

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ДЖИТТЕРА ТАКТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

WAYS TO REDUCE JITTER OF CLOCK GENERATORS

В статье рассмотрены пути уменьшения джиттера сигналов на выходе тактовых генераторов, построенных на базе ИМС компании Analog Devices. Приведены результаты моделирования работы таких генераторов в специализированной программе ADIsimCLK™ Reference Design.

Abstract - The article considers the ways to reduce jitter of signal output clocks, built on the basis of ADI ICs. The modeling results of such generators in specialized program ADIsimCLK™ Reference Design are given in the article.

В. Макаренко

V. Makarenko

Так как требования к быстродействию и разрешению преобразователей данных постоянно растут, повышается спрос на генераторы более высокой тактовой частоты с низким фазовым шумом. С проблемой фазового шума (джиттера) сталкиваются конструкторы базовых станций сотовой связи, радарных и других систем, которые работают на высоких частотах. Практически каждая сложная система требует нескольких тактовых частот, сигнал самой высокой из которых формируется с помощью синтезатора частоты, а сигналы более низких частот – с помощью делителей частоты.

В качестве источника системных тактовых импульсов применяются надежные прецизионные опорные источники импульсов, чаще всего – кварцевые генераторы. Для формирования нескольких различных частот в системе можно использовать либо несколько прецизионных кварцевых генераторов, либо синтезатор с системой ФАПЧ и набор делителей частоты, что гораздо эффективнее с экономической точки зрения. Если необходимо сформировать несколько копий тактового сигнала, для разветвления нужна буферизация.

Джиттер (или фазовый шум кварцевого генератора) не зависит от его точности и стабильности частоты. Для кварцевых генераторов суммарный джиттер не должен быть больше единиц пикосекунд. Фазовый шум указывается в некотором диапазоне частот.

В синтезаторе с системой ФАПЧ фазовый шум выходного сигнала больше, чем фазовый шум опорного генератора. Причем фазовый

шум опорного генератора в области частот, входящих в полосу пропускания цепи обратной связи, на выходе синтезатора практически не ослабляется, тогда как шум, лежащий вне полосы пропускания, ослабляется со скоростью спада 20 дБ/декаду. Это позволяет в синтезаторе с ФАПЧ отфильтровать часть джиттера входного опорного сигнала, снизив тем самым общий джиттер сигнала и фазовый шум. Однако ФНЧ в петле ФАПЧ для сигнала ГУН работает как фильтр верхних частот [1] и поэтому не уменьшает фазовый шум генератора.

Фазовый шум синтезатора в пределах полосы пропускания фильтра ФАПЧ равен

$$\lambda = \lambda_1 + 20 \lg N,$$

где λ_1 – пересчитанный ко входу фазового детектора суммарный уровень фазовых шумов опорного сигнала, фазового детектора, фильтра и усилителя цепи обратной связи, N – коэффициент деления делителя частоты в цепи обратной связи синтезатора.

Из выражения следует, что при высоком разрешении по частоте и высокой выходной частоте синтезатора фазовый шум может достигать значительной величины. Например, для получения выходного сигнала частотой 1 ГГц с разрешающей способностью 1 МГц коэффициент $N = 1000$ и фазовый шум возрастет на 60 дБ. Для уменьшения уровня фазового шума в цепь обратной связи синтезатора включают смеситель и сравнение сигналов в фазовом детекторе производят на более низкой частоте [1], что позволяет снизить величину

коэффициента деления и тем самым уменьшить уровень фазовых шумов.

Снизить суммарный коэффициент деления можно, используя дробные коэффициенты деления, – делением частоты на $N+1$ каждые M периодов сигнала и делением на N в течение остального промежутка времени. В этом случае усредненный коэффициент деления будет равен $(N+1)/M$, где N и M – целые числа. Для заданного значения частотного шага синтезатора с дробным коэффициентом деления позволяют использовать более высокую частоту сравнения на входе фазового детектора, что способствует уменьшению фазового шума и увеличению скорости перестройки синтезатора. Основной недостаток дробного деления – повышенное содержание негармонических спектральных составляющих, возникающих из-за фазовых ошибок, присущих технологии дробного деления.

