

3. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. — М.: Мир, 1989. — 190 с

4. Александров А.К., Ячев И.С., Маринова И.Й., Рыжов С.Ю. „Автоматизированный расчет поля электрических аппаратов методом вторичных источников” М., Издательство МЭИ, 1994, с. 4-5.

Сидорук Ю.К. Довгань В.М. Розрахунок параметрів круглого хвилевода з прямокутною металевією вставкою. Розраховані і проаналізовані основні параметри електромагнітної хвилі H_{11} в круглому хвилеводі з прямокутною металевією пластинкою в випадках: коли круглий хвилевод без металевією пластинки для хвилі H_{11} докритичний, критичний і закритичний. Для розрахунків використовувався метод скінченних елементів і програма Ansoft HFSS.

Ключові слова: *круглий хвилевод, металева вставка, метод скінченних елементів*

Сидорук Ю.К. Довгань В.М. Расчет параметров круглого волновода с прямоугольной металлической вставкой. Рассчитаны и проанализированы основные параметры электромагнитной волны в круглом волноводе с прямоугольной металлической пластинкой в случаях: когда круглый волновод без металлической пластинки для волны H_{11} докритический, критический и закритический. Для расчетов использовался метод конечных элементов и программа Ansoft HFSS.

Ключевые слова: *круглый волновод, прямоугольная металлическая вставка, метод конечных элементов*

Sydoruk Yuriy K. Dovgan Vitally M. Calculations of circular waveguide with a rectangular metal insert. Calculated and analyzed the basic parameters of electromagnetic wave in a circular waveguide with a rectangular metal plate in the following cases: when the circular waveguide without metal plate for a H_{11} wave of subcritical, critical and supercritical. For calculations was used a finite element method and Ansoft HFSS program.

Keywords: *circular waveguide, metal insert, finite element method*

УДК 621.373.12:621.396.61:621.396.62

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ФАЗОВИХ ШУМІВ ТРАНЗИСТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ

Коцержинський Б.О.

Огляд сучасних наукових публікацій показує, що продовжується інтенсивне вивчення виникнення фазових шумів (ФШ) у транзисторних генераторах НВЧ та пошук засобів зменшення їх рівня, тому що шуми суттєво впливають на ефективність систем зв'язку та використання частотного діапазону. При розробці генераторів мінімізація ФШ є першочерговою проблемою. Джерелами шуму є білий шум пасивних компонентів та шум транзисторів.

Рекомендації щодо зменшення рівня ФШ транзисторних генераторів залежать від моделей генератора та транзистора (лінійна або нелінійна),

застосованих методів розв'язання рівнянь, структури генераторів. Розглянемо ці рекомендації та проаналізуємо ефективність їх застосування на прикладах розробки транзисторних генераторів НВЧ.

Рекомендації щодо зменшення рівня фазового шуму транзисторних генераторів

Аналіз лінійної моделі генератора у вигляді підсилювача із позитивним зворотним зв'язком [1] приводить до відомого Leeson's виразу для спектральної густини ФШ

$$L(f_m) = \frac{FkT}{2P_{AVS}} \left[1 + \frac{f_c}{f_m} + \left(\frac{f_0}{2f_m Q_L} \right)^2 \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \right] \quad (1)$$

де F - коефіцієнт шуму підсилювача, T - температура, k - постійна Больцмана, P_{AVS} - потужність вихідного сигналу, f_0 - частота генератора, f_c - флікер частота, f_m - відхилення частоти від центральної, Q_L - навантажена добротність коливальної системи.

Вираз (1) описує шум у діапазоні відхилень: від f_c до $f_0/2Q_L$ (надалі постійний рівень FkT/P_{AVS}).

