

УДК 621.391

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

В.Е. Арустамян¹, Т.М. Азоян², М.С. Азоян¹

¹ Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

² Военный университет связи, Санкт-Петербург, Россия

Известно, что при анализе параметрического делителя сверхвысоких частот (СВЧ) необходимо определить Фурье компоненты для нелинейных функций заряда $q(u)$ и тока $i(u)$, аппроксимирующих вольткулоновую и вольтамперную характеристики (ВКХ и ВАХ). При этом вычисление интегралов, определяющих эти компоненты даже при воздействии двухчастотного сигнала на нелинейный элемент, связано с некоторыми трудностями. С инженерной точки зрения, расчет СВЧ параметрических систем производится классическим методом, сравнение результатов которого с предложенным нами методом составляет погрешность около 5%, что вполне приемлемо с практической точки зрения. На основе результатов исследования энергетических характеристик параметрического делителя СВЧ рекомендуются условия для запуска системы.

Ключевые слова: аппроксимация, параметрический, делитель, субгармоника, вольтамперная и вольткулоновая характеристики.

Введение. В [1,2] для анализа ряда параметрических устройств на нелинейной емкости [3] был использован метод И.В. Басика [4]. В настоящей работе на основе этого метода определены компоненты тока коллектора.

Использование вышеуказанного метода существенно упрощает расчет компонентов тока в любой субгармонике при воздействии на нелинейный элемент сумм гармонических колебаний. При этом ВКХ и ВАХ нелинейного элемента (коллекторного перехода) могут быть определены как произвольными аппроксимирующими функциями, так и экспериментальными графиками. В последнем случае аппроксимации не требуется, и для расчета достаточно определить производные от ВКХ и ВАХ в рабочей точке.

Методы исследования. С помощью укороченных уравнений выводятся расчетные соотношения для условий, определяющих устойчивость транзисторного параметрического делителя (ТПД) сверхвысоких частот, а также оптимальные энергетические параметры.

Исходной для расчета принята коллекторная цепь наиболее распространенной Т-образной эквивалентной схемы транзистора [5], при этом считается, что роль генератора накачки выполняет генератор тока в коллекторной цепи.

При выводе укороченных уравнений для ТПД частоты предполагалось, что на коллекторный p-n переход воздействуют напряжения основного сигнала и его субгармоники :

$$u(t)=U_0 + U_1 \cos n\omega t + U_n \cos(\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где U_0 – постоянная составляющая напряжения, определяющая рабочую точку; φ_n - фаза субгармоники, $n= 2,3,4,\dots$. При этом принимаем, что ток накачки равен

$$I(t) = \alpha I_3 \sin(n\omega t + \varphi_1), \quad (2)$$

где αI_3 и φ_1 – соответственно амплитуда и фаза эквивалентного генератора тока коллекторной цепи.

С учетом соотношений (1) и (2) для стационарного режима получены следующие укороченные уравнения для частоты накачки и субгармоники, при этом компоненты для контура накачки фигурируют с индексом 1 для субгармоники с индексом n :

$$U_1(G_{\Sigma 1} + K_1 b_1 \sin \varphi_n) = n\alpha I_3 \sin \varphi_1, \quad (3)$$

$$U_n(X_1 - K_1 b_1 \cos \varphi_n) = n\alpha I_3 \cos n\varphi_n, \quad (4)$$

$$G_{\Sigma n} - K_n b_n \sin n\varphi_n = 0, \quad (5)$$

$$X_n - K_n b_n \cos n\varphi_n = 0, \quad (6)$$

где

$$G_{\Sigma 1} = B_1 + \frac{B_3}{8} U_1^2 + \frac{B_3}{4} U_n^2 + G_{S1}, \quad (7)$$

$$G_{\Sigma n} = G_{Sn} + G_n + B_1 + \frac{B_3}{4} U_1^2 + \frac{B_3}{8} U_n^2 + \frac{B_n}{\omega A_n} \left[\frac{1}{\omega L_n} - \omega \left(A_1 + \frac{A_3}{4} U_1^2 + \frac{A_3}{8} U_n^2 \right) \right], \quad (8)$$

$$X_1 = \frac{1}{n\omega L_1} - n\omega \left(A_1 + \frac{A_3}{4} U_1^2 + \frac{A_3}{8} U_n^2 \right), \quad (9)$$

$$X_n = \frac{1}{\omega L_n} - \omega \left(A_1 + \frac{A_3}{8} U_1^2 + \frac{A_3}{4} U_n^2 \right), \quad (10)$$

