

Олександр ОСАДЧУК
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>
e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Ярослав ОСАДЧУК
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>
e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Денис ДУМЕНКО
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4051-9355>
e-mail: doomdenny@gmail.com

СТАБІЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ

У статті проаналізовано методи стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності (TAI), визначено їх переваги та недоліки. Розглянуто шляхи реалізації завдяки яким вдається ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів, таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння та інших. Виокремлені універсальні засоби для стабілізації параметрів усіх транзисторних пристроїв. Розглянуті стабілізація робочого режиму на постійному струмі та негативний зворотній зв'язок (НЗЗ) на змінному струмі. Здійснено оцінку режиму нестабільності параметрів TAI по величині приросту еквівалентної індуктивності та добротності. Визначена методика при стабілізації параметрів TAI, а також пристроїв надвисоких частот, в кожному конкретному випадку описана необхідність вибору допустимої нестабільності робочої точки, здійснення розрахунку нестабільності параметрів, що очікується, після чого задля отримання заданої стабільності введення негативного зворотнього зв'язку по змінному струму. Наведені графіки залежності еквівалентної добротності від температури та графіки залежності еквівалентної індуктивності від температури. Наведено вираз приросту індуктивності у випадку, коли основну дестабілізуючу дію на робочий режим транзистора здійснює зміна зворотнього струму колектора, коефіцієнт передачі по струму, напругу колектор – база, напругу емітер – база, струм емітера. Проведено розрахунок коефіцієнта режимної нестабільності. Розглянуто ефективність стабілізуючих впливів від негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі, яка сприяє стабілізації практично всіх параметрів TAI. В якості параметра, що характеризує властивості TAI при наявності і відсутності зворотнього зв'язку розглянуто індуктивність. Наведено вираз для відносної похибки індуктивності при наявності НЗЗ на змінному струмі.

Ключові слова: параметри; стабілізація; нестабільність; транзистор; TAI; сигнал; рівень; НВЧ; робоча точка; змінний струм; зворотній зв'язок; емітер; колектор; база; індуктивність; добротність; навантаження.

Olexander OSADCHUK, Jaroslav OSADCHUK, Denys DUMENKO
Vinnytsia National Technical University

STABILIZATION OF TRANSISTOR ANALOGUES OF INDUCTANCE PARAMETERS

The article analyzes methods for stabilizing the parameters of transistor analogues of inductance (TAI), their advantages and disadvantages are determined. Ways of implementation are considered, thanks to which it is possible to weaken the influence of all destabilizing factors, such as temperature, instability of power supplies, production variation of parameters, changes in parameters due to aging, and others. Allocated universal means to stabilize the parameters of all transistor devices. The stabilization of the operating mode at direct current and negative feedback at alternating current are considered. An assessment of the mode of instability of the parameters of the TAI was carried out by the magnitude of the increase in the equivalent inductance and quality factor. A technique for stabilizing the parameters of the TAI, as well as microwave devices, is defined, in each specific case, the need to select the allowable instability of the operating point, to perform the expected calculation of the instability of the parameters, and then to obtain the desired stability, input negative feedback on alternating current is described. The graphs of the dependence of the equivalent quality factor on temperature and the graphs of the dependence of the equivalent inductance on temperature are presented. An expression is given for the increase in inductance in the case when the main destabilizing effect on the operating mode of the transistor is a change in the reverse collector current, current transfer coefficient, collector-base voltage, emitter-base voltage, emitter current. The coefficient of regime instability was calculated. The effectiveness of stabilizing influences from negative feedback on alternating current, which contributes to the stabilization of almost all parameters of the TAI, is considered. Inductance is considered as a parameter characterizing the properties of TAI in the presence and absence of feedback. An expression is given for the relative error of inductance in the presence of NZS on alternating current.

Keywords: parameters; stabilization; instability; transistor; TAI; signal; level; UHF; working point; alternating current; feedback; emitter; collector; base; inductance; goodness; load.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Із поширенням транзисторних структур, як фундаментальної основи всіх електронних пристроїв, гостро виникає проблема регуляції параметрів та забезпечення їх стабільності у різних режимах роботи. А так як мініатюризація радіоелектронних пристроїв, на сьогоднішній день, досягає граничних рівнів, що можуть забезпечити технології виробництва радіоелектронних компонентів, то ця проблема є особливо актуальною. Відповідно, коли виникає необхідність замінити індуктивність транзисторною структурою, то транзисторний аналог індуктивності [1] є ще більш нестабільною одиницею системи, яка надчутлива до

