

Электронные блоки ЦБ и АБ реализованы аппаратно-программным методом на базе ПЛИС серии Max V фирмы Altera [4] и 8-ми разрядных универсальных микроконтроллеров. Умножение частоты дискретизации выполняется микросхемой программируемого преобразователя частоты SI5328 фирмы Silicon Lab [5].

Конструктивно аппаратура АБ выполнена на печатной плате габаритами 150×90 мм, а аппаратура ЦБ – на плате «Евромеханика-6U».

Принципы построения и технические решения, заложенные в разработку, обоснованы результатами лабораторных испытаний системы. В частности, были получены следующие результаты измерений основных параметров системы:

- энергетический запас ВОКТ – 37 дБ;
- вероятность ошибки приема оптического сигнала в ЦБ и АБ – не более 10–11;
- пиковый джиттер СЧД на выходе АБ – 2 нс;
- коэффициент нелинейных искажений стимулирующего сигнала на выходе АБ – не более 0,1 %;
- мощность потребления ЦБ – не более 2 Вт, АБ – не более 1,5 Вт.

Список используемых источников

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
2. Рубанов И. Л. и др. Волоконно-оптическая система передачи информации для гидроакустической станции с буксируемой антенной // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2. С. 65–69.
3. Бухинник А. Ю., Коровин А. Н., Стефанов Ю. А., Щербатый П. Е. Принципы построения волоконно-оптической системы передачи информации для гидроакустических станций // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2013. С. 684–687.
4. MAX V Device Handbook: Altera, 2011.
5. SI-53xx Family Reference Manual: Silicon Laboratories, 2013.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЛЬТА-СИГМА МОДУЛЯЦИИ В КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ

А.А. Ганбаев, В.А. Филин

Проанализированы возможности усиления сигнала в ключевых усилителях мощности с использованием дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) модуляции. Проведено сравнение спектрального состава прямоугольных колебаний с $\Delta\Sigma$ -модуляцией и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Дана оценка нелинейных искажений сигнала для обоих случаев. Показано, что применение $\Delta\Sigma$ -модуляции в усилителях мощности на нитрид-галлиевых (GaN) транзисторах позволяет достигать высокого КПД при минимальных искажениях усиливаемого сигнала.

Ключевые слова: дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) модуляция, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), усилитель мощности (УМ), амплитудный спектр, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

APPLICATION OF THE DELTA-SIGMA MODULATION IN THE SWITCHING MODE POWER AMPLIFIERS

Ganbayev A., Filin V.

The possibility of signal amplification in switching mode power amplifiers using a delta-sigma ($\Delta\Sigma$) modulation is analyzed. A comparison of the spectral structures of square waves with $\Delta\Sigma$ -modulation and pulse width modulation (PWM) is provided. The estimation of non-linear distortions of the signal in both cases is given. The use of $\Delta\Sigma$ -modulation in power amplifiers on gallium nitride (GaN) transistors permits to reach high efficiency and minimum distortions of the amplified signal.

Keywords: $\Delta\Sigma$ -modulation, pulse width modulation (PWM), power amplifier (PA), amplitude spectrum, analog-to-digital converter (ADC), digital-to-analog converter (DAC).

В исследованиях последних лет по ключевым транзисторным усилителям мощности вместо прямоугольных импульсов возбуждения, модулированных по длительности (ШИМ), предложено использовать импульсную последовательность, сформированную с помощью $\Delta\Sigma$ -модуляции [1]. В данной работе рассматриваются особенности работы такого модулятора в усилителе класса D, исследуется спектральный состав импульсов и осуществляется его сравнение со спектром ШИМ-импульсов.

На рисунке 1 приведена классическая схема $\Delta\Sigma$ -модулятора, широко используемая в системах цифровой обработки сигналов. Схема включает вычитающее устройство, интегратор, АЦП и ЦАП.

