

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.318>
УДК 621.375.4

О.Д. Христенко

Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: alkhrist@gmail.com

ПРОСТИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПОЗАСМУГОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ РАДІОЧАСТОТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Предмет і мета роботи. Методи визначення і забезпечення стабільності радіочастотних (РЧ) підсилювачів досить активно розвиваються протягом останніх десятиріч, однак більшість із них не зручні для практичного використання. Найпопулярніша на цей час методика полягає в комбінації аналітичних і графічних методів, що вимагає високої кваліфікації користувача та використання ліцензійного програмного забезпечення. Також відсутній чіткий алгоритм підвищення високочастотної позасмугової стабільності підсилювачів. Оптимальне рішення для кожної окремої схеми доводиться шукати методом поступових наближень. Метою роботи є розробка простого методу, який дозволить ефективно підвищувати високочастотну позасмугову стабільність РЧ підсилювачів і надійність систем підсилення сигналу, особливо таких складних, які мають низькочастотні радіотелескопи.

Методи і методологія. Для розрахунку параметрів РЧ підсилювачів і пасивних схем використовувався метод комп'ютерного моделювання. Моделювання проводилось на основі S-параметрів РЧ підсилювачів, наданих їх виробниками. Стабільність підсилювачів визначалася за K-фактором стабільності.

Результати. Розроблено простий метод підвищення високочастотної позасмугової стабільності РЧ підсилювачів, який полягає в підключенні до підсилювача послідовно з навантаженням стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$. Запропоновано оригінальну методику розрахунку такого кола. Також запропоновано міру, що дозволяє оцінювати практичний запас високочастотної стабільності РЧ підсилювачів і порівнювати їх між собою. Запропонований метод не потребує використання ліцензійного програмного забезпечення.

Висновки. Пропонований метод дозволяє суттєво підвищити високочастотну стабільність РЧ підсилювачів за межами смуги робочих частот, спростити технологічні вимоги до конструкції, а також зробити більш доступним їх використання. Параметри підсилювача в робочому діапазоні частот залишаються при цьому без суттєвих змін.

Ключові слова: S-параметри, радіочастотний підсилювач, схема Дарлінгтона, K-фактор стабільності.

Вступ

Радіочастотні (РЧ) підсилювачі використовуються у різних галузях науки і техніки, зокрема в радіоастрономії. На їх основі побудовані сис-

теми підсилення низькочастотних радіотелескопів ГУРТ, УТР-2, LOFAR та ін. Разом з високою лінійністю і низьким рівнем власних шумів, стабільність є одним із найважливіших параметрів

Цитування: Христенко О.Д. Простий метод підвищення високочастотної позасмугової стабільності радіочастотних підсилювачів. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 4. С. 318–328. <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.318>

Citation: Khristenko, A.D., 2023. A simple method for improving out-of-band high-frequency stability of radio frequency amplifiers. *Radio Phys. Radio Astron.*, 28(4), pp. 318–328. <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.318>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

РЧ підсилювача. Очевидно, що з частковою втратою підсилення і деяким підвищенням власних шумів підсилювач зберігає свою працездатність, а втрата стабільності робить його непридатним до експлуатації. Висока стабільність РЧ підсилювачів особливо важлива в таких складних системах, як низькочастотні радіотелескопи. Наприклад, у системі підсилення радіотелескопа УТР-2 використовується понад 100 РЧ підсилювачів, десятки різноманітних фільтрів, сотні електромагнітних реле і високочастотних роз'ємів та кілометри радіочастотних кабелів [1]. Вихід з ладу або різка зміна імпедансу навіть поза смугою робочих частот телескопа будь-якого з цих елементів може призвести до втрати узгодження на вході або виході одного з РЧ підсилювачів, що підвищує ризик його самозбудження. За відсутності стабільності самозбудження може виникати при будь-якому перенаведенні діаграми направленості радіотелескопа, яке забезпечується перемиканням високочастотних реле, що обов'язково призводить до значних змін імпедансу у всьому діапазоні робочих частот підсилювачів. Втрата стабільності (автогенерація) лише одного з підсилювачів може призвести до часткової або повної втрати інформації під час радіоастрономічних спостережень.

Окрім надійності, висока стабільність надає РЧ підсилювачу додаткові можливості: поглиблення негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) задля підвищення динамічного діапазону і розширення робочої смуги частот, корекції частотної характеристики та ін. У зв'язку з цим розробники навіть низькочастотних радіотелескопів часто використовують дискретні транзистори або мікросхеми, які здатні працювати в діапазоні від низьких до надвисоких частот (декількох одиниць або десятків гігагерців). Тож, підвищена стабільність РЧ підсилювачів дає можливість використовувати їх більш гнучко та ефективно. Однак забезпечення стабільності надшироко-смугових підсилювальних елементів пов'язане з деякими технологічними труднощами виконання умов підключення вхідних і вихідних кіл. З огляду на це метою роботи є розробка простого і доступного методу підвищення стабільності надшироко-смугових підсилювачів, послідовної методики розрахунку елементів схеми та спрощення технологічних вимог до конструкції та-

ких підсилювачів, що зробить більш доступним їх використання.

Сучасна методика забезпечення стабільності РЧ підсилювачів передбачає застосування комбінації аналітичних і графічних методів [2, 3]. Стабільність підсилювача характеризується K -фактором стабільності (або його аналогами), який розраховується через S -параметри [4]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{12}||S_{21}|},$$

де $D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$.

Частотний діапазон безумовної стабільності підсилювача визначається умовами, коли $K > 1$ і $|D| < 1$. Якщо хоча б одна з цих умов не виконується, певне неузгодження навантажень підсилювача може призвести до паразитної генерації. У такому випадку для забезпечення стабільності на вході і (або) виході РЧ підсилювача вводять стабілізуювальні RLC -кола. Для розрахунку цих кіл проводиться аналіз залежності стабільності від імпедансів джерела сигналу і навантаження.

Одним з кращих способів виявити, які імпеданси джерела сигналу і (або) навантаження викликають нестабільність РЧ підсилювача, — нанести кола стабільності на діаграму Сміта [5]. Коло стабільності джерела сигналу (навантаження) — це коло на діаграмі Сміта, яке є межею між тими значеннями імпедансу навантаження (джерела сигналу), які викликають нестабільність, і тими, які не викликають.

Щоб потенційна нестабільність стала неможливою, необхідно змінити розташування центра або радіус кола стабільності таким чином, щоб зона нестабільності опинилась за межами діаграми Сміта. Досягають цього введенням у схему стабілізуювальних кіл. Зауважимо, що необхідно проаналізувати кола стабільності не тільки з боку джерела сигналу, а й з боку навантаження.

