

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА РЯДАМИ ВОЛЬТЕРРА

Во Зуї Фук; Зинченко М. В., к.т.н.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», г. Київ, Україна

В сфере технической защиты информации актуальной остается задача нахождения источников электромагнитного излучения. Особого внимания заслуживают нелинейные рассеиватели, способные переизлучать в окружающее пространство новые спектральные составляющие. Исследование природы рассеивателя по спектру сигнала отклика в ряде случаев требует особых алгоритмов, причем адаптируемых под параметры воздействующего сигнала [1, 2].

В качестве модели элементарного нелинейного рассеивателя принято рассматривать симметричный вибратор, в нагрузке которого находится полупроводниковый диод. Если известна эквивалентная схема антенной структуры и вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода, то можно получить математические выражения для нахождения амплитудного спектра гармонических и комбинационных составляющих тока, проходящего через полупроводниковый прибор. Особые сложности возникают, когда на рассеиватель воздействуют четыре и более независимых сигналов с разными частотами. В этом случае нелинейный процесс представляет смешивание этих сигналов с последующим образованием широкого спектра сигнала отклика, состоящего из комбинационных и гармонических компонент типа:

$$I(K\omega_1 \pm L\omega_2 \pm M\omega_3 \pm N\omega_4) = i_{\Sigma \text{диода}},$$

где  $\omega_1 - \omega_4$  — частоты воздействующих сигналов;  $K, L, M, N$  — коэффициенты, принимающие значение из ряда целых чисел 0, 1, 2, 3, .... Для нахождения спектра сигнала отклика при полигармоническом воздействии возможно применение метода динамических рядов Вольтерра [3].

При расчете амплитуд спектральных составляющих в процессе гармонического или полигармонического возбуждения необходимо наиболее точно подобрать аппроксимирующую функцию нелинейных участков ВАХ диода, соответствующих воздействию токам. Для разрешения задачи аппроксимации как правило используется метод, основанный на применении тригонометрических функций кратных аргументов.

Получение приближенного выражения  $n$ -го порядка для ВАХ диода предусматривает выбор  $n$ -го количества точек на соответствующей характеристике с последующим формированием системы из  $n$  уравнений вида:

$$I_o = a_1 U_{\text{вход}} + a_2 U_{\text{вход}}^2 + a_3 U_{\text{вход}}^3 + \dots + a_{n-1} U_{\text{вход}}^{n-1} + a_n U_{\text{вход}}^n,$$

где  $a_1, \dots, a_n$  — коэффициенты аппроксимации.

В случае моногармонического воздействия на нелинейный рассеиватель, которое характеризуется выражением  $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)$ , где  $U_0$  — постоянное напряжение смещения, уравнение преобразованного тока имеет вид:

$$I(t) = a_1(U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)) + a_2(U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi))^2 + \dots + a_n(U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi))^n.$$

Отметим, что полигармоническое воздействие с частотами  $\omega_p$  характеризуется функцией  $u_p(t)$ , представленной в виде ряда Фурье:

$$u_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{U}_p^k \exp(jk\omega_p t),$$

где  $\dot{U}_p^k$  — коэффициенты разложения.

Рассмотрим влияние на нелинейный рассеиватель бигармонического сигнала, причем одна его составляющая по частоте намного больше другой ( $\omega_1 > \omega_2$ ). В этом случае ток и напряжение через полупроводниковый элемент будут найдены с учетом всех комбинационных частот:

$$\omega_1 \pm h \cdot \omega_2, \quad h=0,1,2,\dots$$

$$U(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} U_k \exp[j(\omega_1 + h\omega_2)t],$$

$$I(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} I_k \exp[j(\omega_1 + h\omega_2)t].$$

При более сложном полигармоническом воздействии рациональным является использование метода динамических рядов Вольтерра в исследовании нелинейно преобразованных токов. В соответствии с указанным методом производится анализ системы, использующий линейную аппроксимацию для нахождения подсистем, описываемых уравнениями первого порядка. Далее находятся подсистемы второго порядка, учитывающие «слабые» нелинейности как дополнительные источники тока. Значения комплексных амплитуд источников могут быть выражены через значения токов и напряжений, которые были найдены при расчете подсистемы первого порядка. Эта процедура продолжается до тех пор, пока не будет найден требуемый порядок.

Так, с учетом указанного подхода и точной аппроксимации функций для ВАХ полупроводникового элемента, при действии бигармонического сигнала в виде  $U_{\text{вход}} = U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t$  возможным становится нахождение амплитудных составляющих в выражениях:

$$U(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} U_l U_k \exp[j(\omega_1 + h\omega_p)(\omega_2 + l\omega_p)t],$$

$$I(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l I_k \exp \left[ j \left( \omega_1 + h\omega_p \right) \left( \omega_2 + l\omega_p \right) t \right].$$

Таким образом, в контексте решения актуальной задачи нахождения источников электромагнитного излучения средствами технической защиты информации, рассмотрено применение динамических рядов Вольтерра для анализа нелинейных рассеивателей при полигармоническом воздействии по спектру сигнала отклика. Эта методика дает возможность неявно учесть «слабые» нелинейности ВАХ полупроводникового элемента, что позволяет адекватно рассчитать минимальные уровни спектральных составляющих сигнала отклика для оценки динамического диапазона работы нелинейного рассеивателя.

### Перечень источников

1. Зінченко М. В. Моделювання ансамблю симетричних вібраторів з нелінійними навантаженнями рядами Вольтерра-Пікара / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – Вип. 41. – С. 148–156.

2. Зинковский Ю.Ф. Моделирование рассеивателей в нелинейной радиолокации рядами Вольтерра / Ю.Ф. Зинковский, М.В. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ». – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 54-64.

3. Зінченко М. В. Моделювання впливу нелінійностей на формування сигналу в нелінійній радіолокації / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Науково-технічний збірник. НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип. 2 (21). – С. 90–99.

### Анотація

Показана можливість застосування динамічних рядів Вольтерра для аналізу нелінійних розсіювачів при полігармонічному впливі по спектру сигналу відгуку. Обґрунтовано методику неявного врахування «слабких» нелінійностей ВАХ напівпровідникового елемента, що дозволяє проводити адекватний розрахунок мінімальних рівнів спектральних складових сигналу відгуку для оцінки динамічного діапазону роботи нелінійного розсіювача.

Ключові слова: захист інформації, нелінійний розсіювач, ряди Вольтерра.

### Аннотация

Показана возможность применения динамических рядов Вольтерра для анализа нелинейных рассеивателей при полигармоническом воздействии по спектру сигнала отклика. Обоснована методика неявного учета «слабых» нелинейностей ВАХ полупроводникового элемента, что позволяет производить адекватный расчет минимальных уровней спектральных составляющих сигнала отклика для оценки динамического диапазона работы нелинейного рассеивателя.

Ключевые слова: защита информации, нелинейный рассеиватель, ряды Вольтерра.

### Abstract

Possibility of usage of dynamic Volterra series for nonlinear scatterers analysis at polyharmonic impact on the response signal spectrum is shown. The method of implicit accounting of CVC "feeble" nonlinearity of semiconductor element, that allows to make an adequate calculation of minimum levels of the response signal spectral components for the estimation of dynamic range of nonlinear scatterer is justified.

Keywords: information security, nonlinear scatterer, Volterra series.