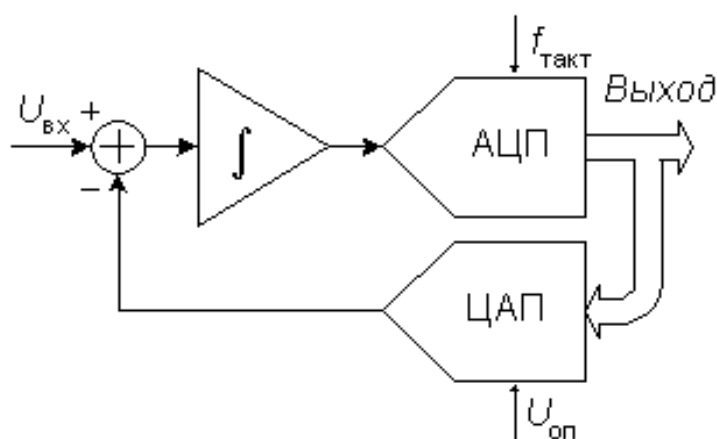


Рис. 1. Классический $\Delta\Sigma$ -модулятор

При усилении колебаний ключевыми методами нашел применение однобитный $\Delta\Sigma$ -модулятор [2, 3], схема которого показана на рисунке 2. В однобит-

ном $\Delta\Sigma$ -модуляторе в качестве АЦП используется компаратор, а в качестве ЦАП – аналоговый коммутатор.

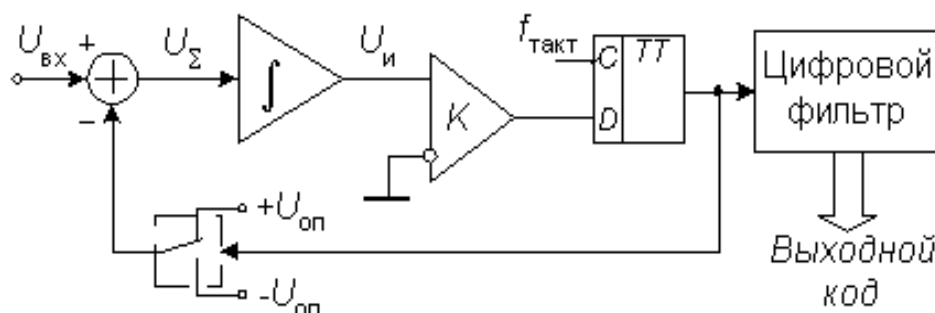


Рис. 2. Однобитный $\Delta\Sigma$ -модулятор

Одним из основополагающих принципов $\Delta\Sigma$ -модуляции является превышение частоты Котельникова в K раз. При такой передискретизации эффективная разрядность, а соответственно, и отношение сигнал/шум, увеличивается согласно формуле $K = 2^N$, где K – коэффициент передискретизации, а N – количество дополнительных битов. За счет большего, чем при ШИМ количества переключений между ‘0’ и ‘1’, происходит эффект вытеснения шумов в ВЧ область, которые в итоге легче отфильтровать [2, 3].

В программе FASTMEAN 6.0 была исследована схема дельта-сигма модулятора (рис. 3) и был рассчитан амплитудный спектр выходного сигнала (рис. 4).

