

УДК 621.391

АНАЛИЗ МНОГОЧАСТОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИГНАЛА НА КОМПЛЕКСНУЮ НЕЛИНЕЙНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ КОНТАКТА

М.С. Азоян¹, Т.М. Азоян²

¹ Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

² Военный университет связи, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается обобщенный метод анализа нелинейных радиотехнических схем на полупроводниковом р-п контакте с произвольными вольт-амперной и вольт-кулоновой характеристиками при многочастотном воздействии гармонических сигналов. Полученные результаты позволяют оценить проводимости, характеризующие эквивалентную схему контакта для каждого из воздействующих сигналов.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, вольт-кулоновая характеристика, контакт, произвольная функция, спектр, гармонические составляющие.

Введение. Известно достаточное количество способов анализа многочастотного воздействия сигнала на р-п переход, учитывающих активную [1] или реактивную [2] составляющие нелинейной проводимости, при этом характер нелинейности задается произвольной функцией [3, 4].

При проектировании радиотехнических схем на нелинейных элементах основные затруднения возникают при расчетах высокочастотных токов гармонических составляющих. Задача упрощается в том случае, когда предельно однозначно определяем нужный нам параметр.

Методы исследования. Для решения поставленной нами задачи воспользуемся более удобным методом [4], который был использован для расчета составляющих спектра при различных аппроксимирующих функциях.

Учитывая, что разные компоненты комплексной нелинейной проводимости контакта находятся под воздействием одной и той же суммы мгновенных напряжений, представим полный ток в виде суммы тока проводимости и емкостного тока (классический пример представления эквивалентной электрической схемы контакта):

$$I(t) = I_{G(U)} + I_{C(U)}. \quad (1)$$

Для определения полного спектра тока запишем зависимости тока и заряда нелинейных составляющих проводимости от напряжения в виде

$$i = f\left(U + \sum_{i=0}^n U_i \cos \omega_i t\right), \quad q = q\left(U + \sum_{i=0}^n U_i \cos \omega_i t\right), \quad (2)$$

где $i = f(U_0)$ и $q = q(U_0)$ – произвольные функции, удовлетворяющие условиям Дирихле и описывающие вольт-амперные и вольт-кулоновые характеристики (ВАХ и ВКХ) контакта; U_0 – напряжение постоянного смещения; $\sum_{i=0}^n U_i \cos \omega_i t$ – сумма переменных напряжений, действующих на контакт.

Разлагая нелинейные функции в ряд Тейлора по степеням переменного воздействия в рабочей точке $U = U_0$, путем формального выведения из-под знака суммы $f(U_0)$ и $q(U_0)$ представим выражение (2) в виде символической записи:

$$i = f(U_0) \exp \sum_{i=1}^n U_i \cos \omega_i t \frac{d}{du_0}, \quad q = q(U_0) \exp \sum_{i=1}^n U_i \cos \omega_i t \frac{d}{du_0}. \quad (3)$$

Раскладывая (3) в ряд Лорана, для полного спектра тока через комплексную проводимость получим

$$\dot{I} = i + \frac{dq(U_0 + \sum_{i=1}^n U_i \cos \omega_i t)}{dt}. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет постоянную составляющую, а также все гармонические и комбинационные составляющие тока, протекающего через комплексную нелинейную проводимость произвольного контакта, и является исходным для анализа свойств контактов и устройств, использующих подобные нелинейности.

Приведенная выше методика анализа является достаточно общей и приемлемой в случае больших сигналов, т.е. сигналов с амплитудой, превышающей величину потенциального барьера, имеющегося в контакте.

Рассмотрим общий случай сверхвысокочастотного (СВЧ) параметрического преобразователя на приборе с нелинейным контактом. Для этого определим спектральный компонент тока, протекающего через комплексную нелинейную проводимость, при воздействии трех сигналов:

$$U(t) = U_0 + U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos(n\omega_1 t + \varphi_2) + U_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3). \quad (5)$$

Полагая, что $\omega_3 \neq m\omega_1$, где m – произвольное целое число, из (4) получаем следующие выражения для составляющих токов сигнала, гармоники и мешающего сигнала:

$$I_1 = 2[a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos(\omega_1 t + \varphi_2) - \omega_1 b_1 \sin n\omega t - \omega_1 b_2 \sin(\omega_1 t + \varphi_2)], \quad (6)$$

$$I_n = 2[a_3 \cos(n\omega_1 t + \varphi_2) + a_4 \cos n\omega_1 t - n\omega_1 b_3 \sin(n\omega_1 t + \varphi_2) - n\omega_1 b_4 \sin n\omega_1 t], \quad (7)$$

$$I_3 = 2[a_5 \cos(\omega_3 t + \varphi_3) - \omega_3 b_5 \sin(\omega_3 t + \varphi_3)], \quad (8)$$

где $a_1 - a_5$ и $b_1 - b_5$ – расчетные коэффициенты соответствующих производных от ВАХ и ВКХ в рабочей точке.