Если требования к скорости перестройки частоты синтезатора не выдвигаются, что характерно для генераторов тактовых импульсов, то параметры петли ФАПЧ следует выбирать таким образом, чтобы получить требуемые характеристики при минимальной стоимости системы. Так, если требованиями оговорены малые шумы на частотах вблизи несущей, то следует выбрать удовлетворяющий этим условиям источник сигнала опорной частоты и спроектировать петлю ФАПЧ с широкой полосой частот, чтобы подавить шумы ГУН в требуемой полосе частот.

Если же необходимо получить малый шум на частотах, далеко отстоящих от несущей, можно использовать относительно недорогой источник сигнала опорной частоты, имеющий значительный уровень шума, и использовать узкополосную ФАПЧ для подавления шумов до допустимых значений.

В ИМС тактового генератора AD9523-1, выпускаемой компанией Analog Devices, использована модернизированная схема синтезатора, содержащая две петли ФАПЧ (рис. 1) [2, 3] – PLL1 и PLL2. Такое построение схемы генератора, по утверждению [2], позволяет обеспечить снижение уровня джиттера опорной частоты с помощью первого синтезатора и получить малый уровень фазового шума сигнала высокой частоты на выходе второго синтезатора. Однако схема, приведенная на рис. 1, не дает представ-

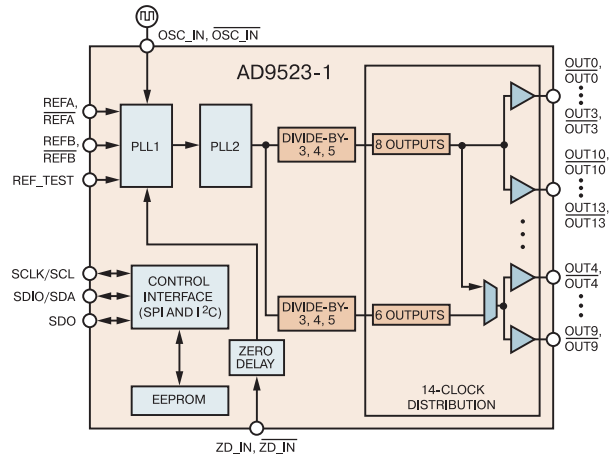


Рис. 1. Структурная схема тактового генератора AD9523-1

ления о том, каким образом достигаются такие результаты. Для пояснения необходимо обратиться к функциональной схеме генератора [3], приведенной на рис. 2.

На один из входов: REF_A, REF_SEL или REF_B подается сигнал опорного кварцевого генератора. Подключение того или иного входа осуществляется с помощью программно-управляемого переключателя Switch-Over Control. В качестве ГУН (VCO) первого синтезатора используется внешний кварцевый генератор, управляемый напряжением (VCXO), а во втором синтезаторе используется встроенный ГУН. Схема второго синтезатора не отличается от классической, а фазовый детектор первого синтезатора сравнивает сигнал генератора опорной частоты, подключенного к одному из входов REF, с сигналом, формируемым на выходе второго синтезатора. Выходной сигнал фазового детектора первого синтезатора управляет частотой генератора VCXO, который является источником опорного сигнала для второго синтезатора.

Благодаря такой организации схемы генератор обеспечивает: формирование выходных сигналов в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц на 14-и конфигурируемых выходах (LVPECL, LVDS, HSTL и LVCMOS), временной сдвиг между сигналами различных выходов не превышает 50 пс, абсолютная величина джиттера на частоте 122.88 МГц – не более 150 фс при частоте опорного сигнала на входе 30.72 МГц. Температурная нестабильность не превышает ± 100 ppm и полностью определяется параметрами кварцевого генератора, управляемого на-