Як бачимо, сучасна методика аналізу і забезпечення стабільності РЧ підсилювачів досить складна і потребує високої кваліфікації користувача та програмного забезпечення, яке в більшості випадків є ліцензійним. Саме тому ми вирішили розробити простий, але ефективний метод підвищення стабільності РЧ підсилювачів.

Для моделювання параметрів РЧ підсилювачів і пасивних схем ми використовували програму

QucsStudio-4.3.1 [6]. Ця програма розроблена групою ентузіастів і знаходиться у вільному доступі.

1. Аналіз запасу стабільності РЧ підсилювача GALI-74+

У своїй роботі ми вирішили не використовувати діаграми Сміта, а знайти більш простий спосіб розрахунку стабілізуючих кіл. Для цього нам необхідно було проаналізувати схему типового РЧ підсилювача, аби знайти причини втрати стабільності. Однак у технічній документації сучасних РЧ підсилювачів їх принципові схеми відсутні. Переважна більшість серед відомих нам РЧ підсилювачів побудовані на основі схеми Дарлінгтона. Тому, як приклад, розглянемо спрощену схему найбільш поширеного РЧ підсилювача Gali-74+ [7], який використовується в системі підсилення радіотелескопа LOFAR (рис. 1, а).

Спрощену схему РЧ підсилювача Gali-74+ (рис. 1, а) можна додатково спростити, змінивши конфігурацію Дарлінгтона (VT1, VT2) транзистором VTD (рис. 1, б). На рис. 1, б бачимо транзисторний каскад зі спільним емітером (СЕ) з комбінованим негативний зворотним зв'язком (НЗЗ). Для цієї схеми, з певною мірою спрощення, можна стверджувати [8], що

$$S_{21} = \frac{R_{зз} - R_e}{R_n + R_e}, \quad (1)$$

де S_{21} — коефіцієнт прямої передачі; $R_{зз}$ — опір зворотного зв'язку; R_e — опір в колі емітера; $Z_n = R_n$ — опір навантаження.

Рівняння (1) справедливе за дотримання умов $R_r = Z_n = R_n$, $R_{зз}R_e = R_nR_n$. Звідси випливає, що в узгодженому режимі S_{21} підсилювача визначається резисторами $R_{зз}$ і R_e . Це й не дивно, оскільки ці резистори утворюють два кола НЗЗ: паралельного за напругою через $R_{зз}$ і послідовного за струмом через R_e . Ретельний аналіз схеми з двома колами НЗЗ — задача досить непроста. Тим більше, що нам не відомі ні повна принципова схема, ні параметри використаних транзисторів. Тому будемо моделювати схеми РЧ підсилювачів, використовуючи їхні S-параметри. Звернемося до параметрів РЧ підсилювача Gali-74+ [9] (рис. 2).

При розгляді рис. 2 виникає враження, що імовірність втрати стабільності РЧ підсилювача

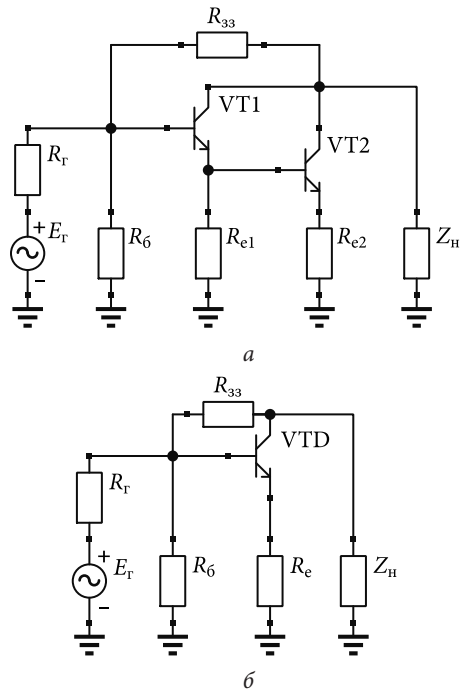


Рис. 1. Принципові схеми РЧ підсилювача Gali-74+: а — спрощена, б — надспрощена

чем Gali-74+ на частоті $f = 50$ МГц ($K = 1.05$) більша, ніж на частоті $f = 5.5$ ГГц ($K = 1.46$). Однак на практиці відбувається протилежне. Достатньо зменшити кількість отворів, що з'єднують відповідні ніжки мікросхеми Gali-74+ із «земляним» шаром друкованої плати, щоб підсилювач утратив стабільність на високій частоті. Причиною втрати стабільності в даному випадку є зростання паразитної індуктивності монтажу $L_{пар}$. Тобто більше значення K не завжди є ознакою більшого запасу стабільності підсилювача. Так само за частотною характеристикою K неможливо визначити, при якій величині $L_{пар}$ підсилювач утратить стабільність. Отже, для практичної оцінки запасу стабільності РЧ підсилювача нам потрібен додатковий критерій.

Для оцінки запасу стабільності ми використовуємо величину $L_{пар}$: чим з більшим значенням $L_{пар}$ підсилювач зберігає стабільність, тим більший його запас стабільності. На практиці $L_{пар}$ можна приблизно оцінити, знаючи товщину плати і кількість металізованих отворів, що з'єднують відповідні виводи РЧ підсилювача із «земляним» шаром. Для плати завтовшки 1 мм індуктивність кожного металізованого отвору становить приблизно $L_{пар} \approx 1$ нГн. Індуктивність

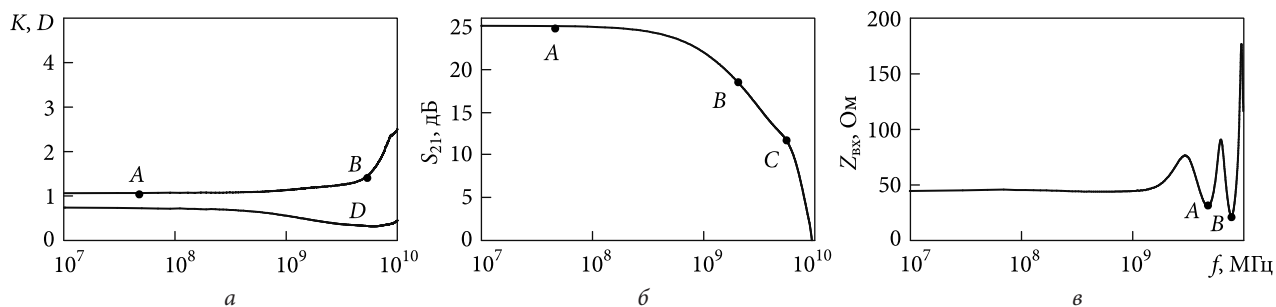


Рис. 2. Параметри Gali-74+ у стандартному включенні: *а* – K, D (точка $A - f = 50$ МГц, $K = 1.05$; точка $B - f = 5.5$ ГГц, $K = 1.46$); *б* – S_{21} (точка $A - f = 50$ МГц, $S_{21} = 25$ дБ; точка $B - f = 2.01$ ГГц, $S_{21} = 18.6$ дБ; точка $C - f = 5.5$ ГГц, $S_{21} = 11.8$ дБ); *в* – вхідний імпеданс $Z_{вх}$ (точка $A - f = 4.75$ ГГц, $Z_{вх} = 30.4 / -2.82^\circ$; точка $B - f = 7.72$ ГГц, $Z_{вх} = 22.1 / -7.1^\circ$)

