

Ромашов В.В., Ромашова Л.В., 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: romashovamur@yandex.ru, sochnewa.natalya@mail.ru

### Математические модели шумовых характеристик гибридных цифро-аналоговые форми- рователей сигналов на быстродействующих ЦАП

В современных радиосистемах используются формирователи радиосигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов, у которых пока еще ограничен частотный диапазон. Для его увеличения используют копии спектра основной частоты (образы основной частоты) выходного сигнала быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП).

В последнее время уделяется большое внимание применению специальных режимов ЦАП, позволяющих увеличить амплитуду образов основной частоты по сравнению с амплитудой основной частоты в нормальном режиме работы NRZ.

Среди таких режимов выделяют [1]:

1. Режим 2xNRZ — ЦАП работает с удвоенной тактовой частотой.
2. Режим return-to-zero (RZ), в котором уменьшается длительность тактовых импульсов, вследствие чего увеличивается амплитуда образа во второй зоне Найквиста.
3. Режим радиочастоты RF, при котором каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью  $\tau = T/2$ . Максимальная амплитуда у образов во второй и третьей зонах Найквиста.
4. Режим RFZ (radio frequency return-to-zero mode), уменьшается длительность разнополярных импульсов режима RF относительно момента  $t = 0$ .
5. Режим, условно названный RFZ2. Длительность разнополярных импульсов, также как в режиме RFZ, составляет  $\tau < T/2$ , однако изменение их длительности осуществляется относительно моментов времени  $t = 0$  и  $t = T/2$ .

6. Режимы RFZ3 и RFZ4, с удвоением биполярных импульсов на выходе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя. Они позволяют увеличить амплитуду гармоник образов основной частоты в восьмой и девятой зонах Найквиста до 20 и 15 дБ, соответственно, относительно огибающей спектра основного режима работы NRZ.

Для анализа шумовых характеристик радиоустройств используется спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов, представляющая собой отношение мощности шумов на частоте  $F$  одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала.

В [2,3] предложены модели СПМ фазовых шумов ЦАП в режиме работы NRZ

$$S_{\text{ЦАП}}(F) = K_{\text{ЦАП}}^2 \left( \frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{\text{кв}}, \quad (1)$$

где  $F$  - отстройка от несущей частоты,  $S_{\text{кв}} = 2^{-2N-0.59} \frac{f_{\text{ЦАП}}}{f_{\text{T}}^2}$  - шумы квантования,  $N$  - количество разрядов ЦАП,  $K_{\text{ЦАП}} = f_{\text{ЦАП}}/f_{\text{T}}$  - коэффициент передачи ЦАП.

Коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$  определяют уровень СПМ  $1/F^2$  шума,  $1/F$  шума, естественной шумовой составляющей входных цепей и естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки. Например, для ЦАП AD9164 величины коэффициентов:  $k_1=-8,4, k_2=-5,7, k_3=-17,1, k_4=-15,4$ .

При использовании образов основной частоты в специальных режимах модель отличается коэффициентом  $K_{\text{АЧХ}}(F)$  ЦАП

$$S_{\text{ЦАП,обр}}(F) = S_{\text{ЦАП}}(F)/K_{\text{АЧХ}}^2(F). \quad (2)$$

Для СПМ фазовых шумов ЦАП с учетом шумов генератора опорной частоты  $S_{\text{ГОЧ}}(F)$

$$S_{\text{ЦАП,ГОЧ}}(F) = S_{\text{ГОЧ}}(F)(n^2 + K_{\text{ЦАП}}^2) + S_{\text{ЦАП,обр}}(F), \text{ где } n = \pm 1, \pm 2 \dots \text{ номера образа.} \quad (3)$$

Рассмотрим СПМ фазовых шумов ЦАП на образцах основной частоты для двух режимов NRZ и RF.

Коэффициенты  $K_{\text{АЧХ}}(F)$  для режимов NRZ и RF имеют вид [4]

$$K_{\text{NRZ}}(F) = \frac{\sin(\pi|n + K_{\text{ЦАП}}|)}{\pi|n + K_{\text{ЦАП}}|}$$

$$K_{\text{RF}}(F) = \frac{2(\sin(\pi|n + K_{\text{ЦАП}}|))^2}{\pi|n + K_{\text{ЦАП}}|}$$

На рисунке 2 приведены рассчитанные для двух режимов работы ЦАП СПМ фазовых шумов на образцах основной частоты.

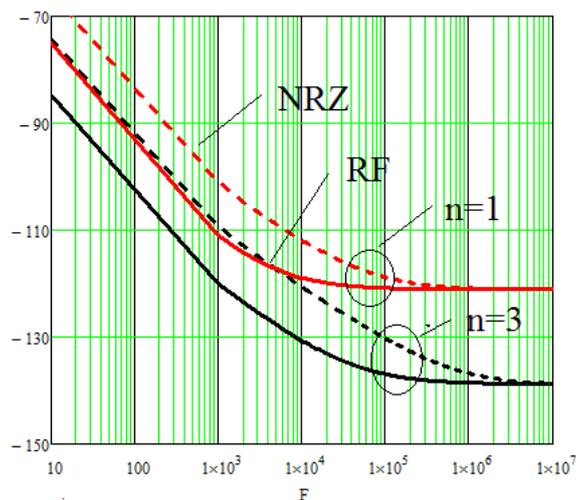


Рисунок 1 СПМ фазовых шумов ЦАП на образцах основной частоты  
 $f_{\text{ЦАП}} = 120$  МГц,  $f_T = 600$  МГц,  
 выходная частота ЦАП при  $n = 1 - 720$  МГц, при  $n = 3 - 1900$  МГц\

Видно, что применение образов ЦАП в режиме RF позволяет уменьшить СПМ фазовых шумов формирователя радиосигналов по сравнению с режимом NRZ до частот отстройки 100 кГц на 10 дБ.

### Литература

1. 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.
2. В.В.Ромашов, Л.В.Ромашова, И.Д.Грошков, Н.А.Сочнева Математические модели шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021, №2. С. 50 – 57.
3. Romashov, V.V., Romashova, L.V., Doktorov, A.N., Yakimenko, K.A., Sochneva, N.A. Mathematical models of noise characteristics of high - speed digital - to -analog converters of radar signal generators // Journal of Physics: Conference Series. Volume 1991. Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRS-RWPD) 2021 25-27 May 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1991/1/012024.
4. Сочнева Н.А. Исследование коэффициентов передачи фазового шума быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при использовании образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2019, №21. С. 31-37.