

Схемотехнические методы линеаризации характеристик усилителей мощности

Е. Б. Соловьева¹, А. Д. Шеллер²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹selenab@hotmail.ru, ²nastya-sheller@mail.ru

Аннотация. The contemporary telecommunication channels are characterized by broadband access and a large number of users. These properties are taken into account on designing equipment to ensure high-quality signal transmission via the communication channels. The signal transmission system includes various devices, one of them is a power amplifier that produces nonlinear signal distortions in the high efficiency mode. The developed methods for the synthesis of high-linear power amplifiers based on the circuits engineering solutions are considered. These methods comprise the envelope elimination and restoration method, the Doherty amplifier, linear amplification using nonlinear components, combined analogue locked loop universal modulator. The results of comparing the methods according to the linearization accuracy, signal broadband and amplifier synthesis simplicity are represented.

Ключевые слова: power amplifier; nonlinear distortion; nonlinear model; linearization

I. ВВЕДЕНИЕ

Для современных телекоммуникационных каналов связи характерны: широкополосность доступа, большое число пользователей – свойства, которые учитываются при проектировании аппаратуры для обеспечения качественной передачи сигналов [1], [2]. Система передачи сигналов включает разные устройства, один из них – усилитель мощности, порождающий в режиме высокого коэффициента полезного действия (КПД) нелинейные искажения сигналов в усилительных трактах каналов связи [3]–[7]. Существуют два подхода к подавлению указанных нелинейных искажений. Один из них основан на формировании сигнала ошибки, который модифицирует воздействие и далее вычитается из выходного сигнала усилителя, другой учитывает высокие темпы развития технологий и базируется на схемотехнических решениях. Оба подхода реализуются разными методами [6], [7].

В данной работе рассматриваются схемотехнические методы синтеза высоколинейных усилителей мощности. К ним относятся [6]:

- выделение огибающей и ее восстановление (envelope elimination and restoration, EER),
- усилитель Догерти,
- линейное усиление с использованием нелинейных компонент (linear amplification using nonlinear components, LINC),

- комбинированный аналоговый универсальный модулятор с замкнутой обратной связью (combined analogue locked loop universal modulator, CALLUM).

Представляются результаты сравнения указанных методов с точки зрения степени линеаризации, широкополосности сигналов и простоты синтеза усилителей.

II. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ

Метод выделения огибающей и ее восстановления (EER) [6] основан на получении из амплитудно-фазового модулированного сигнала

$$v_i(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi(t))$$

двух компонент: низкочастотной огибающей

$$s_1(t) = A(t)$$

и фазомодулированного сигнала с единичной амплитудой

$$s_2(t) = \cos(\omega t + \varphi(t)) .$$

и их последующей обработке.

Принцип работы EER-системы, изображенной на рис. 1, следующий. В блоке «AM-Limiter» (ограничитель огибающей) выделяется фазомодулированный сигнал $s_2(t)$ с единичной амплитудой и далее задерживается в блоке «Delay». Низкочастотная огибающая $s_1(t)$ формируется в блоке «Envelope detector» и затем усиливается. Модулированный сигнал синтезируется в блоке «Power Amplifier and Modulator».

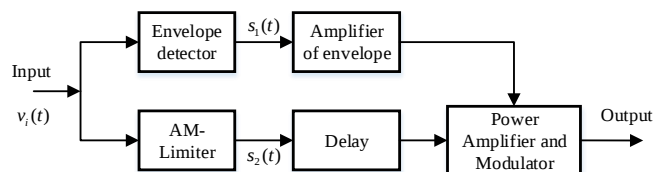


Рис. 1. Блок-схема EER-системы усиления

Метод EER прост в реализации в силу отсутствия обратных связей, однако он чувствителен к рассогласованию амплитудной и фазовой компонент, что ведет к необходимости их синхронизации.

III. УСИЛИТЕЛЬ ДОГЕРТИ

Блок-схема усилителя Догерти, представленная на рис. 2, содержит два усилителя: главный, работающий в классе В или АВ, и вспомогательный, работающий в классе С. Линии с длиной волны $\lambda/4$ предназначены для согласования импедансов [8], [9].