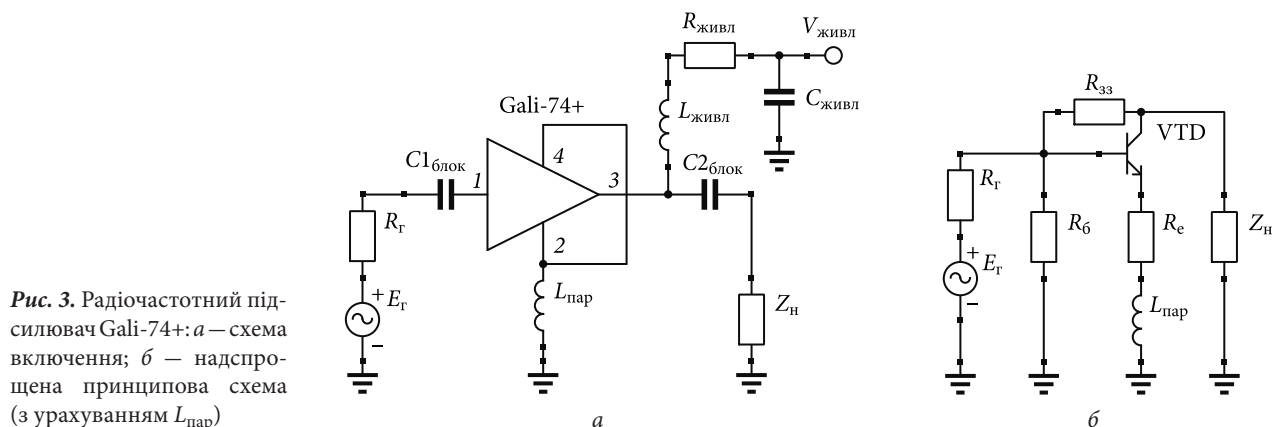


Рис. 3. Радіочастотний підсилювач Gali-74+: *а* – схема включення; *б* – надспрощена принципова схема (з урахуванням $L_{пар}$)

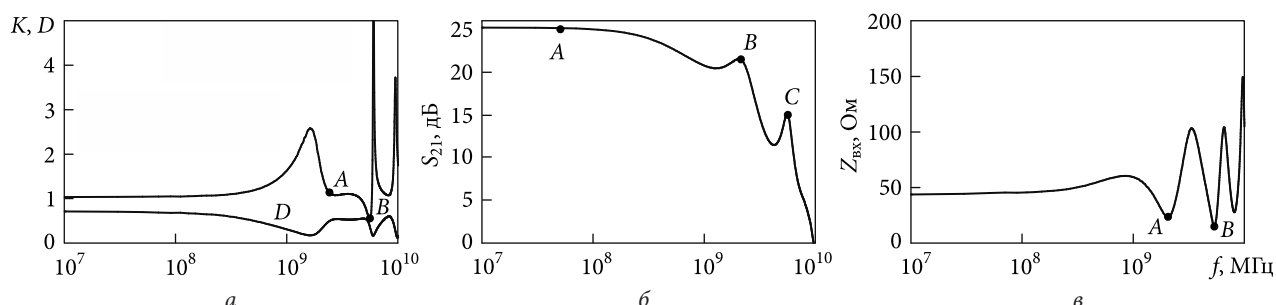


Рис. 4. Параметри Gali-74+ з $L_{пар} = 0.3$ нГн: *а* – K, D (точка $A - f = 2.45$ ГГц, $K = 1.13$, точка $B - f = 5.5$ ГГц, $K = 0.569$); *б* – S_{21} (точка $A - f = 50$ МГц, $S_{21} = 25$ дБ; точка $B - f = 2.05$ ГГц, $S_{21} = 21.4$ дБ; точка $C - f = 5.5$ ГГц, $S_{21} = 15$ дБ); *в* – $Z_{вх}$ (точка $A - f = 2.05$ ГГц, $Z_{вх} = 23.7 / 14.1^\circ$; точка $B - f = 5.32$ ГГц, $Z_{вх} = 15 / 11.3^\circ$)

трьох отворів, включених паралельно, приблизно $L_{пар} \approx 0.3$ нГн. Із власного досвіду додамо, що більшість РЧ підсилювачів, з якими нам доводилося працювати, втрачають безумовну стабільність з $L_{пар} \approx 0.3$ нГн.

Розглянемо параметри РЧ підсилювача Gali-74+ за наявності $L_{пар} \approx 0.3$ нГн. Схему включення Gali-74+ і його надспрощену принципову схему з урахуванням паразитної індуктивності $L_{пар}$ наведено на рис. 3.

Параметри РЧ підсилювача Gali-74+ з урахуванням паразитної індуктивності $L_{пар}$ наведено на рис. 4.

Як бачимо на рис. 4, паразитна індуктивність $L_{пар} = 0.3$ нГн призводить до резонансних максимумів S_{21} і мінімумів K на деяких частотах. Зокрема, на частоті $f = 5.5$ ГГц Gali-74+ втрачає безумовну стабільність ($K < 1$). Частоти, на яких K має резонансні мінімуми, ми називаємо частотами потенційної нестабільності $F_{пн}$. Для Gali-74+

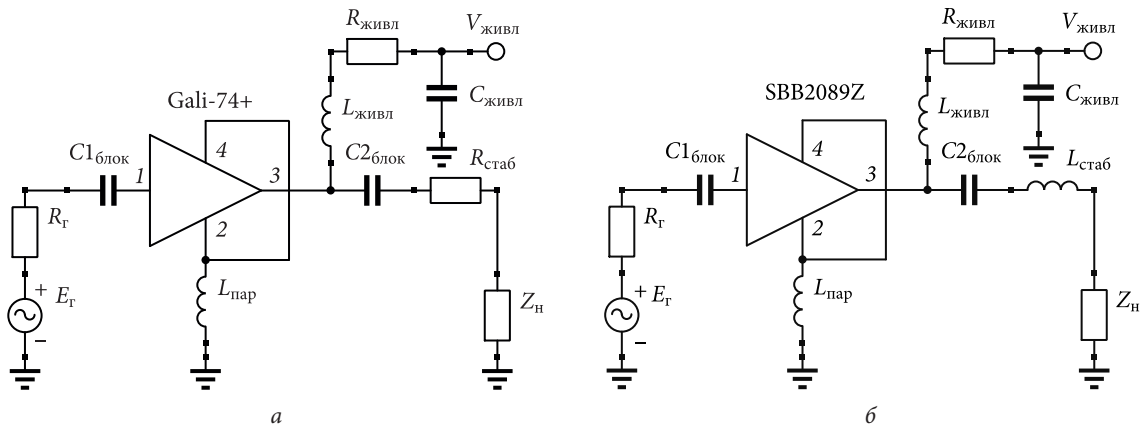


Рис. 5. Схеми включення РЧ підсилювачів з урахуванням $L_{\text{пар}}$: а – Gali-74+ із $R_{\text{стаб}}$; б – SBB2089Z із $L_{\text{стаб}}$

це частоти $F_{\text{пн1}} \approx 2.4$ ГГц і $F_{\text{пн2}} \approx 5.5$ ГГц. Саме на одній з цих частот РЧ підсилювач може втратити стабільність у першу чергу.