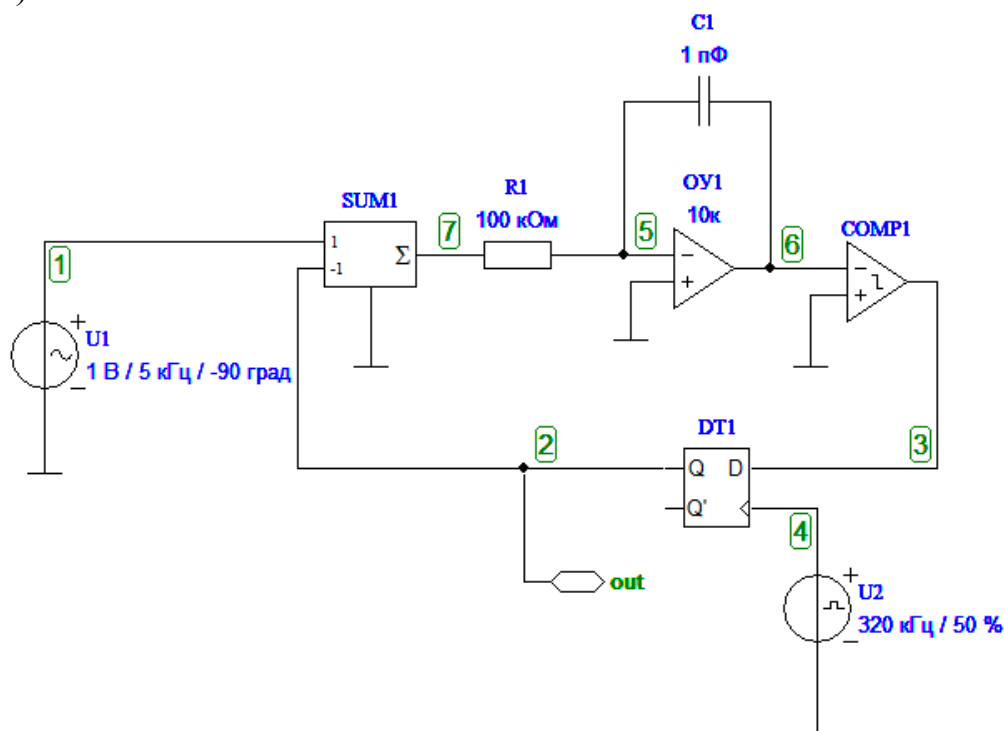


Рис. 3. Схема однобитного $\Delta\Sigma$ -модулятора в FASTMEAN 6.0

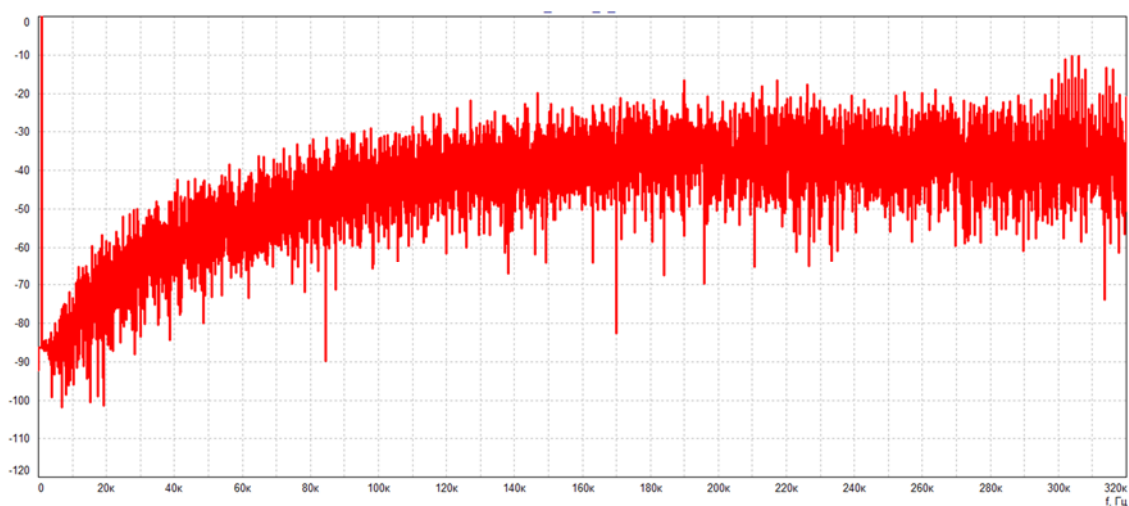


Рис. 4. Амплитудный спектр на выходе $\Delta\Sigma$ -модулятора

Аналогично была исследована схема широтно-импульсного модулятора (рис. 5) и получен амплитудный спектр (рис. 6) для сравнения его со спектром прямоугольных колебаний на выходе $\Delta\Sigma$ -модулятора.