Для зменшення ФШ треба: 1. збільшувати добротність коливальної системи Q_L , 2. збільшувати напругу на резонаторі, тобто збільшувати потужність P_{AVS} (обмежена пробійними напругами транзисторів), 3. використовувати деяку форму АРП для обмеження вхідної потужності транзисторів, 4. використовувати транзистори із малим власним шумом і із великим імпедансом, 5. вихідний сигнал краще брати із резонатора (може обмежити діапазон перестроювання частоти у ГКН, тому що резонатор буде працювати ще як смуговий фільтр). Узгодження генератора із навантаженням також зменшує шум. Подальший аналіз моделі [2] додає такі поради для зменшення шумів: 1. використовувати транзистори великої геометрії для максимізації P_{AVS} , 2. мінімізувати коефіцієнт шуму F шляхом контролю імпедансного оточення транзисторів. Але у іншій праці для цієї моделі [3] відмічається, що коефіцієнт шуму F представляє вплив шуму активних елементів та циклічний шум періодичних процесів генератора, не може бути розрахованим без урахування коливальної системи. Лінійна модель не враховує нелінійні перетворення шумів, тому пропонується вважати F та f_c коригуючими параметрами на основі експериментальних даних. Визначається, що збільшення Q_L неможливо без одночасного збільшення втрат резонаторної системи, потрібно збільшувати коефіцієнт підсилення. Оптимальне значення $Q_L/Q_0 = 0.5$ та втрати 6 дБ для мінімуму шумів.

Нелінійний аналіз генератора на негативному опорі за моделлю Курокави показує, що коливання стають дуже шумлячими при досягненні границі стабільної області (параметр p , який характеризує швидкість відновлення стаціонарних коливань під час маленьких пертурбацій, наближається до нуля, $p=1$ - умова найбільшої потужності генератора) [3].

$$L(f_m) = \frac{FkT}{2P_{AVS}} \left(1 + \frac{f_c}{f_m}\right) \left(\frac{f_0}{2f_m Q_L}\right)^2 \left[1 + \frac{q^2}{p^2 + \left(\frac{2Q_L f_m}{f_0}\right)^2} \right]$$

$$p = \frac{A_0 f_0}{2Q_L (\text{Re} Z_L)^2} \cdot \left(\frac{\partial \text{Re} Z}{\partial A} \frac{\partial \text{Im} Z}{\partial f} - \frac{\partial \text{Im} Z}{\partial A} \frac{\partial \text{Re} Z}{\partial f} \right) \quad q = \frac{A_0 f_0}{2Q_L (\text{Re} Z_L)^2} \cdot \left(\frac{\partial \text{Re} Z}{\partial A} \frac{\partial \text{Re} Z}{\partial f} + \frac{\partial \text{Im} Z}{\partial A} \frac{\partial \text{Im} Z}{\partial f} \right)$$

Параметр q обумовлює залежність частоти коливань від їх амплітуди у режимі сильного сигналу. Z_L – імпеданс навантаження, Z – повний імпеданс генератора, Q_L – навантажена добротність генератора, причому

$$Q_L = \frac{f_0}{2 \text{Re} Z_L} \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re} Z}{\partial f}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Im} Z}{\partial f}\right)^2}$$

Нелінійність елементів генератора має значний вплив на шумовий спектр генератора. Наприклад, для генератора на MESFET транзисторі заслін-витік ємність відповідає за перетворення низькочастотного шуму у фазовий шум, а амплітудний шум в основному викликається нелінійною передавальною провідністю, нелінійна провідність стік-витік майже не впливає на процеси перетворення шумів.

Для зменшення ФШ треба: 1. лінеаризувати передавальну провідність та ємність заслін-витік; 2. виконувати чисельний пошук оптимальних параметрів генератора за його нелінійною моделлю.

У роботі [4] отримані результати аналітичного методу мінімізації ФШ генераторів Colpitts

$$L(f_m) = \left[1 + \frac{f_0^2}{(2f_m Q_0)^2 m^2 (1-m)^2} \right] \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \frac{FkT}{2P_{AVS}} + \frac{2kTRG^2}{f_m^2} \quad (2)$$

де $m = Q_L/Q_0$; R – еквівалентне шумове навантаження варактора, G – коефіцієнт підсилення (напруга), які доповнюють вище зроблені рекомендації щодо зменшення рівня ФШ транзисторних генераторів: 1. узгоджувати шумовий імпеданс аналогічно узгодженню потужності шляхом трансформаторів, 2. застосовувати фільтр у емітерному колі типового генератора Colpitts (можна знизити шум на 3-6 дБ), 3. отримати симетричні коливання сигналу (симетрія форми коливань), 4. виконати умову мінімального шуму $m_{opt} = 0.5$, 5. оптимізувати негативну передавальну провідність (negative transconductance) для підтримки стабільних коливань без введення зайвих теплових шумів, які їй пропорційні, 6. використати самосинхронізацію (наприклад, другою гармонікою), 7. використати спеціальні активні резонатори [4].

