

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕРМОДУЛЯЦІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

THE METHOD OF DETERMINATION THE INTERMODULATION DISTORTIONS OF THE POWER AMPLIFIERS

Аннотация. Предлагается метод определения интермодуляционных искажений третьего порядка усилителей мощности, основанный на измерении коэффициентов гармонических искажений третьего и пятого порядков. Произведен расчет погрешности метода.

Анотація. Пропонується метод визначення інтермодуляційних спотворень третього порядку підсилювачів потужності, заснований на вимірюванні коефіцієнтів гармонічних спотворень третього та п'ятого порядків. Здійснено розрахунок похибки методу.

Summary. The method of determination the intermodulation distortion of the 3rd order of the power amplifiers is proposed based on measurement factor harmonic distortion of the 3rd and of the 5rd orders. The calculation of the error method is made.

При анализе нелинейных искажений многочастотных сигналов усилителей мощности (УМ), работающих в квазилинейном режиме, существует традиционная проблема увеличения точности расчета коэффициента интермодуляционных искажений [1]. Для ее решения перспективно применять методы, основанные на экспериментальном определении коэффициентов полинома передаточной характеристики УМ [2]. В работах [3, 4] произведен анализ интермодуляционных составляющих на основе рассчитанных значений коэффициентов гармонических искажений, в случае, если передаточная характеристика УМ описывается полиномом третьей степени. Однако вопрос определения коэффициента интермодуляционных искажений УМ на основе измеренных значений коэффициентов гармонических искажений не рассмотрен.

Цель данной статьи – разработка метода определения коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка УМ, основанного на измерении коэффициентов гармонических искажений третьего и пятого порядков.

Наиболее удобным методом определения нелинейных искажений является анализ УМ, с помощью представления его передаточной характеристики степенным полиномом [5, 6]

$$u_{\text{вых}}(t) = \sum_{k=1}^n a_k (u_{\text{вх}}(t))^k, \quad (1)$$

где $u_{\text{вых}}(t)$ – мгновенное значение выходного напряжения; $u_{\text{вх}}(t)$ – мгновенное значение полигармонического входного сигнала; n , a_n – степень и коэффициенты полинома соответственно.

Как известно, для оценки нелинейности УМ, работающего в квазилинейном режиме достаточно принять в расчет наибольшие по уровню нечетные гармонические и интермодуляционные составляющие, а именно третьего и пятого порядков. В связи с этим, для определения этих составляющих, примем $n = 5$ [4]. Тогда после подстановки в (1) выражения для одночастотного сигнала с амплитудой U_1 и частотой ω_1 , т.е. $u_{\text{вх1}}(t) = U_1 \cos(\omega_1 t)$ и соотношения для равноамплитудного двухчастотного сигнала – $u_{\text{вх2}}(t) = U_{11} \cos(\omega_{11} t) + U_2 \cos(\omega_2 t)$, где $U_{11} = U_2$, $\omega_{11} = \omega_1$, ω_2 – амплитуды и частоты интермодулирующих сигналов [7], соответственно, при равенстве амплитуд $U_1 = U_{11} = U_2$, получаем

$$u_{\text{вых}}(t) \approx \begin{cases} a_1 U_1 \cos(\omega_1 t) + \frac{1}{4} a_3 U_1^3 \cos(3\omega_1 t) + \frac{5}{16} a_5 U_1^5 \cos(5\omega_1 t), & \text{при } u_{\text{вх1}}(t), \\ a_1 U_1 (\cos(\omega_{11} t) + \cos(\omega_2 t)) + \frac{3}{4} a_3 U_1^3 \cos(2\omega_{11} - \omega_2) t + \frac{25}{8} a_5 U_1^5 \cos(2\omega_{11} - \omega_2), & \text{при } u_{\text{вх2}}(t). \end{cases}$$

Исходя из этих выражений амплитуды напряжения третьей и пятой гармоник, соответственно равны $U_3 = \frac{1}{4} a_3 U_1^3 + \frac{5}{16} a_5 U_1^5$, $U_5 = \frac{1}{16} a_5 U_1^5$ [6], а также амплитуда интермодуляционной