2. Універсальні методи підвищення високочастотної позасмугової стабільності РЧ підсилювачів

Стабільність РЧ підсилювачів можна підвищити підключенням на їх вході і (або) виході стабілізуювальних RLC-кіл [10]. Ці кола мають відповідні фазову і амплітудно-частотну характеристики (АЧХ). Однак у переважній більшості сучасні методи визначення схем стабілізуювальних кіл дають для кожного підсилювача своє оригінальне схематичне рішення. Є лише кілька універсальних схем, які можна застосувати до будь-якого РЧ підсилювача. Їх використання можливе, коли підсилювач буде безумовно стабільним при $S_{12} = 0$ [3]. Тобто зменшення S_{12} підсилювача призводить до збільшення його K .

2.1. Схема з послідовним резистором $R_{\text{стаб}}$

Найбільш простий і ефективний спосіб підвищення стабільності РЧ підсилювача – включення на вході (або виході) послідовно з навантаженням (або джерелом сигналу) резистора $R_{\text{стаб}}$ [5]. Як відомо, значну загрозу стабільності РЧ підсилювача становить ємнісне навантаження і режим короткого замикання у навантаженні. Саме цим двом загрозам протидіє включений послідовно з навантаженням $R_{\text{стаб}}$. Він, з одного боку, зменшує зсув фаз відбитого від навантаження

сигналу, а з іншого – послаблює його амплітуду шляхом зменшення S_{12} . Схему РЧ підсилювача Gali-74+, включеного таким чином, наведено на рис. 5, а, а її характеристики – на рис. 6.

Як бачимо на рис. 6, резистор $R_{\text{стаб}} = 110$ Ом забезпечує безумовну стабільність РЧ підсилювача Gali-74+ при наявності $L_{\text{пар}} = 0.3$ нГн. Зауважимо, що K підвищується як на нижніх, так і на верхніх частотах. Очевидно, що зі збільшенням $R_{\text{стаб}}$ буде зростати і K . Водночас цей метод має суттєвий недолік: зі збільшенням $R_{\text{стаб}}$ зменшується S_{21} і знижується вихідна потужність підсилювача. Приблизно такого ж підвищення K можна досягти включенням $R_{\text{стаб}}$ послідовно з джерелом сигналу. Однак у такому випадку зростуть шуми підсилювача. Ці недоліки обмежують використання схеми з послідовним резистором на практиці.

2.2. Схема з послідовною індуктивністю $L_{\text{стаб}}$

Інша універсальна схема підвищення стабільності РЧ підсилювачів – включення на виході послідовно з навантаженням додаткової індуктивності $L_{\text{стаб}}$ [11]. Така схема має індуктивний характер навантаження підсилювача на високих частотах поза смугою робочих частот, що є сприятливим фактором для підвищення його стабільності. На відміну від послідовного резистора, послідовна індуктивність послаблює відбитий від навантаження сигнал, не зменшуючи коефіцієнт підсилення у робочому діапазоні частот. Ця схема рекомендується для використання в технічній документації РЧ підсилювача SBB2089Z

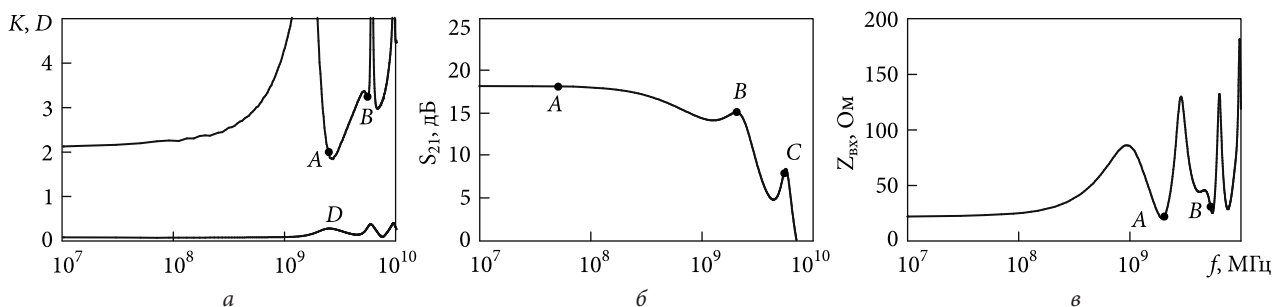


Рис. 6. Параметри Gali-74+ з $R_{\text{стаб}} = 110 \text{ Ом}$ і $L_{\text{стаб}} = 0.3 \text{ нГн}$: а – K, D (точка А – $f = 2.45 \text{ ГГц}$, $K = 1.97$; точка В – $f = 5.5 \text{ ГГц}$, $K = 3.22$); б – S_{21} (точка А – $f = 50 \text{ МГц}$, $S_{21} = 18 \text{ дБ}$; точка В – $f = 2.05 \text{ ГГц}$, $S_{21} = 14.9 \text{ дБ}$; точка С – $f = 5.5 \text{ ГГц}$, $S_{21} = 7.86 \text{ дБ}$); в – $Z_{\text{вх}}$ (точка А – $f = 2.05 \text{ ГГц}$, $Z_{\text{вх}} = 21.4 / 33.3^\circ$; точка В – $f = 5.32 \text{ ГГц}$, $Z_{\text{вх}} = 30 / 0.19^\circ$)