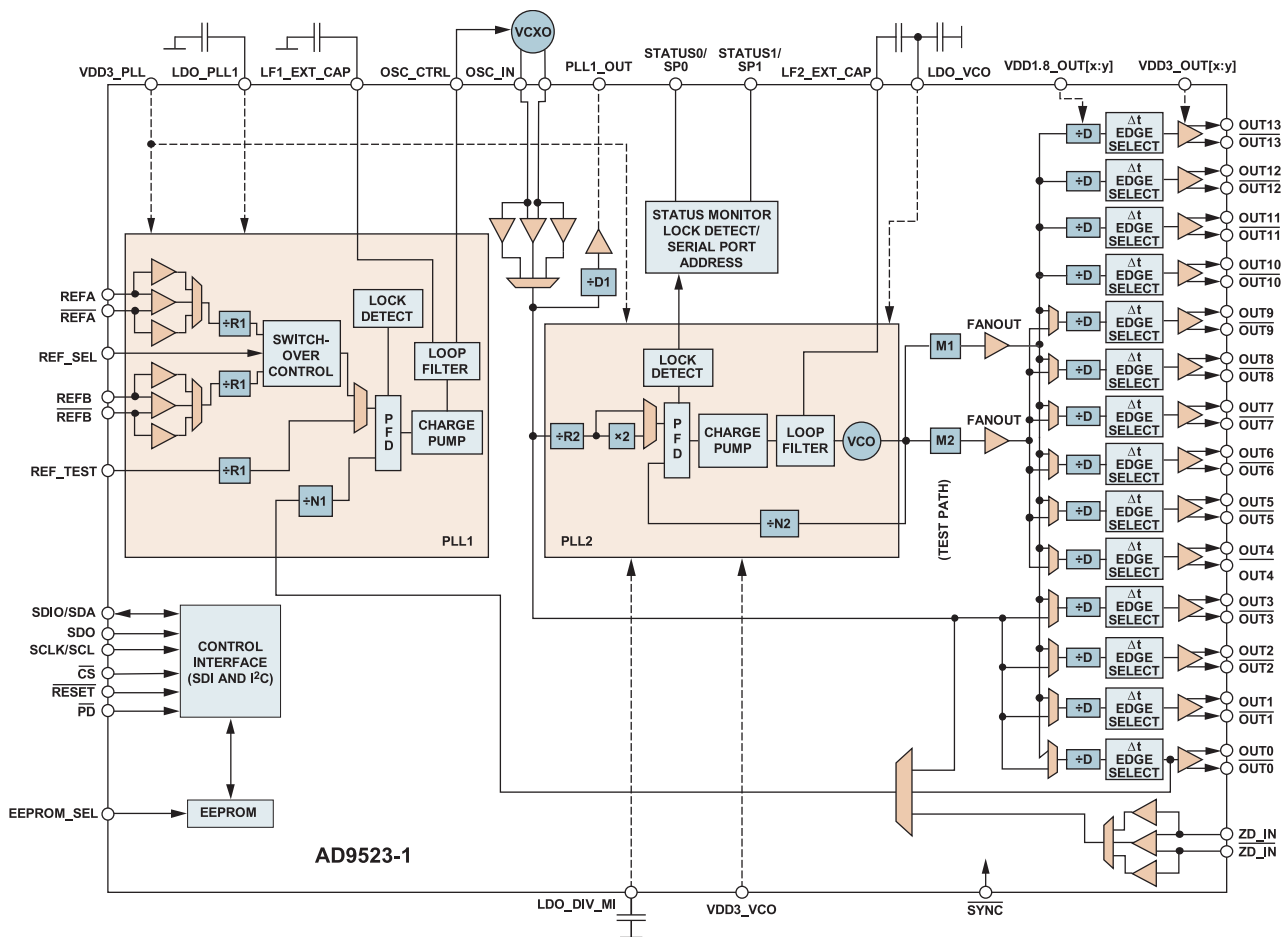


Рис. 2. Функциональная схема тактового генератора AD9523-1

пряжением (VCXO), который используется в качестве источника опорной частоты [3].

Анализ характеристик такой сложной схемы без использования специальных программных средств весьма затруднителен и поэтому специалистами компании Analog Devices была разработана программа ADIsimCLK™ Reference Design Tools, которую можно бесплатно скачать [4], предварительно пройдя несложную регистрацию.

После запуска программы на экран вначале выводятся краткие рекомендации и урок работы с программой. Если отказаться от просмотра урока, то в открывшемся окне начала работы с программой (рис. 3) можно выбрать один из четырех вариантов:

- начать новый проект
- продолжить работу с сохраненным проектом
- открыть последний проект
- просмотреть урок моделирования работы тактового генератора.

