

Ромашов В.В., Храмов К.К., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева Н.А.
 Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного
 учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет име-
 ни Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23
 e-mail: hramovkk@gmail.com

Математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы

Достижения в области микроэлектроники позволили существенно увеличить частоту преобразования цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) до 6...12 ГГц и создать высокочастотные (быстродействующие) ЦАП, формирующие аналоговый сигнал непосредственно на несущей частоте в УВЧ диапазоне [1].

Использование быстродействующих ЦАП с разрядностью 12...16 бит позволило разработать широкополосные многоканальные цифровые радиопередающие устройства [2]. В таких устройствах тактовая частота быстродействующих ЦАП задается, как правило, генератором с цифровым управлением и определяется при частотном планировании. Преимуществами такой архитектуры являются ее универсальность, более низкий уровень дискретных составляющих в спектре выходного сигнала, улучшение шумовых характеристик передающего устройства, уменьшение его массы и габаритов, снижение сложности и стоимости изготовления.

Традиционно в ЦАП реализуется интерполяция нулевого порядка, когда сигнал тактируется прямоугольными импульсами с амплитудой A_0 и длительностью T :

$$h_{\text{NRZ}}(t) = A_0, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (1)$$

Такой режим работы ЦАП называют non-return-to-zero (NRZ) или normal mode [3].

Быстродействующие ЦАП позволяют реализовать специальные режимы работы [2–4]. В этих режимах происходит изменение формы огибающей спектра выходного сигнала так, чтобы увеличить амплитуды требуемых образов спектра. В работах [4–7] были исследованы режимы работы RZ, RF, RFZ, RFZ2, которые позволяют увеличить амплитуды образов основной частоты во второй, третьей и четвертой зонах Найквиста. Импульсные отклики в этих режимах описываются выражениями:

$$h_{\text{RZ}}(t) = \begin{cases} A_0, & T/4 \leq t \leq 3T/4, \\ 0, & (t < T/4) \cup (t > 3T/4); \end{cases} \quad (2)$$

$$h_{\text{RF}}(t) = \begin{cases} A_0, & 0 \leq t \leq T/2, \\ -A_0, & T/2 < t \leq T; \end{cases} \quad (3)$$

$$h_{\text{RFZ}}(t) = \begin{cases} A_0, & T/4 \leq t \leq T/2, \\ -A_0, & T/2 < t \leq 3T/4, \\ 0, & (t < T/4) \cup (t > 3T/4); \end{cases} \quad (4)$$

$$h_{\text{RFZ2}}(t) = \begin{cases} A_0, & T/4 \leq t \leq T/2, \\ -A_0, & 3T/4 \leq t \leq T, \\ 0, & (t < T/4) \cup (T/2 < t < 3T/4). \end{cases} \quad (5)$$

Авторами [8] были исследованы еще два специальных режима работы быстродействующих ЦАП – RFZ3 и RFZ4. Режим RFZ3 является производным от режима RFZ, однако в каждом из интервалов $T/2$ содержится по два разнополярных импульса длительностью $T/8$. Импульсный

отклик в этом режиме имеет вид

$$h_{\text{RFZ3}}(t) = \begin{cases} A_0, & (T/8 \leq t \leq T/4) \cup (3T/8 \leq t \leq T/2), \\ -A_0, & (T/2 < t \leq 5T/8) \cup (3T/4 \leq t \leq 7T/8), \\ 0, & (t < T/8) \cup (T/4 < t < 3T/8) \cup (5T/4 < t < 3T/4) \cup (t > 7T/8); \end{cases} \quad (6)$$