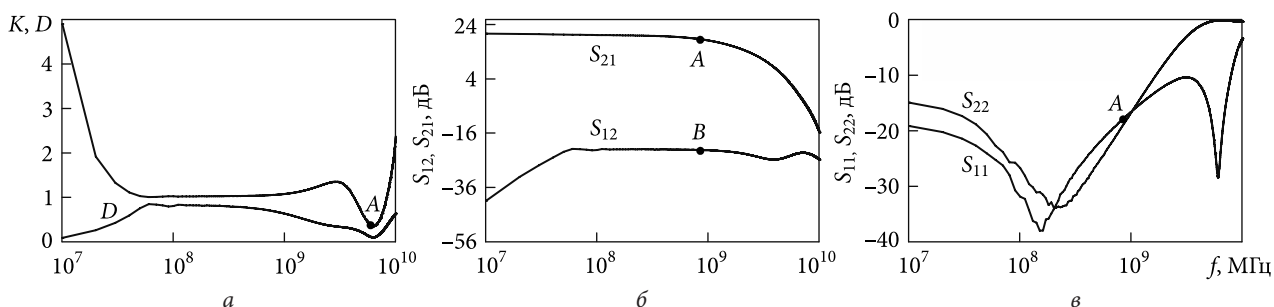


Рис. 7. Параметри SBB2089Z з $L_{\text{стаб}} = 2.7 \text{ нГн}$ і $L_{\text{пар}} = 0.3 \text{ нГн}$: а – K, D (точка А – $f = 6.0 \text{ ГГц}$, $K = 0.36$); б – S_{12}, S_{21} (точка А – $f = 840 \text{ МГц}$, $S_{21} = 18.7 \text{ дБ}$; точка В – $f = 840 \text{ МГц}$, $S_{12} = -22.1 \text{ дБ}$); в – S_{11}, S_{22} (точка А – $f = 840 \text{ МГц}$, $S_{11} = -17.9 \text{ дБ}$)

Qorvo Inc. (рис. 5, б) [12, 13]. Параметри цього підсилювача в стандартному включенні за умови $L_{\text{пар}} = 0.3 \text{ нГн}$ наведені на рис. 7.

Як бачимо на рис. 7, підсилювач SBB2089Z (так само, як і Gali-74+) у стандартному включенні, за наявності в схемі $L_{\text{пар}} = 0.3 \text{ нГн}$, втрачає безумовну стабільність на частоті $F_{\text{пн}} = 6 \text{ ГГц}$. Якщо навантаження матиме ємнісний характер $Z_{\text{н}} = -1 / j2 f C_{\text{н}}$, то вихід підсилювача буде підключено до послідовного контуру $L_{\text{стаб}} C_{\text{н}}$, який на резонансній частоті має мінімальний опір. У такому випадку $L_{\text{стаб}}$ принципово не може завадити режиму короткого замикання підсилювача на виході, і це є суттєвим недоліком такої схеми.

2.3. Схема частотнозалежної стабілізації

У кожній з наведених схем підвищення стабільності РЧ підсилювачів є свої переваги і недоліки. Якщо поєднати ці схеми, увімкнувши $R_{\text{стаб}}$ паралельно з індуктивністю $L_{\text{стаб}}$, отримаємо схему, показану на рис. 8. При цьому $R_{\text{стаб}}$ підвищуватиме стабільність підсилювача на високих частотах, а в робочому діапазоні частот його вплив

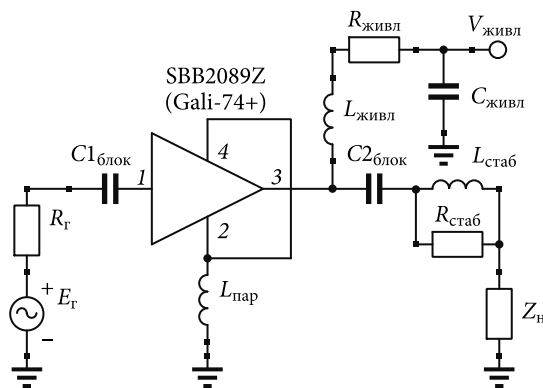


Рис. 8. Схема включення SBB2089Z (Gali-74+) з $L_{\text{пар}}$ і стабілізуювальним колом $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$

буде мізерний через шунтування індуктивністю $L_{\text{стаб}}$. Характеристики РЧ підсилювача SBB2089Z зі стабілізуювальним колом $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ на виході наведено на рис. 9.

З порівняння рис. 7 і 9 випливає, що РЧ підсилювач SBB2089Z з $L_{\text{стаб}} = 2.7 \text{ нГн}$ та $R_{\text{стаб}} = 100 \text{ Ом}$ на виході має безумовну стабільність з $L_{\text{пар}} = 0.3 \text{ нГн}$. При цьому його S -параметри в робочому діапазоні частот практично не змінились. Зауважимо, що таке суттєве підвищення K -фактора

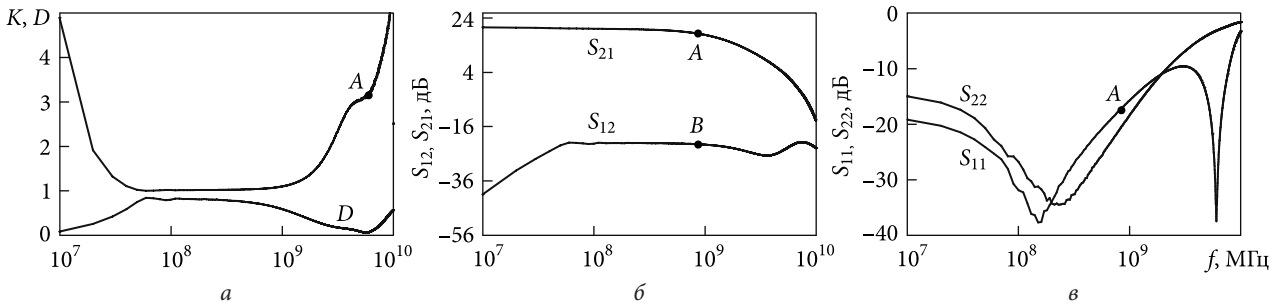


Рис. 9. Параметри SBB2089Z з $L_{\text{пар}} = 0.3$ нГн і стабілізувальним колом $L_{\text{стаб}} = 2.7$ нГн, $R_{\text{стаб}} = 100$ Ом: а – K, D (точка А – $f = 6.0$ ГГц, $K = 3.15$); б – S_{12}, S_{21} (точка А – $f = 840$ МГц, $S_{21} = 18.5$ дБ; точка В – $f = 840$ МГц, $S_{12} = -22.3$ дБ); в – S_{11}, S_{22} . (точка А – $f = 840$ МГц, $S_{11} = -17.2$ дБ)

стабільності РЧ підсилювача SBB2089Z досягнуто введенням у схему, рекомендовану виробником, лише одного додаткового елемента – резистора $R_{\text{стаб}}$. Саме на цій схемі базується простий метод підвищення височастотної позасмугової стабільності РЧ підсилювачів, який ми пропонуємо.

