

# Анализ джиттера в высокоскоростных цифровых устройствах на примере опции R&S RTO-K12

## Часть 2

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),  
Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

Вторая часть статьи рассказывает о функциональных возможностях и особенностях опции R&S RTO-K12 и рассматривает конкретные примеры её применения для анализа джиттера, возникающего в процессе формирования и обработки цифровых сигналов.

### Функциональные возможности и особенности опции R&S RTO-K12

В осциллографах серии R&S RTO оценка параметров джиттера может выполняться на основе ГД (базовая функция) и при помощи специальной опции. Построение ГД с минимальным вносимым джиттером достигается за счёт точной побитовой синхронизации [8]. На основе ГД автоматически могут быть измерены:

- амплитудно-временные характеристики раскрытия «глаза» и показатели их разброса;
- шумовые характеристики, связанные с амплитудными флуктуациями сигнала;
- пиковое, среднеквадратичное значение джиттера, а также интервал наиболее вероятных его значений.

Построение ГД в осциллографах серии R&S RTO реализуется в первую очередь как средство для тестирования цифровых сигналов по заданной пользователем маске и используется для оценки целостности сигналов при отладке ЦУ высокого быстродействия. Опция R&S RTO-K12 расширяет и углубляет возможности измерений характеристик джиттера за счёт сочетания временного и статистического анализов. Она позволяет оценивать джиттер между смежными циклами (посредством последовательной передачи единичного и нулевого битов [8]) и их пачками, задержку относительно опорного сигнала, разность в длительности импульсов в соседних циклах и многие другие характеристики. Опция способна восстанавливать опорный сигнал, анализировать задержку по времени между двумя взаимозависимыми сигналами, например в составе дифференциальной пары. Все перечислен-

ные характеристики могут измеряться одновременно.

Для управления измерением этих параметров предусмотрено весьма подробное конфигурирование. Измерение джиттера может выполняться по первому обнаруженному перепаду или строго по фронту или спаду, либо по любым перепадам в составе цифрового сигнала. Для определения временных соотношений задаётся опорный уровень.

Для сопоставления исследуемого сигнала с опорным, например тактовым сигналом, опция предоставляет две возможности. Первая состоит в том, что опорный сигнал подаётся на один из входов осциллографа, т.е. его источником служит внешнее устройство. Во втором случае опорный сигнал формируется программным либо аппаратным алгоритмом CDR (опция R&S RTO-K13). Настройки режима измерений предусматривают указание видов перепадов для исследуемого и опорного сигналов, а также опорных уровней, по которым рассчитывается задержка. Для анализа временной задержки между двумя взаимозависимыми сигналами достаточно указать только их источники и тип перепада.

Статистические данные по джиттеру могут отображаться в виде трека результатов измерения и в виде вероятностной гистограммы. Для использования этих режимов в настройках осциллографа необходимо включить режим статистики, и тогда результаты измерений заданной характеристики джиттера будут отображаться в синхронном сопоставлении с осциллограммой сигнала. Гистограмма строится на основе трека и характеризует вероятностное распределение измеряемой характеристики джиттера, по которому можно делать выводы о его природе и причинах появления. К треку может быть

применена функция быстрого преобразования Фурье с получением спектра заданной характеристики джиттера, что даёт дополнительную информацию о динамике её изменения.

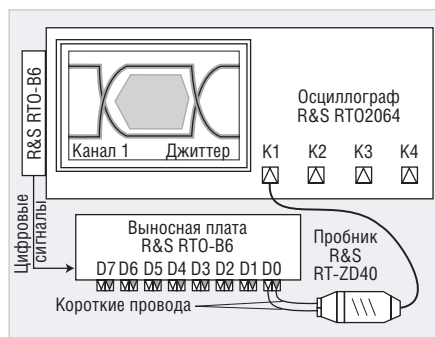
Таким образом, опция R&S RTO-K12 предоставляет весьма широкий набор инструментов для исследования разнообразных характеристик джиттера при отладке быстродействующих ЦУ.

### ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА ДЖИТТЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЦИИ R&S RTO-K12

#### Используемые средства измерений и оснастка

Для наблюдения джиттера и измерения его временных характеристик необходимо использовать средства измерений, обладающие высокоточной внутренней временной шкалой, иначе результаты измерений будут отражать собственную нестабильность измерительной системы. Осциллографы серии R&S RTO полностью соответствуют данному требованию.