После перехода к символической форме записи:

$$\widehat{U}_1 = U_1 \exp j\omega_1 t, \widehat{U}_2 = U_2 \exp j(n\omega_1 t + \varphi_2), \widehat{U}_3 = U_3 \exp j(n\omega_3 t + \varphi_3) \quad (9)$$

можем определить проводимости, характеризующие эквивалентные схемы контакта для каждого из воздействующих сигналов:

$$\dot{Y}_1 = 2 / U_1 [a_1 + j\omega_1 b_1 + e^{-j\varphi_2} (a_2 + j\omega b_2)], \quad (10)$$

$$\dot{Y}_n = 2 / U_n [a_3 + jn\omega_1 b_3 + e^{-j\varphi_2} (a_4 + jn\omega_1 b_4)], \quad (11)$$

$$\dot{Y}_3 = 2 / U_3 [a_5 + j\omega_3 b_5]. \quad (12)$$

Анализируя воздействие сигнала ω_1 , гетеродина ω_2 и их комбинационной частоты $\omega_3 = \omega_2 \pm \omega_1$, можно получить аналогичные выражения для проводимостей. При этом воздействующее на контакт напряжение имеет вид

$$U(t) = U_0 + U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + U_3 \cos[(\omega_2 - \omega_1) t + \varphi_3]. \quad (13)$$

Выражения для проводимостей имеют вид

$$\dot{Y}_1 = 2 / U_1 [a_1 + j\omega_1 b_1 + e^{j(\pm\varphi_3 \mp \varphi_2)} (a_6 + j\omega_1 b_6)], \quad (14)$$

$$\dot{Y}_2 = 2 / U_2 [a_3 + j\omega_2 b_3 + e^{j(\varphi_3 - \varphi_2)} (a_7 + j\omega_2 b_7)], \quad (15)$$

$$\dot{Y}_3 = 2 / U_3 [a_5 + j\omega_3 b_5 + e^{j(\varphi_2 - \varphi_3)} (a_8 + j\omega_3 b_8)], \quad (16)$$

$$\dot{Y}_0 = G_0 = 1 / U_0 [a_9 + 2a_{10} \cos(\varphi_2 - \varphi_3)]. \quad (17)$$

Аналогично можно получить выражения для проводимостей в случае воздействия амплитудно-модулированного сигнала при $\omega_2 = \omega_1 + \pi$; $\omega_3 = \omega_1 - \pi$:

$$\dot{Y}_1 = 2 / U_1 [a_1 + j\omega_1 b_1 + e^{-j(\varphi_3 - \varphi_2)} (a_{10} + j\omega_1 b_9)], \quad (18)$$

$$\dot{Y}_2 = 2 / U_2 [a_3 + j\omega b_3], \quad (19)$$

$$\dot{Y}_3 = 2 / U_3 [a_5 + j\omega_3 b_5], \quad (20)$$

$$\dot{Y}_0 = G_3 = 2 / U_0 a_9. \quad (21)$$

Выражения (10) - (12) и (14) - (17) являются исходными для исследования преобразующих свойств контактов с произвольными ВАХ и ВКХ, которые могут быть заданы либо в виде аппроксимирующих эти зависимости функций, либо в виде их экспериментально снятых графиков.

Рассмотрим более подробно зависимость проводимостей по каждому из сигналов от фаз воздействующих переменных напряжений. С этой целью запишем выражения (10) и (11) в следующем виде:

$$\dot{Y}_1 = 2 / U_1 [a_1 + a_2 \cos \varphi_2 - \omega_1 b_2 \sin \varphi_2 + j(\omega_1 b_1 + \omega_1 b_2 \cos \varphi_2 + a_2 \sin \varphi_2)], \quad (22)$$

$$\dot{Y}_n = 2 / U_n [a_3 + a_4 \cos \varphi_2 - n\omega_1 b_4 \sin \varphi_2 + j(n\omega_1 b_3 + n\omega_1 b_4 \cos \varphi_2 - a_4 \sin \varphi_2)]. \quad (23)$$

Из (22) и (23) видно, что при $\varphi_2 \neq 0$ активные составляющие проводимостей приобретают реактивные компоненты $a_2 \sin \varphi_2$ и $a_4 \sin \varphi_2$, обусловленные актуальной проводимостью, а реактивные составляющие - активные компоненты $\omega_1 b_2 \sin \varphi_2$ и $n\omega_1 b_4 \sin \varphi_2$, обусловленные емкостью, причем в случае, когда $-\pi \geq \varphi_2 \geq 0$, нелинейная емкость вносит в контур гармоники множителя отрицательную активную проводимость, а в контур основной частоты - положительную активную проводимость. Нелинейная активная составляющая при этом вносит в контур гармоники отрицательную реактивную проводимость, а в контур основной частоты - положительную. Таким образом, максимальные значения вносимых в контур реактивных и активных составляющих проводимости получаем при $\varphi_2 = -\pi/2 + \varepsilon$, где ε - малый дополнительный фазовый угол, обусловленный биениями высших комбинационных компонентов тока.

