

УДК 621.396.61

## Исследование коэффициентов передачи фазового шума быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при использовании образов основной частоты

Сочнева Н.А.

В статье приводятся выражения для нормированных коэффициентов передачи фазовых шумов цифроаналоговых преобразователей в различных режимах работы. Рассматриваются результаты анализа нормированных коэффициентов передачи фазовых шумов в зависимости от образов (копий спектра) основной частоты выходного сигнала ЦАП. Приводятся выражения для нормированных коэффициентов передачи фазовых шумов цифроаналоговых преобразователей, приведенных к одной основной выходной частоте. Проводится анализ коэффициентов передачи фазовых шумов в различных режимах работы для одного образа основной частоты.

**Ключевые слова:** Цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС), быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), образы основной частоты, фазовый шум, коэффициенты передачи фазовых шумов.

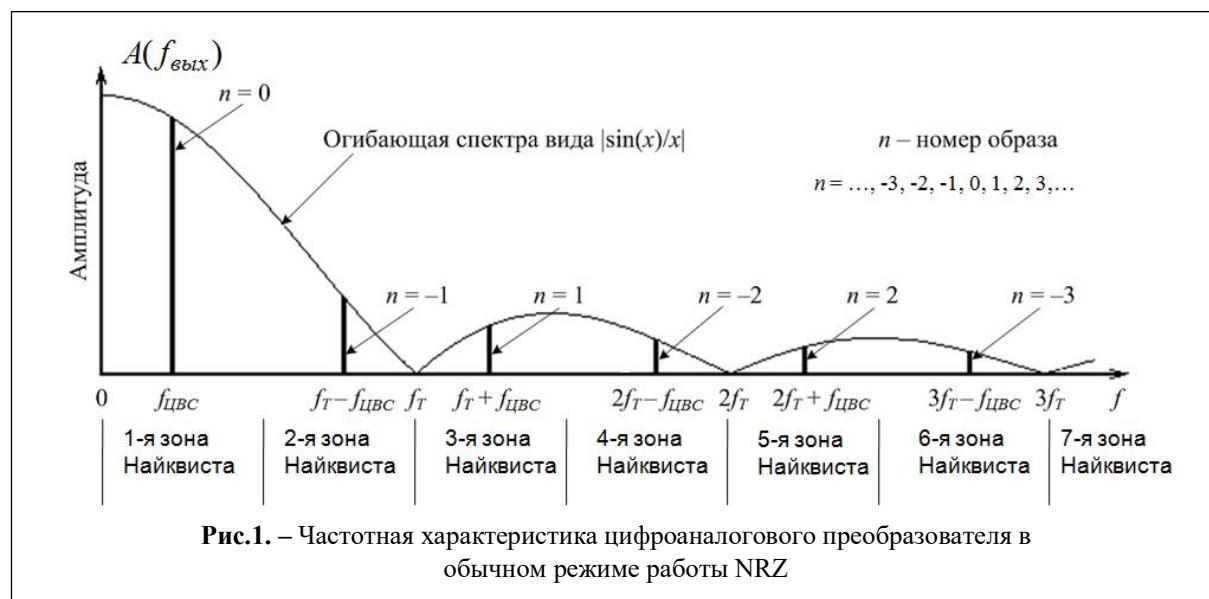
Перспективным и активно развивающимся в настоящее время направлением синтеза частот является метод прямого цифрового синтеза. Формирование сеток частот высокочастотных диапазонов методом прямого цифрового синтеза предполагает использование современных подходов – быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), использующих специальные режимы работы для повышения эффективности использования побочных высокочастотных компонентов спектра выходного сигнала. Данные компоненты называются образами (копиями спектра) основной частоты и образуются вследствие эффекта дискретизации.

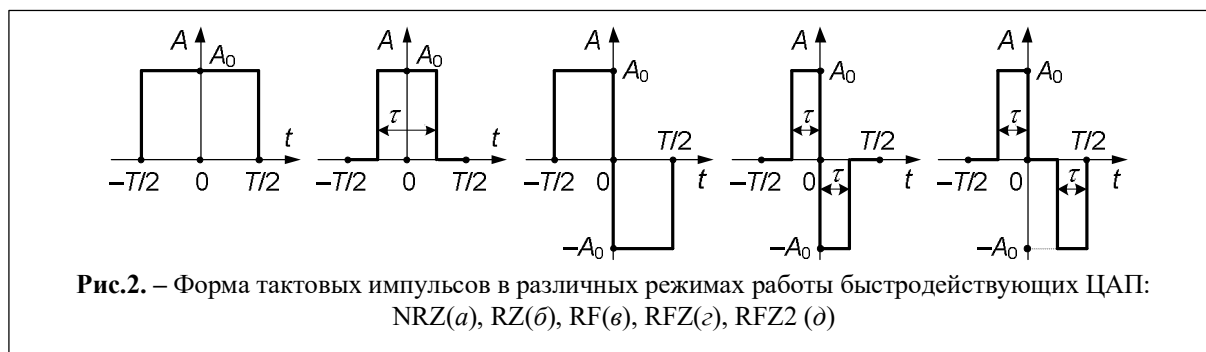
Применение различных режимов работы ЦАП позволяет увеличить отношение сигнал/шум без использования дополнительных

