

УДК 621.397.62

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ АТТЕНЮАТОРОВ

К. т. н. Б. С. Троицкий

Одесский национальный политехнический университет
Украина, г. Одесса

Рассмотрен анализ управляемых многоэлементных аттенюаторов (УА) на основе обращения степенных рядов, с помощью которых вольт-амперные характеристики нелинейных элементов УА аппроксимируются в широком диапазоне амплитуд входных сигналов. Решена задача математического описания нелинейной цепи, содержащей произвольное число нелинейных элементов (НЭ).

Ключевые слова: аттенюатор, нелинейные искажения.

Для анализа преобразования сигналов в нелинейных цепях (НЦ) аппаратуры связи применяют [1, 2] представление зависимости между воздействием и откликом степенными рядами с вещественными или комплексными коэффициентами. На основе известных [1, 2] методов многоэлементные УА рассматриваются только качественно в связи с отсутствием метода, позволяющего установить однозначную связь между $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ в разветвленной цепи, содержащей неограниченное число нелинейных и линейных элементов.

Если предположить, что функциональная связь между током и напряжением на нелинейном элементе (НЭ) является монотонной однозначной функцией, а воздействие является квазигармоническим колебанием $x(t) = X(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$, то в сложных нелинейных цепях можно заменить произвольное число последовательно или параллельно соединенных НЭ эквивалентными нелинейными двухполюсниками (ЭНД) [3].

Для определения параметров ЭНД, эквивалентного последовательному соединению m НЭ, записывается уравнение в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\dot{i}(t) = \sum_{k=1}^m \dot{i}_k(t), \quad (1)$$

где $\dot{i}(t) = U \exp j(\omega_0 t + \varphi_0)$ — входное воздействие,

$$\dot{i}_k(t) = \sum_{q=1}^n \dot{a}_{qk} [i_k(t)]^q \quad \text{— напряжение на } k\text{-ом НЭ}, \quad (2)$$

\dot{a}_{qk} — комплексные коэффициенты, определяемые по методике [4].

Многозвенные УА представляют собой цепи лестничной структуры, поэтому находя поочередно зависимости $\dot{i}(t) = \Phi[i(t)]$ и $i(t) = \Phi[\dot{i}(t)]$ для соединенных последовательно или параллельно НЭ с помощью обращения степенных рядов и переходя от выходных зажимов цепи ко входным, можно определить зависимость $\dot{i}_{\text{вых}}(t) = \Phi[\dot{i}_{\text{вх}}(t)]$ и интересующие параметры УА.

Выбор степени аппроксимирующего соотношения (2) подробно рассмотрен в [5], где предложен алгоритм определения степени полинома n , удовлетворяющий двум условиям: сходимости степенного ряда в диапазоне заданных амплитуд $U_{\text{вх}}$ и величины n , учитывающей заданный характер продуктов нелинейных преобразований сигнала в НЦ. При анализе УА кроме формул, определяющих входное сопротивление $\dot{Z}_{\text{вх}}$, и коэффициента передачи K_u , необходимо получить расчетные соотношения для коэффициентов нелинейных искажений по второй ($K_{Г2}$) и третьей ($K_{Г3}$) гармоникам входного сигнала, а также для коэффициентов интермодуляционных искажений второго ($K_{ИММ2}$) и третьего ($K_{ИММ3}$) порядков.

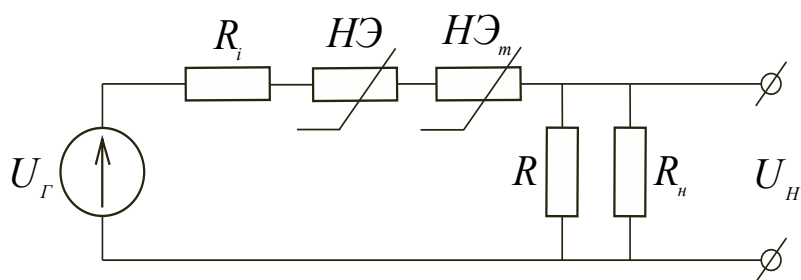


Схема управляемого аттенюатора

Применяя изложенный метод к анализу последовательного УА (см. рисунок), который состоит из последовательно включенных генератора сигнала U_G с внутренним сопротивлением R_i , m нелинейных элементов одного типа, сопротивления нагрузки R_n , технологического резистора R , ограничиваясь $n=3$ и диапазоном частот, в котором коэффициенты полинома (2) вещественны, т.е. $\dot{a}_{qk} = a_{qk}$, получим следующие результаты:

$$R_{\text{ex}} = m[A_1 + (R_i + R'_n) \cdot m^{-1}], \quad (3)$$

$$K_u = R'_n \cdot Q, \quad (4)$$

$$K_{Г2} = 0,5(-A_2 \cdot A_1 \cdot m^{-3})U / Q, \quad (5)$$

$$K_{Г3} = 0,25U^2[(2A_2^2 - A_3 \cdot A_1)A_1^{-5} \cdot m^{-3}] / Q, \quad (6)$$

$$K_{\text{нмн}2} = 2K_{Г2}, K_{\text{нмн}3} = 3K_{Г3}, \quad (7)$$

$$Q = m^{-3}[m^2 A_1^{-1} + 0,75U^2(2A_2^2 - A_1 \cdot A_3)A_1^{-5}], \quad (8)$$

Здесь $R'_n = R \cdot R_n / (R + R_n)$; величины A_1, A_2, A_3 — коэффициенты обращенного полинома $i = a_1 u^1 + a_2 u^2 + a_3 u^3$, который представляет вольт-амперную характеристику любого НЭ, входящего в состав УА, ($A_1 = a_1^{-1}, A_2 = -a_2 / a_1^3, A_3 = 2a_2^2 - a_1 a_3 / a_1^5$).