(комбинационной) составляющей будет равна $U_{к3} = \frac{3}{4}a_3U_1^3 + \frac{25}{8}a_5U_1^5$ [2]. Тогда получаем соотношение $3U_3 = U_{к3} - 35U_5$. В этом случае коэффициент интермодуляционных искажений третьего порядка, определяющийся отношением $k_{21} = \frac{U_{к3}}{U_1}$ [3], будет равен

$$k_{21} = 3k_3 + 35k_5, \quad (2)$$

где $k_3 = \frac{U_3}{U_1}$, $k_5 = \frac{U_5}{U_1}$ – коэффициенты гармонических искажений третьего и пятого порядков соответственно.

Для измерения составляющих k_3 и k_5 приводится измерительная установка, структурная схема которой показана на рис. 1, а также соответствующая методика измерений.

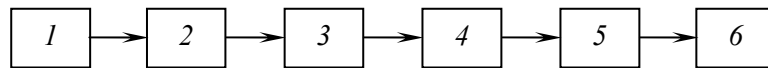


Рисунок 1 – Структурная схема измерительной установки для определения гармонических искажений: 1 – генератор стандартных сигналов (ГСС);

2 – перестраиваемый полосовой фильтр; 3 – исследуемый усилитель;

4 – ступенчатые выходные аттенюаторы на 10; 20 и 30 дБ; 5 – плавно регулируемый аттенюатор;

6 – селективный микровольтметр

Измерения осуществляются следующим образом. ГСС и фильтр 2 настраивают на частоту ω_1 , а приемник 6 на частоту $3\omega_1$, при условии, что $\omega_1 \ll \omega_{гр}$, где $\omega_{гр}$ — верхняя граничная частота транзистора исследуемого УМ. При этом уровень напряжения на выходе блока 1 устанавливается такой величины, при которой обеспечивается режим “большого” сигнала для блока 3. Далее устанавливается затухание аттенюатора 5, Δ_1 , соответствующее фиксированному уровню напряжения на входе блока 6, например 10 мВ. Затем блок 6 перестраивают на частоту ω_1 , а аттенюатором 5 устанавливается ослабление Δ_2 , вновь соответствующее амплитуде 10 мВ на входе блока 6. Разность показаний аттенюатора 5 в разгах, есть величина k_3 . Аналогичным образом измеряется величина k_5 . Затем с помощью выражения (2) определяется k_{21} .

Оценим погрешность предлагаемого метода. Пределы этой погрешности могут быть определены следующим выражением [8]

$$\delta = 1,1\sqrt{\delta_{иу1}^2 + \delta_{иу2}^2 + \delta_{мет}^2},$$

Где $\delta_{иу1}$, $\delta_{иу2}$ – погрешности измерений, вносимые измерительной установкой при измерении величин k_3 и k_5 соответственно; $\delta_{мет}$ – методическая погрешность, образующаяся в результате представления выходного сигнала (1) степенным полиномом не выше пятой степени.

Поскольку методика измерений составляющих k_3 и k_5 одна и та же, примем $\delta_{иу1} = \delta_{иу2}$, тогда $\delta = 1,1\sqrt{2\delta_{иу1}^2 + \delta_{мет}^2}$.

Пусть погрешности, вносимые элементами структурной схемы, заданы своими допустимыми границами, и нет данных в пользу какого-нибудь распределения. В этом случае можно предположить, что закон распределения соответствующих погрешностей является равномерным [8]. Тогда составляющую $\delta_{иу}$ можно определить как

$$\delta_{иу1} = \alpha\sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2},$$

Где α – коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности P . Для $P = 0,95$, $k = 1,1$ [8]; δ_i – составляющие погрешностей; m – количество источников погрешностей.

Для определения погрешности $\delta_{\text{нп}}$ составим перечень вероятных факторов, определяющих ее величину:

δ_1 – неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) блока 6;

δ_2 – погрешность отсчета уровня напряжения по микровольтметру 6.