устройств путем изменения огибающей частотной характеристики. В целом все это приводит к улучшению шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов, использующих ЦАП [1-3].

Рассмотрим основные режимы работы быстродействующего цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора.

1. Нормальный режим работы, или *non-return-to-zero* (NRZ). Частотная характеристика ЦАП в режиме NRZ показана на рис. 1. Максимум частотной характеристики приходится на первую зону Найквиста. При использовании образов, расположенных в других зонах Найквиста, в данном режиме огибающая частотной характеристики вида  $(\sin x)/x$  вызывает уменьшение амплитуды





образов.

2. Режим работы ЦАП, в котором применяется уменьшение длительности  $\tau$  тактовых импульсов (рис. 2, б) так, что выходной сигнал оказывается как бы «вырезан» из сигнала режима NRZ в интервалы времени  $-\tau/2 < t < \tau/2$ . получил название *return-to-zero (RZ) mode*. [5-7]. Преимущество режима RZ заключается в том, что увеличивается амплитуда гармоники образа с  $n=-1$  во второй зоне Найквиста.

3. Принципиально другим режимом работы, применяемым в некоторых быстродействующих ЦАП, является *radio frequency (RF)* или *mix mode* [5-7]. При его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью  $\tau=T/2$  (рис. 2, в). Режим радиочастоты RF является оптимальным для работы на высокой частоте выходного сигнала, во второй и третьей зонах Найквиста.

4. Путем уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента  $t=0$  так, как показано на рис. 2, г, разработчики реализуют еще один режим работы быстродействующих ЦАП,

известный как RFZ (*radio frequency return-to-zero mode*) [5-6].

5. Еще один режим работы ЦАП, условно названный RFZ2 [4]. В нем длительность разнополярных импульсов, также как в режиме RFZ, составляет  $\tau < T/2$ , однако изменение их длительности осуществляется относительно моментов времени  $t=0$  и  $t=T/2$  (рис. 2, д).

Частотные характеристики описанных быстродействующих ЦАП для различных режимов работы и гармоники образов основной частоты приведены на рис. 3.

В работе [8] были получены основные выражения, описывающие коэффициенты передачи фазового шума. Для RZ режима коэффициент передачи фазовых шумов ЦАП определяется формулой:

$$Z_{RZ} = \frac{1}{K_{RZ}} = \frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{\sin\left(\frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{q}\right)}$$

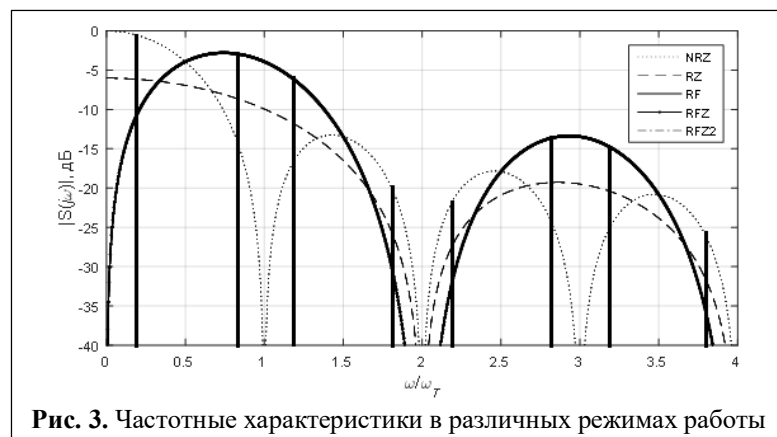
Для RF режима:

$$Z_{RF} = \frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{2 \left( \sin\left(\frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{2}\right) \right)^2}$$

Коэффициент передачи фазовых шумов для режима RFZ имеет вид:

$$Z_{RFZ} = \frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{2 \left( \sin\left(\frac{\pi |n + K_{\text{ЦБС}}|}{q}\right) \right)^2}$$

В режиме RFZ2 коэффициент передачи фазовых шумов равен:



$$Z_{RFZ2} = \frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2 \sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{q}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2}\right)},$$

где  $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_T$  - коэффициент деления ЦВС;  $f_T$  - тактовая частота;  $f_{ЦВС}$  - основная выходная частота ЦВС.