При выводе формул (4) — (8) было принято $A_1 > (R_i + R'_n)$, что подтверждается экспериментом. Значение A_1 увеличивается при увеличении m .

Из (3) — (8) видно, что при увеличении m также увеличивается R_{ex} , а K_u и нелинейные искажения уменьшаются. На основе этих соотношений могут быть рассчитаны нелинейные соотношения для конкретных схем УА и произведена оптимизация его по заданной их величине.

В докладе представлены результаты расчета последовательного УА, содержащего один, два и три нелинейных элемента, в качестве которых применен полевой транзистор BF256; управляющее напряжение $U_{\text{зи}}$ изменялось от 0 до 1,6 В, амплитуда напряжения сигнала $U = 1,5$ В, $R_i = R = 100$ Ом, сопротивление нагрузки принималось равным 100, 1000, 10000 Ом, соответственно. Анализ полученных результатов показывает, что при изменении управляющего напряжения изменяются соотношения между коэффициентами полинома, аппроксимирующего вольт-амперную характеристику НЭ, поэтому рассматриваемые зависимости имеют немонотонный характер.

Получены соотношения, характеризующие перечисленные параметры для параллельного УА, в котором НЭ включается параллельно R_n . Расчет нелинейных искажений для параллельного УА показывает, что применение нескольких НЭ в этом устройстве увеличивает нелинейные искажения до недопустимых значений, определяемых видом аппаратуры. Сравнение последовательного и параллельного УА с одним НЭ демонстрирует различное влияние R_n на нелинейные искажения: уменьшение R_n вызывает уменьшение $K_{Г2}$ и $K_{Г3}$ в параллельном аттенюаторе, тогда как в последовательном аттенюаторе искажения возрастают.

Широко применяемые в аппаратуре связи и радиовещания Г-, Т- и П-образные УА представляют структуры, образованные соответствующими соединениями последовательных и параллельных ветвей. Анализ этих УА на базе метода обращения степенных рядов показал, что их параметры описываются одинаковыми по структуре соотношениями:

$$K_u = J_1 + 0,75J_3 U^2 + 0,625J_5 U^4, \quad (9)$$

$$K_{Г2} = 0,5(J_2U + J_4U^2) / K_U, \quad (10)$$

$$K_{Г3} = (0,25J_3U^2 + 0,312J_5U^4) / K_U, \quad (11)$$

$$K_{ИМИ2} = (J_2U + 1,5J_4U^3) / K_U, \quad (12)$$

$$K_{ИМИ3} = (0,75J_3U^2 + 0,936J_5U^4) / K_U, \quad (13)$$

$$G_{BX} = D_1 + D_2U_{Г} + D_3U_{Г}^2, \quad (14)$$

полученными при ограничении степени аппроксимирующего полинома $n=3$ и представляющими сложные функции коэффициентов a_1, a_2, a_3 всех НЭ, имеющихся в схеме. Сравнивая (10) и (12), (11) и (13), видим, что для сложных схем УА $K_{ИМИ2} > 2K_{Г2}$, $K_{ИМИ3} > 3K_{Г3}$.

Таким образом, численный анализ коэффициента передачи K_U , R_{BX} нелинейных искажений $K_{Г2}$, $K_{Г3}$, интермодуляционных искажений второго $K_{ИМИ2}$ и третьего $K_{ИМИ3}$ порядков для четырех схем УА при действии сигналов большой амплитуды, изменении управляющего напряжения, сопротивления генератора и нагрузки позволил показать, что переход к сложным схемам УА уменьшает $K_{Г2}$, $K_{Г3}$, но увеличивает интермодуляционные искажения. Уменьшение последних возможно при последовательном включении нескольких нелинейных элементов (от 3 до 5).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Крылов Г. М., Хоняк Е. И., Тыныныка А. Н. и др. Управляемые аттенюаторы.— Москва: Радио и связь, 1985.
2. Богданович Б. М. Нелинейные искажения в приёмно-усилительной аппаратуре.— Москва: Связь, 1988.
3. Троицкий Б. С. Анализ и расчёт нелинейных цепей методом обращения степенных рядов // Электро-связь.— 1987.— № 8.— С.50—53.
4. Фильчаков П. Ф. Численные и графические методы прикладной математики.— Киев: Наукова думка, 1970.
5. Троицкий Б. С. Анализ и расчет управляемых аттенюаторов методом обращения степенных рядов // Труды ОНПУ.— 2004 г.— Вып. 2 (2).— С. 181—186.

B. S. Troitsky

Nonlinear distortions of multielement controlled attenuators.

The authors consider the multi-element analysis of controlled attenuators (CA) based on the circulation of power series, by means of which the current-voltage characteristics of CA nonlinear elements are approximated in a wide range of amplitudes of the input signals. The paper presents a solution for the problem of the mathematical description of the non-linear circuit containing an arbitrary number of non-linear elements (NE).

Keywords: *attenuator, nonlinear distortion.*