Известно, что джиттер зависит от характера битовой последовательности, передаваемой в цифровом сигнале, включая количество переходов между состояниями с высоким и низким уровнями. Для формирования битовых последовательностей с различным наполнением можно использовать функциональные генераторы, однако более приемлемым решением, в большей степени отражающим принципы формирования сигналов в цифровых устройствах, является применение генератора битовых последовательностей. Генератор сигналов произвольной формы R&S RTO-B6, помимо двух аналоговых выходов, имеет 8 синхронизированных цифровых выходов с интервалом напряжений от 0 до 6 В. Для вывода цифровых сигналов используется небольшая внешняя плата, подключаемая к блоку R&S RTO-B6 при помощи шлейфа. На ней установлены 16 контактов (по два, включая общий, на каждый выход), подключение к которым может выполняться



**Рис. 5. Установка для измерений джиттера одиночного цифрового сигнала**

ся штатными пробниками при помощи переходников. Для управления выходными сигналами генератора используются файлы \*.csv с установленной в техническом описании структурой [8]. В этих файлах в шестнадцатеричном виде задаётся последовательность состояний параллельной шины, образованной выводами D0–D7 внешней платы генератора.

В описанных ниже измерениях были использованы:

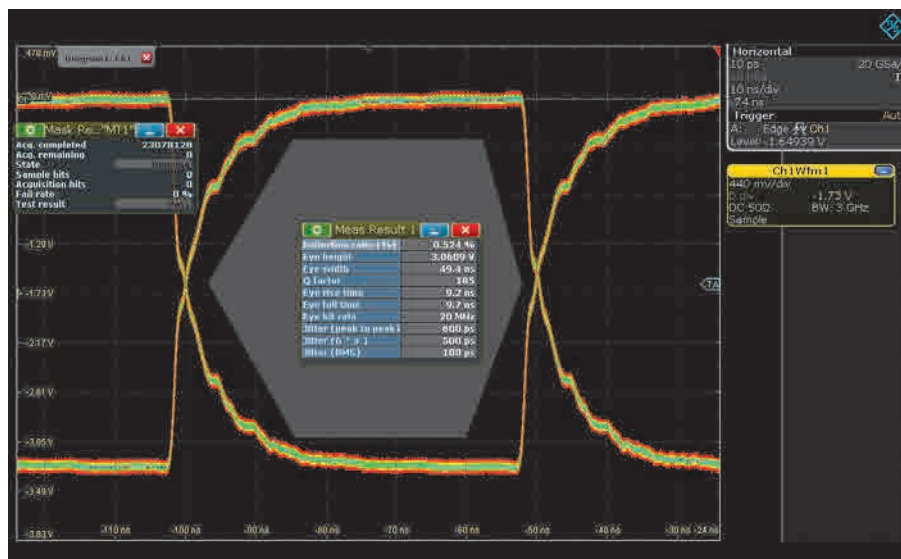
- осциллограф R&S RTO2064 с полосой рабочих частот до 6 ГГц и 4 каналами с опциями R&S RTO-B6 и RTO-K12;
- дифференциальные пробники R&S RT-ZD30 и R&S RT-ZD40 с полосой рабочих частот до 3 и до 6 ГГц соответственно.

Использование дифференциальных пробников в описанных ниже измерениях обусловлено исключительно удобством их подключения к внешней плате R&S RTO-B6. Анализ джиттера можно проводить с использованием любых пробников, существенно не ограничивающих полосу частот цифрового сигнала.

**Построение глазковой диаграммы с помощью базовых функций осциллографа R&S RTO**

Для построения глазковой диаграммы (ГД) и проведения с её помощью измерений использовалась схема, представленная на рисунке 5. Она предусматривала прямое подключение выхода D0 генератора к входу осциллографа через пробник R&S RT-ZD30. Алгоритм формирования цифрового сигнала соответствовал шестнадцатеричной схеме 0x0→0x1→... с периодическим повторением, т.е. последовательной смене нулей и единиц в битовом потоке. Его скорость составляла 20 Мбит/с при выходном напряжении 3,3 В.

Результаты построения глазковой диаграммы приведены на рисунке 6, где в



**Рис. 6. Построение глазковой диаграммы на основе базовых функций осциллографа R&S RTO**

таблице также показаны оценки некоторых характеристик джиттера в соответствии с установленными настройками измерений. Для улучшения отображения джиттера в настройках осциллографа была активирована функция послесвечения с длительностью 100 мс, которая позволяет визуально определить область вариаций цифрового сигнала.

