

## Разработка высокоэффективного модуляционного тракта для ВЧ усилителя мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала

Приводятся расширенная методика расчета, анализ различных вариантов структуры и результаты экспериментальных исследований высокоэффективного оконечного каскада ШИМ модулятора для ВЧ усилителя мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала.

**Варламов О.В.,**  
с.н.с. НИЛ-6 НИЧ МТУСИ, к.т.н.

Модуляционный тракт усилителя мощности с разделным усилением составляющих модулированного ВЧ сигнала во многом определяет качественные и энергетические характеристики усилителя в целом. Предстоящий перевод средств радиосвязи на цифровые виды модуляции, использующие в общем случае амплитудно-фазомодулированные сигналы с высоким пикфактором (до 10 дБ) предъявляет новые, более жесткие требования к модуляционному тракту. В частности, для получения высокого среднего КПД усилителя мощности таких сигналов, высокий КПД модуляционного тракта должен сохраняться при снижении мощности на 15...20 дБ от максимальной.

Кроме того, известно, что сигналы с цифровыми видами модуляции более критичны к искажениям в нижней части амплитудной характеристики. Поэтому линейный динамический диапазон амплитудной характеристики должен составлять не менее 35...40 дБ.

Традиционно применявшееся схемотехническое решение для оконечного каскада усилителя ШИМ (последовательный ключ с рекуперационным диодом [1, 2]) может обеспечить достаточно высокий КПД (более 90%) при снижении мощности до уровня на 14 дБ меньше максимальной, однако не обеспечивает линейности в нижней части амплитудной характеристики.

Синхронная (двухтактная) схема оконечного каскада усилителя ШИМ позволяет обеспечить требуемую линейность и может рассматриваться в качестве основы для разработки модуляционного тракта с заданными параметрами.

Для более корректного анализа энергетической эффективности усилителя ШИМ в широком диапазоне выходных напряжений использовалась расширенная (по сравнению с традиционными) методика учета потерь. Расчет проводился для современных n-канальных MOSFET транзисторов фирмы IR (IRFB4615), которые были установлены в разработанном макете.

1. Потери на сопротивлении насыщения верхнего транзистора:  
 $R_{внас} = \ln 2 \cdot r \cdot D$ ,  
где  $D$  — рабочий цикл ( $E_{вх}/E_{вх\max}$ ),  
 $I_n = E_{вх}/R_n$ ,  $R_n$  — сопротивление нагрузки модулятора (4 Ом),  
 $r$  — сопротивление насыщения транзистора (0.039 Ом).
2. Потери на переключение верхнего транзистора:  
 $R_{впер} = 0.5 \cdot E_{пит} \cdot I_n \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{такт}$ ,  
где  $f_{такт}$  — тактовая частота ШИМ,  
 $t_r$  — время фронта (35нс),  $t_f$  — время спада (20нс).
3. Коммутативные потери верхнего транзистора:  
 $R_{вком} = 0.5 \cdot C_{вх} \cdot E_{пит}^2 \cdot f_{такт}$ ,  
где  $C_{вх}$  — выходная емкость транзистора.
4. Потери на сопротивлении насыщения нижнего транзистора:

$$R_{ннас} = \ln 2 \cdot r \cdot (1 - D).$$

5. Потери в диоде подложки нижнего транзистора:

$$R_{дл} = V_f \cdot I_n \cdot f_{такт} \cdot (t_{dr} + t_{df}),$$

где  $V_f$  — прямое напряжение диода подложки (1V),

$t_{dr}$ ,  $t_{df}$  — времена фронта и спада диода подложки (10 нс).

6. Потери на восстановление диода подложки:

$$R_{гт} = Q_{гт} \cdot E_{пит} \cdot f_{такт},$$

где  $Q_{гт}$  — накопленный заряд диода подложки (177нС).

7. Потери в ФНЧ:

$$R_{фил} = I_n^2 \cdot R_{фил},$$

где  $R_{фил}$  — сопротивление катушек индуктивности ФНЧ и датчика тока (0,054 Ом).

Результирующий КПД усилителя ШИМ можно определить как:

$$\eta = E_{вх} \cdot I_n / (E_{вх} \cdot I_n + R_{внас} + R_{впер} + R_{вком} + R_{ннас} + R_{дл} + R_{гт} + R_{фил}).$$

Расчитанные по данной методике значения КПД оконечного каскада ШИМ в широком диапазоне выходных напряжений (для выбранной элементной базы) приведены на рис. 1 (кривая "Синхронный"). Там же приведены значения КПД для традиционного схемотехнического решения, рассчитанные по аналогичной методике (кривая "Традиционный ШИМ"). Сравнение результатов расчетов показывает, что, начиная с выходного уровня на 16 дБ ниже максимального, синхронный каскад проигрывает по КПД. Поэлементный анализ потерь в диапазоне амплитуд выходного сигнала показал, что причиной этого являются потери на восстановление диода подложки нижнего транзистора, которые не зависят от уровня выходного сигнала и составляют около 1 Вт.

Шунтирование нижнего транзистора диодом Шотки устраняет данный вид потерь, добавляя коммутативные потери в емкости диода (около 0,14 Вт). Такая конфигурация оконечного каскада ШИМ (кривая "Расчет" на рис. 1) имеет более высокие энергетические характеристики для данного применения — КПД выше 90% даже при снижении выходного уровня на 20 дБ от максимального. Такой способ построения оконечного каскада модулятора был использован в лабораторном макете ВЧ усилителя мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала (УМРС-КВ300 — усилитель КВ диапазона с выходной мощностью 300 Вт).

