

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396.61

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА ИНФОРМАЦИОННЫЙ СИГНАЛ

Жиганова Елена Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент Муромского
института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: zhiganova.ei@gmail.com.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: разработана математическая модель квадратурного усилителя мощности частотно-модулированных сигналов при воздействии гармонической помехи на нелинейные усилительные элементы устройства. Оценена степень уменьшения интермодуляционных колебаний в узкой полосе частот выходного сигнала квадратурного усилителя мощности. Исследовано, как нелинейность характеристик усилителей мощности, входящих в квадратурный усилитель мощности, влияет на изменения частоты модулирующего сигнала. Определены преимущества и неудобства такого математического аппарата.

Ключевые слова: Частотное детектирование, математическая модель, интермодуляционные колебания, узкополосный сигнал, метод комплексной огибающей, нелинейное устройство, квадратурный усилитель мощности, нелинейные характеристики, компенсация интермодуляционных колебаний, аналитическое представление сигнала, степень уменьшения интермодуляции.

Введение

При разработке новых или выборе известных методов анализа нелинейных цепей при многочастотном воздействии особое внимание уделяют возможности исследования интермодуляционных колебаний. Метод должен учитывать ряд факторов: тип нелинейного элемента, параметры радиосистемы и воздействующих сигналов, сложность расчета, удобство и точность. В [1-3] предложен метод анализа интермодуляционных колебаний как амплитудно-фазовых искажений в узкой полосе частот, позволяющий получить аналитическое выражение для выходного сигнала нелинейного безинерционного устройства. Полученные соотношения позволяют рассчитать спектр сигнала в узкой полосе частот относительно несущего (основного) колебания. Данный метод применим для любого входного сигнала, который можно представить комплексной огибающей [4,5].

В большинстве радиотехнических систем ОВЧ диапазона и системах радиосвязи используют частотную модуляцию. Целью работы является разработка математической модели частотного детектирования входных и выходных сигналов квадратурного усилителя мощности частотно-модулированных сигналов с целью оценки влияния нелинейности характеристик усилительных элементов на модулирующий сигнал и исследования возможности уменьшения или компенсации некоторых порядков интермодуляционных колебаний этим устройством [6-8].

Математическая модель выходного сигнала КУМ ЧМ сигналов

Пусть на вход квадратурного усилителя мощности КУМ подается частотно-модулированный сигнал вида

$$U_{\text{вх}}(\lambda, t) = U_1 \cos(\omega_1 t + \int \Delta\omega \cdot \lambda(t) dt + \varphi_0), \quad (1)$$

где U_1 - амплитуда входного сигнала, $\Delta\omega_M$ - максимальное отклонение частоты (девиация

частоты), $\lambda(t)$ - информационный процесс, φ_0 - начальная фаза.

Рассмотрим случай, когда информационный процесс изменяется по гармоническому закону $\lambda(t) = \cos(\Omega t)$, где Ω - частота модулирующего сигнала.

Комплексная огибающая (КО) ЧМ сигнала в этом случае запишется

$$\dot{U}_{ex}(\lambda, t) = U_1 e^{j \int \Delta \omega_m \lambda(t) dt} \quad (2)$$

При подаче сигнала (2) на входы усилителей мощности УМ1 и УМ2, проходные характеристики которых описаны полиэкспоненциальной аппроксимацией с положительными знаками показателей степени ПЭА ПЗ в узкой полосе частот [4-7], с учетом фазового сдвига на $\pi/2$ в первом плече КУМ, комплексная огибающая сигнала на выходе устройства будет иметь вид

$$\dot{I}(t) = 2 \left\{ \sum_{m=0}^M a_m I_1(mU_1) \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(mU_0) \right\} \times \left\{ e^{j\varphi_{УМ1}(t)} + e^{j\varphi_{УМ2}(t)} \right\} \quad (3)$$

где $\varphi_{УМ1}(t) = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \sin(\Omega t) + \frac{\pi}{2}$ - фаза входного сигнала усилителя УМ1,

$\varphi_{УМ2}(t) = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \sin(\Omega t)$ - фаза входного сигнала усилителя УМ2.