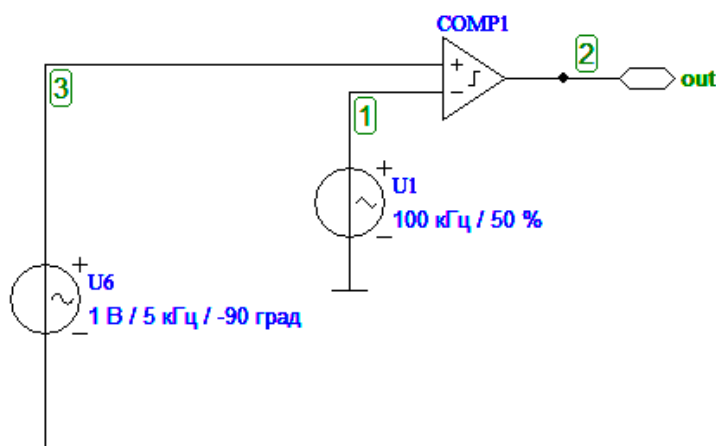


Рис. 5. Схема ШИМ в FASTMEAN 6.0

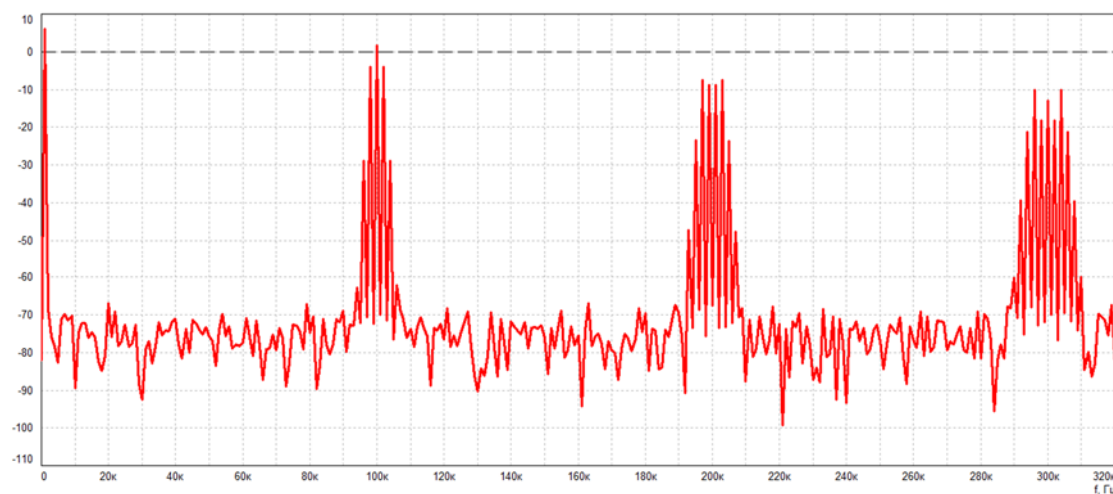


Рис. 6. Амплитудный спектр на выходе ШИМ

Проводилось моделирование процессов в ключевом усилителе мощности класса D с применением драйвера, работающего по принципу $\Delta\Sigma$ -модуляции (рис. 7), а также традиционного драйвера с широтно-импульсной модуляцией (см. рис. 8).