Следует отметить, что для низковольтных применений, в частности, в импульсных источниках вторичного электропитания, энергетически более выгодной оказывается синхронная схема оконечного каскада без диода Шотки [3], поскольку потери на восстановление диода подложки нижнего транзистора уменьшаются прямо пропорционально напряжению питания. Такая схема использовалась в модуляционном тракте макета усилителя мощности с разделным усилением составляющих с выходной мощностью 10 Вт при напряжении питания 12 В, разработанном в НИЛ-6 НИЧ МТУСИ в предыдущие годы.

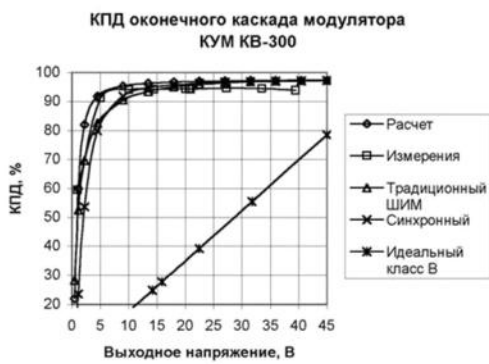


Рис. 1. Энергетические характеристики оконечного каскада ШИМ модулятора

В высоковольтных применениях, в частности, в модуляционных трактах мощных средневолновых радиовещательных передатчиков с напряжением питания 300...500 В из-за отсутствия высоковольтных диодов Шотки приходится применять традиционную схему оконечного каскада усилителя ШИМ. Для обеспечения требуемой линейности в нижней части амплитудной характеристики (при незначительном снижении КПД) в этом случае применяют дополнительный "нижний" параллельный ключ, подключенный через резистор [4, 5].

Реализованное в настоящей работе решение обеспечивает наилучшие энергетические характеристики в диапазоне напряжений питания от 25...30 В до 100...150 В.

Формирователь ШИМ построен по классической схеме и работает на частоте 120 кГц. Усилитель ШИМ выполнен на современных n-канальных MOSFET транзисторах фирмы IR по синхронной схеме, возбуждаемых специализированным драйвером фирмы TI. Применение непосредственного управления мощными MOSFET транзисторами позволило реализовать весь модуляционный тракт без мачочных элементов — за исключением выходного ФНЧ. Выбор компонентов модуляционного тракта проведен с одновременной оптимизацией по КПД (по приведенной выше методике) и линейности модуляционной характеристики в широком диапазоне амплитуд выходного сигнала. Согласование времен включения и выключения всех элементов позволило устранить сквозные токи (для предотвращения снижения КПД) и обеспечить достижение минимальной неискаженной длительности выходного импульса ШИМ не более 80 на-

носекунд. При периоде импульсов ШИМ, равном 8,33 микросекунд ( $f_{\text{такт}} = 120$  кГц), полученная минимальная длительность выходных импульсов ШИМ обеспечивает динамический диапазон модулятора не менее 40 дБ, что необходимо для усиления сигналов с цифровыми видами модуляции и достаточно даже для работы с ними на уровне 10% от полной выходной мощности.

Полученный КПД оконечного каскада ШИМ (измеренный отдельно от ВЧ тракта) с достаточной точностью совпадает с расчетными значениями (кривая "Измерения" на рисунке 1), что свидетельствует об адекватности примененной методики расчетов. Оконечный каскад ШИМ имеет КПД не хуже 94% при уменьшении выходного напряжения на 19 дБ от максимального и не менее 60% при уменьшении выходного напряжения в пределах от 19 до 33 дБ от максимального. Это позволяет обеспечивать высокий КПД усилителя УМРС-КВ300 в целом для всех видов усиливаемых сигналов — от немодулированной несущей до однополосной модуляции шумовым сигналом. Для сравнения, на рис. 1 (кривая "Идеальный класс В") приведены идеализированные энергетические характеристики традиционных усилителей мощности.

Испытания модуляционного тракта в составе макета УМРС-КВ300 показали, что он удовлетворяет требованиям ГОСТ РВ 52226-2004 "УСТРОЙСТВА РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ Требования к основным параметрам внеполосных и побочных радиопомех" по уровню внеполосных излучений на шумовом однополосном сигнале как для класса передатчиков с мощностью от 100 Вт до 1 кВт, так и для класса передатчиков с мощностью более 1 кВт. Уровень комбинационных искажений, измеренных на двухтоновом сигнале, на низких рабочих частотах (там, где он определяется в основном модуляционным трактом) не превышает -38 дБ при выходных мощностях от 10 до 100% от номинальной.

#### Литература

1. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств / А.Д. Артым, А.Е. Божмусский, Е.В. Козин и др.; Под ред. А.Д. Артыма. — М.: Радио и связь, 1987. — 176 с.
2. Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме / В.Б. Козырев, В.Г. Лаврушенко, В.П. Леонов и др.; Под ред. И.А. Попова. — М.: Радио и связь, 1985. — 192 с.
3. Steve Mappus. Optimizing MOSFET Characteristics by Adjusting Gate Drive Amplitude. Texas Instruments Application Report SLUA341— June 2005, C.1-13.
4. Advances in AM Modulation Techniques to Improve Digital Transmission of HD Radio and DRM By Ky T. Luu, Wayne Duello and Anders Mattsson Harris Broadcast Communications.
5. Ky Thoai Luu. Pulse width modulator having reduced signal distortion at low duty cycles. US patent N° 6838862, Jan 4, 2005.