При низком уровне воздействия работает главный усилитель, вспомогательный отключен. Когда уровень входного сигнала превышает пороговое значение, включается вспомогательный усилитель, и на нагрузку действуют сигналы обоих усилителей. На рис. 3 показана амплитудная характеристика усилителя Догерти, где $A_{\max}$ – максимальная амплитуда выходного сигнала системы усиления.

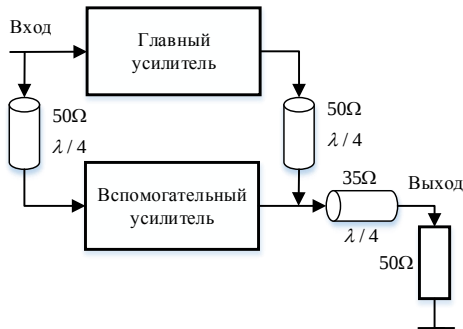


Рис. 2. Архитектура усилителя Догерти

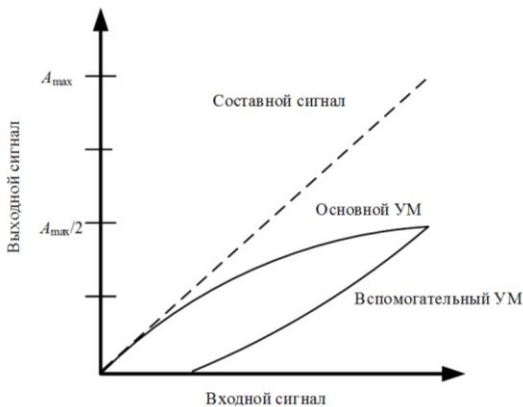


Рис. 3. Амплитудная характеристика усилителя Догерти

Усилитель Догерти имеет более высокий КПД по сравнению с усилителями-аналогами из-за рационального использования транзисторов по току (здесь, в отличие от класса А, транзистор открыт лишь часть периода сигнала). Такое схемное решение позволяет эффективно управлять входными сигналами с высоким отношением пиковой мощности к средней, которое характерно для современных систем связи.

Недостаток усилителя Догерти – его узкополосность, преодоление которой возможно за счет увеличения числа вспомогательных усилителей и применения цифровых технологий.

IV. ЛИНЕЙНОЕ УСИЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТ ИЛИ ДЕФАЗИРОВАНИЕ

В основе метода линеаризации с использованием нелинейных компонент (LINC) [6], [8], [9] лежит идея представления амплитудно-фазового модулированного сигнала в виде суммы двух сигналов с постоянной амплитудой:

$$v_i(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi(t)) = \cos(\arccos(A(t))) \cos(\omega t + \varphi(t)) = v_1(t) + v_2(t) ,$$

где

$$v_1(t) = 1/2 \cos(\omega t + \varphi(t) + \arccos(A(t))),$$

$$v_2(t) = 1/2 \cos(\omega t + \varphi(t) - \arccos(A(t))).$$

Блок-схема LINC изображена на рис. 4. Как следует из анализа рис. 4, входной сигнал разделяется на две фазомодулированные составляющие $v_1(t)$ и $v_2(t)$, затем эти составляющие усиливаются и суммируются, образуя выходной сигнал.

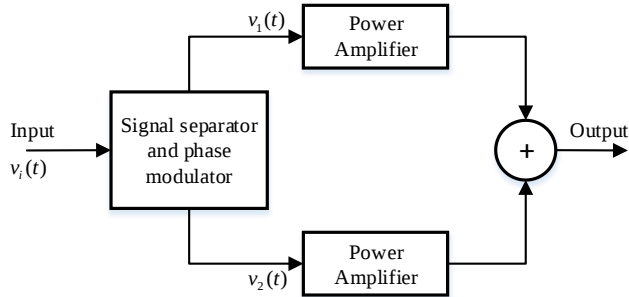


Рис. 4. Блок-схема LINC-системы

Отсутствие модуляции по амплитуде у сформированных составляющих входного сигнала позволяет избежать их аддитивных искажений. Точность преобразований в LINC-системе зависит от идентичности внутренних усилителей.