Для оценки влияния нелинейных характеристик на модулирующий сигнал произведем демодуляцию входного и выходного ЧМ сигналов квадратурного усилителя мощности - частотное детектирование (рис. 1) [9-11].

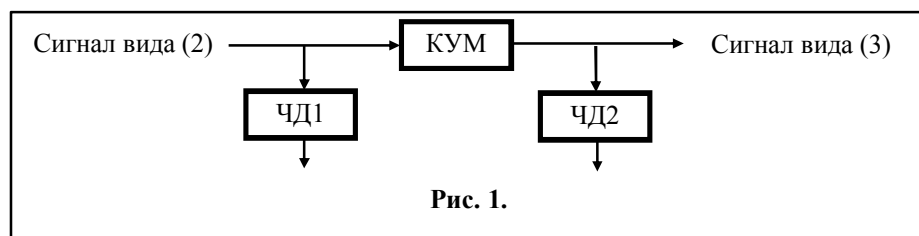


Рис. 1.

Алгоритм преобразования комплексной огибающей частотным детектором заключается в дифференцировании фазы сигнала по времени, тогда изменения частоты для входного и выходного сигналов запишутся как [12]

$$\omega_{ex}(t) = \frac{d\varphi_{ex}(\lambda, t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \sin \Omega t\right)}{dt} = \Delta \omega_m \cos \Omega t, \quad (4)$$

а для выходного сигнала

$$\omega_{вых}(t) = \frac{d\varphi_{вых}(\lambda, t)}{dt} = \left(\arctg \frac{\text{Im}(\dot{I}(t))}{\text{Re}(\dot{I}(t))} \right)'. \quad (5)$$

Спектром модулирующих сигналов на входе и выходе квадратурного усилителя мощности ЧМ сигналов при индексе частотной модуляции $m_{чм} = \Delta \omega_m / \Omega = 5$ является одна составляющая с частотой Ω [13,14].

Из выражения (3) видно, что нелинейность характеристик усилителей мощности, входящих в квадратурный усилитель мощности, не влияет на изменения частоты модулирующего сигнала.

Математическая модель выходного сигнала КУМ ЧМ сигналов при воздействии гармонической помехи на усилители мощности

Пусть на вход схемы квадратурного усилителя мощности (рис. 2) подается сигнал вида (2), а на усилители мощности УМ1 и УМ2 воздействует сигнал с частотой помехи вида

$$U_{помехи}(t) = U_2 \cos \omega_2 t,$$

где U_2, ω_2 - амплитуда и частота помехового сигнала, соответственно.

Так как входной сигнал представлен через комплексную огибающую, то и помеховый сигнал приведем к комплексной форме

$$U_{помехи}(t) = U_2 e^{j\Delta \omega_{П}},$$

где $\Delta \omega_{П} = \omega_1 - \omega_2$ - расстройка частот входного и помехового сигналов.

На входы усилителей УМ1 и УМ2, соответственно, воздействует сигнал, комплексная огибающая

которого имеет вид

$$\dot{U}_{exУМ1}(t) = \dot{U}_{ex}(\lambda, t) \cdot K_{ФВ} + \dot{U}_{помехи}(t),$$

$$\dot{U}_{exУМ2}(t) = \dot{U}_{ex}(\lambda, t) + \dot{U}_{помехи}(t),$$

где $K_{\phi B}$ - коэффициент передачи фазовращателя $\pi/2$.