Аналогично можно записать и выражения для проводимости нелинейного контакта в случае преобразователя частоты:

$$Y'_1 = 2/U_1 \{a_1 + a_6 \cos(\pm\varphi_3 \mp \varphi_2) - \omega_1 b_6 \sin(\pm\varphi_3 \mp \varphi_2) + j[\omega_1 b_1 + \omega_1 b_6 \cos(\pm\varphi_3 \mp \varphi_2) + a_6 \sin(\pm\varphi_3 \mp \varphi_2)]\}, \quad (24)$$

$$Y'_2 = 2/U_2 \{a_3 + a_7 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) - \omega_2 b_7 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) + j[\omega_2 b_3 + \omega_2 b_7 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + a_7 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)]\}, \quad (25)$$

$$Y'_3 = 2/U_3 \{a_5 + a_8 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - \omega_3 b_8 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + j[\omega_3 b_5 + \omega_3 b_8 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + a_8 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)]\}. \quad (26)$$

Таким образом, в случае преобразователя частоты проводимость нелинейной емкости также приобретает активную составляющую, а активная составляющая нелинейной проводимости - реактивную на всех трех частотах.

При этом необходимо отметить, что в случае, когда $\omega_3 = \omega_2 + \omega_1$ и $\pi > (\varphi_2 - \varphi_3) > 0$, активные составляющие емкости на частотах гетеродина (ω_2) и сигнала (ω_1) имеют одинаковый знак (реактивные составляющие активной проводимости положительны). В случае, когда $\omega_3 = \omega_2 - \omega_1$, активные составляющие емкости (реактивные составляющие активной нелинейной проводимости) имеют одинаковый знак на частотах ω_1 и ω_3 и отрицательны, что соответствует поглощению энергии и внесению отрицательной активной проводимости в контуры сигнала и комбинационной частоты. Первый случай имеет место в преобразователях нерегенеративного типа, а второй - в преобразователях регенеративного типа, что подтверждается общеизвестными результатами [5].

Заключение. Рассмотренный метод анализа наиболее удобен в случае, когда ВАХ и ВКХ контакта заданы (или аппроксимированы) полиномами, так как наивысшая степень аппроксимирующей функции ограничивает количество членов ряда (4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евтянов С.И.** О связи между символическими и укороченными уравнениями // Радиотехника.- 1946. - 1.- С.43-48.
2. **Мальшев В.А., Толочаненко А.Ф.** Учет влияния автосмещения при воздействии суммы гармоник на нелинейную полупроводниковую емкость // Радиотехника и электроника. - 1973. - 6. - С.18-20.
3. А. с. кл. Н.19/14 № 310344 (СССР). Параметрический делитель частоты / **И.Х. Гуревич.** - Заяв. 12.05.1969.
4. **Басик И.В.** Метод определения компонентов тока при воздействии на нелинейную систему суммы синусоидальных напряжений // Сб. научных трудов ЦНИИС. – М., 1948. - С.15.
5. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов / Под ред. **М.В. Благовещенского, Г.М. Уткина.** - М.: Радио и связь, 1982.- 408 с.

*Поступила в редакцию 08.04.2014.
Принята к опубликованию 12.05.2014.*

ՀՊԱԿԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԲԱԶՄԱՀԱՃԱՆԱՅԻՆ ԱՂԿԱՆՇԱՆԻ ԱՂԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Մ.Ս. Ազոյան, Տ.Մ. Ազոյան

Դիտարկվում է կիսահաղորդչային ոչ գծային p-n հպակի վրա կամայական վոլտամպերային և վոլտ-կուլոնային բնութագրերով ռադիոտեխնիկական շրջանների ընդհանրացված վերլուծման մեթոդը՝ բազմահաճախային հարմոնիկ ազդանշանի ազդեցության դեպքում: Ստացված հաղորդականությունների արդյունքները բնութագրում են կոնտակտի համարժեք շրջան յուրաքանչյուր ազդանշանի համար:

Առանցքային բաներ. վոլտամպերային բնութագիր, վոլտկուլոնային բնութագիր, հպակ, կամայական ֆունկցիա սպեկտր, հարմոնիկ բաղադրիչ:

ANALYZING THE MULTIFREQUENCY IMPACT OF THE SIGNAL ON THE COMPLEX NON-LINEAR CONDUCTANCE OF THE CONTACT

M.S. Azoyan, T.M. Azoyan

A generalized method for analyzing the nonlinear electronic circuits on a p-n semiconductor with arbitrary current-voltage and voltage-Coulomb characteristics at multifrequency impact of harmonic signals is considered. The obtained results allow to estimate the conductances characterizing the equivalent circuit contact for each operating signal.

Keywords: current-voltage, voltage-Coulomb, contact, arbitrary spectrum harmonic component.