Запропонований аналітичний розрахунок шумів нелінійного багатопроводового генератора методом гармонічного балансу, у якому врахована крос-кореляція шумових джерел (флікер і білий) [5]. Але порад немає.

Вивчення впливу нелінійностей транзисторів на шумові параметри генераторів поблизу несучої частоти із використанням нелінійної моделі польових транзисторів показало, що амплітудний шум виникає через нелінійну пряму передавальну провідність, у ФШ вагомий вклад вносить нелінійна пряма передавальна провідність та нелінійність ємності заслону, зменшення контактного опору заслону може суттєво покращити шумові параметри генератора [6]. Ці поради слід враховувати при виборі або створенні транзисторів. Запропонована методика може бути корисною при розробці генераторів.

Створена у роботі [7] узагальнена теорія ФШ генераторів, яка враховує змінну у часі періодичну природу генераторів та cyclostationary шумові джерела, які можуть значно збільшити шум вихідного сигналу (особливо у LC генераторах, кільцеві генератори менш чутливі). Теорія набула значного поширення. Для створення нелінійної моделі використана функція чутливості імпульсу (impulse sensitivity function ISF) - безрозмірна періодична (2π) функція, незалежна від частоти та амплітуди, яка описує, наскільки зсувається фаза при введенні одиничного імпульсу у $t=\tau$.

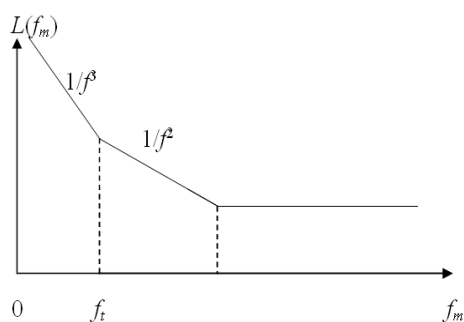


Рис.1

Модель генератора точно передбачає залежність між формою коливань та перетворенням фліккер шуму. Показано, що вигин у $1/f^3$ спектрі ФШ (рис.1) менше f_c транзистора на коефіцієнт, який визначається симетричними властивостями форми коливань, що особливо важливо для CMOS RF застосувань, тому вплив $1/f$ шуму транзистора може бути зменшеним правильною розробкою генератора.

Для зменшення шумів в області $1/f^3$ треба мінімізувати постійну складову функції ISF, це пов'язано із певними властивостями симетрії форми коливань, тривалостями зростання та спадання форми коливань, потрібна симетрична форма. Для диференційних структур генераторів вимога симетрії коливань стосується кожної генераторної секції. Використання лінійного резистивного навантаження також сприяє зменшенню перетворення шуму. Велика добротність коливальної системи забезпечує більш симетричні та стабільні коливання та зменшує перетворення шуму.

Суттєво зменшення ФШ дає використання принципу N-push для побудови генераторів [8]. Також доведено [9], що ФШ поблизу несучої зменшується при оптимальному зв'язку взаємносинхронізованих N генераторних секцій у N разів, що корисно для багатотранзисторних генераторів.

Розроблені та пропонуються для використання різні методи розрахунку ФШ генераторів. У роботі [10] напіваналітичним методом розраховується спектр ФШ вихідного сигналу для заданого спектра джерела шуму на ос-

нові загальної залежності спектра вихідного сигналу від характеристик вхідних шумових процесів. Може бути корисним при оцінці шумів поблизу частоти генератора.

Пошук оптимального набору параметрів пасивних та активних компонентів заданою моделлю структури генератора для забезпечення заданих вихідних характеристик методом геометричного програмування [11] дозволяє швидко отримати потрібні результати. Встановлюються обмеження на параметри для отримання компромісного варіанту. Дієздатність методу доведена порівнянням розрахункових даних із результатами тестувань виготовлених генераторів.