Комплексная огибающая выходного сигнала квадратурного усилителя мощности с учетом помехи запишется как [15]

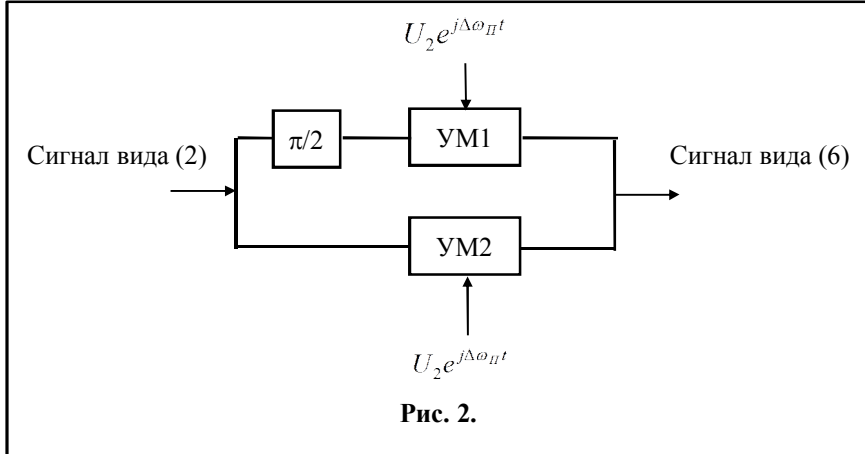


Рис. 2.

$$I(t) = 2 \sum_{m=0}^M a_m I_1(mA_1(t)) \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(mU_0) e^{j\phi_{YM1}(t)} + 2 \sum_{m=0}^M a_m I_1(mA_2(t)) \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(mU_0) e^{j\phi_{YM2}(t)}, \quad (6)$$

где

$$A_1(t) = \left| \dot{U}_{\text{ex}YM1}(t) \right| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega_1 t)}$$

$$A_2(t) = \left| \dot{U}_{\text{ex}YM2}(t) \right| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega_2 t)}$$

амплитуды входных сигналов УМ1 и УМ2,

$$\phi_{YM1}(t) = \arg \left(\dot{U}_{\text{ex}YM1}(t) \right) = -\arctg \left(\frac{S_1(t)}{S(t)} \right),$$

$$\phi_{YM2}(t) = \arg \left(\dot{U}_{\text{ex}YM2}(t) \right) = -\arctg \left(\frac{S_1'(t)}{S'(t)} \right)$$

фазы входных сигналов УМ1 и УМ2,

$$\Delta\omega_1 t = \frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t + \frac{\pi}{2} - \Delta\omega_{\Pi} t, \quad \text{- разность фаз входного сигнала УМ1 и помехи в первом плече КУМ,}$$

$$\Delta\omega_2 t = \frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t - \Delta\omega_{\Pi} t, \quad \text{разность фаз входного сигнала УМ2 и помехи во втором плече КУМ,}$$

$$S(t) = U_1 \cos \left(\frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t + \frac{\pi}{2} \right) + U_2 \cos \Delta\omega_{\Pi} t,$$

$$S_1(t) = U_1 \sin \left(\frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t + \frac{\pi}{2} \right) + U_2 \sin \Delta\omega_{\Pi} t,$$

$$S'(t) = U_1 \cos \left(\frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t \right) + U_2 \cos \Delta\omega_{\Pi} t,$$

$$S_1'(t) = U_1 \sin \left(\frac{\Delta\omega_M}{\Omega} \sin \Omega t \right) + U_2 \sin \Delta\omega_{\Pi} t.$$

Здесь $S(t)$, $S_1(t)$, $S'(t)$, $S_1'(t)$, $\phi_{1,2}(t)$ вычислены с использованием преобразований Гильберта.

Для анализа степени влияния нелинейности проходной характеристики и воздействия помехового сигнала на возникновение интермодуляционных колебаний в выходном сигнале провели частотное детектирование с использованием математической модели устройства (4)- (6).