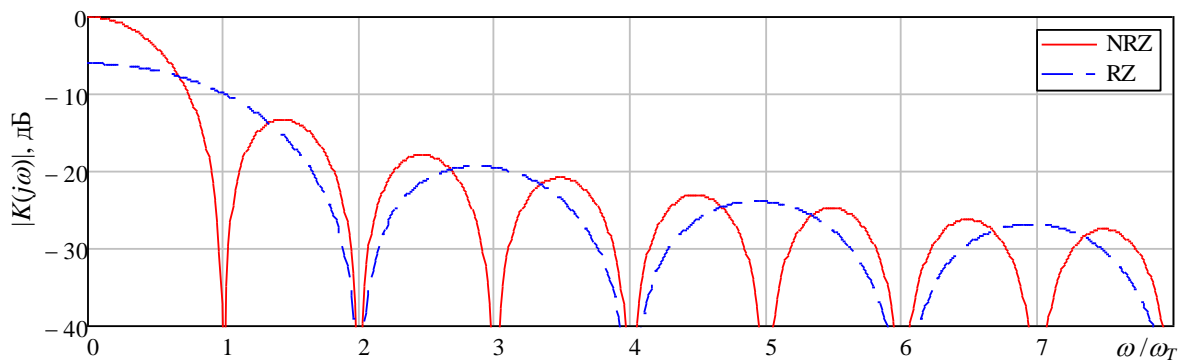
Режим RFZ4 аналогичен режиму RFZ3, но отрицательные импульсы имеют временной сдвиг на интервал $T/8$:

$$h_{\text{RFZ4}}(t) = \begin{cases} A_0, & (T/8 \leq t \leq T/4) \cup (3T/8 \leq t \leq T/2), \\ -A_0, & (5T/8 \leq t \leq 3T/4) \cup (7T/8 \leq t \leq T), \\ 0, & (t < T/8) \cup (T/4 < t < 3T/8) \cup (T/2 < t < 5T/8) \cup (3T/4 < t < 7T/8). \end{cases} \quad (7)$$

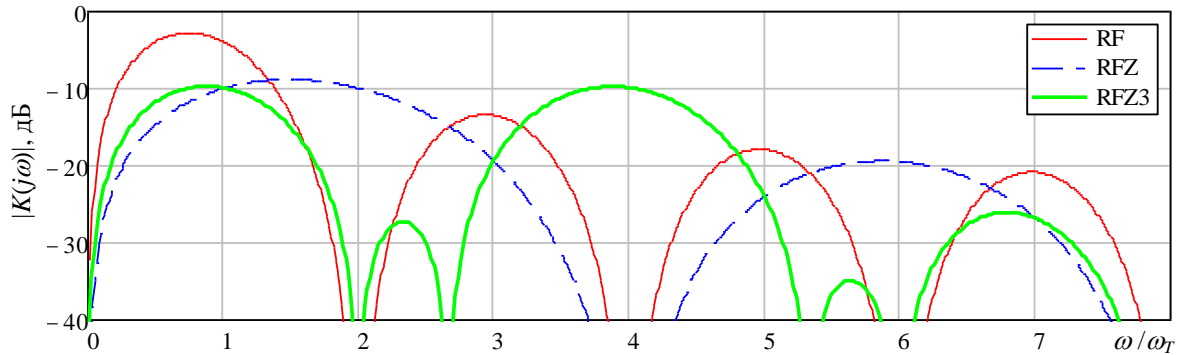
Функции (1) и (2) являются четными, а (3), (4) и (6) – нечетными функциями времени относительно момента $T/2$.

На основании выражений (1)–(7) были построены математические модели быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы и проведено их исследование. Получены огибающие спектра выходного сигнала ЦАП (рис. 1) с использованием выражения

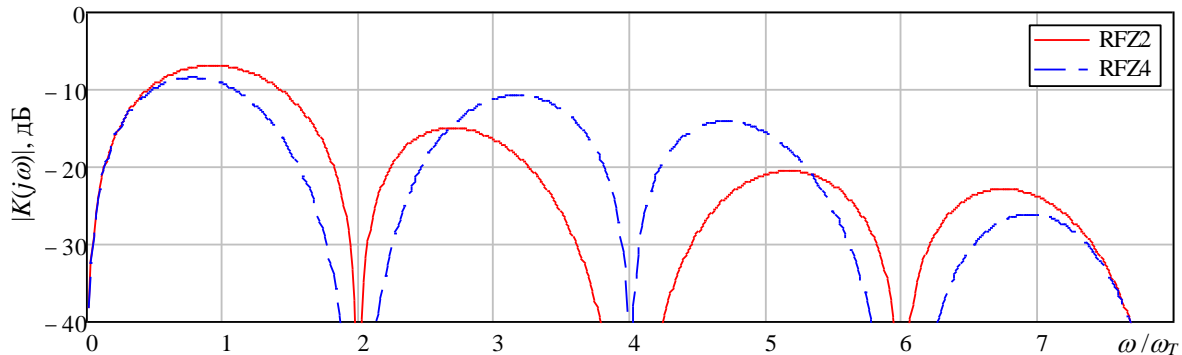
$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (8)$$