зовнішніх та внутрішніх чинників. Виникає необхідність стабілізації параметрів ТАІ для коректної роботи всієї системи в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час постійно проводяться наукові дослідження, що аналізують проблематику та пропонують нові підходи до стабілізації параметрів, чи нові рішення в реалізації вже існуючих. Найбільш ґрунтовними дослідженнями серед опублікованих є роботи таких авторів як Берман Л.С., Андрєєв В.С., Ареф'єв О.О., Осадчук В.С., Dutta Roy S. C., Saito T., Lindmayer J.. Всі вони описують питання, що безпосередньо пов'язані з питаннями стабілізації параметрів чи аспекти індуктивних ефектів в напівпровідникових пристроях.

А оскільки тенденція мініатюризації та роботи на надвисоких частотах напівпровідникових пристроїв залишається однією з течій розвитку сучасного приладобудування, то ми потребуємо і подальших досліджень цієї проблематики.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері проблема все ще є актуальною і потребує вирішення та виявлення нових методів стабілізації, чи покращення існуючих. Різноманіття компонентної бази дозволяє покращувати розкид параметрів й досягати більш стабільної роботи системир[2]. Проте оскільки всі системи й задачі, що ставляться перед ними є унікальними, й ідеальних результатів досягти апріорі неможливо, то проблема потребує подальших досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз методів стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності, та способів ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів[3], таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння, тощо.

Виклад основного матеріалу.

Стабілізація параметрів ТАІ як і інших транзисторних пристроїв може бути здійснена двома шляхами:

- ізоляцією ТАІ від різного роду дестабілізуючих впливів;
- шляхом створення таких умов, при яких нестабільність параметрів транзисторів буде в найменшій степені здійснюватися на стабільність параметрів ТАІ, або пристроїв на основі ТАІ[4].

Для нас інтерес представляє другий спосіб, так як він дозволяє одночасно ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів, таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння і т.д.

Тому при стабілізації параметрів ТАІ, а також пристроїв НВЧ на їх необхідно в кожному конкретному випадку вибирати допустиму нестабільність робочої точки[5], здійснити розрахунок очікуємої нестабільності параметрів, а після для отримання заданої стабільності ввести негативний зворотній зв'язок по змінному струму.

Оцінку режиму нестабільності параметрів ТАІ будемо здійснювати по величині приросту еквівалентної індуктивності та добротності.

Якщо припустити, що основну дестабілізуючу дію на робочий режим транзистора здійснює зміна зворотнього струму колектора i_{k0} , коефіцієнт передачі по струму α , напругу колектор – база, напругу емітер – база, струм емітера[6], то вираз для приросту індуктивності та добротності можна представити у вигляді

$$dL = \frac{\partial L}{\partial i_{k0}} di_{k0} + \frac{\partial L}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial L}{\partial U_{кБ}} dU_{кБ} + \frac{\partial L}{\partial U_{БЕ}} dU_{БЕ} + \frac{\partial L}{\partial I_E} dI_E, \tag{1}$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial i_{k0}} di_{k0} + \frac{\partial Q}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial Q}{\partial U_{кБ}} dU_{кБ} + \frac{\partial Q}{\partial U_{БЕ}} dU_{БЕ} + \frac{\partial Q}{\partial I_E} dI_E, \tag{2}$$

Перейдемо до кінцевих приростів

$$\Delta L = B_i^L \Delta I_{k0} + B_\alpha^L \Delta \alpha + B_K^L \Delta U_K + B_{U_{БЕ}}^L \Delta U_E + B_{I_E}^L \Delta I_E, \tag{3}$$

$$\Delta Q = B_i^Q \Delta I_{k0} + B_\alpha^Q \Delta \alpha + B_K^Q \Delta U_K + B_{U_{БЕ}}^Q \Delta U_E + B_{I_E}^Q \Delta I_E, \tag{4}$$

де $B_i^L = \frac{\partial L}{\partial i_{k0}}$, $B_\alpha^L = \frac{\partial L}{\partial \alpha}$, $B_K^L = \frac{\partial L}{\partial U_K}$, $B_E^L = \frac{\partial L}{\partial I_E}$, $B_i^Q = \frac{\partial Q}{\partial i_{k0}}$, $B_\alpha^Q = \frac{\partial Q}{\partial \alpha}$, $B_K^Q = \frac{\partial Q}{\partial U_K}$, $B_E^Q = \frac{\partial Q}{\partial I_E}$.