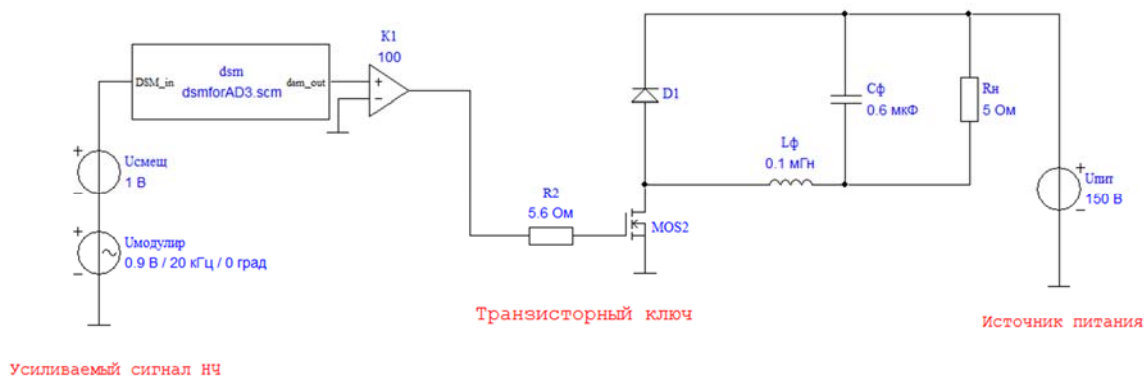


Рис. 7. Схема усилителя с использованием $\Delta\Sigma$ -модулятора

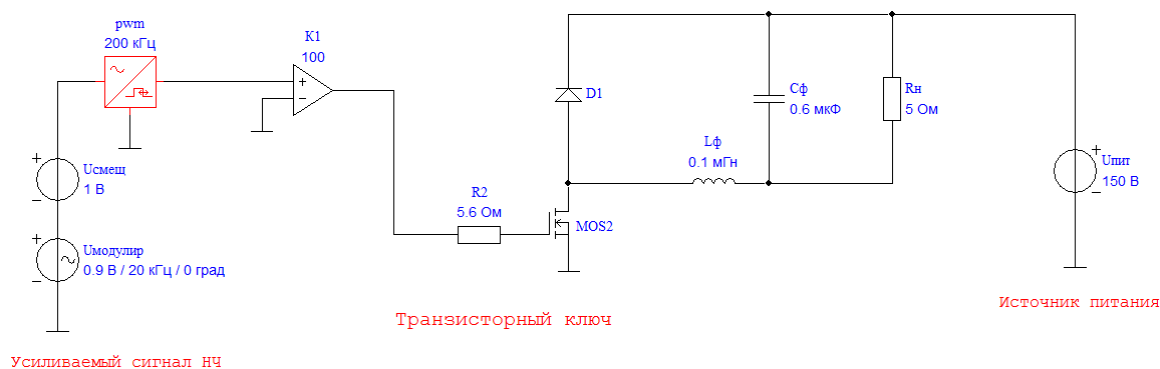


Рис. 8. Схема усилителя с использованием ШИМ

Для данных схем усилителя класса D были рассчитаны коэффициенты нелинейных искажений (THD) выходного сигнала (рис. 9 и 10).

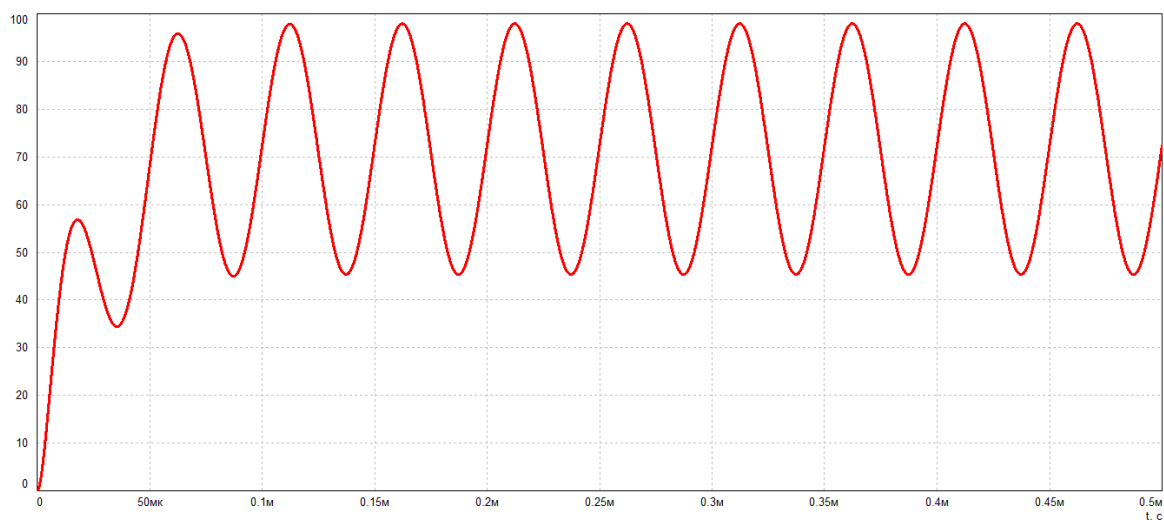


Рис. 9. Временная диаграмма на выходе усилителя с использованием $\Delta\Sigma$ -модулятора

