

---

---

# Анализ сигналов и систем

---

---

УДК 621.396.61

## Оценка нелинейности усилителя мощности при изменении крутизны проходных характеристик усилительных элементов

Жиганова Е.А.

В статье проводится исследование спектра выходного сигнала квадратурного усилителя мощности при воздействии бигармонического сигнала. Оценивается коэффициент внутриполосного излучения, а именно, качественный и количественный состав интермодуляционных составляющих в выходном сигнале устройства при выборе усилительных элементов (транзисторов) с разной крутизной их характеристик.

*Ключевые слова:* нелинейный элемент, усилительный элемент, квадратурный усилитель мощности, узкая полоса частот, интермодуляция, интермодуляционные колебания, коэффициент внутриполосных колебаний, проходная характеристика, крутизна.

### Введение

Сложная электромагнитная обстановка заставляет все большее внимание уделять построению выходных каскадов радиопередающих устройств (РПДУ). Использование широкополосных усилителей мощности в качестве выходных каскадов в РПДУ ОВЧ диапазона приводит к тому, что излучаемый сигнал помимо основного колебания содержит нежелательные, из которых наиболее опасными являются интермодуляционные колебания (ИМК).

В современных РПДУ различных диапазонов волн широко применяется мостовые схемы сложения мощности, в которых за счет особенностей фазовых характеристик делителя и сумматора мощности удается подавить наиболее опасный третий порядок ИМК (ИМК-3) и снизить уровень ИМК и гармоник других порядков. В большинстве радиотехнических систем ОВЧ диапазона с частотной модуляцией используют квадратурные усилители мощности (КУМ), позволяющие увеличить мощность выходного сигнала при одновременном уменьшении уровня побочного излучения.

Анализ работы квадратурного усилителя мощности КУМ в основном проводят при условии полной симметрии плеч схемы, в реальных условиях которого достичь очень

сложно. Асимметрия плеч приводит к дополнительным амплитудным и фазовым искажениям. Для снижения влияния асимметрии плеч схемы и подавления или уменьшения уровней разностных порядков ИМК в [1-3] предлагается использовать автокомпенсатор амплитудно-фазовых искажений.

Как известно, даже при использовании двух одинаковых усилительных элементов на практике будем иметь незначительные расхождения некоторых их параметров. Помеха, воздействующая на эти элементы в виде электромагнитного поля с частотой помехи, может на какой-то элемент оказывать более сильное влияние. Все это приводит к асимметрии плеч.

Кроме того, крутизна проходных характеристик усилительных элементов в зависимости от выбранного типа элемента может сильно отличаться. Возникает вопрос оценки степени влияния изменения крутизны транзистора на работу квадратурного усилителя мощности с точки зрения эффективности уменьшения уровня интермодуляционных колебаний и полной компенсации некоторых порядков ИМК.

На стадии проектирования устройства при математическом моделировании усилительные элементы имеют идентичные характеристики, поэтому предполагаемый уровень

ИМК в выходном сигнале будет отличаться от уровня ИМК, который будем иметь на практике при эксплуатации этого устройства. И очевидно это отличие будет ухудшать технические характеристики устройства.

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 [2] 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 [4-7].

В данной работе была поставлена задача проведения исследования уровня интермодуляции в выходной сигнале квадратурного усилителя мощности при изменении одного из основных параметров нелинейных усилительных элементов – крутизны проходной характеристики. Математическое моделирование провели с использованием метода в узкой полосе частот.

### Математическое моделирование КУМ на биполярном транзисторе КТ920Б

Для проведения математического моделирования КУМ (рис. 1) использовали реальные проходные характеристики ПХ усилительных элементов, аппроксимированные полиэкспоненциальной аппроксимацией.

На рис. 2 приведена нормированная проходная характеристика транзистора КТ 920 Б, который был использован в качестве усилительного элемента в обоих плечах схемы УУ1 и УУ2 [6]. Крутизна этой характеристики  $S=6$  А/В. Входным сигналом является

гармонический сигнал, на усилительные устройства УУ1 и УУ2 воздействует помеховый сигнал, изменяющийся по гармоническому закону.