Выражение, отражающее изменения частоты входного сигнала, имеет вид, аналогичный (4), а спектр модулирующего сигнала на входе КУМ имеет одну составляющую с частотой Ω . Из-за сложности взять производную фазы выходного сигнала КУМ по времени в аналитическом виде не удалось, поэтому воспользуемся одним из способов моделирования операции частотного детектирования, основанном на функциональном подходе и методе огибающих [11,13]. Если узкополосный процесс (6) представить в виде последовательностей значений его квадратурных компонент $\text{Re}(\dot{I}(n))$ и $\text{Im}(\dot{I}(n))$, то алгоритм формирования дискретной частоты запишется

$$\omega_{\text{вых}}[n] = \frac{\text{Re}(\dot{I}[n]) \cdot \Delta \text{Im}(\dot{I}[n]) - \text{Im}(\dot{I}[n]) \cdot \Delta \text{Re}(\dot{I}[n])}{\text{Re}(\dot{I}[n])^2 + \text{Im}(\dot{I}[n])^2}, \quad (7)$$

где

$$\Delta \text{Re}(\dot{I}[n]) = \frac{2}{\Delta t} \text{Re}(\dot{I}[n]) - \frac{2}{\Delta t} \text{Re}(\dot{I}[n-1]) - \Delta \text{Re}(\dot{I}[n-1]),$$

$$\Delta \text{Im}(\dot{I}[n]) = \frac{2}{\Delta t} \text{Im}(\dot{I}[n]) - \frac{2}{\Delta t} \text{Im}(\dot{I}[n-1]) - \Delta \text{Im}(\dot{I}[n-1]).$$

На рис. 3-а) приведен спектр модулирующего сигнала на выходе КУМ. Из рисунка видно, что спектр модулирующего выходного сигнала КУМ содержит комбинационные составляющие с частотами $\Omega \pm k\Delta\omega_{\Pi}$, наличие

которых обусловлено присутствием ИМК в спектре модулирующей частоты на выходе КУМ. Такие комбинационные составляющие будем также называть интермодуляционными в спектре модулирующего сигнала ИМК-м.

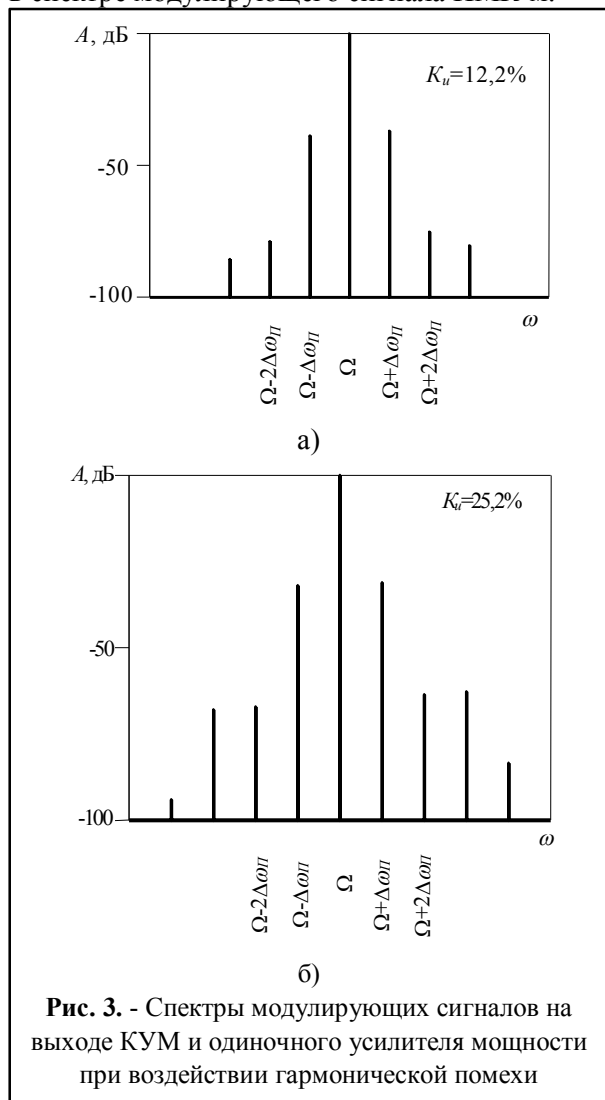


Рис. 3. - Спектры модулирующих сигналов на выходе КУМ и одиночного усилителя мощности при воздействии гармонической помехи

