

УДК 681.511.48

## Механизмы линейризации выходных каскадов передатчиков

Все более высокие требования предъявляются к современным средствам телекоммуникаций в области линейности и повышенным коэффициентам полезного действия (КПД), что обусловлено необходимостью обеспечения высокого качества конечного продукта и проводимой повсеместно политикой энергосбережения. Особенно это относится к электрическим и радиотехническим системам.

Р. А. ЖЕРНОСЕКОВ,  
соискатель БГУИР

**Введение.** Вопросу эффективности работы оконечных каскадов радиопередающих средств уделялось немало внимания с самого начала их появления. Однако тема линейризации выходных каскадов передатчиков стала самостоятельным направлением сравнительно недавно и получила широкое распространение в последнее время. Это вызвано прежде всего получившими широкое распространение цифровыми видами модуляции, такими как, например, OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов).

Различают несколько видов механизмов линейризации. В настоящее время их можно разделить на три группы:

- аппаратные – механизмы, которые реализуются с помощью схемотехнических решений;
- программные – механизмы, где находят применение различного рода специализированные контроллеры, с помощью которых реализуются необходимые параметры выходных каскадов;
- комбинированные – здесь наряду со схемотехническими решениями используются

и программные средства. Рассмотрим некоторые из них.

**Усилители с прямой связью (Feedforward Amplifier).** В 20-х годах прошлого столетия американским инженером Х. С. Блэком был предложен вариант построения усилителя с подавлением компонент четного и нечетного порядка, которые возникают в передающей системе и носят характер нелинейности. Предложенная схема была использована непосредственно на ВЧ-диапазонах и по своей структуре имеет две части. Усиленный сигнал со смещенным по времени опорным сигналом. В этом случае, компоненты сигнала, которые в своем составе имеют элементы шума и искажений основного усилителя, усиливаются с помощью дополнительного высококачественного усилителя и добавляются к смещенному по времени сигналу основного усилителя, в такой фазе, которая позволяет свести к минимуму искажения и уровень шума в выходном сигнале. Элементы задержек (D1, D2), которые используются в такой системе служат для согласования с частотно-зависимыми фазовыми