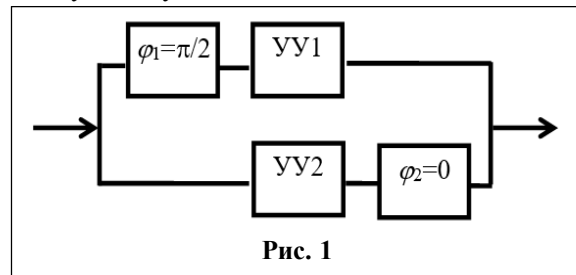


Рис. 1

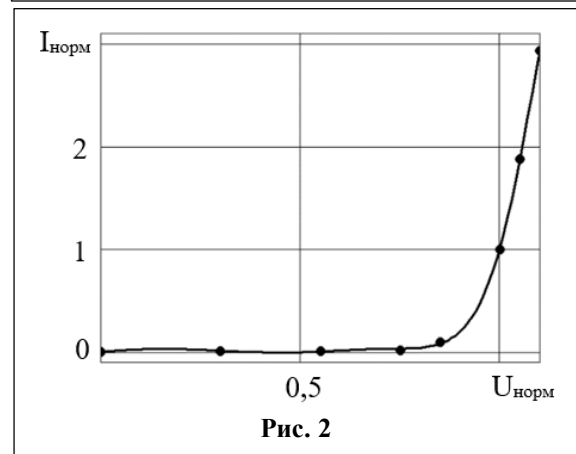


Рис. 2

Аналитическое выражение для выходного сигнала КУМ было разработано в ранних работах автора [4] и имеет вид

$$\dot{I}_{КУМ}(t) = 2 \sum_{m=0}^M a_m I_1(mA_1(t)) \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m \cdot U_0) e^{j\Phi_1(t)} + 2 \sum_{m=0}^M a_m I_1(mA_2(t)) \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m \cdot U_0) e^{j\Phi_2(t)},$$

где  $A_{1,2}(t) = \left| \dot{U}_{1,2П}(t) \right|$  и  $\Phi_{1,2}(t) = \arg(\dot{U}_{1,2П}(t))$  - амплитуды и фазы входных сигналов УУ1 и УУ2,  $U_0$  - смещение активных элементов усилителей,

$$\dot{U}_{1П}(t) = U_{ex}(t) e^{j\left(\phi_{ex}(t) + \frac{\pi}{2}\right)} + U_{П}(t) e^{j\phi_{П}(t)},$$

$$\dot{U}_{2П}(t) = U_{ex}(t) e^{j\phi_{ex}(t)} + U_{П}(t) e^{j\phi_{П}(t)}.$$

На рис. 3 и 4 приведены результаты математического моделирования КУМ с полной симметрией плеч в виде временных зависимостей амплитуды и фазы выходного сигнала (рис. 3) и спектра выходного сигнала (рис. 4).

Как видно из рис. 4, происходит компенсация ИМК третьего и пятого порядков. Коэффициент внутрисигнальных колебаний при полной симметрии равен  $K_{ВПК} = 14,8\%$ .

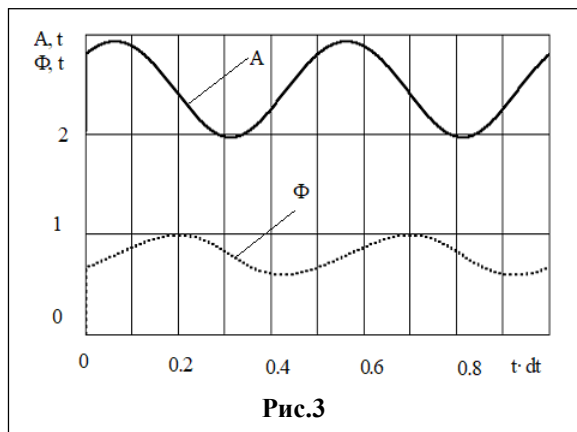


Рис.3

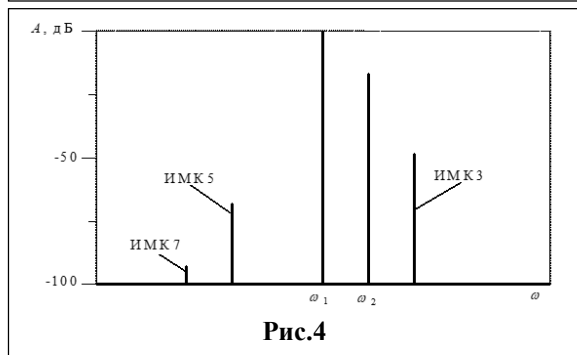


Рис.4

**Математическое моделирование КУМ на биполярном транзисторе КТ648А**

Для проведения подобного моделирования применили усилительный элемент КТ 648А, проходная характеристика которого приведена на рис. 5. Крутизна этой характеристики  $S=3$  А/В.