по аналогії з (1) отримаємо вираз для коефіцієнта режимної нестабільності індуктивності.

$$S_L = B_i^L \Delta I_{k0} \left(1 + \frac{B_\alpha^L \Delta \alpha}{B_i^L \Delta I_{k0}} + \frac{B_K^L \Delta U_K}{B_i^L \Delta I_{k0}} + \frac{B_E^L \Delta I_E}{B_i^L \Delta I_{k0}} \right), \tag{5}$$

та добротності

$$S_Q = B_i^Q \Delta I_{k0} \left(1 + \frac{B_\alpha^Q \Delta \alpha}{B_i^Q \Delta I_{k0}} + \frac{B_K^Q \Delta U_K}{B_i^Q \Delta I_{k0}} + \frac{B_E^Q \Delta I_E}{B_i^Q \Delta I_{k0}} \right), \tag{6}$$

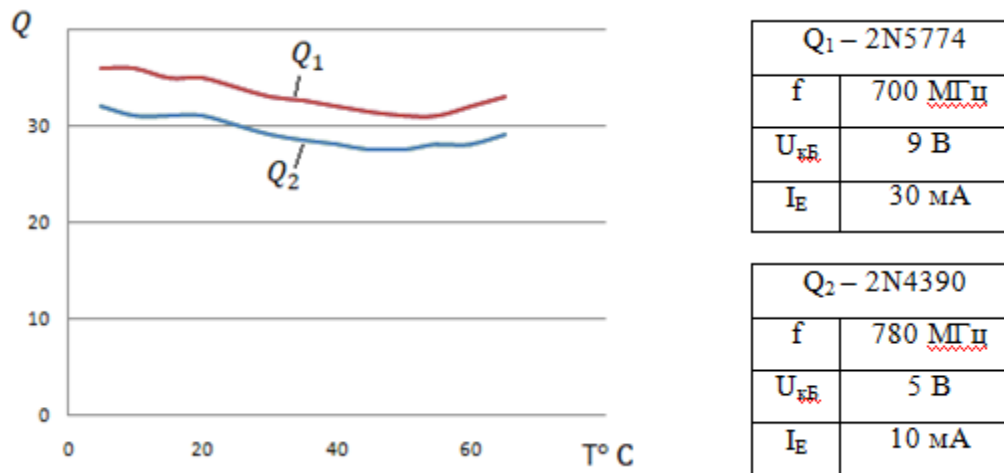


Рисунок 1 – Графік залежності еквівалентної добротності від температури

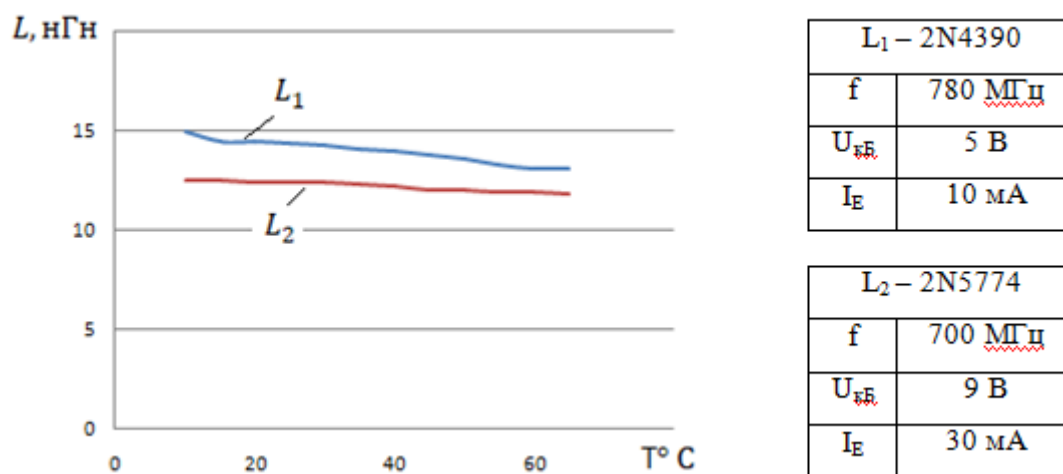


Рисунок 2 – Графік залежності еквівалентної індуктивності від температури

В кожному окремому випадку при розрахунку коефіцієнта режимної нестабільності, необхідно враховувати несумісність умов, що мають місце при переважанні різних видів нестабільностей. Тому їх варто розглядати окремо, а потім вибрати номінальне значення коефіцієнта режимної нестабільності для гіршого випадку [7].