После выбора пункта **Create a New Design** (Начать новый проект) и нажатия кнопки **Ok** на экран выводится окно (рис. 4) выбора ИМС тактового генератора (Select Device), в котором содержится информация о количестве выходов ИМС; максимальной выходной частоте; наличии встроенного синтезатора частоты на основе ФАПЧ (PLL); наличии встроенного ге-



Рис. 3. Окно начала работы с программой ADIsimCLK™

Part #	Outputs	Max Fout	PLL	Int. VCO	Max Fin	Jitter	Max Rate	Vcc(Min)	Vcc(Max)	Vp	Icc
AD9523-1	24	1600	yes	2270 - 2650	2400	<225fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-2	24	1600	yes	2020 - 2335	2400	<225fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-3	24	1600	yes	1720 - 2250	2400	<225fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-4	24	1600	yes	1400 - 1800	2400	<225fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-5	24	1600	no	none		<225fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-6	24	800	yes	2550 - 2950	2400	<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-7	24	800	yes	2270 - 2650	2400	<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-8	24	800	yes	2020 - 2335	2400	<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-9	24	800	yes	1720 - 2250	2400	<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-10	24	800	yes	1400 - 1800	2400	<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-11	24	800	no	none		<242fs(ad)	250	2.7	3.3	5.3	
AD9523-12	24	1000	yes	3350 - 4050	4050	<200fs(tot)	400	2.7	3.3	5.3	
AD9523-13	14	800	yes	3150 - 3900	3900	<100fs(ad)	400	2.7	3.3	5.3	
AD9524	14	1000	yes	3350 - 4050	4050	<200fs(tot)	400	2.7	3.3	5.3	
AD9525	8	3600	yes	none	3600	<100fs(ad)	500	3.1	3.5	5.3	
ADCLK946	24	1200	no	none	1200	100fs(ad)	1.7	1.7	1.9		
ADCLK954	24	1200	no	none	1200	100fs(ad)	1.7	1.7	1.9		
ADCLK905	1	7500	no	none	7500	80fs(ad)	2.5	3.3			
ADCLK907	1	7500	no	none	7500	80fs(ad)	2.5	3.3			

Рис. 4. Окно выбора ИМС тактового генератора

нератора, управляемого напряжением (Int VCO), и его диапазоне частот; максимальной частоте сигнала на входе опорного генератора (Max Fin); величине джиттера; диапазоне допустимых напряжений питания.

После выбора ИМС и нажатия кнопки **Ok** открывается рабочее окно **Performance Clocks – Chip Selection** (рис. 5), в котором можно изменить тип выбранной микросхемы тактового генератора, выпускаемой компанией Analog Devices. Для этого достаточно нажать на черный треугольник рядом с окошком **Chip** и выбрать из выпадающего списка (рис. 6) необходимую ИМС. В последней версии программы для выбора предлагаются 43 ИМС тактовых ге-



Рис. 5. Рабочее окно выбора ИМС тактового генератора Performance Clocks – Chip Selection

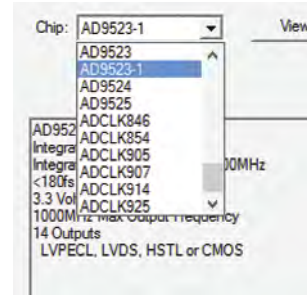


Рис. 6. Список доступных ИМС тактовых генераторов

нераторов. Полный список ИМС тактовых генераторов в виде таблицы, содержащей основные параметры генераторов, приведен в [5]. Всего на сегодняшний день компания Analog Devices выпускает 65 наименований тактовых генераторов. Наилучшие характеристики обеспечивает генератор ADCLK944, который формирует тактовый сигнал в полосе частот до 7 ГГц с джиттером, не превышающим 50 фс. К сожалению, он еще не включен в список компонентов, доступных для анализа с помощью программы ADIsimCLK™.

Для упрощения выбора тактового генератора с требуемыми параметрами предназначена кнопка **Selector Guide** (рис. 5), при нажатии на которую открывается окно с таблицей параметров (рис. 4), в котором можно выбрать требуемый генератор, используя приведенные в таблице параметры. При наличии Интернет-соединения можно нажать кнопку **View Online Selector Guide** (рис. 5) и на экран будет выведена таблица основных параметров генераторов с сайта компании Analog Devices.

После выбора ИМС тактового генератора (в нашем случае – AD9523-1) в нижней части окна **Chip Selection** выводится краткая информация о ее параметрах (рис. 5).

После нажатия кнопки **Далее** (рис. 5) на экран выводится окно **Configure PLL1 and PLL2 for AD9523-X** с функциональной схемой генератора, на которой указаны частоты сигналов генераторов: опорного, VCXO и VCO (рис. 7).

После нажатия кнопки **Next** открывается окно выбора параметров **VCXO Selection – PLL1** (рис. 8). Для первой итерации сохраним рекомендуемую программой крутизну характеристики управления генератором $K_V = 1.3$ кГц/В.