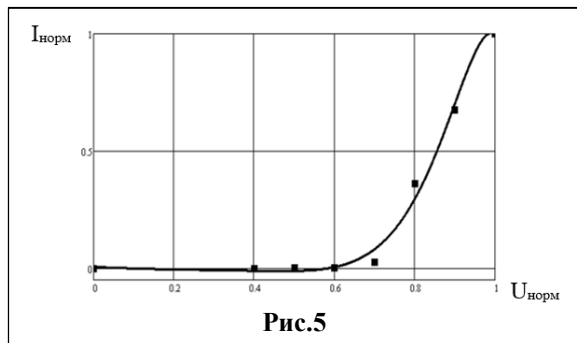


Рис.5

На рис. 6 и 7, соответственно, приведены временные зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала и его спектр КУМ с асимметрией плеч.

Коэффициент внутривибрационных колебаний, вызванной уменьшением крутизны нормированной проходной характеристики в 2 раза, равен  $K_{ВПК} = 27,5\%$ . Аналогично предыдущему моделированию, здесь произошла полная компенсация третьего и пятого порядков ИМК.

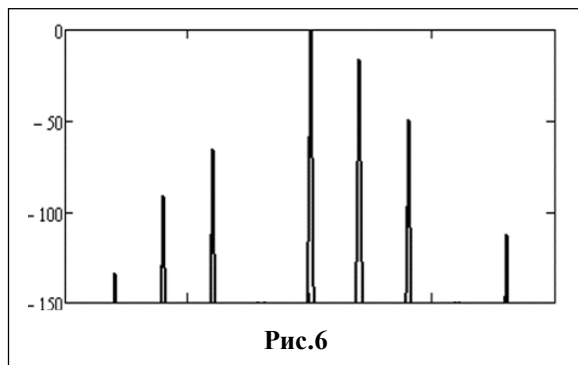


Рис.6

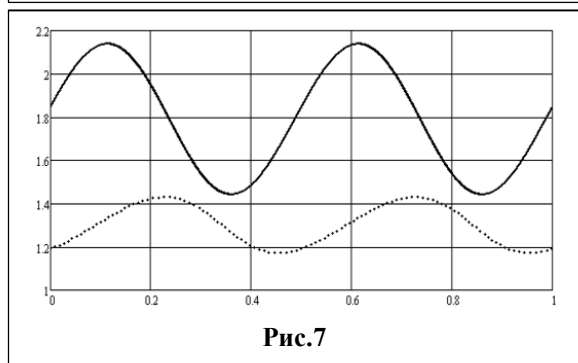


Рис.7

**Математическое моделирование КУМ на биполярном транзисторе КТ982А**

В данном случае применили усилительный элемент КТ 982А, проходная характеристика которого приведена на рис. 8. Крутизна этой характеристики  $S=2$  А/В.

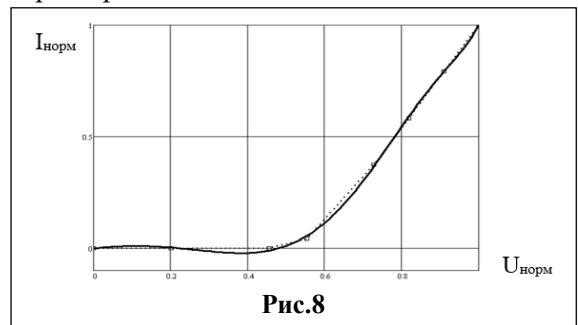


Рис.8

На рис. 9 и 10, соответственно, приведены временные зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала и его спектр КУМ с асимметрией плеч.

Коэффициент внутривибрационных колебаний уменьшения крутизны нормированной проходной характеристики в 3 раза, равен  $K_{ВПК} = 39\%$ , кроме того, как и в предыдущем случае, это позволило скомпенсировать третий и пятый порядки ИМК.