а



б



в

Рис. 1. Нормированные огибающие спектра выходного сигнала быстродействующих ЦАП в различных режимах работы

Как следует из приведенных выше графиков, во всех режимах работы амплитудные значения спектральных компонент 2...8 зон Найквиста удастся увеличить на несколько децибел за счет перераспределения энергии в спектре выходного сигнала ЦАП. В режимах RF, RFZ, RFZ2, RFZ3 и RFZ4 постоянная составляющая в выходном сигнале отсутствует. В режиме RFZ создаются условия для формирования широкополосного сигнала, охватывающего 2...5 зоны Найквиста, но уровень этого сигнала не превышает значения минус 9 дБ относительно полной шкалы ЦАП.

Применение режима RFZ3 наиболее эффективно для образов спектра, расположенных в зонах Найквиста с номерами 2, 3, 7, 8, 9. Режим RFZ4 оказывается наиболее эффективным для образов основной частоты, лежащих в 2, 3, 6, 7, 10 и 11 зонах, причем для 6 и 7 зон его использование позволяет увеличить амплитуду гармоник на 10...20 дБ при значениях основной синтезируемой частоты не превышающих 15% от частоты $\omega_T = 2\pi/T$.

Общим недостатком всех режимов, за исключением RFZ, является принципиальная невозможность формирования сигнала в окрестностях частоты $\omega = 2\omega_T$.

В докладе рассматриваются математические модели быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, проводится анализ амплитудного и фазового спектра выходного сигнала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00149, <https://rscf.ru/project/22-79-00149/>

Литература

1. Быстродействующие ЦАП [Электронный ресурс]: сайт НИИ электронной техники. – Режим доступа: <https://niiet.ru/product-category/chips/dais/cap/fast>.
2. Kuckreja Ajay, Ostrem Geir, “High-Speed DACs ease transmitter designs,” *Microwave & RF*, August 2010.
3. Храмов К.К., Ромашов В.В. Сравнительный анализ режимов работы быстродействующих ЦАП // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2018, № 4. С. 44-54.
4. V V Romashov, A N Doktorov, K A Yakimenko and K K Khramov “Development of technology of high-speed digital-to-analogue converters to improve the efficiency of direct digital synthesis of radio-frequency signals,” *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094 (2021) 022067 DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022067.
5. Chen S.Y.-S, Kim N.S., Rabaey J.M. Multi-mode sub-nyquist rate digital-to-analog conversion for direct waveform synthesis, 2008 IEEE Workshop on Signal Processing Systems, SiPS: Design and Implementation. Article number 4671747. Pp 112-117. Washington, DC, 8 October 2008 - 10 October 2008. DOI: 10.1109/SIPS.2008.4671747.
6. Wei-Hsin Tseng, Chi-Wei Fan, and Jieh-Tsorng Wu, A 12-Bit 1.25-GS/s DAC in 90 nm CMOS With >70 dB SFDR up to 500 MHz, *IEEE Journal Solid-State Circuits*, Vol. 46, No. 12, December 2011.
7. Khramov K.K., Romashov V.V. “Operational modes of high-speed DACs: analysis and mathematical modeling,” *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1096, Issue 1, 2019, p. 012158. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012158.
8. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А. Повышение эффективности использования высших зон Найквиста при прямом цифровом синтезе высокочастотных сигналов // *Радиотехника*. 2022. Т. 86. № 5. С. 135-144. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202205-16>