В программе предусмотрено 2 варианта изменения параметров VCXO. Можно задать кру-

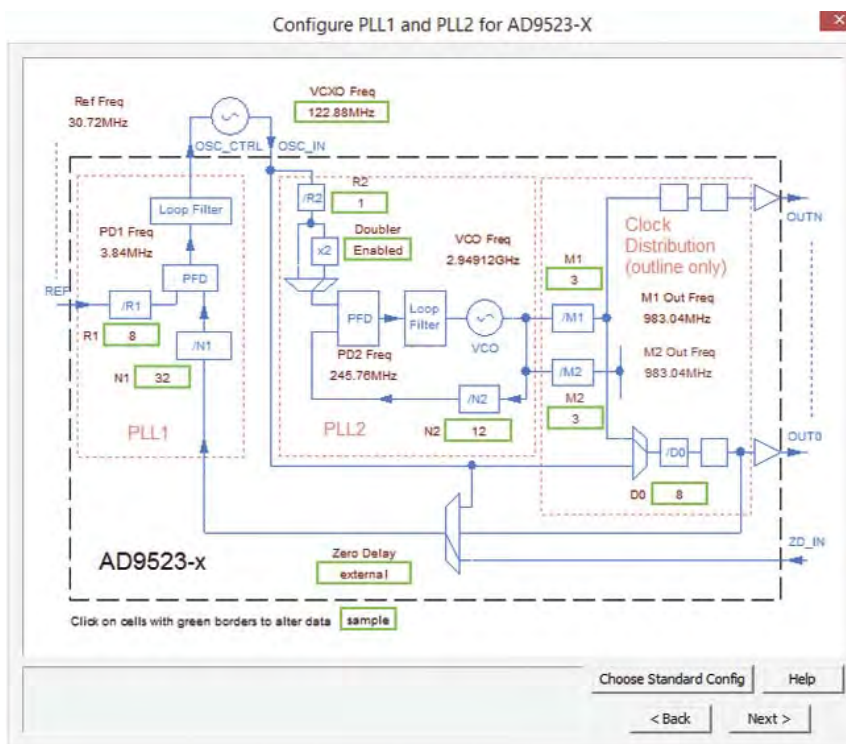


Рис. 7. Функциональная схема генератора, выводимая программой моделирования

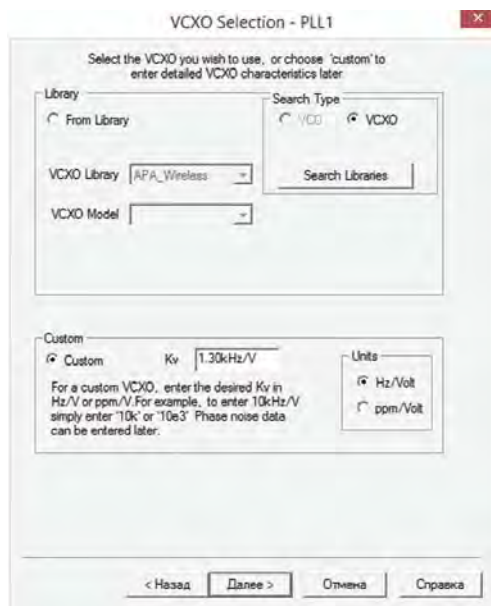


Рис. 8. Окно выбора параметров генератора VCXO первого синтезатора частоты PLL1

тизну характеристики вручную в режиме **Custom** либо выбрать модель генератора VCXO из библиотеки в режиме **From Library** (рис. 8). При нажатии на черный треугольник в правой части окна **VCXO Library** выпадает список,

включающий 12 библиотек, одна из которых (**User**) может создаваться пользователем. Чтобы выбрать конкретную модель VCXO, необходимо нажать кнопку **Search Libraries**, после чего открывается окно **Choose VCXO** с таблицей параметров генераторов (рис. 9).

В таблице приведены названия моделей и библиотек генераторов, отклонение частоты, крутизна характеристики управления, диапазон изменения напряжения управления, фазовый шум, нестабильность частоты, диапазон рабочих температур.

После того, как пользователем заданы параметры или выбрана одна из микросхем генератора VCXO, следует нажать кнопку **Далее**, в результате чего откроется окно **PLL Reference Selection** (выбор опорной частоты), в котором, как и на предыдущем шаге, можно задать частоту генератора опорной частоты вручную либо выбрать генератор из библиотеки (рис. 10). В библиотеке имеется 6 разновидностей кварцевых генераторов с термостабилизацией (ТСХО): ТСХО5, ТСХО10, ТСХО12, ТСХО15, ТСХО20, ТСХО6144.