Автори [12] створили нову строгу теорію ФШ генераторів та розробили ефективні числові методи для розв'язання нелінійних рівнянь. Показали, що аналіз, який базується на лінеаризації, не сумісний з генераторами та може дати нефізичні прогнози. Результати розрахунків збігаються із результатами експерименту навіть на частотах, близьких до несучої.

При практичній реалізації генераторів слушні такі поради [13]: 1. грамотно підключати малошумлячі джерела живлення та керування високої якості до плати (найкраще батареї); підключення до порту керування робити найкоротшим та добре екранованим від зовнішніх завад; 2. грамотно виконувати ВЧ заземлення та підключення конденсаторів фільтрації; 3. непогано використати резистивний вихідний контакт (pad) між генератором та зовнішнім навантаженням.

Ефективність застосування розглянутих порад

Генератори так званого LC типу мають у своєму складі пасивні або активні елементи стабілізації струму живлення транзисторів, які також додають шум у вихідний сигнал. При створенні LC генераторів на 1.8 ГГц (пара перекресно зв'язаних транзисторів) [11] за методом геометричного програмування виявлено, що збільшення струму живлення дає значне зменшення шуму тільки тоді, коли транзистори працюють у режимі обмеження струму (current limited mode), який привабливий для малопотужних генераторів, тоді і оптимізація добротності індукторів більш дієва. Рівень ФШ становить -124.2 дБн/Гц. Врахувати одночасно усі поради неможливо, тому метод геометричного програмування може бути корисним при пошуку компромісного варіанту. Генератори кільцевого типу мають свої особливості. Теоретичний аналіз та експериментальна перевірка генераторів [14] підтвердила зменшення ФШ при збільшенні енергоспоживання (збільшенні розмірів

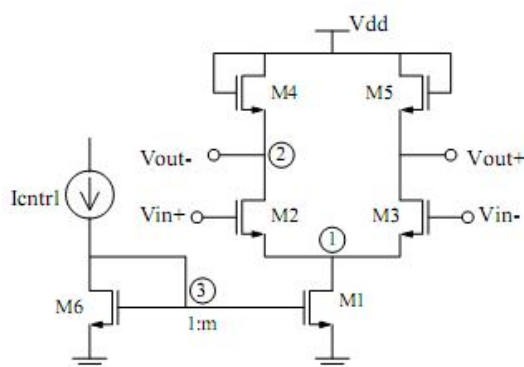


Рис.2.

Генератори кільцевого типу мають свої особливості. Теоретичний аналіз та експериментальна перевірка генераторів [14] підтвердила зменшення ФШ при збільшенні енергоспоживання (збільшенні розмірів

транзисторів) та коли розмах коливань перевищує напругу джерела живлення.

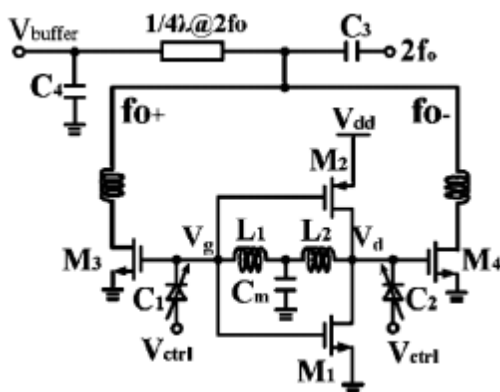


Рис.3

При використанні диференційної структури для каскаду генератора (рис.2) із дзеркалом струму значний вклад у збільшенні низькочастотного шуму за рахунок перетворення флікер шуму вносить транзистор M_6 , M_1 значно менше, тому дзеркало струму небажано для монолітних генераторів.

Зменшення коефіцієнта шуму F

(1) досягається новими структурами генераторів: типу Hartley [15] ($f=5.6$ ГГц, ФШ - -123.6 дБн/Гц при відстроюванні на 1 МГц); типу Vackar [16] ($f=4.9$ ГГц, ФШ - -124.9 дБн/Гц при відстроюванні на 1 МГц), монолітний ГКН [17] за комплементарною push-push топологією Colpitts генератора (рис.3) (відсутність дзеркал струму, $f=64.2-69.4$ ГГц, ФШ - -76 дБн/Гц при відстроюванні на 1 МГц).