3. Визначення частот потенційної нестабільності $F_{\text{пн}}$

Будь-який РЧ підсилювач має хоча б одну частоту потенційної нестабільності $F_{\text{пн}}$. Знання частот $F_{\text{пн}}$ полегшує пошук оптимальних способів підвищення стабільності для конкретної схеми. Наведені в технічній документації РЧ підсилювачів S-параметри і K не дають прямої інформації про ці частоти. У більшості випадків ці частоти проявляють себе лише після введення в схему $L_{\text{пар}}$. На рис. 3, б бачимо, що $L_{\text{пар}}$ включена послідовно з R_e . Вона є частиною елементів послідовного НЗЗ. На низьких частотах $L_{\text{пар}}$ не впливає на роботу схеми. Однак зі збільшенням частоти імпеданс в емітерному колі VTD зростає за рахунок збільшення реактивного опору $L_{\text{пар}}$:

$$Z_e = R_e + j2\pi f L_{\text{пар}}. \quad (2)$$

Це посилює НЗЗ і зсуває фазу сигналу в ньому.

З теорії підсилювачів відомо, що параметри транзисторного каскаду із СЕ і послідовним НЗЗ за струмом (без урахування впливу паралельного НЗЗ за напругою) характеризуються такими співвідношеннями [14]:

Вхідний імпеданс

$$Z_{\text{вх}} = r_6 + \beta(r_e + Z_e), \quad (3)$$

де r_e – диференційний опір емітерного переходу,

включеного в прямому напрямку; r_6 – об’ємний опір базової області; $\beta = I_k / I_6$ – коефіцієнт передачі струму бази у схемі зі СЕ, I_k – струм колектора; I_6 – струм бази.

Вихідний імпеданс

$$Z_{\text{вих}} = \frac{Z_{\text{н}} r_k}{Z_{\text{н}} + r_k},$$

де r_k – диференційний опір колекторного переходу, включеного в зворотному напрямку; $Z_{\text{н}}$ – опір навантаження.

Коефіцієнт підсилення напруги (формула для наближеного розрахунку):

$$K_u \approx \frac{Z_{\text{н}}}{Z_e}.$$

Коефіцієнт підсилення струму (формула для наближеного розрахунку):

$$K_i \approx \beta.$$

Коефіцієнт підсилення потужності (формула для наближеного розрахунку):

$$K_p \approx \frac{Z_{\text{н}}}{Z_e} \beta. \quad (4)$$

З (2)–(4) випливає, що зі збільшенням частоти під впливом $L_{\text{пар}}$ вхідний імпеданс підсилювача $Z_{\text{вх}}$ має зростати, а S_{21} – зменшуватись. Однак ми спостерігаємо на деяких частотах резонансне підвищення S_{21} (рис. 4, а). Очевидно, що на цих частотах зменшується запас стабільності по фазі в колах НЗЗ. При певних значеннях $L_{\text{пар}}$ негативний зворотний зв’язок може перетворитись на позитивний, унаслідок чого підсилювач втрачить стабільність. Можна стверджувати, що частоти резонансних сплесків S_{21} є ознакою частот потенційної нестабільності підсилювача $F_{\text{пн}}$.

Ще більш інформативною є характеристика вхідного імпедансу РЧ підсилювача $Z_{вх}$. На рис. 4, в бачимо три яскраво виражені мінімуми: $F_{1\min} = 2.05$ ГГц, $F_{2\min} = 5.32$ ГГц і $F_{3\min} = 8.06$ ГГц. До того ж, на цих частотах реактивна складова вхідного імпедансу наближається до нуля. Очевидно, що така поведінка можлива лише в умовах, коли на цих частотах негативний зворотний зв'язок перетворюється на позитивний. Також бачимо, що частоти локальних мінімумів $Z_{вх}$ і K дуже близькі (рис. 4, а). Цікаво, що мінімуми вхідного імпедансу $Z_{вх}$ для РЧ підсилювача Gali-74+ мають місце навіть за відсутності паразитної індуктивності (рис. 2, в). Це означає, що за характеристикою $Z_{вх}$ можна приблизно оцінити частоти потенційної нестабільності $F_{пн}$ РЧ підсилювача, спираючись лише на їх S-параметри, які наведені в технічній документації.

Таким чином, можна стверджувати, що локальні мінімуми як активної, так і реактивної складових вхідного імпедансу $Z_{вх}$ РЧ підсилювача є ознаками частот потенційної нестабільності $F_{пн}$.

Величину $Z_{вх}$ легко розрахувати через S-параметри в програмі QucsStudio-4.3.1 або визначити експериментально за допомогою вимірювальних приладів.

4. Методика розрахунку стабілізуючого кола $R_{стаб}L_{стаб}$

Емпіричним шляхом було визначено, що максимальне підвищення запасу стабільності РЧ під-

силювача відбувається за умови, що модуль реактивного опору $L_{стаб}$ дорівнює активному опору $R_{стаб}$ на частоті потенційної нестабільності $F_{пн}$:

$$R_{стаб} = |j2\pi F_{пн} L_{стаб}|. \quad (5)$$

Пояснення цього факту ґрунтується на таких обставинах. При виконанні умови (5) на частоті $F_{пн}$ стабілізуювальне коло $R_{стаб}L_{стаб}$ зсуває фазу вихідного сигналу підсилювача, що проходить до навантаження, на $\varphi_{вх} = 45^\circ$. Відбитий від навантаження сигнал, проходячи через стабілізуювальне коло у зворотному напрямку, отримує подвійний зсув фаз $-\varphi_{вих} = 90^\circ$. Це означає, що у випадку суто ємнісного навантаження, яке дає зсув фаз відбитого сигналу $\varphi_{Звних} = -90^\circ$, сумарний зсув фаз відбитого сигналу на виході підсилювача φ_{Σ} буде нульовим:

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{вих} + \varphi_{Звних} = 90^\circ - 90^\circ = 0^\circ.$$

Таким чином, стабілізуювальне коло максимально підвищує запас стабільності РЧ підсилювача за умови компенсації зсуву фаз відбитого сигналу, викликаного ємнісним навантаженням, на частоті потенційної нестабільності $F_{пн}$.

Розрахунок стабілізуючого кола $R_{стаб}L_{стаб}$ здійснюють у такій послідовності:

1) Визначення частот потенційної нестабільності $F_{пн}$. У випадку, якщо частот потенційної нестабільності $F_{пн}$ декілька, для розрахунку слід обрати ту, на якій K -фактор або вхідний імпеданс $Z_{вх}$ мають найглибші резонансні мінімуми.

