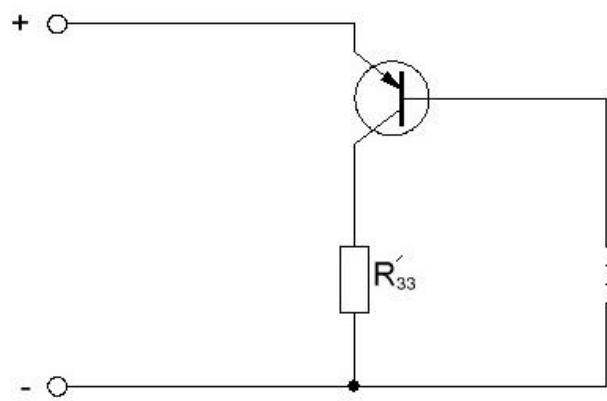


Рис. 5. Каскад з послідовним зворотнім зв'язком по змінному струмі

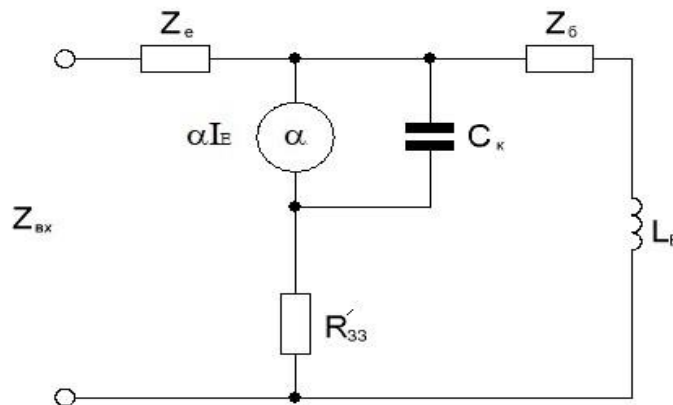


Рис. 6. Спрощена еквівалентна схема для розрахунку

Як видно з рисунку – послідовний НЗЗ здійснює стабілізуючу дію на індуктивність, добротність, проте остання різко зменшується при введенні послідовного опору в коло колектора.[4]

С) Каскад із паралельно-послідовним НЗЗ.

Каскад із паралельно-послідовним НЗЗ при постійному струмі, та його спрощена еквівалентна схема для розрахунку зображені на рис. 8, 9.

На розрахунковій схемі рис. 9 значення опорів R_1, R_2, R_3 ; визначаються на основі формул (1).

Використовуючи метод контурних струмів [5] проведемо розрахунок вхідного опору, індуктивності та добротності схеми рис. 9.

Вирази для визначення цих величин мають вигляд:

$$L = \frac{BA - KM}{\omega(B^2 + K^2)}, \quad Q = \frac{BA - KM}{MB + KA}, \quad (12)$$

Де $M = NB - \omega L_0(k + l) - R_3^2$;
 $A = \omega L_0(B + R_3) + KN + lR_3$;
 $B = R_2 + R_3 + R'_{33}$; $N = R_1 + R_3$.

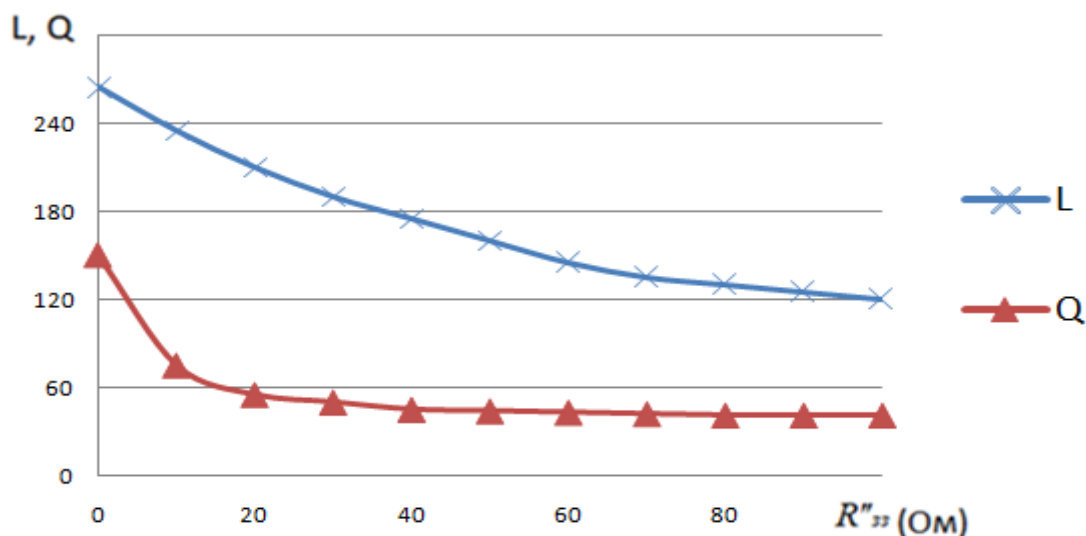


Рис. 7 .Графіки залежностей L, Q в функції глибини послідовного негативного зворотнього зв'язку при змінному струмі.