В таблице результатов измерений присутствуют три важных временных характеристики джиттера: пиковое, среднеквадратичное значение и наиболее вероятное значение джиттера (6σ). Эти значения составили 600, 100 и 500 пс, что близко к расчётным значениям для нормального распределения. Отсюда следует, что джиттер исследуемого цифрового сигнала имеет случайный характер. По построенной ГД автоматически измерены времена нарастания и спада, скорость битового потока, ширина и высота диаграммы, а также Q-фактор – отношение разности средних амплитуд логической единицы и логического нуля к сумме их среднеквадратичных отклонений, являющееся обобщённой характеристикой качества цифрового сигнала с точки зрения его захвата приёмником. Любые деструктивные воздействия на цифровой сигнал, например повышенные потери в линии передачи, приводят к снижению Q-фактора. В рассматриваемом случае Q-фактор имеет значение 185, что свидетельствует о незначительном влиянии джиттера на захват логического состояния и подтверждается большим раскрытием «глаза».

Для выбранного класса цифровых компонентов всегда можно определить минимально допустимые грани-

цы ГД входного сигнала, при которых ещё осуществляется надёжный захват логического состояния. На этом принципе основано тестирование по маске, задаваемой оператором. Для реализации такого тестирования в осциллографе должна быть установлена опция R&S RTO-K12. Интерфейс осциллографов R&S RTO позволяет задавать маску непосредственно в графическом виде при помощи сенсорного экрана, что удобно при тестировании цифровых устройств с сигналами разной амплитуды и битовой скоростью. В левой таблице на рисунке 6 приведены результаты тестирования по маске, включающие количество прошедших и не прошедших тестирование бит.

Таким образом, измерения цифровых сигналов по ГД в осциллографах серии R&S RTO фактически выполняются в автоматическом режиме и их результаты дают представление об основных характеристиках джиттера, однако для его глубокого статистического анализа требуется использование опции R&S RTO-K12.

**Анализ джиттера с использованием опции R&S RTO-K12**

Данный анализ выполнялся с использованием той же схемы подключения оборудования (см. рис. 5). Из всех параметров, которые она способна измерять в автоматическом режиме, были выбраны период, частота, межтактовый джиттер [8], а также джиттер длительности логической единицы. Статистика по данным параметрам приведена в таблице в нижней части рисунка 7. Она включает в себя текущее, минимальное,

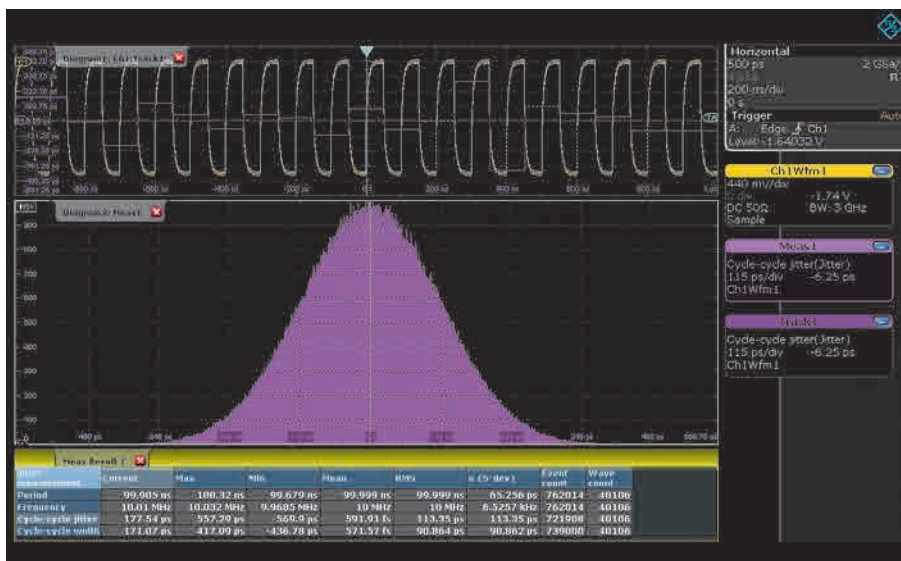


Рис. 7. Результат временного и статистического анализа джиттера с использованием опции R&S RTO-K12

максимальное, среднее и среднеквадратичное значения упомянутых параметров, а также их дисперсию и количество учтённых в расчётах построений осциллограммы. Статистика периода и частоты наиболее важна для тактовых сигналов, которые определяют цикличность процессов в цифровых устройствах. Она позволяет также отслеживать влияние регулировочных операций и иных действий по отладке. Заданное значение битовой скорости в представленном примере равнялось 20 Мбит/с, и, как видно из первых двух строк таблицы, это значение выдержано с высокой точностью.