Для сравнения был рассчитан спектр модулирующего сигнала на выходе одиночного усилителя мощности ЧМ сигналов (рис. 3-б), построенного на том же активном элементе, при тех же параметрах входного и помехового сигналов и описываемого аналогичной аппроксимирующей функцией. В таблице 1 приведена степень подавления ИМК-м в модулирующем выходном сигнале квадратурного усилителя мощности по сравнению с одиночным УМ в дБ относительно модулирующей частоты.

Для оценки эффективности работы квадратурного усилителя мощности по сравнению с одиночным рассчитали коэффициент искажений модулирующего сигнала по выражению

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^P (U_i)^2}}{U_1},$$

где в числителе – сумма квадратов значений уровней интермодуляционных составляющих в модулирующем сигнале устройства, в знаменателе – значение уровня основного модулирующего колебания Ω .

Оказалось, что коэффициент искажений модулирующего сигнала почти в 2 раза меньше в схеме КУМ, чем в одиночном УМ.

Таблица 1. Степень подавления некоторых порядков интермодуляционных колебаний в модулирующем сигнале КУМ по сравнению с одиночным УМ

Порядок ИМК-м	Степень подавления в дБ
$\Omega + \Delta\omega_{П}$	5,9
$\Omega + 2\Delta\omega_{П}$	11,7
$\Omega - \Delta\omega_{П}$	5,9
$\Omega + 3\Delta\omega_{П}$	17,7
$\Omega - 2\Delta\omega_{П}$	11,7
$\Omega + 4\Delta\omega_{П}$	23,4
$\Omega - 3\Delta\omega_{П}$	17,7
Коэффициент искажений в одиночном УМ $K_u = 25\%$	
Коэффициент искажений в квадратурном УМ $K_u = 12,2\%$	

Как видно из таблицы 1, использование квадратурного усилителя мощности позволяет снизить уровни нечетных разностных порядков ИМК-м на 5,9 – 23,4 дБ и, таким образом, снижаются искажения модулирующего сигнала.

Разработанная математическая модель позволяет на этапе проектирования с помощью математического моделирования оценить степень влияния нелинейности характеристики, воздействующих помеховых сигналов на модулирующий сигнал, а также упрощает анализ выходного сигнала, сосредоточив внимание на интересующей части спектра, позволяет определить уровни интермодуляционных составляющих в узкой полосе частот, уменьшить объем математических расчетов. Использовать подобную модель выходного сигнала можно для любого сигнала, представленного комплексной огибающей.

Математическое моделирование с использованием разработанной модели позволяет сделать вывод о том, что нелинейность характеристик усилителей мощности, входящих в квадратурный усилитель мощности, не влияет на изменения частоты модулирующего сигнала. Если на вход устройства помимо основного ЧМ сигнала воздействует гармонический сигнал с частотой помехи, то спектр модулирующего выходного сигнала содержит комбинационные составляющие, наличие которых обусловлено присутствием ИМК в спектре модулирующей частоты на выходе устройства, тем самым происходит искажение модулирующего сигнала. Но, как показало исследование, искажение информационного сигнала почти в 2 раза меньше в схеме КУМ, чем в одиночном усилителе.