K-фактор і S_{12} на частотах потенційної нестабільності $F_{пн}$ РЧ підсилювачів SBB2089Z та Gali-74+ зі стабілізуючими колами $R_{стаб}L_{стаб}$ для різних варіантів робочої смуги частот Δf

Параметри та елементи схеми	Робоча смуга частот Δf , МГц, для РЧ підсилювачів					
	SBB2089Z ($F_{пн} = 6$ ГГц)			Gali-74+ ($F_{пн1} = 2.4$ ГГц, $F_{пн2} = 5.5$ ГГц)		
	50...150	50...450	50...850	0...50 ($F_{пн1}$)	0...450 ($F_{пн2}$)	0...1000 ($F_{пн2}$)
$L_{стаб}$, нГн	15.3	5.1	2.7	108	6	2.7
$R_{стаб}$, Ом	570	190	100	1600	209	94
K ($L_{пар} = 0$)	32.5	12.1	7.2	5.1	3.5	2.4
S_{12} , дБ ($L_{пар} = 0$)	-39.3	-32.4	-29.4	-43.5	-28.6	-25.6
K ($L_{пар} = 0.3$ нГн)	16.20	5.60	3.15	6.87	3.00	1.69
S_{12} , дБ ($L_{пар} = 0.3$ нГн)	-33.1	-25.9	-22.8	-45.5	-28.2	-25.1
K ($L_{пар} = 1$ нГн)	5.35	1.65	—	1.97	—	—
S_{12} , дБ ($L_{пар} = 1$ нГн)	-23	-15.4	—	-39	—	—

При визначенні частоти $F_{\text{пн}}$ похибка до десяти відсотків суттєво не впливає на ефективність послідовного стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$.

2) Визначення величини індуктивності $L_{\text{стаб}}$. Стабілізуюче коло $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ — це фільтр нижніх частот (ФНЧ) першого порядку. Необхідно визначити частоту зрізу цього фільтра $f_{-3 \text{ дБ}}$ (на рівні -3 дБ). Ця частота має бути вищою за верхню частоту робочого діапазону $f_{\text{в}}$, але нижчою за частоту потенційної нестабільності $F_{\text{пн}}$:

$$f_{\text{в}} < f_{-3 \text{ дБ}} < F_{\text{пн}}. \quad (6)$$

Як бачимо на рис. 9, а, величина K збільшується з ростом частоти. Цей ріст спричинений частотним збільшенням затухання відбитого від навантаження сигналу в стабілізуючому колі. Отже, для підвищення K бажано частоту $f_{-3 \text{ дБ}}$ знижувати. Однак це може призвести до зниження S_{21} у верхній частині робочого діапазону РЧ підсилювача. Таким чином, частоту зрізу $f_{-3 \text{ дБ}}$ визначають, знаходячи компроміс між звуженням смуги робочих частот РЧ підсилювача і підвищенням його стабільності. Після визначення частоти $f_{-3 \text{ дБ}}$ легко знайти $L_{\text{стаб}}$, як елемент ФНЧ. Звісно, $R_{\text{стаб}}$ також впливає на значення частоти $f_{-3 \text{ дБ}}$, однак його впливом у більшості випадків можна знехтувати.

3) Визначення величини резистора $R_{\text{стаб}}$ за формулою (5).

5. Практичне застосування послідовного стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$

Варіанти застосування послідовного стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ для РЧ підсилювачів SBB2089Z та Gali-74+ з різними діапазонами робочих частот наведені в таблиці (див. с. 325).

Згідно з даними таблиці, зниження верхньої частоти робочого діапазону РЧ підсилювача призводить до зниження S_{12} і зростання K -фактора стабільності. Тому при застосуванні послідовного стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ у найбільш вигідній ситуації знаходяться діапазони коротких і ультракоротких хвиль. Слід зауважити, що для РЧ підсилювача Gali-74+ у діапазоні частот $\Delta f = (0..50) \text{ МГц}$ розрахунок елементів стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ проводився на частоті $F_{\text{пн1}} = 2.4 \text{ ГГц}$, а в решті діапазонів — на частоті

$F_{\text{пн2}} = 5.5 \text{ ГГц}$. Пов'язано це з тим, що в низькочастотному діапазоні хвиль більш впливовою виявилась більш низька частота потенційної нестабільності.

Зростання $L_{\text{пар}}$ посилює негативний зворотний зв'язок. Це означає, що здатність підсилювача зберігати стабільність з більшою $L_{\text{пар}}$ — це здатність зберігати стабільність з більш сильним негативним зворотним зв'язком.

Зазначимо, що на частотах потенційної нестабільності $F_{\text{пн}}$ K -фактор стабільності РЧ підсилювача SBB2089Z вищий, ніж у Gali-74+, за наявності однакових паразитних індуктивностей $L_{\text{пар}} = (0..1) \text{ нГн}$. Це означає, що за однакових умов SBB2089Z має більший запас стабільності, ніж Gali-74+.

Висновки

Наше дослідження показало, що з допомогою стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ можна суттєво підвищити високочастотну позасмугову стабільність РЧ підсилювача. Запропонований нами метод розрахунку цього кола є простим і доступним у використанні.

Також ми запропонували міру оцінки запасу високочастотної стабільності РЧ підсилювача через величину $L_{\text{пар}}$. Ця міра дає можливість порівнювати запаси стабільності різних РЧ підсилювачів.

Виробники мікросхем РЧ підсилювачів намагаються максимально зменшити $L_{\text{пар}}$. Для цього вони у технічній документації щодо використання своїх продуктів рекомендують збільшувати кількість металізованих отворів, що з'єднують відповідні контакти з «земляним» шаром друкованої плати і зменшувати її товщину. Використання стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ дає можливість забезпечити стабільність РЧ підсилювачів за наявності значної паразитної індуктивності $L_{\text{пар}} = (0.3..1.0) \text{ нГн}$. Це дає можливість спростити технологічні вимоги до конструкції і підвищує доступність використання РЧ підсилювачів як в радіоастрономічних застосуваннях, так і у найширшому їх переліку.

Збільшений запас стабільності також надає додаткові можливості у використанні РЧ підсилювачів: підвищення динамічного діапазону та розширення смуги робочих частот за рахунок по-

силення НЗЗ, зміна вхідного і вихідного імпедансів тощо.

У роботі ми використовували РЧ підсилювачі Gali74+ та SBB2089Z, розроблені різними фірмами із застосуванням різних технологій, аби показати універсальність запропонованого методу.

Метод послідовного стабілізуючого кола $R_{\text{стаб}}L_{\text{стаб}}$ був застосований нами в практичних конструкціях РЧ підсилювачів, виконаних як на

мікросхемах, так і на дискретних елементах; він підтвердив свою ефективність.