Графіки залежності $L_{екв}, Q_{екв}$ в функції глибини послідовного R'_{33} ; та паралельного НЗЗ представлені на рис. 10 при змінному та постійному струмі дозволяє стабілізувати параметри транзисторних аналогів індуктивності при взаємодії таких дестабілізуючих факторів як нестабільність джерел живлення, зміну температури в діапазоні до $+50^\circ$ для германієвих та $+70^\circ$ для Si – транзисторів[6]. Проте при зміні температури в більш широкому діапазоні, тобто перехід в негативні області потребує прийняття додаткових заходів.

Температурна стабільність значно покращується при заміні постійних опорів температурно-чутливими елементами[7]. Одна із схем ТАІ з використанням термочутливого елемента в колі живлення представлена на рис. 11. Характеристика такого елемента підбирається експериментальним шляхом. З цією метою постійний опір в колі зворотнього зв'язку замінюється змінним, та змінюється температура відбиваючого середовища в межах $\pm C$ [8]. Для кожного значення температури підбирається величина опору, при якій величина добротності та індуктивності залишається постійною[9]. В результаті виходить необхідна характеристика термокомпенсуючого елемента.

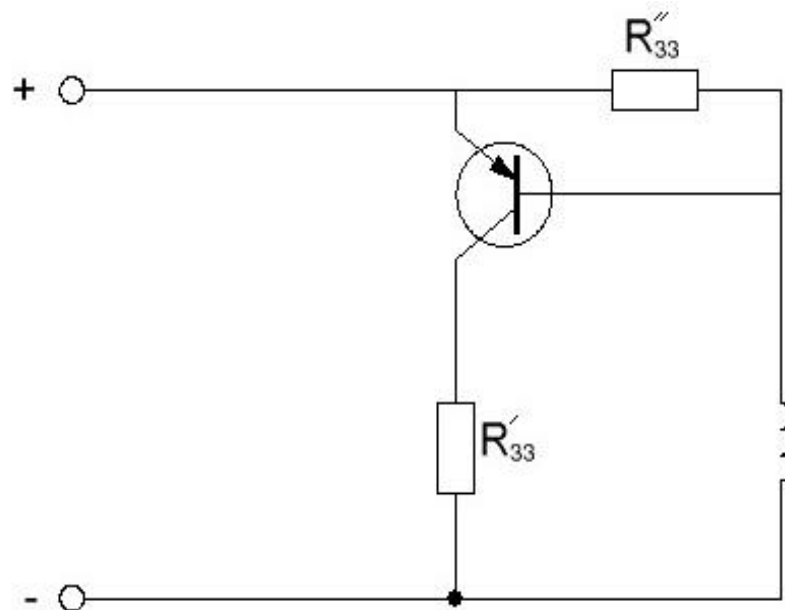


Рис. 8. Каскад із паралельно-послідовним НЗЗ при постійному струмі

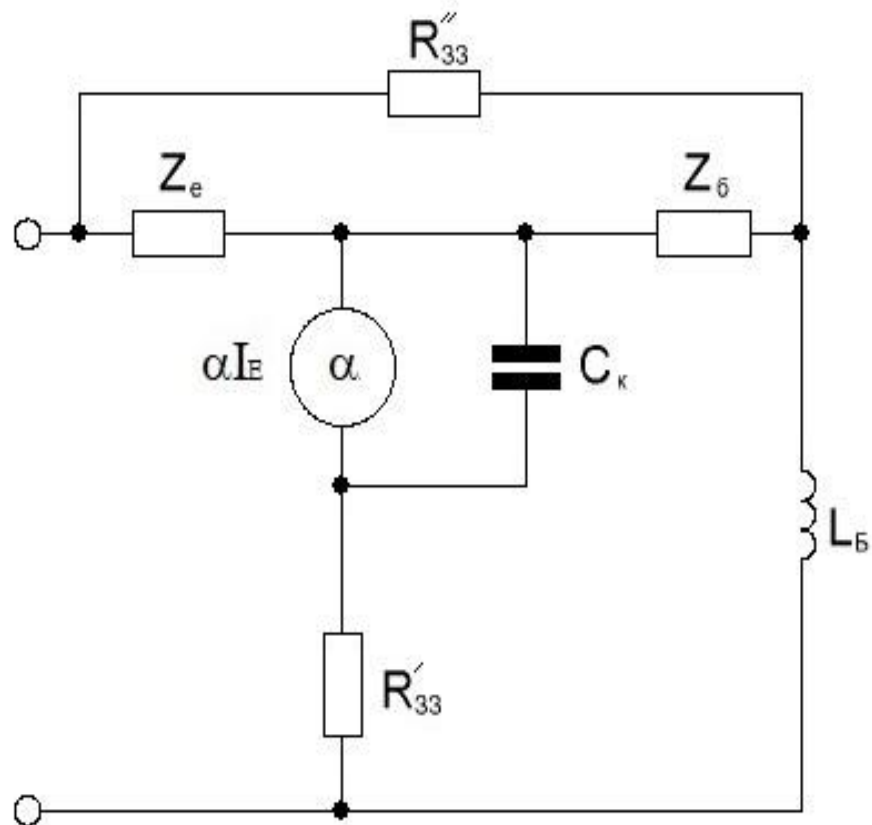


Рис. 9 . Розрахункова спрощена еквівалентна схема каскаду із паралельно-послідовним НЗЗ при постійному струмі

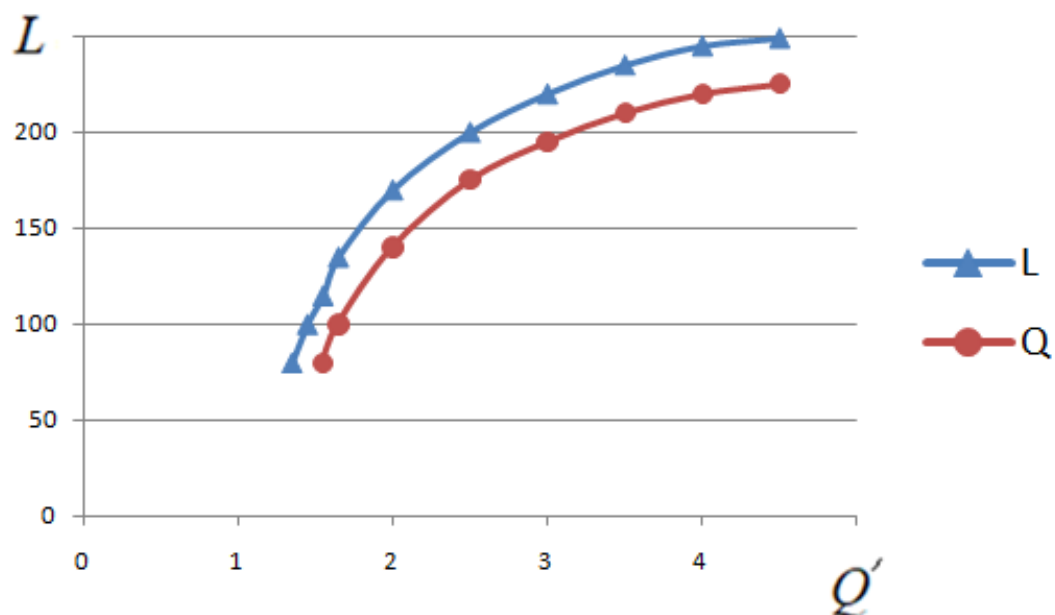


Рис. 10. Графіки залежності $L_{екв}, Q_{екв}$ в функції глибини послідовного R'_{33} ; та паралельного НЗЗ