Литература

1. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод анализа интермодуляционных колебаний в нелинейных безинерционных устройствах в узкой полосе частот / Радиотехника, №11, 2004г. - С. 80-83.
2. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод комплексной огибающей в спектральном анализе нелинейного устройства / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011, №1. – С. 25-28.
3. Ромашов В.В., Шуненкова Е.А. (Жиганова Е.А.) Метод анализа интермодуляционных колебаний в усилителях мощности в узкой полосе частот/ Деп. в ВИНТИ 27.11.01, № 2474-В2001.
4. Ромашов В.В., Мошнина Е.Н., Шуненкова Е.А. (Жиганова Е.А.) Использование полиэкспоненциальной аппроксимации для анализа комплексной огибающей выходного сигнала нелинейного безинерционного устройства/ Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвузовский сборник научных трудов / Под ред. В.В. Ромашова. – Гидрометеиздат, С.-Петербург, 2001. – С.40-41.
5. Ромашов В.В., Шуненкова Е.А. (Жиганова Е.А.). Исследование интермодуляционных колебаний в квадратурных усилителях мощности / Методы и устройства передачи и обработки информации. - Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2002. - С. 46-48.
6. Жиганова Е.А. Особенности использования функций Бесселя при спектральном анализе выходного сигнала нелинейного устройства / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 3. – С. 12-15.
7. Ромашов В.В., Курилов И.А., Жиганова Е.А., Суржик Д.И., Романов Д.Н., Васильев Г.С., Харчук С.М. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2014, №1. С. 35-49.
8. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Нелинейное уравнение синтезатора частот с автокомпенсацией амплитудно-фазовых искажений / Вопросы радиоэлектроники. Серия «Общетехническая», выпуск 1.-. Москва, 2010. С.11-17.
9. Жиганова Е.А. Анализ компенсационных характеристик автокомпенсатора амплитудно-фазовых искажений в частотной области / Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: Межвуз. сб. научн. тр. / Под ред. Ю.Н. Паршина. - Рязань: РГРТУ, 2010. - С. 25-29.
10. Жиганова Е.А. Анализ работы усилителя мощности ЧМ сигналов в условиях сложномодулированных помех / Проектирование и технология электронных средств 2010, №1. С.25-29.
11. Жиганова Е.А. Оценка работы усилителя мощности с автокомпенсацией при воздействии полигармонической помехи / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 1. – С. 12-15.
12. Жиганова Е.А. Исследование влияния асимметрии в квадратурном усилителе мощности на уменьшение интермодуляционных колебаний / Радиопромышленность. 2012. № 2. С. 14-20.
13. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод анализа внутрисполостной интермодуляции в нелинейном устройстве / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013, №4. С. 13-17.
14. Жиганова Е.А. Оценка автокомпенсации интермодуляционных колебаний в асимметричном квадратурном усилителе мощности / Методы и устройства передачи и обработки информации, 2014, Вып.16. - С. 13-17.
15. Жиганова Е.А. Влияние изменения крутизны проходной характеристики на степень асимметрии плеч в квадратурном усилителе мощности / Методы и устройства передачи и обработки информации, 2013, Вып.15. - С. 4-7.

Поступила 20 марта 2015 г.

English

Estimation of non-linearity effect of power amplifiers characteristics on information signal

Elena Aleksandrovna Zhiganova– Candidate of Engineering, Associate Professor Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: zhiganova.ei@gmail.com.

Address: Orlovskaya st., 23, Murom, 602264.

Abstract: This paper describes the mathematical model of frequency detection of input and output signals of a quadrature power amplifier of frequency modulated signals in a narrow band of frequencies of output signal for the purpose of estimation of non-linearity effect of amplifying devices on a modulating signal and for the purpose of research of possible decreasing or compensating some orders of intermodulated oscillations by this device. Mathematical modeling of a quadrature power amplifier of FM signals was performed demonstrating that non-linearity of characteristics of power amplifiers that makes part of a quadrature power amplifier does not affect frequency change of a modulating signal. But, if non-linear elements of the device are under the influence of harmonic interference then intermodulated oscillations occur in the frequency modulating spectrum in the output of QPA FM signals that result in distortion of information signal. However, the distortion ratio of a modulating signal in the quadrature power amplifier is twice less than in a single amplifier according to the research. The developed model also simplifies analysis of an output signal, focusing on the targeted subspectrum, and that enables to define the levels of intermodulated components in narrow frequency bandwidth and to reduce the amounts of mathematical calculations. The same model of the output signal can be used for any signal which is in the form of a complex envelope.