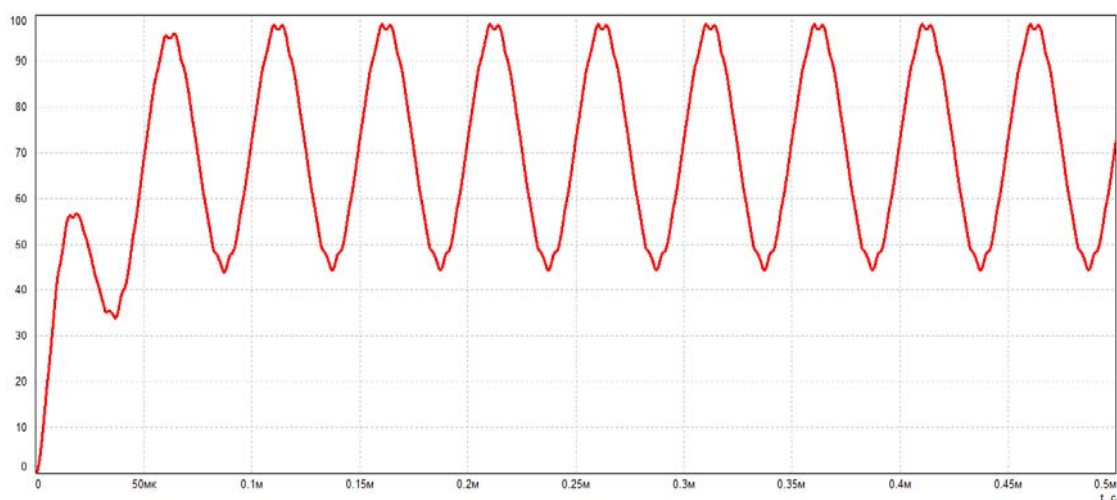


Рис. 10. Временная диаграмма на выходе усилителя с использованием ШИМ

Для усилителя с использованием $\Delta\Sigma$ -модулятора коэффициент нелинейных искажений составил 0,92 %, а при использовании ШИМ – 3,33 %.

Таким образом, выполненный анализ подтверждает, что усилитель класса D с аналоговой ШИМ не позволяет реализовать высококачественное усиление сигнала. Для снижения нелинейных искажений, как показывают проведенные исследования, следует перейти от ШИМ к $\Delta\Sigma$ -модуляции. Однако неизбежным следствием этого становится возрастание частоты переключения выходных транзисторов и снижение КПД из-за роста потерь при переключениях. Для преодоления этого недостатка представляется перспективным применение в качестве мощных ключей нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов, обладающих широкой рабочей полосой частот и температурной устойчивостью. Использование же $\Delta\Sigma$ -модулятора в качестве драйвера в этом случае позволяет обеспечить высокие качество усиления сигнала и КПД [1].

Список используемых источников

1. Dr Andrzej Samulak. System Analyses of Class-S Power Amplifier. Germany: Erlangen, 2010.
2. Baker, Bonnie. Delta-sigma ADCs in a nutshell. EDN, 2007, pg 22.
3. Baker, Bonnie. Delta-sigma ADCs in a nutshell, part 2: the modulator. EDN, 2008, pg 24.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ ИДЕАЛЬНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ С ЗОНОЙ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

О.В. Косарев

Снижение разрядности обрабатываемых данных в устройствах обработки радиолокационных сигналов является актуальной задачей, несмотря на рост производительности вычислительных устройств. Предельным случаем снижения разрядности является бинар-