Автор висловлює свою вдячність Гюнтарду Краусу та іншим розробникам програмного забезпечення QucsStudio. Цей якісний програмний продукт був розроблений ними на добровільних засадах і наданий у вільне користування. Завдяки застосуванню QucsStudio ефективність нашої роботи значно підвищилась.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Абранин Э.П., Брук Ю.М., Захаренко В.В., Коноваленко А.А.. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997. Т. 2, № 1. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra>
2. Suárez A. Check the Stability: Stability Analysis Methods for Microwave Circuits. *IEEE Microw. Mag.* 2015. Vol.16, Iss. 5. P. 69–90. DOI: 10.1109/MMM.2015.2410951
3. Bahl I.J. *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2009. P. 479–506.
4. Rollett J. Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports. *IRE Trans. Circuit Theory*. 1962. Vol. 9, Iss. 1. P. 29–32. DOI: 10.1109/TCT.1962.1086854
5. Gonzalez G. *Microwave Transistor Amplifiers, Analysis and Design*. 2nd ed. Prentice Hall, 1997. P. 217–228.
6. QucsStudio a free and powerful circuit simulator. URL: <http://qucsstudio.de>
7. Surface Mount. Monolithic Amplifier DC-1 GHz. GALI-74+. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/GALI-74+.pdf>
8. Титов А.А. Упрощённый расчёт широкополосного усилителя. *Радиотехника*. 1979. № 6. С. 88–90.
9. Mini-Circuits. GALI-74+. SMT Low Noise Amplifier, DC – 1000 MHz, 50Ω. URL: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=GALI-74%2B>
10. Шварц Н.З. *Линейные транзисторные усилители СВЧ*. Москва: Сов. радио, 1980. С. 74.
11. Ahn H., Ji H., Kang D., Son S.-M., Lee S., Han J. A 26–30 GHz GaN HEMT Low-Noise Amplifier Employing a Series Inductor-Based Stability Enhancement Technique. *Electronics*. 2022. Vol. 11, Iss. 17, id. 2716. DOI: 10.3390/electronics11172716
12. GORVO all around you. SBB2089Z. 50–850 MHz Cascadable InGaP HBT Active Bias MMIC Amplifier. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/SBB2089Z#documents>
13. GORVO all around you. Model-Based GaN PA Design Basics: GaN Transistor S-Parameters, Linear Stability Analysis and Resistive Stabilization. URL: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/model-based-gan-pa-design-basics-s-parameters-linear-and-resistive-stabilization>
14. Ровдо А.А. *Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах*. Москва: Додэка XXI век, 2002. С. 108–113.

Стаття надійшла 23.05.2023

REFERENCES

1. Abranin, E.P., Bruk, Yu.M., Zakharenko, V.V., Konovalenko, A.A., 1997. Structure and Parameters of New System of Antenna Amplification of Radio Telescope UTR-2. *Radio Phis. Radio Astron.*, **2**(1), pp. 95–103 (in Russian).
2. Suárez, A., 2015. Check the Stability: Stability Analysis Methods for Microwave Circuits. *IEEE Microw. Mag.*, **16**(5), pp. 69–90. DOI: 10.1109/MMM.2015.2410951
3. Bahl, I.J., 2009. *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers*. A John Wiley & Sons, Inc., Publ., pp. 479–506.
4. Rollett, J., 1962. Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports. *IRE Trans. Circuit Theory*, **9**(1), pp. 29–32. DOI: 10.1109/TCT.1962.1086854
5. Gonzalez, G., 1997. *Microwave Transistor Amplifiers, Analysis and Design*. 2nd ed. Prentice Hall, pp. 217–228.
6. QucsStudio a free and powerful circuit simulator. Available from: <http://qucsstudio.de>
7. Surface Mount. Monolithic Amplifier DC-1 GHz. GALI-74+[pdf]. Available from: <https://www.minicircuits.com/pdfs/GALI-74+.pdf>
8. Titov, A.A., 1979. Simplified calculation of a broadband amplifier. *Radiotekhnika*, **6**, pp. 88–90 (in Russian).
9. Mini-Circuits. GALI-74+. SMT Low Noise Amplifier, DC – 1000 MHz, 50Ω. Available from: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=GALI-74%2B>
10. Schwartz, N.Z., 1980. *Linear transistor microwave amplifiers*. Moscow: Soviet Radio Publ. (in Russian).
11. Ahn, H., Ji, H., Kang, D., Son, S.-M., Lee, S., Han, J., 2022. A 26–30 GHz GaN HEMT Low-Noise Amplifier Employing a Series Inductor-Based Stability Enhancement Technique. *Electronics*, **11**(17), id. 2716. DOI: 10.3390/electronics11172716
12. GORVO all around you. SBB2089Z. 50–850 MHz Cascadable InGaP HBT Active Bias MMIC Amplifier. Available from: <https://www.qorvo.com/products/p/SBB2089Z#documents>

13. GORVO all around you. Model-Based GaN PA Design Basics: GaN Transistor S-Parameters, Linear Stability Analysis and Resistive Stabilization. Available from: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/model-based-gan-pa-design-basics-s-parameters-linear-and-resistive-stabilization>
14. Rovdo, A.A., 2002. *Circuit design of amplifier stages based on bipolar transistors*. Moscow: Publishing house Dodeka XXI century, pp. 108–113 (in Russian).

Received 23.05.2023

A.D. Khristenko

Institute of Radio Astronomy NAS of Ukraine
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

A SIMPLE METHOD FOR IMPROVING OUT-OF-BAND HIGH-FREQUENCY STABILITY OF RADIO FREQUENCY AMPLIFIERS

Subject and Purpose. Methods for determining and ensuring the stability of radio frequency (RF) amplifiers have been progressing quite actively over the past decades. However, most of them are not convenient for practical use. Combining analytical and graphical techniques widely accepted at the moment requires a highly skillful user and licensed software. Also, a bad point is the lack of clear algorithms for increasing the out-of-band high-frequency stability of amplifiers, sending us to the procedure of successive approximations when an optimal solution for an individual scheme is sought. The present work seeks for a simple method that effectively increases the out-of-band high-frequency stability of RF amplifiers and improves the reliability of signal amplification systems, especially those complex structures that incorporate low-frequency radio telescopes.

Methods and Methodology. The parameters of the RF amplifiers and passive circuits are obtained by computer modeling upon the S -parameters given by the manufacturer. The amplifier stability is determined by the K -factor for stability.

Results. A simple universal method has been developed to improve the out-of-band high-frequency stability of RF amplifiers. In this method, a stabilization $R_{stab}I_{stab}$ circuit is connected to the amplifier in series with the load. An original procedure has been designed to calculate the stabilization circuit. Also, a metric has been proposed that evaluates the practical margins of the out-of-band high-frequency stability of RF amplifiers and makes it possible to compare them one to another. Finally, the proposed method offers freedom from the licensed software.

Conclusions. The proposed method significantly increases the high-frequency stability of RF amplifiers beyond the operating frequency range and simplifies the technological requirements for the design. The employment of RF amplifiers is more available almost without compromising their performance in the operating frequency range. The method is simple and easy to apply.

Keywords: S -parameters, RF amplifier, Darlington scheme, K -factor for stability.