Нормирование коэффициентов передачи фазовых шумов ЦАП в специальных режимах относительно коэффициента передачи фазового шума в обычном режиме (NRZ) и приведение к одной основной выходной частоте позволяет анализировать и сравнивать режимы работы ЦАП с точки зрения уменьшения фазовых шумов.

Формула нормированного коэффициента для режима RZ:

$$Z_{RZ\_NRZ} = \frac{Z_{RZ}}{Z_{NRZ} \cdot \frac{[n + K_{ЦВС}]^2}{K_{ЦВС}^2}}.$$

Формула нормированного коэффициента для режима RF:

$$Z_{RF\_NRZ} = \frac{Z_{RF}}{Z_{NRZ} \cdot \frac{[n + K_{ЦВС}]^2}{K_{ЦВС}^2}}.$$

Формула нормированного коэффициента для режима RFZ:

$$Z_{RFZ\_NRZ} = \frac{Z_{RFZ}}{Z_{NRZ} \cdot \frac{[n + K_{ЦВС}]^2}{K_{ЦВС}^2}}.$$

Формула нормированного коэффициента для режима RFZ2:

$$Z_{RFZ2\_NRZ} = \frac{Z_{RFZ2}}{Z_{NRZ} \cdot \frac{[n + K_{ЦВС}]^2}{K_{ЦВС}^2}}.$$

На рис. 4, 5 приведены результаты анализа нормированных коэффициентов передачи фазовых шумов в зависимости от номера  $n$  образов основной частоты.

Проанализируем полученные результаты. Для RZ режима лучше всего использовать первый положительный и первый отрицательный образы ( $n = -1, 1$ ). В этом случае

уменьшение уровня фазового шума может достигать 3.. 5 дБ в зависимости от значения  $K_{ЦВС}$ . Режим RF позволяет еще больше снизить уровень фазовых шумов, до 5...10 дБ при значениях  $K_{ЦВС}$ , оптимальных для фильтрации образов ( $0,15 < K_{ЦВС} < 0,35$ ).

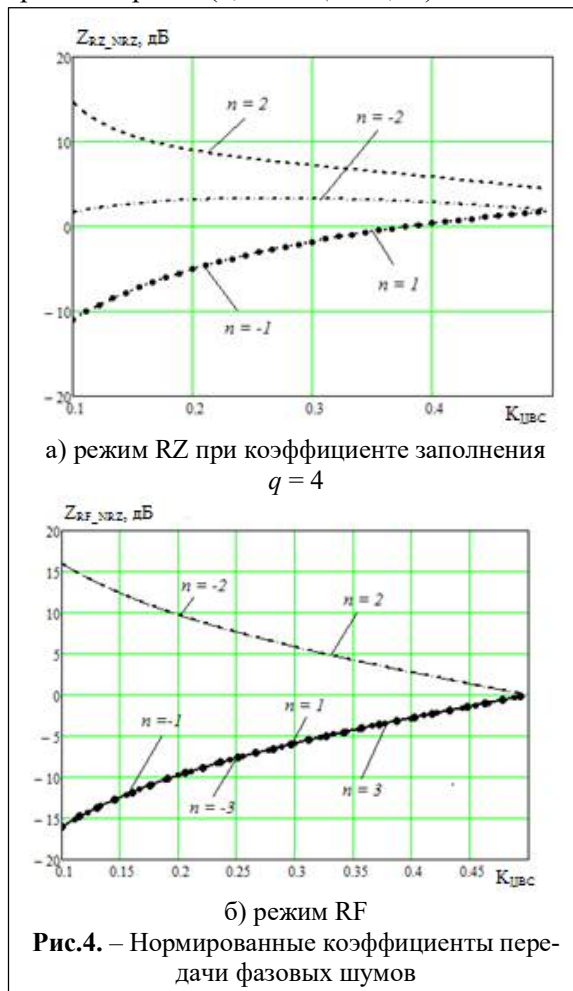
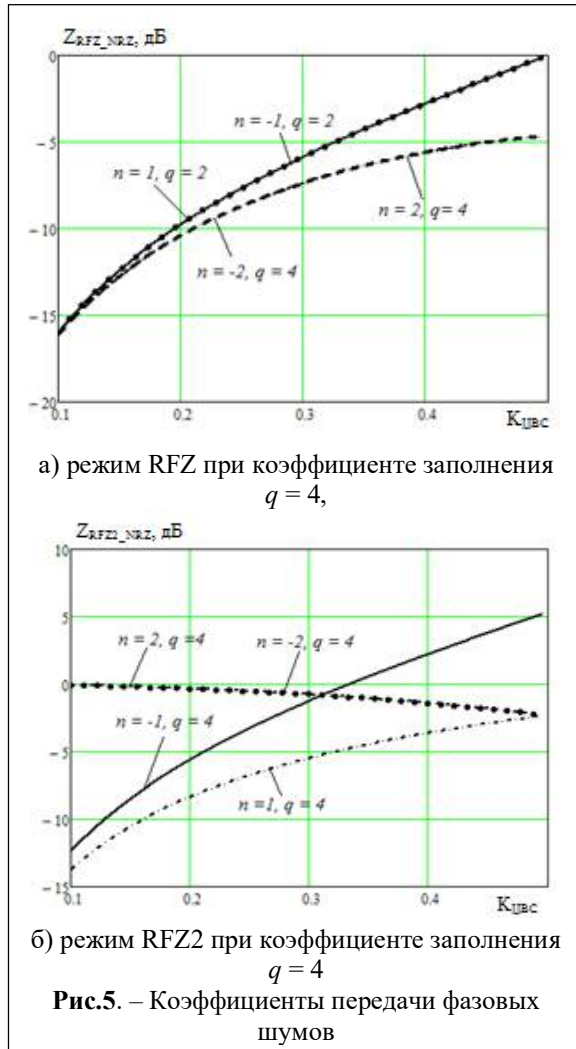