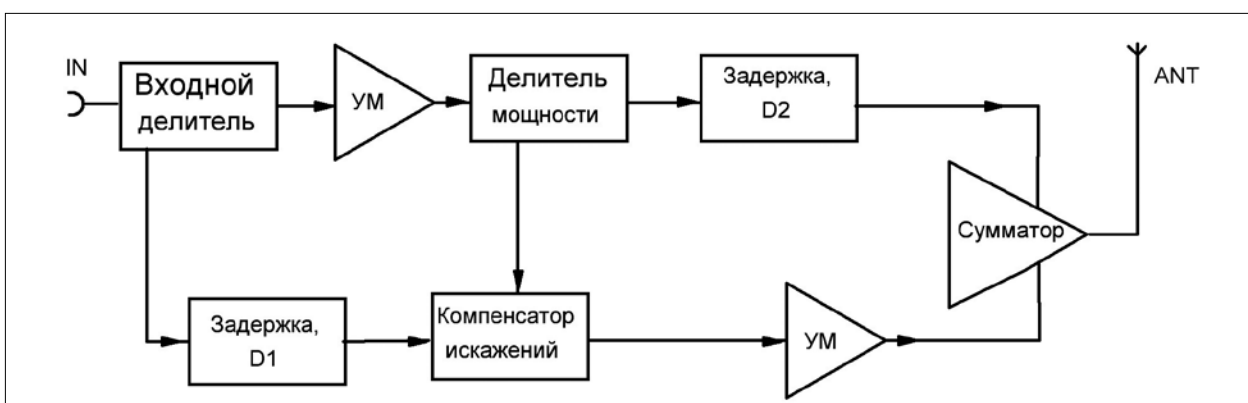


Рисунок 1 – Усилитель с прямой связью

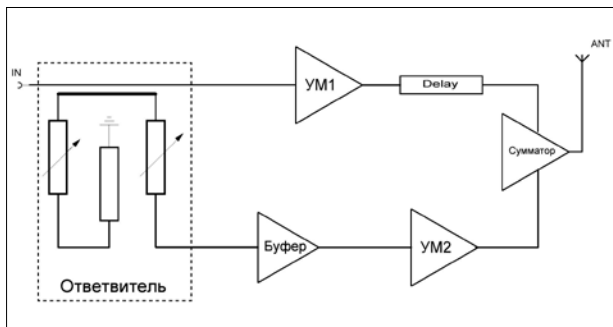


Рисунок 2 – Усилитель прямой линейризации с отражением

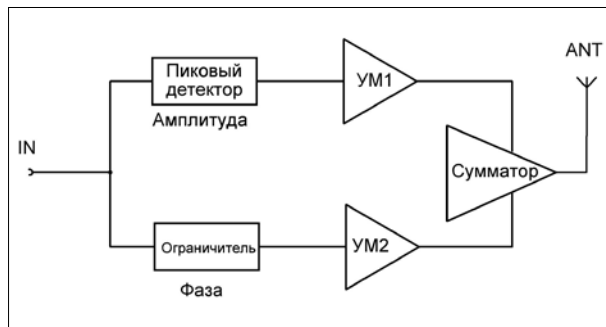


Рисунок 3 – Механизм выделения огибающей и ее восстановления

сдвигами в используемых усилителях. Небольшие отклонения в согласовании по фазе и амплитуде этих усилителей в значительной степени ухудшает компенсацию искажений. Усилитель с прямой связью, показан на рисунке 1[1].

В основе механизма усилителя прямой линейризации с отражением (RFAL) используется отраженный входной сигнал от одного из усилителей мощности, и он используется для коррекции интермодуляционных искажений в другом усилителе. Базовым принципом механизма (RFAL, **Reflect Forward**) является то, что усилители начинают использоваться тогда, когда они еще находятся в нелинейной рабочей области. Однако, при высоких уровнях возбуждения вход усилителя отражает не только составляющие основной частоты, но и составляющие нелинейных искажений, появляющихся на выходе усилителя. При этом уровень нелинейных искажений на входе, пропорционален выходному и имеет уровень достаточный, чтобы их использовать в качестве сигнала коррекции искажений вносимых выходными транзисторами, а также корректировать их амплитуду и фазу, чтобы эффективно подавлять возникающие интермодуляционные искажения. Для примера, собранный по такой системе усилитель, изготовленный по технологии LDMOS, обеспечил выходную мощность порядка 43 дБм, при общей эффективности 20 %, при уровне подавления интермодуляции третьего порядка более чем на 15 % в диапазоне частот 865–895 МГц [2].

Еще одним механизмом линейризации выходных каскадов является метод выделения огибающей и ее восстановления (EER, **envelop elimination and restoration**).

Из амплитудно- фазового модулированного сигнала, выраженного формулой

$$v_{ii} = A(t)\cos(\omega t + \varphi(t)), \tag{1}$$

выделяются две компоненты: низкочастотная  $s_1 = A(t)$ , и фазомодулируемая, которая имеет амплитуду, равную 1 и подвергаются дальнейшей обработке.

По своей структуре механизм EER очень близко напоминает усилитель Кана. Выделяемая низкочастотная составляющая сигнала усиливается и моделируется, задержанным во времени фазомодулированным сигналом и в последствии усиливается в самом УМ.

Сам по себе такой механизм линейризации несложен. Однако такой способ линейризации очень чувствителен к рассогласованию амплитудных и фазовых составляющих, потому для нормальной работы данного механизма требуется их временная синхронизация.

**Линейное усиление с использованием нелинейных компонент (Linear Amplification Using Nonlinear Components, LINC) или применение дефазирования.** Данный механизм линейризации основывается на том, что амплитудно-фазовый сигнал  $v_i$  представлен в виде суммы двух фазомодулированных сигналов  $v_1$  и  $v_2$ , что выражается следующей формулой:

$$\begin{aligned} v_1 &= A(t)\cos[\omega t + \varphi(t)] = \cos\{\arccos[A(t)]\} \\ \cos[\omega t + \varphi(t)] &= v_1(t) + v_2(t) \tag{2} \\ \text{где } v_1 &= 1/2 \cos\{\omega t + \varphi(t) + \arccos[A(t)]\}, \\ v_2 &= 1/2 \cos\{\omega t + \varphi(t) - \arccos[A(t)]\}. \end{aligned}$$

Механизм линейризации по методу LINC реализуется следующим образом: сформированный фазомодулированный сигнал поступает на вход усилителей, с постоянной амплитудой, где разделяется на два сигнала  $v_1$  и  $v_2$ , усиливается до необходимого уровня и складывается на выходе устройства. Структурная схема механизма линейризации LINC изображена на рисунке 4.