Составляющая δ_1 определяется численными значениями ослабления сигнала из-за неравномерности АЧХ микровольтметра 6 при заданной нестабильности частоты ГСС. Тогда, в соответствии с методикой измерения, величина δ_1 будет равна [9, 10]

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_{11}^2 + \delta_{12}^2},$$

где δ_{11} и δ_{12} – значения ослабления сигнала, вызванные неравномерностью АЧХ блока 6 при настройке последнего на частоты $3\omega_1$ и ω_1 .

Примем значения $\delta_{11} = \delta_{12} = \pm 0,5$ дБ в предположении, что АЧХ блока 6 имеет максимально-плоскую вершину. Тогда $\delta_1 = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} \approx 0,7$ дБ.

Величина погрешности δ_2 , в соответствии с техническим описанием микровольтметра 6 находится в диапазоне $\pm (0,5, \dots, 2)$ дБ. Если принять величину $\delta_2 = \pm 1$ дБ, то $\delta_{\text{нп}} = 1,1\sqrt{0,7^2 + 1^2} = \pm 1,3$ дБ.

Как известно, для усилителей, работающих в режиме “большого” сигнала, выходное напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ достаточно представить полиномом седьмой степени [11]. Следовательно, составляющая $\delta_{\text{мет}}$ определяется седьмым отброшенным членом $a_7 u_{\text{вх}}(t)^7$ выражения (1). Тогда при

$$n=7, \quad U_{\text{кз}} = \frac{3}{4}a_3U_1^3 + \frac{25}{8}a_5U_1^5 + \frac{735}{64}a_7U_1^7, [2]; \quad U_3 = \frac{1}{4}a_3U_1^3 + \frac{5}{16}a_5U_1^5 + \frac{21}{64}a_7U_1^7; \quad U_5 = \frac{1}{16}a_5U_1^5 + \frac{7}{64}a_7U_1^7 \quad \text{и}$$

амплитуда седьмой гармоники $U_7 = \frac{1}{64}a_7U_1^7$ [6]. Тогда $3U_3 = U_{\text{кз}} - 35U_5 - 427U_7$, откуда коэффициент интермодуляционных искажений третьего порядка будет равен

$$k_{31} = 3k_3 + 35k_5 + 427k_7, \quad (3)$$

Где $k_7 = \frac{U_7}{U_1}$ – коэффициент гармонических искажений седьмого порядка.

Относительная методическая погрешность $\delta_{\text{мет}}$ определяется соотношением [8]

$$\delta_{\text{мет}} = \frac{k_{21}}{k_{31}} - 1,$$

или в логарифмической форме:

$$20 \log(\delta_{\text{мет}}) = 20 \log(k_{21}) - 20 \log(k_{31}). \quad (4)$$

Для определения этого вида погрешности примем наблюдаемый на практике случай, когда отношение $\frac{U_3}{U_1} = 3,16 \times 10^{-2}$, что соответствует в логарифмическом масштабе 30 дБ. Примем допущение, когда амплитуды нечетных гармонических составляющих отличаются на одну и ту же

величину. Тогда $\frac{U_5}{U_1} = 1 \times 10^{-3}$ и $\frac{U_7}{U_1} = 3,16 \times 10^{-5}$, что соответствует в логарифмическом масштабе 60

и 90 дБ соответственно. После подстановки отношений $\frac{U_3}{U_1}$, $\frac{U_5}{U_1}$ в (2) и $\frac{U_3}{U_1}$, $\frac{U_5}{U_1}$, $\frac{U_7}{U_1}$ в (3), по выражению (4) получаем численное значение $\delta_{\text{мет}} \approx 1$ дБ.

Таким образом, пределы общей относительной погрешности предлагаемого метода с доверительной вероятностью $P = 0,95$ будут равны

$$\delta = 1,1\sqrt{2 \cdot 1,3^2 + 1^2} = \pm 2,3 \text{ дБ.}$$

Эффективность предложенного метода определения коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка подтверждается сравнением его экспериментальной величины k_{21} по методу [12] с рассчитанной по соотношению (2) (рис.1). Измерения параметра k_{21} проводились при амплитудах интермодулирующих сигналов $U_{11} = U_2 = 1,5$ В и частотах $\omega_{11} = 10$ и $\omega_2 = 10,1$ МГц. Для сопоставимости этих измерений, с рассчитанной величиной k_{21} по (2), измерения величин k_3 и k_5 осуществлялось при амплитуде первой гармоники $U_1 = 1,5$ В и частоте $\omega_1 = 10$ МГц. Из рис.1 видно, что экспериментальная кривая 1, отличается от кривой 2 не более чем на 1 дБ.