**Выводы**

В результате проведенного исследования квадратурного усилителя мощности было

установлено, что изменение крутизны проходной характеристики усилительного элемента вызывает увеличение уровня интермодуляционного излучения в полосе частот основного сигнала. Рассчитанный коэффициент внутриполосных колебаний показал, что при уменьшении крутизны ПХ в 2 раза, уровень интермодуляции увеличивается почти в два раза, а при уменьшении крутизны ПХ в 3 раза - почти в три раза.

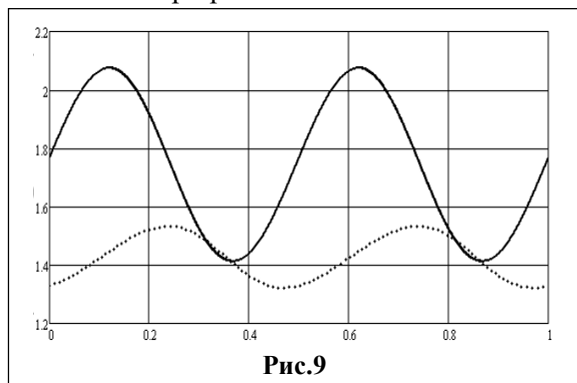


Рис.9

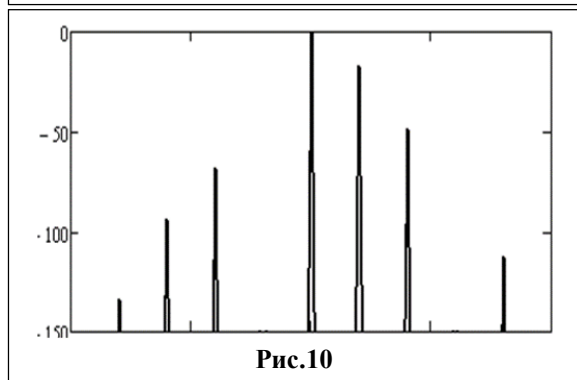


Рис.10

Кроме того, в квадратурном усилителе мощности при изменении крутизны проходных характеристик транзисторов сохраняется эффект полной компенсации (при идеальной идентичности усилительных элементов в

**Поступила 15 ноября 2018 г.**

The article studies the spectrum of the output signal of a quadrature power amplifier under the influence of a biharmonic signal. The coefficient of in-cavity radiation is estimated, namely, the qualitative and quantitative composition of intermodulation components in the output signal of the device when selecting amplifying elements (transistors) with different steepness of their characteristics.

**Key words:** direct non-linear element, amplifier element, quadrature power amplifier, narrow frequency band, intermodulation, intermodulation oscillations, coefficient of in-band oscillations.

*Жиганова Елена Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* zhiganovael@yandex.ru.

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

плечах устройства) третьего порядка ИМК слева в спектре основного сигнала (самого опасного - из-за близкого расположения к частоте информационного сигнала и большого уровня) и пятого порядка ИМК справа в спектре.

### Литература

1. Жиганова Е.А. Оценка работы усилителя мощности с автокомпенсацией при воздействии полигармонической помехи / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 1. – С. 12-15.
2. Курилов И.А., Ромашов В.В., Жиганова Е.А., Романов Д.Н., Васильев Г.С., Харчук С.М., Суржик Д.И. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №1, 2014г. - С. 35-49.
3. Жиганова Е.А. Анализ работы усилителя мощности ЧМ сигналов в условиях сложномодулированных помех / Проектирование и технология электронных средств 2010, №1. С.25-29.
4. Жиганова Е.А. Исследование влияния асимметрии в квадратурном усилителе мощности на уменьшение интермодуляционных колебаний / Радиопромышленность. 2012. № 2. С. 14-20.
5. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод анализа интермодуляционных колебаний в нелинейных безинерционных устройствах в узкой полосе частот. Радиотехника. С. 80-83. №11, 2004г.
6. Жиганова Е.А. Оценка влияния нелинейности характеристик усилителей мощности на модулирующий сигнал / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 2. – С. 5-10.
7. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод комплексной огибающей в спектральном анализе нелинейного устройства / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 1. С. 25-28.