После задания частоты генератора ТСХО и нажатия кнопки **Далее** открывается окно установки параметров первого и второго синте-

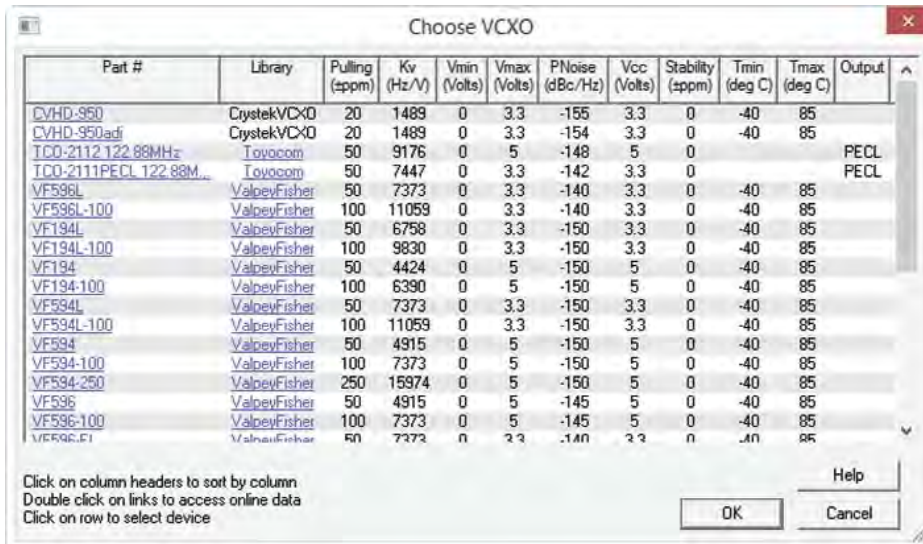


Рис. 9. Окно Choose VCXO

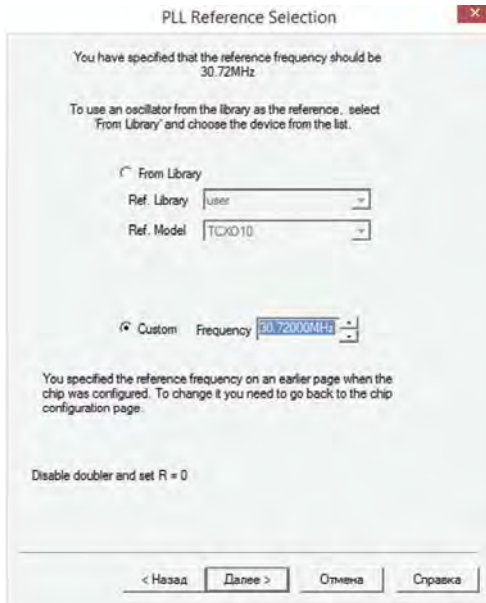


Рис. 10. Окно выбора параметров генератора опорной частоты



Рис. 11. Окно установки параметров синтезаторов частоты

заторов (рис. 11). Задаются два параметра синтезаторов – полоса частот петли обратной связи и фазовый сдвиг в ней. Кроме того, можно включить режим моделирования синтезатора во временной области (Enable Time Domain simulation). После установки этих параметров и нажатия кнопки **Далее** выводится окно (рис. 12) с параметрами выходных сигналов (Clock Distribution Configuration), в котором отображаются значения частоты сигнала на каждом из выходов генератора. С помощью кнопок **Configure**, расположенных в правой

части окна, можно сконфигурировать параметры моделирования (рис. 13) для каждого из выходов: диапазон частот, в котором анализируется фазовый шум; необходимость анализа джиттера; временную задержку, фазовый шум; необходимость отображения отношения сигнал/шум для сигнала входной частоты; вид драйвера выходного каскада.