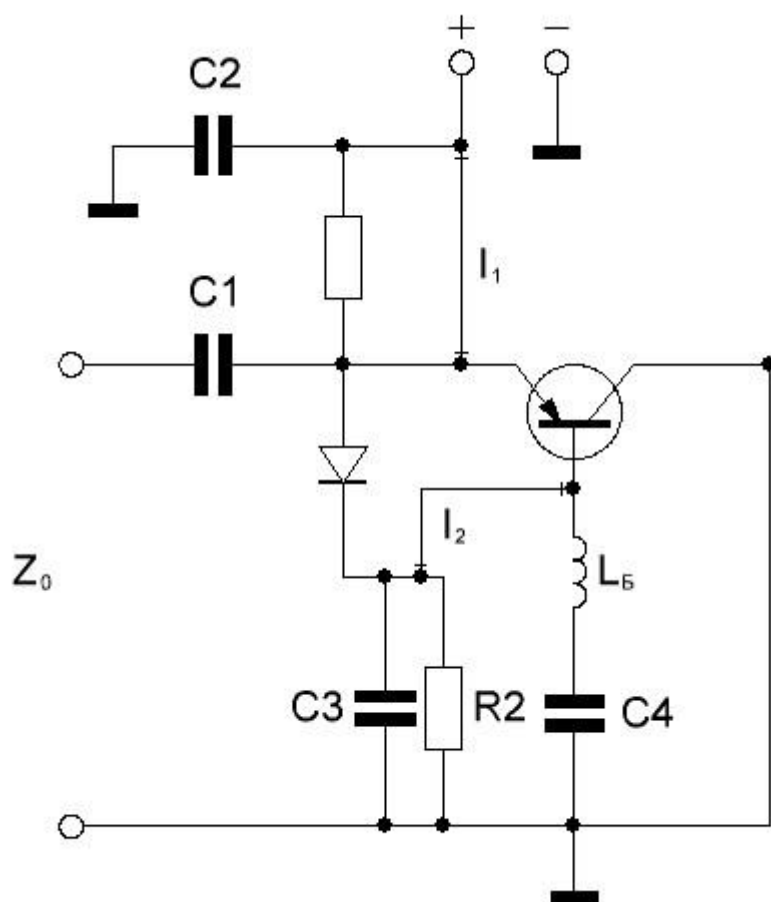


Рис. 11. Схема ТАІ з використанням термочуттєвого елементу в колі живлення

Висновки

1. Аналізуючи отримані результати - бачимо, що послідовний НЗЗ здійснює стабілізуючу дію на індуктивність, добротність, проте остання різко зменшується при введенні послідовного опору в коло колектора.

2. Залежність індуктивності та добротності в функції глибини послідовного зворотнього зв'язку та паралельного негативного зворотнього зв'язку при змінному та постійному струмі дозволяє стабілізувати параметри транзисторних аналогів індуктивності при взаємодії таких дестабілізуючих факторів як нестабільність джерел живлення, зміну температури в діапазоні до $+50^{\circ}$ для германієвих та $+70^{\circ}$ для Si – транзисторів, однак, при зміні температури в більш широкому діапазоні, тобто перехід в негативні області потребує прийняття додаткових заходів.

Література

1. Ромашко В. Я., Батрак Л. М. Теорія електричних кіл-2. Нелінійні електричні кола : навч. посіб. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2020. 88 с.
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 183 с.
3. Філінюк М. А., Войцеховська О. В.. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негatronів. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 189 с.
4. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором та ін. Вінниця : ВНТУ, 2011. 336 с.
5. В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник у 4 т. Т. 1. Аналогові та імпульсні пристрої /]. – Харків: Фоліо, 2002. – 510 с.
6. O. Faruqe, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, PP. 57-64
7. Осадчук О. В., Семенов А. О. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором : Вісник Хмельницького національного університету. 2005. № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 256–259.
8. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Том I. Теоретичні і фізичні основи негatronіки. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 456 с.
9. S. Diao, Y. Wang, C. Wang VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.

References

1. Romashko V. Ya., Batrak L. M. *Teoriia elektrychnykh kil-2. Neliniini elektrychni kola : navch. posib.* [Theory of electrical circuits-2. Nonlinear electrical circuits: a tutorial.] Kyiv – KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2020. – 88 s. [in Ukrainian].
2. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Semenov A. O. *Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom : monohrafiia* [Generators of electrical oscillations based on transistor structures with negative resistance: monograph]. Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 183 s. [in Ukrainian].
3. Filyniuk M. A., Voitsekhovska O. V. *Elementy ta prystroi avtomatyky na osnovi neliniinykh vlastyvostei dynamichnykh nehatroniv : monohrafiia* [Elements and devices of automation based on the nonlinear properties of dynamic negatrons: monograph]. Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. – 189 s. [in Ukrainian].
4. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Semenov A. O. *Funktsionalni vuzly radiovymiriuvalnykh pryladiv na osnovi reaktyvnykh vlastyvostei tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom : monohrafiia* [Functional nodes of radio measuring instruments based on the reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph]. Vinnytsia : VNTU, 2011. — 336 s. [in Ukrainian].
5. *Elektronika i mikroskhemotekhnika : Pidruchnyk u 4 t. T. 1. Analohovi ta impulsni prystroi* [Electronics and microcircuitry: A textbook on v4. V. 1. Analog and pulse devices] / [ta in.] / Kharkiv: Folio, 2002. – 510 s. [in Ukrainian].
6. O. Faruqe, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, PP. 57-64 [in English].
7. Osadchuk O. V., Semenov A. O. *Matematychnе modeliuвання heneratora NVCh na osnovi tranzystornoї struktury z vid'iemnym oporom : [Mathematical modeling of a microwave generator based on a transistor structure with negative resistance]* *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University.* – 2005. – № 4, Ch. 1, T. 2. – S. 256–259. [in Ukrainian].
8. Filyniuk M. A. *Osnovy nehatroniky. Tom I. Teoretychni i fizychni osnovy nehatroniky : monohrafiia* [Fundamentals of negatronics]. Volume I. Theoretical and physical foundations of negatronics: monograph] – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. 456 s. [in Ukrainian].
9. S. Diao, Y. Wang, C. Wang VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4. [in English].