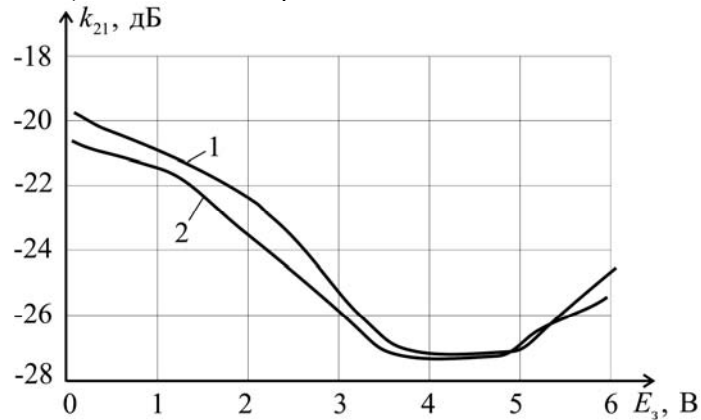


Рисунок 2 – Зависимость параметра k_{21} от напряжения смещения на затворе E_3 усилителя на транзисторе КП 901 Б: 1 – рассчитанного по выражению (2); 2 – измеренного двухчастотным методом

В заключение отметим: разработан метод, позволяющий определять величину коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка усилителей мощности, работающих в квазилинейном режиме по экспериментальным значениям коэффициентов гармонических искажений третьего и пятого порядков. Кроме того, экспериментальные исследования показали, что предложенный метод отличается высокой точностью.

Литература

1. *Троицкий Б.С.* Анализ и расчет управляемых аттенуаторов методом обращения степенных рядов / Б. С. Троицкий // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2004. – Вып. 2(2). – С. 181 — 186.
2. *Тележный Б.Г.* О синтезе функции, аппроксимирующей нелинейность выходного тракта передатчика / Б.Г. Тележный // Радиотехника и электроника. – 1988. — Вып. 9. – С. 1895 – 1899.
3. *Игнатов А.Н.* Полевые транзисторы и их применение / Игнатов А. Н. – М.: Радио и связь, 1984. – 242 с.
4. *Мощные высокочастотные транзисторы* / [Ю. В. Завражнов, И. И. Каганова, Е. З. Мазель и др.]; под ред. Е. З. Мазеля. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
5. *Радиопередающие устройства: [учебник для вузов]* / [В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.]; под ред. В. В. Шахгильдяна. – [3-е изд., перераб. и доп.] – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.
6. *Бруевич А.Н.* Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии / А.Н. Бруевич, С.И. Евтянов. – М.: Сов. Радио, 1965. — 345 с.
7. *Ямпольский Ю.С.* Определение динамического диапазона радиочастотных усилителей / Ю.С. Ямпольский, К.Я Мамедов, С.С. Дрозд // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2008. – Вып. 2(30). – С. 185 – 189.
8. *Рабинович С. Г.* Погрешности измерений / Рабинович С.Г. – Л.: Энергия, 1978. – 258 с.
9. ГОСТ 8.207 – 76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдения. Основные положения. – 10 с.
10. *Кассандрова О.Н.* Обработка результатов наблюдения / О.Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 325 с.
11. *Тихонов А.И.* Анализ и разработка высоколинейных преобразователей и усилителей радиочастоты на транзисторах: Дис.... канд. техн. наук: 05.12.17 / Тихонов Александр Иванович. – Одесса, 1984. – 182 с.
12. ГОСТ 18604.23 – 80. Транзисторы биполярные. Метод измерения коэффициентов комбинационных составляющих. – 7 с.