Розглянемо ефективність стабілізуючих впливів від негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі, яка сприяє стабілізації практично всіх параметрів ТАІ.

В якості параметра, що характеризує властивості ТАІ при наявності і відсутності зворотнього зв'язку розглянемо наприклад, індуктивність. Вираз для відносної похибки індуктивності при наявності НЗЗ на змінному струмі можливо визначити виразом [8]:

$$\frac{dL_{зз}}{L_{зз}} = \frac{1}{F} \cdot \frac{dL}{L}, \quad (7)$$

де \bar{L} - середнє значення індуктивності при відсутності НЗЗ;

F - глибина НЗЗ, визначається відносно вихідних зажимів каскада із спільним колектором.

Аналіз впливу НЗЗ на параметри транзисторних пристроїв наведено в [9].

На основі цього аналізу можна зробити вивід, що вибір того, чи іншого методу стабілізації визначається конкретними схемами каскадів. При цьому необхідно враховувати також вплив стабілізації робочого режиму.

Одним із методів стабілізації параметрів ТАІ, також як і в інших транзисторних пристроях є використання негативного зворотнього зв'язку на постійному струмі, яка дозволяє автоматично керувати базовим зміщенням.

Для цих цілей може бути використаний паралельний, послідовний і паралельно-послідовний зворотній зв'язок.

Дослідження, наведені в роботі [10], в області низьких частот, показали, що дія паралельного НЗЗ на постійному струмі в випадку, якщо опір навантаження є мало ефективним. Так як в області НВЧ узгоджені навантаження опором 50 або 75 Ом, то застосування даного методу стабілізації є малоефективним, що підтвердили теоретичні та експериментальні дослідження. Застосування послідовного

НЗЗ на постійному струмі дозволяє стабілізувати напругу живлення, проте в випадку коливань температури цей метод є також малоефективним[11].

Застосування комбінованого НЗЗ на постійному струмі також не призводить до бажаних результатів, оскільки його введення призводить до зменшення добротності еквівалентної індуктивності[12].

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного аналізу можна зробити вивід, що вибір того, чи іншого методу стабілізації визначається конкретними схемами каскадів. При цьому необхідно враховувати також вплив стабілізації робочого режиму.

А також варто підкреслити, що застосування комбінованого НЗЗ на постійному струмі також не призводить до бажаних результатів, оскільки його введення призводить до зменшення добротності еквівалентної індуктивності.

Література

1. Теорія електричних кіл-2. Нелінійні електричні кола. навч. посіб. для студ. спеціальності 171 / В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак. – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2020. – 88 с.
2. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 183 с.
3. Філінюк М. А. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негатронів : монографія / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 189 с.
4. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов та ін. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 336 с.
5. Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник у т4. Т. 1. Аналогові та імпульсні пристрої / [В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін.] – Харків: Фоліо, 2002. – 510 с.
6. O. Faruq, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
7. Осадчук О. В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 256–259.
8. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Том I. Теоретичні і фізичні основи негатроніки : монографія / М. А. Філінюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
9. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, 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. Theory of electric circuits-2. Nonlinear electric circuits. education manual for students specialties 171 / V. Ya. Romashko, L. M. Batrak. - Kyiv: Ihor Sikorskyi KPI, 2020. - 88 p.
2. V. S. Osadchuk Generators of electric oscillations based on transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 183 p.
3. M. A. Filynyuk Elements and devices of automation based on nonlinear properties of dynamic negatrons: monograph / M. A. Filynyuk, O. V. Voytsekhovska. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. – 189 p.
4. Functional nodes of radio measuring devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov, et al. — Vinnytsia: VNTU, 2011. — 336 p.
5. Electronics and microcircuit technology: Textbook in volume 4. T. 1. Analog and pulse devices / [V. I. Senko, M. V. Panasenکو, E. V. Senko, etc.] - Kharkiv: Folio, 2002. - 510 p.
6. O. Faruq, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, pp. 57-64
7. O. V. Osadchuk Mathematical modeling of a microwave generator based on a transistor structure with negative resistance / O. V. Osadchuk, A. O. Semenov // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. – 2005. – No. 4, Part 1, Volume 2. – P. 256–259.
8. Filynyuk M. A. Fundamentals of negatronics. Volume I. Theoretical and physical foundations of negatronics: a monograph / M. A. Filynyuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 456 p.
9. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, 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.