У [18] при створенні генераторів діапазону 6 ГГц на польових транзисторах GaAs MESFET використані: N-push принцип, збільшення добротності коливальної системи та рекомендації праці [7] щодо придушення перетворення $1/f$ шуму за рахунок виконання умов симетрії форми коливань, що для push-push генераторів означає відсутність зсуву фаз між першою та другою гармоніками. Отримане зменшення рівня ФШ в $1/f^2$ області на 15 дБ при відстроюванні на 10-1000 кГц у порівнянні із генератором з несиметричною формою коливань. Таке ж 15 дБ зменшення шумів (теоретичний прогноз до 26дБ) має triple-push генератор, для якого згадана умова передбачає відсутність парних гармонік у сигналах генераторних секцій, які придушуються короткозамкненими шлейфами. Переваги triple-push генераторів використані і у інших розробках [19].

Оптимальний вибір транзистора для малопотужного генератора з низьким рівнем ФШ можливий при використанні методики експериментального визначення адитивного шуму транзистора та оцінки шумів за (1) [20].

Висновки

На сьогоднішній день існують достатньо розвинені методи розрахунків ФШ генераторів та відповідні комп'ютерні програми. Вище розглянуті поради сприяють тільки орієнтованому вибору структури генератора і транзисторів. Точність розрахунків залежить від якості моделей, особливо моделей транзисторів із джерелами шумів. Так у [22] для біполярних транзисторів розроблені шумові моделі, які базуються на узагальненні фізичних процесів та результатів експериментальних тестувань. Моделі використані для розрахунків ГКН на 2 ГГц і push-push генератора на 13 ГГц. Шумові

параметри виготовлених у промислових умовах генераторів чудово збігаються із прогнозом (як кажуть автори, без підстроювання). При наявності адекватних моделей резонаторної системи та транзисторів метод геометричного програмування [11] для пошуку оптимального варіанта генератора може бути дуже корисним.

Література

1. www.rfic.co.uk RF,RFIC & Microwave Theory, Design / Systems & Devices Tutorials / Phase Noise.
2. Puglia K.V. Oscillator Phase Noise:Theory and Prediction // Microwave Journal.-2007.-V.9.-№.9.-P.178-192.
3. Grebennikov A. Transistor LC Oscillators for Wireless Applications: Theory and Design Aspects, part II // Microwave Journal.-2005.-V.48.- №. 11.-P.
4. Rohde U.L., Poddar A.K. Noise Minimization Techniques for RF and MW Signal Sources // Microwave Journal.-2007.-V.50.- №. 9.-P.136.
5. Mehrshahi E.,Farzaneh F. An Analytical Approach in Calculation of Noise Spectrum in Microwave Oscillators Based on Harmonic Balance// IEEE Trans.on MTT.-2000.- V.48.- №. 5.-PP.822-831.
6. Lee S.,Webb K.J. The Influence of Transistor Nonlinearities on Noise Properties // IEEE Trans.on MTT.-2005.- V.53.- №. 4.-PP. 1314-1321.
7. Hajimiri A.,Lee T.H. A General Theory of Phase Noise in Electrical Oscillators//IEEE Journal of Solid-State Circuits.-1998.- V.33.- №. 2.-PP. 179-194.
8. Коцержинський Б.О. Використання принципу N-push для побудови малошумлячих транзисторних НВЧ генераторів //Вісник НТУУ „КПІ”,серія Радіотехніка, Радіобудування-2009.-Вип.38.-С.123-129.
9. Chang H.-C., Cao X., Mishra U.K., York R.A. Phase Noise in Coupled Oscillators: Theory and Experiment// IEEE Trans.on MTT.-1997.- V.45.- №. 5.-PP.604-615.
10. Vanassche P., Gielen G., Sansen W. A Generalized Method for Computing Oscillator Phase Noise Spectra// Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Computer Aided Design, San Jose, CA.-2003.-Nov.-PP.247-250.
11. Hershenson M., Hajimiri A., Mohan S.S., Boyd S.P., Lee T.H. Design and Optimization of LC Oscillators// Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Computer Aided Design, San Jose, CA.-1999.-Nov.-PP.65-69.
12. Demir A., Mehrota A., Roychowdhury J. Phase Noise in Oscillators: a Unifying Theory and Numerical Methods for Characterization//IEEE Trans. CS.-2000.-V.47.- №.5.-PP.655-674.
13. www.rfdesign.com Characterising Phase Noise (Mini Circuits Inc. www.minicircuits.com) .-2003.-January.-PP.58-59.
14. Dai L., Harjani R. Analysis and Design of Low-Noise Ring Oscillators//ISLPED,Rapallo,Italy.-2000.
15. Park J., Park J., Choi Y., Sim K.,Baek D. A Fully-Differential Complementary Hartley VCO in 0.18 μm CMOS Technology //IEEE Microwave and Wireless Components Letters.-2010.-V.20.- №. 2.-PP. 91-93.
16. Nguyen T.N., Lee J-W. Low Phase Noise Differential Vackar VCO in 0.18 μm CMOS Technology// IEEE Microwave and Wireless Components Letters.-2010.-V.20.- № 2.-PP. 88-90.
17. Chiu H., Kao C. A Wide Tuning Range 69 GHz Push-Push VCO Using 0.18 μm Technology//IEEE Microwave and Wireless Components Letters.-2010.-V.20.- №. 2.-PP.97-99.