С окончанием процесса конфигурации следует нажать кнопку **Готово** (рис. 12), после чего на экран будет выведено окно (рис. 14) с результатами моделирования, которое, в свою

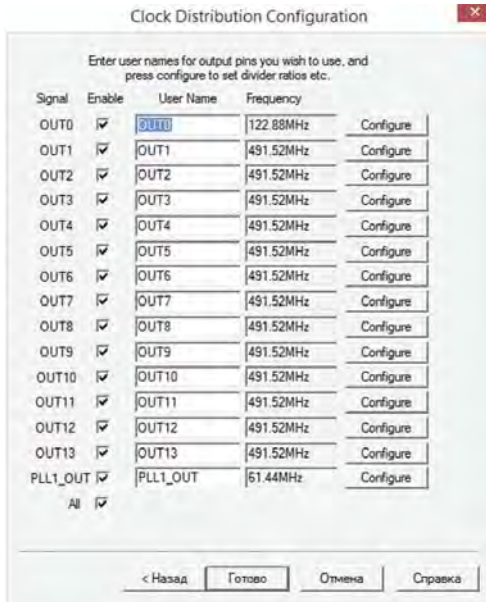


Рис. 12. Окно с параметрами выходных сигналов

очередь, содержит несколько закладок в нижней части окна. Каждая закладка открывает новое окно, в котором содержится информация о параметрах одного из узлов генератора. В их число входят: параметры синтезаторов и всех выходов генератора, частотные и временные зависимости сигналов в различных точках схемы, схема подключения генератора и сводный отчет (при открытии закладки **Report**) в виде текстовой информации о результатах, полученных при моделировании. Фрагмент сводного отчета приведен на рис. 15.



Рис. 13. Окно с параметрами выходных сигналов

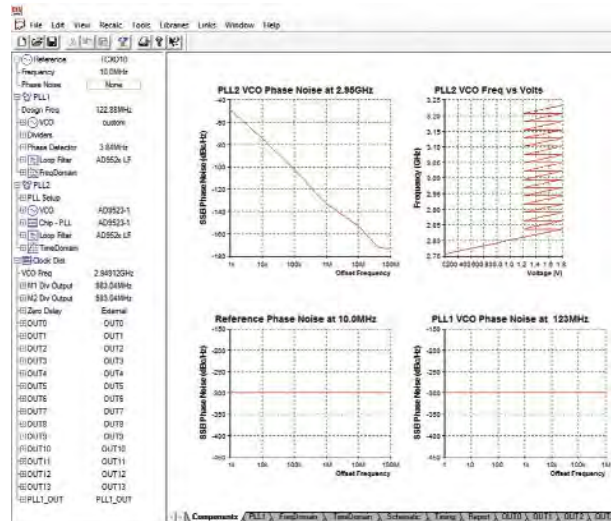


Рис. 14. Окно результатов моделирования

AD9523-1.clk analysed at 02/11/14 11:23:25

Clock Chip is AD9523-1
VCO is AD9523-1
Reference is TCXO10

PLL1 Loop Filter specified by: Phase Margin
Design Objective: Loop Bandwidth: 30.0 Hz
Phase Margin: 75.0 deg
Simulation Result: Loop Bandwidth: 30.55 Hz
Phase Margin: 80.0 deg

PLL2 Loop Filter specified by: Phase Margin
Design Objective: Loop Bandwidth: 450kHz
Phase Margin: 75.0 deg
Simulation Result: Loop Bandwidth: 447.3kHz
Phase Margin: 74.5 deg

Power Dissipation Estimate

Core	325mW
Ref single	4.0mW
OUT0	51.07mW
...	
Total Power	1.592 W

OUT0:
Frequency: 122.880MHz
Broadband Jitter (>1kHz) = 209fs rms
SNR = 77.63dB ENOB = 12.94bits
at IF Freq = 100MHz
Integrated Phase Noise from 100kHz to 1.25MHz
Timing Jitter = 92.5fs rms
Phase Jitter EVM = 0.0071 % rms
Phase Jitter = 0.004 degrees rms
ACI / ACR = -85.9dBc
Delay from Ref to OUT0 is 0s

OUT1:
Frequency: 491.520MHz
Broadband Jitter (>1kHz) = 214fs rms

Рис. 15. Фрагмент сводного отчета, сформированного по результатам моделирования

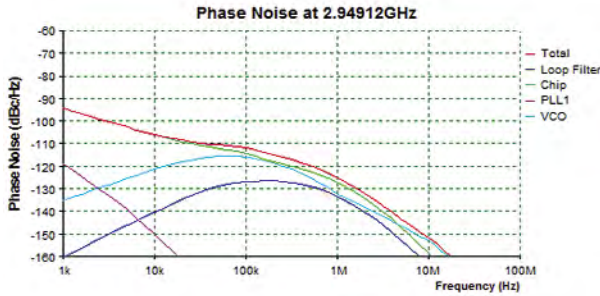


Рис. 16. Графики зависимости спектральной плотности фазового шума в различных точках схемы генератора