K_1, K_n – квазилинейные коэффициенты комбинационных компонентов токов накачки и субгармоники; G_{S1}, G_{Sn} – проводимости пассивных потерь; L_1, L_n – внешние индуктивности резонансных контуров накачки и субгармоники; $G_{\Sigma 1}, G_{\Sigma n}$ – проводимости потерь на образование субгармоники, вносимые нелинейными емкостью и проводимостью коллектора; X_1, X_n – реактивные проводимости на образование субгармоники, вносимые нелинейными емкостью и проводимостью коллектора;

$A_i = \frac{d^i q(u)}{dU^i} \Big|_{u=u_0}$ – i-я производная от ВКХ в рабочей точке ;

$B_i = \frac{d^i u(u)}{dU^i} |_{u=u_0}$ – i -я производная от ВАХ в рабочей точке.

Исключив фазы φ_1 в соотношениях (3) и (4) и φ_n в соотношениях (5) и (6), получаем

$$U_1 = \frac{n\alpha I_3 b_1}{\left[G_{\Sigma 1} + \frac{U_n^n}{2^{n-1} n! U_1 \sqrt{G_{\Sigma 1}}} \right] \sqrt{1 + Q_{1\Lambda}^2 \delta_{1\Lambda}^2}}, \quad (11)$$

$$G_{\Sigma n} - \frac{U_n^{n-2} b_n U_1}{2^{n-1} (n-1)! \sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2}} = 0, \quad (12)$$

где $Q_n \delta_n = \frac{B_n}{G_{\Sigma n}}$; $Q_{1\Lambda} \delta_{1\Lambda} = (X_1 - K_1 b_1 \frac{Q_n \delta_n}{\sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2}}) / (G_{\Sigma 1} + K_1 b_1 \frac{1}{\sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2}})$;

Q_n – добротность нагруженного контура на частоте субгармоники; $Q_{1\Lambda}$ – добротность контура накачки с учетом добротности и расстройки контура субгармоники; δ_n и $\delta_{1\Lambda}$ – расстройки контура накачки и субгармоники;

$$K_1 = \frac{U_n^n}{2^{n-1} n! U_1}, \quad K_n = \frac{U_n^{n-2}}{2^{n-1} (n-1)!} U_1.$$

Соотношение (12) определяет баланс амплитуд в контуре субгармоники. Подставляя вместо амплитуды U_1 ее выражение из (11), получаем уравнение относительно U_n в виде

$$U_n^{n-2} n \alpha I_3 b_n + 2^{n-1} (n-1)! G_{\Sigma 1} G_{\Sigma n} \sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2} \sqrt{1 + Q_{1\Lambda}^2 \delta_{1\Lambda}^2} + \frac{U_n^{2n-2} b_1 b_n}{2^{n-1} (n-1)! \sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2}} = 0. \quad (13)$$

При $n=2$ уравнение (13) является квадратным и имеет простое аналитическое решение. Ограничиваясь рассмотрением этого случая, что наиболее интересно с практической точки зрения, на основе (13) получаем

$$U_2 = \sqrt{\frac{8}{b_1 b_2} \sqrt{1 + Q_n^2 \delta_n^2} \left(\alpha I_3 b_2 - G_{\Sigma 1} G_{\Sigma 2} \sqrt{1 + Q_2^2 \delta_2^2} \sqrt{1 + Q_{1\Lambda}^2 \delta_{1\Lambda}^2} \right)}. \quad (14)$$

Так как $U_2 > 0$, то при

$$\alpha I_3 \geq \frac{1}{b_2} G_{\Sigma 1} G_{\Sigma 2} \sqrt{1 + Q_2^2 \delta_2^2} \sqrt{1 + Q_{1\Lambda}^2 \delta_{1\Lambda}^2} \quad (15)$$

возникают субгармонические колебания, причем чем больше αI_3 , тем больше U_2 . Если полагать, что система настроена в резонанс на обеих частотах, то есть $\delta_n = \delta_{1\Lambda} = 0$, то соотношение (15) примет упрощенный вид

$$U_2 = \sqrt{\frac{8}{b_1 b_2} (\alpha I_3 b_2 - G_{\Sigma 1} G_{\Sigma 2})} . \quad (16)$$

Мощность, выделяемая в нагрузке, в последнем случае будет

$$P_H = \frac{U_2^2}{2} G_H = \frac{4}{b_1 b_2} [\alpha I_3 b_2 - G_{\Sigma 1} (G_2 + G_H)] G_H , \quad (17)$$

где $G_2 = G_{\Sigma 2} - G_H$,

а оптимальная нагрузка, определяемая из условия $\frac{d P_H}{d G_H} = 0$, имеет величину

$$G_{\text{Нопт}} = \frac{\alpha I_3 b_2 - G_2 G_{\Sigma 1}}{2 G_{\Sigma 1}} . \quad (18)$$