Key words: The frequency detection, mathematical model, intermodulation oscillations, narrow bandwidth signal, method of complex envelope, non-linear device, the quadrature power amplifier, non-linear characteristics, compensation of intermodulation oscillations, analytical representation of the signal, level of intermodulation reducing.

References

1. Romashov V.V., Zhiganova E.A. Analytical method of intermodulation oscillations in non-linear inertia-free devices in narrow frequency bandwidth of. - Radiotekhnika, №11, 2004r. - P. 80-83.
2. Romashov V.V., Zhiganova E.A. Method of a complex envelope in spectrum analysis of the non-linear device. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy, 2011, №1. - P. 25-28.
3. Romashov V.V., Shunenkova E.A. (Zhiganova E.A.) Analytical method of intermodulation oscillations in power amplifiers in narrow frequency bandwidth. - Dep. in VINITI 27.11.01, № 2474-B2001.
4. Romashov V.V., Moshnina E.N., Shunenkova E.A. (Zhiganova E.A.) The use of polyexponential approximation for the analysis of a complex envelope of an output signal of non-linear inertia-free device.- Methods and devices of information transmission and processing: Mezhdvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. - Ed. by V.V. Romashov. - Gidrometeoizdat, St. - Petersburg, 2001. - P.40-41.
5. Romashov V.V., Shunenkova E.A. (Zhiganova E.A.). The research of intermodulation oscillations in the quadrature power amplifiers. - Methods and devices (apparatuses) of information transmission and processing. - Murom: Izd. - poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2002. - P. 46-48.
6. Zhiganova E.A. Special aspects of Bessel functions use in the spectrum analysis of an output signal of a non-linear device. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2012. - № 3. - P. 12-15.
7. Romashov V.V., Kurilov I.A., Zhiganova E.A., Surzhik D.I., Romanov D.N., Vasilyev G.S., Harchuk S.M. Analytical methods of radio units on the basis of the functional approximating. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy, 2014, №1. P. 35-49.
8. Romashov V.V., Zhiganova E.A. Non-linear equation of frequency synthesizer with self-compensation of the amplitude-phase distortions. - Voprosy radioelektroniki. Seriya «Obshchetekhnicheskaya», vypusk 1.- Moscow, 2010. P.11-17.
9. Zhiganova E.A. Analysis of compensatory characteristics of a self-compensator of amplitude-phase distortions in the frequency field. - Methods and devices of signal shaping and processing in the information systems: Mezhdvuz. sb. nauchn. tr. - Ed.by Yu.N.Parshin. - Ryazan: RGRTU, 2010. - P. 25-29.
10. Zhiganova E.A. Analysis of a power amplifier operation of FM signals in the setting of complex modulated noises. - Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv 2010, №1. P.25-29.
11. Zhiganova E.A. Performance assessment of a power amplifier with self-compensation under the impact of the polyharmonic noises. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2012. - № 1. - P. 12-15.
12. Zhiganova E.A. The research of asymmetrical effect in the quadrature power amplifier for reducing intermodulation oscillations. - Radiopromyshlennost. 2012. № 2. P. 14-20.
13. Romashov V.V., Zhiganova E.A. Analytical method of intracavity intermodulation in a non-linear device. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy, 2013, №4. P. 13-17.
14. Zhiganova E.A. Assessment of self-compensation of intermodulation oscillations in a asymmetrical quadrature power amplifier. - Methods and devices of information transmission and processing, 2014, Vyp.16. - P. 13-17.
15. Zhiganova E.A. Effect of change of slope curve of transit characteristic onto the level of arm asymmetry in the quadrature amplifier powers. - Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii, 2013, Vyp.15. - P. 4-7.