Применяя современные цифровые технологии, используя этот механизм линейризации, удается получить высокую степень линейности выходного каскада. При аналоговой реализации подобного механизма достичь такой линейности невозможно.

Усиление подобных механизмов полностью зависит от линейности и фазовой синхронизации входящих в систему усилителей.

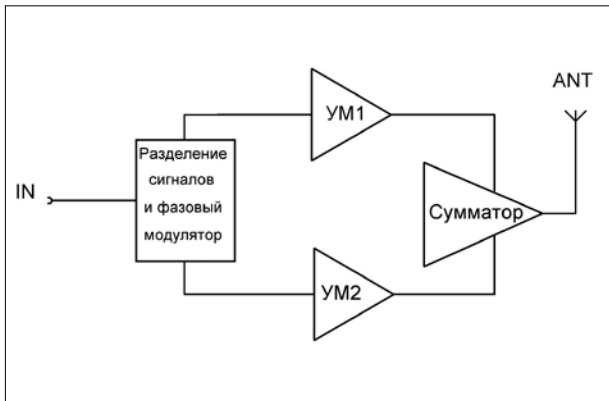


Рисунок 4 – Механизм линейризации методом дефазирования

Обеспечить высокую линейность характеристик усилителей мощности можно, используя механизм предварительного искажения входного сигнала, усиление которого в УМ приведет к компенсации искажений самого УМ. В настоящее время наибольшее распространение получил механизм, где предискажения создаются в цифровом виде посредством предсказателя (DPD, digital predistorter). Подобный предсказатель, включается в систему передачи данных. Таким образом, блок усилителя мощности разделяется на две части: он содержит в своем составе цифровую часть и аналоговую. Такое взаимодействие позволяет получить высокую степень линейности и усиления, используя сам усилитель мощности как можно эффективнее. Данный вид механизма линейризации используется в системах 5G. Основной вопрос – это

поиск оптимальных алгоритмов с точки зрения быстродействия расчета [3]. Структурная схема усилителя с DPD линейризацией представлена на рисунке 5.

**Заключение.** Рассмотренные механизмы линейризации выходных каскадов, далеко неполный список. В зависимости от области применения и использования каждый имеет свою специфику. Современные средства цифровой техники позволяют создавать эффективные алгоритмы для надежной и качественной работы радиопередающих средств. Наиболее перспективным направлением в области линейризации является использование цифрового DPD (предыскажения) в усилителях мощности систем 5G. К настоящему времени ведется поиск наиболее оптимального алгоритма предыскажения, который позволит максимально реализовать качественные характеристики усилителя мощности при сохранении высокого КПД в области энергосбережения.

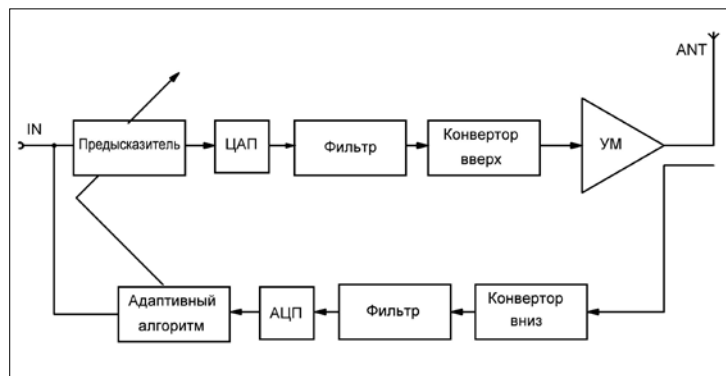


Рисунок 5 – Механизм линейризации с помощью DPD

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Legarda, J.** Feedforward amplifiers for wideband communication system. The Netherlands, Dordrecht: Spinger, 2006.
2. **Gutierrez, R.**, High-Efficiency Linearized LDMOS Amplifiers Utilize the RFAL Architecture, High Frequency Electronics, vol.6, pp. 22–28, Feb., 2004.
3. **Соловьева, Е. Б.** Методы линейризации характеристик усилителей мощности / Е. Б. Соловьева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – № 9, стр. 41–47.

*Increasingly high demands are placed on modern telecommunications in the field of linearity and increased efficiency. This is due to the need to ensure the high quality of the final product and the energy saving policy pursued everywhere. This is especially true for electrical and radio engineering systems.*

Получено 23.11.2022.