Рис.4. – Нормированные коэффициенты передачи фазовых шумов

Из рис. 5 видно, что наилучшим с точки зрения минимума фазовых шумов в RFZ режиме будет использование -2 и 2 образа. При этом уменьшение уровня фазовых шумов в требуемом диапазоне  $K_{ЦВС}$  достигает 6..13 дБ. В RFZ2 некоторое преимущество дает использование первого положительного образа. Однако для режимов RZ, RFZ, RFZ2 требуется определить значения коэффициента заполнения восстанавливающего импульса ЦАП  $q$ , при которых снижение уровня фазовых шумов будет максимальным.

Развитием широко используемого в технике синтеза частот метода прямого цифрового синтеза является применение быстродействующих цифроаналоговых преобразо-

вателей [5-7], позволяющих использовать образы основной частоты [1] более эффективно, за счет изменения огибающей частотной характеристики в специальных режимах работы.



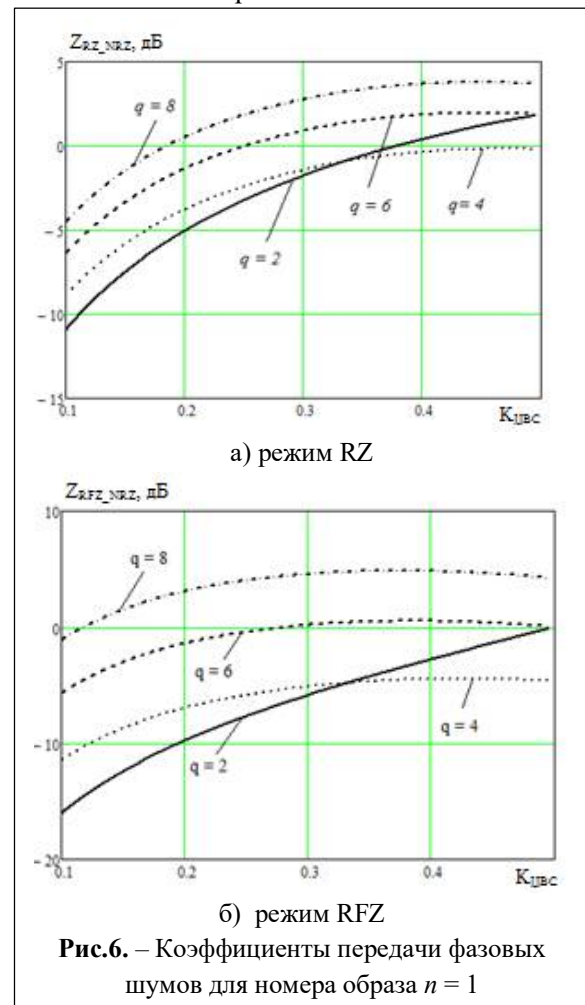
Применение новых режимов работы ЦАП позволяет увеличить отношение сигнал/шум без использования дополнительных устройств, путем изменения огибающей частотной характеристики. В целом все это приводит к улучшению шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов [2, 3].