V. КОМБИНИРОВАННЫЙ АНАЛОГОВЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МОДУЛЯТОР С ЗАМКНУТОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Система с замкнутой обратной связью (CALLUM) [6], [8], [9] основана на усилении двух сигналов с постоянной огибающей в независимых усилителях мощности. Входными сигналами системы являются синфазная $I(t)$ и квадратурная $Q(t)$ составляющие модулированного колебания

$$v_i(t) = I(t) \sin(\omega t) + Q(t) \cos(\omega t) .$$

Блок-схема CALLUM-системы показана на рис. 5.

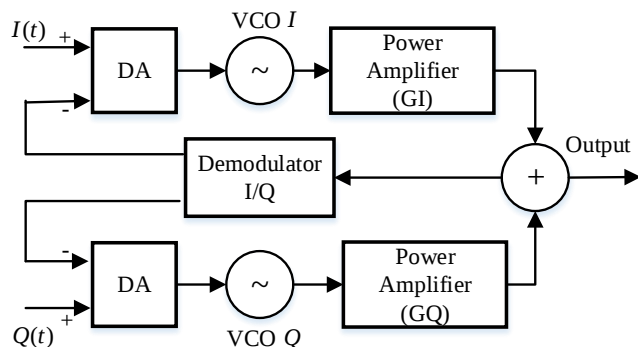


Рис. 5. Блок-схема CALLUM-системы

Выходной сигнал системы по линии обратной связи поступает в блок «Demodulator», где выделяются синфазная и квадратурная составляющие выходного сигнала. В блоках «DA» (differential amplifier) полученные компоненты вычитаются из соответствующих компонент входного сигнала. В результате на выходах блоков «DA» формируются сигналы ошибки, которые управляют генераторами VCO I, VCO Q (voltage controlled oscillator). Далее выходные сигналы генераторов отдельно усиливаются и суммируются друг с другом, образуя выходной сигнал системы.

Отметим возможную нестабильность CALLUM-системы из-за дисбаланса внутренних генераторов, управляемых напряжением.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свойства рассмотренных методов линеаризации усилителей мощности, синтезируемых на основе схемотехнических решений, представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 СВОЙСТВА МЕТОДОВ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Метод линеаризации	Сложность метода	Степень линеаризации	Полоса пропускания
EER	средняя	средняя	узкая
Усилитель Догерти	высокая	высокая	узкая
LINC	высокая	высокая	средняя
CALLUM	высокая	высокая	узкая

Из анализа таблицы следует, что по совокупности показателей метод LINC превосходит другие рассмотренные системы линеаризации. Однако отметим, что система CALLUM и усилитель Догерти не утратили свою популярность в силу их конструктивности и возможности применения цифровых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Степунин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 Т. Том 1. Москва–Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 384 с.
- [2] Степунин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 Т. Том 2. Москва–Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 420 с.
- [3] RF power amplifier behavioral modeling / D. Schreurs, M. O'Droma, A.A. Goacher, M. Gadringer. New York: Cambridge University Press, 2009. 260 p.
- [4] Wood J. Behavioral modeling and linearization of RF power amplifiers. Norwood: Artech House, 2014. 326 p.
- [5] Бычков Ю.А., Соловьева Е.Б., Щербаков С.В. Непрерывные и дискретные нелинейные модели динамических систем. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 420 с.
- [6] Соловьева Е.Б. Методы линеаризации характеристик усилителей мощности // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С.41-47.
- [7] Соловьева Е.Б., Шеллер А.Д. Методы линеаризации усилителей мощности с обработкой сигнала ошибки // 74-я науч.-техн. конф. Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: Сборник докладов, Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2019 / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. С.64–68.
- [8] Grebennikov A., Sokal N.O., Franco M.J. Switchmode RF and microwave power amplifiers. UK: Elsevier Inc., 2012. 704 p.
- [9] Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers / Editor: J.L.B. Walker. New York: Cambridge University Press, 2012. 687 p.