18. Choi J., Mortazawi A. Design of Push-Push and Triple-Push Oscillators for Reducing 1/f Noise Upconversion // IEEE Trans.on MTT.-2005.- V.50.- №. 11.-PP.3407-3413.

19. Коцержинський Б.О. Потроювання частоти у транзисторних НВЧ генераторах // Вісник НТУУ „КПІ”, серія Радіотехніка, Радіобудування-2010.-Вип.39.-Ст.123-129.

20. Jankovic M., Breitbarh J., Brannon A., Popovic Z. Measuring Transistor Large-Signal Noise Figure for Low-Power and Low Phase-Noise Oscillator Design // IEEE Trans.on MTT.-2008.- V.56.- №. 7.-PP.1511-1515.

21. Kim N., Oh Y., Reeh J-S. A 47 GHz LC Cross-Coupled VCO Employing High-Q Island-Gate Varactor for Phase Noise Reduction// IEEE Microwave and Wireless Components Letters.-2010.-V.20.- №. 2.-PP. 94-96.

22. Nallatamby J., Prigent M., Camiade M., Sion A., Gourdon C., Obregon J.J. An Advanced Low-Frequency Noise Model of GaInP-GaAs HBT for Accurate Prediction of Phase Noise in Oscillators// IEEE Trans.on MTT.-2005.- V.53.- №. 5.-PP.1601-1612.

Коцержинський Б.О. Ефективність засобів зменшення фазових шумів транзисторних генераторів НВЧ Розглянуті поради щодо зменшення фазових шумів по результатах лінійного та нелінійного аналізів та ефективність їх впровадження у розробки генераторів.

Ключові слова: транзисторний генератор, фазовий шум

Коцержинский Б.А. Эффективность способов уменьшения фазовых шумов транзисторных генераторов СВЧ Рассмотрены советы по уменьшению фазовых шумов на основании линейного и нелинейного анализов и эффективность их внедрения в разработку генераторов.

Ключевые слова: транзисторный генератор, фазовый шум

Kotserjinsky B.O. Efficiency of Microwave Oscillators Phase-Noise Reduction Advices. The phase-noise reduction advices as the result of linear and nonlinear analysis and the efficiency of their oscillators design applications are considered.

Key words: transistor oscillator, phase noise

УДК 621.3.09; 004.942

НАДВИСОКОЧАСТОТНИЙ ПРИСТРІЙ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ.

Сидорук Ю.К., Моніч І.Л

Вступ. Постановка задачі

Проблема знезараження (знищення патогенної мікрофлори) в рідких середовищах, таких як вода, молоко, соки та інші, навіть при сучасному стані розвитку науки, залишається належним чином не вирішена. Вода, молоко та інші напої залишаються важливим чинником поширення інфекцій. Особливо це стосується води. В річки та озера, які є джерелами питної води, щодня потрапляють тисячі тон інфікованих стоків очисних споруд.