В работах [4, 8] были выведены основные соотношения, определяющие коэффициенты передачи фазовых шумов специальных режимов быстродействующих цифроаналоговых преобразователей.

В режимах RZ, RF, RFZ, RFZ2 параметр  $q$  определяет коэффициент заполнения восста-

навливающего импульса быстродействующего цифроаналогового преобразователя. Для режима NRZ  $q$  всегда равен 1, в режиме RF  $q$  всегда равен 2, а в остальных режимах его значение может изменяться от 1 до 8 и более. Физически он эквивалентен скважности и определяется отношением длительности восстановленного импульса и периода тактового сигнала.

На рис. 6, 7 приведены результаты анализа нормированных коэффициентов передачи фазовых шумов в зависимости от коэффициента заполнения  $q$ .



Из анализа рис. 6, 7 можно сделать следующие выводы. Во-первых, значительное увеличение коэффициента заполнения  $q$  ухудшает шумовые характеристики системы с быстродействующим ЦАП. Во-вторых, для образа с номером 1 оптимальным будет значение  $q = 2$  для всех трех режимов с изменением  $q$ .

Уменьшение уровня фазовых шумов в требуемом диапазоне изменения  $0,15 < K_{\text{ДВС}} < 0,35$  на 3..12 дБ для первого образа достигается применением режимов RFZ и RFZ2 при коэффициенте заполнения  $q = 2$ . Для высокочастотных образов по сравнению с  $n = 1$  применение коэффициента заполнения  $q$  со значениями больше 2 будет более эффективным, однако это требуется исследовать дополнительно.

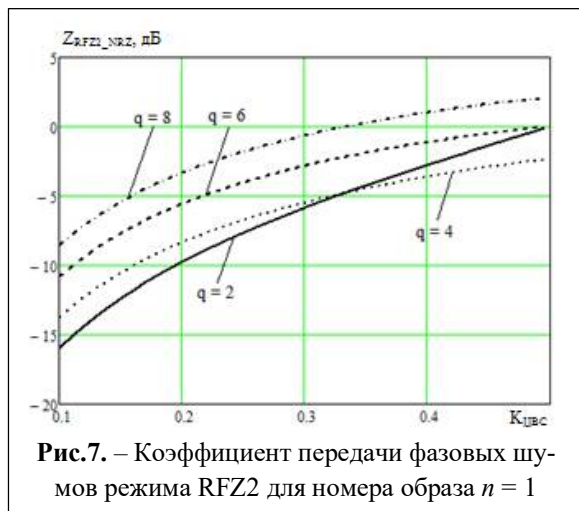


Рис.7. – Коэффициент передачи фазовых шумов режима RFZ2 для номера образа  $n = 1$

### Литература

1. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The Use of Images of DDS Fundamental Frequency for High-Frequency Signals Formation, 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014, pp. 310-311.

Поступила 22 июня 2019 г.

The article presents expressions for normalized phase noise transmission coefficients of digital-to-analog converters in various operating modes. The results of the analysis of normalized coefficients of phase noise transmission depending on images (copies of the spectrum) of the fundamental frequency of the DAC output signal are considered. Expressions for normalized phase noise transmission coefficients of digital-to-analog converters reduced to one main output frequency are given. The analysis of the transmission coefficients of phase noise in different operating modes for a single image of the main frequency is carried out.

*Key words:* direct digital synthesizer, high-speed digital-to-analog converters, images of the fundamental frequency, phase noise, phase noise transfer coefficients.

Сочнева Наталья Александровна - магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* sochnewa.natalya@yandex.ru.

*Адрес:* 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

2. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The Use of Images of DDS in the Hybrid Frequency Synthesizers, 2014 24th International Crimean Conference Micro-wave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014, pp. 302-303.

3. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, № 4. С. 10-15.

4. Khramov K.K., Romashov V.V. Mathematical modeling of operational modes of high-speed DACs. В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2018. С. 1403-1411.

5. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Maxim Integrated, 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>

6. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2017. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html>

7. Kuckreja Ajay, Ostrem Geir, "High-Speed DACs ease transmitter designs," Microwave & RF, August 2010.

8. Ромашов В.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А., Матерухин С.Е. Математическое моделирование шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4. С. 52-59.