С учетом (18) выражение для максимальной выходной мощности примет вид

$$P_{\text{Нмакс}} = \frac{2}{b_1 b_2 G_{\Sigma 1}} (\alpha I_3 b_2 - G_{\Sigma 1} G_2)^2 . \quad (19)$$

Таким образом, из соотношения (14) можно судить о частотных свойствах делителя СВЧ на два с учетом комплексной нелинейной проводимости коллекторного р-п перехода при известных добротностях $Q_{1\Lambda}$ и Q_2 . Выражение (15) в общем случае определяет пусковые условия системы.

Используя выражения (18) и (19), можно рассчитать оптимальную проводимость нагрузки и максимальную выходную мощность ТПД частоты.

Заключение. Результаты, полученные в данной работе, позволяют на основе решения уравнения (13) проанализировать и рассчитать ТПД частоты с любым коэффициентом деления при заданных произвольных ВКХ и ВАХ коллекторного р-п перехода.

Литература

1. **Каплан А.Е.** Субгармонические колебания в параметрическом генераторе с нелинейной емкостью // Радиотехника и электроника.- 1963.- Т. 8, N8.
2. **Басик И.В.** Метод определения компонент тока при воздействии на нелинейную систему суммы синусоидальных напряжений // Сборник научных трудов ЦНИИС.-1948.- С.70-76.
3. **Малышев В.А., Голоманенко А.Ф.** Анализ параметрических устройств на нелинейной емкости с произвольной вольткулоновой характеристикой // Радиотехника.- 1975.- N7.- С. 38-44.
4. **Азоян М.С., Азоян Т.М.** Анализ многочастотного воздействия сигнала на комплексную нелинейную проводимость контакта // Вестник ГИУА (Политехник). Серия "Информационные технологии, электроника, радиотехника".- 2014.- Вып.17, №1.- С.87-91.

5. **Каганов В.И.** СВЧ полупроводниковые передатчики.- М.: Радио и связь, 1981.- 397 с.

*Поступила в редакцию 17.09.2014.
Принята к опубликованию 17.12.2014.*

**ԳԲՀ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻԿ ԲԱԺԱՆԻՉԻ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ**

Վ.Ե. Առուստամյան, Տ.Մ. Ազոյան, Մ.Ս. Ազոյան

Հայտնի է, որ ԳԲՀ պարամետրիկ բաժանիչի հետազոտման դեպքում անհրաժեշտ է որոշել լիցքի $q(u)$ և հոսանքի $i(u)$ ոչ գծային ֆունկցիաների Ֆուրյե բաղադրիչները՝ վոլտկուլոնային և վոլտամպերային բնութագրերի ապրոքսիմացման համար: Այդ բաղադրիչները բնութագրող ինտեգրալների հաշվարկը, անգամ ոչ գծային տարրի վրա երկհաճախային ազդեցության դեպքում, կապված է որոշակի բարդությունների հետ: Ճարտարագիտական տեսանկյունից նման հաշվարկները կատարվում են դասական տարբերակով: Մեր կողմից առաջարկված հաշվարկային մեթոդի արդյունքների շեղումը չի գերազանցում 5%, ինչը գործնականորեն լրիվ բավարար է: ԳԲՀ պարամետրիկ բաժանիչի էներգետիկ բնութագրերի հետազոտման արդյունքում առաջարկված է համակարգի գործարկման պայմանը ևս:

Առանցքային բաներ. ապրոքսիմացիա, պարամետրիկ, բաժանիչ, ենթահարմոնիկա, վոլտամպերային և վոլտկուլոնային բնութագիր:

**ANALYSIS OF THE ENERGETIC CHARACTERISTICS OF A PARAMETRIC SHF
DIVIDER**

V.E. Arustamyan, T.M. Azoyan, M.S. Azoyan

It is known that at analyzing the parametric SHF divider, it is necessary to determine the Fourier components for nonlinear functions of charge $q(u)$ and current $i(u)$ approximating the volt-charge and current-voltage characteristics. In this case, the calculation of integrals defining these components, even under the influence of a two-frequency signal on the nonlinear element is associated with certain difficulties. From an engineering point of view, the calculation of the SHF parametric systems is carried out by the classical method. Comparing the results of this method with those of the method proposed by us reveals an error of about 5% which is completely admissible from the practical standpoint. Based on the investigation results of energetic characteristics of parametric SHF divider, conditions for the system start – up are recommended.

Keywords: approximation, parametric, divider, subharmonic, current-voltage, volt-charge, characteristics.