В окне **FreqDomain** (анализ в частотной области) приводятся АЧХ и ФЧХ разомкнутой и замкнутой петли обратной связи, а также зависимость спектральной плотности фазового шума от частоты в различных точках схемы генератора (рис. 16): на выходе ГУН, на выходе первого синтезатора и на выходе петлевого фильтра первого синтезатора. На графике по оси частот откладывается частотный интервал от несущей частоты до частоты анализа фазового шума.

При параметрах схемы, заданных в программе по умолчанию, наименьшее значение джиттера, равное 91.6 фс в полосе анализа от 100 кГц до 1.25 МГц при частоте выходного сигнала 491.52 МГц, получено на выходах 1...13 (OUT1...OUT13). На выходе OUT0 частота сигнала составляет 122.88 МГц, а значение джиттера в той же полосе частот – 92.5 фс.

Анализ работы схемы выполняется очень быстро и несложно поэкспериментировать с параметрами генератора для получения желаемого результата. К сожалению, невозможно изменить конфигурацию схемы, чтобы исследовать отдельные узлы генератора в авто-

номном режиме, но и та информация, которая будет получена в результате моделирования, позволяет провести достаточно подробный анализ работы схемы.

Конечно, в рамках одной статьи невозможно не только детально описать работу схемы и пути оптимизации параметров, но даже перечислить полученные результаты. Более подробно с моделированием работы тактовых генераторов можно ознакомиться лишь экспериментальным путем.

Использование программы ADIsimCLK позволяет оценить потенциальные возможности тактовых генераторов на этапе выбора ИМС и оптимизировать параметры схемы для получения требуемого результата. Метод уменьшения джиттера, примененный в ИМС AD9523-1, позволяет получить хорошие результаты при незначительных аппаратных затратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манасевич В. Синтезаторы частот. (Теория и проектирование): Пер. с англ./ Под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
2. Slightom K. Dual-Loop Clock Generator Cleans Jitter, Provides Multiple High-Frequency Outputs. – Analog Dialogue 48-01, January (2014), http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/48-01/pll_jitter_cleaner.pdf.
3. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9523-1.pdf.
4. http://www.analog.com/en/rfif-components/products/ADIsimCLK_thankyou/fca.html.
5. <http://www.analog.com/parametric-search/en/10149#10149>.

VD MAIS
 Электромеханические компоненты и компоненты систем автоматизации

- Низковольтная коммутационная аппаратура
- Программируемые промышленные контроллеры и компьютеры, ПО
- Шкафы • Крейты • Соединители • Корпуса
- Вентиляторы • Инструмент • Кабельная продукция • СКС • Системы маркировки

Дистрибуция и прямые поставки:
 Acme-Portable, AMP Netconnect, Belden, Vopla, Eaton, EBM-Papst, HARTING, Hoffman, Kroy, Lapp Group, Molex, Phoenix Contact, Rittal, Schroff, Siemens, TE Connectivity, TKD, Wago

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6
 тел.: (0-44) 220-0101, 492-8852, факс: (0-44) 220-0202
 e-mail: info@vdmiais.kiev.ua, www.vdmiais.kiev.ua

VD MAIS
 Оборудование и материалы для монтажа/демонтажа электронных компонентов (ЭК)

- Паяльное и ремонтное оборудование
- Системы очистки воздуха • Устройства трафаретной печати • Системы установки компонентов • Паяльные печи: конвекционной и селективной пайки, пайки волной
- Испытательное оборудование
- Системы визуального контроля
- Координатно-фрезерные станки
- Технологические материалы монтажа ЭК
- Средства антистатической защиты

Дистрибуция и прямые поставки:
 AIM, Bernstein, Charleswater, Electrolube, Essemtec, KIC, Kolver, LPKF, Magic Ray, Miele, Nordson, Optilia, PACE, PDT, Samsung, Seho, TWS, Vision, Weiss

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6
 тел.: (0-44) 220-0101, 492-8852, факс: (0-44) 220-0202
 e-mail: info@vdmiais.kiev.ua, www.vdmiais.kiev.ua