Положительные и отрицательные значения джиттера в цифровом потоке компенсируют друг друга, поддерживая необходимое значение средней длительности битового интервала. Оценочное среднее значение межтактывого джиттера составляет всего 592 фс, т.е. 0,0833% от заданной длительности битового интервала, а максимальное – не более 1,2%. Такие значения гарантируют захват логического состояния при обработке цифровых сигналов с близкой к нулевой вероятностью появления ошибок.

В верхнем поле на рисунке 7 показано совмещение осциллограммы цифрового сигнала и расчётного значения джиттера между смежными циклами, значения которого можно отсчитывать по расположенной слева вертикальной шкале. Захват прибором множества циклов цифрового сигнала позволяет построить вероятностную гистограмму, которая, как показано на рисунке, в целом повторяет кривую плотности нормального распределения. С увели-

чением объёма выборки форма вероятностной гистограммы всё больше приближается к статистически достоверной. Форма вероятностной гистограммы свидетельствует об отсутствии выраженных источников детерминированного джиттера, как это и должно быть в качественных цифровых устройствах. Если бы цифровой сигнал характеризовался детерминированным джиттером, то в большинстве случаев гистограмма имела бы «выбросы» с симметричным расположением относительно математического ожидания.

**Измерение джиттера запаздывания между двумя зависимыми сигналами**

Данное измерение используется при оценке постоянства системной задержки в ЦУ, что является одной из задач тайминга – проверки соблюдения временных соотношений, необходимых для групповой обработки бит [4]. Если алгоритмы функционирования ЦУ достаточно сложны и предполагают несколько ветвей обработки с последующим объединением потоков информации на аппаратном уровне, что часто используется для достижения наибольшего быстродействия, то это может стать причиной системных ошибок и неработоспособности ЦУ.

Для демонстрации измерительных возможностей опции R&S RTO-K12 в части измерения джиттера зависимых сигналов использовалась схема, представленная на рисунке 8. Цифровые сигналы с амплитудой 1,2 В с выходов D0 и D7 внешней платы генератора R&S RTO-B6 поступали на каналы 1 и 2 осциллографа. Битовая скорость рав-

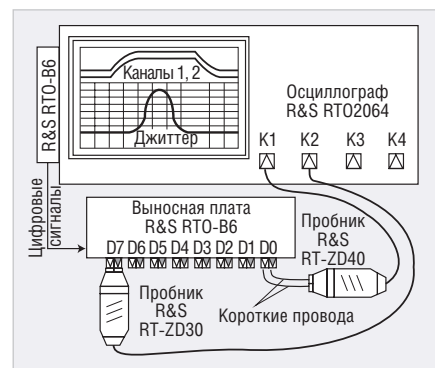


Рис. 8. Установка для измерений джиттера одиночного цифрового сигнала

нялась 20 Мбит/с. Алгоритм формирования цифрового сигнала соответствовал шестнадцатеричной последовательности 0xFF→0x00→0xFF→0x00→→0x00→0xFF→0x00→0xFF→0xFF→→0x00→0xFF→0xFF→0x00→0x00→→0x00→... с периодическим повторением, имитирующей случайную битовую последовательность и обеспечивающей одинаковое логическое состояние на выводах D0, D7 генератора. Перед проведением измерений в цепях пробников R&S RT-ZD30 и R&S RT-ZD40 было установлено нулевое смещение по времени.

В качестве характеристик, для которых анализировался джиттер, рассматривались задержка сигналов и разность фаз, характеризующая долю джиттера в длительности последовательной передачи нуля и единицы. Результаты измерений приведены на рисунке 9. В верхнем окне показаны осциллограммы сигналов, далее с привязкой к той же временной шкале показано, как от цикла к циклу меняется задержка. В нижней части рисунка приведены вероятностная диаграмма и таблица со статистическими результатами измерений джиттера. Согласно таблице, максимальное зарегистрированное значение джиттера составляет 659 пс, т.е. чуть более 1,3% битового интервала. Такие временные вариации цифровых сигналов безопасны с точки зрения соблюдения тайминга. Среднее значение джиттера составляет –71,3 пс – таким образом, сигнал в канале 1 (выход D0) преимущественно опережает сигнал в канале 2 (выход D7). Среднее и среднеквадратичное значения фазы составляют –0,16° и 0,31°, откуда следует, что сигналы отличаются высоким уровнем синхронизации.

Весьма интересные выводы позволяют сделать вероятностная гистограмма. В отличие от предыдущего случая, она

лишена монотонного спада от максимального значения, хотя и сходна по форме с функцией плотности нормального распределения. Выброс в области значения 50 пс свидетельствует о проявлении детерминированного джиттера, который, по-видимому, зависит от характера передаваемых данных либо проявляется в силу перекрёстных помех в шлейфе, соединяющем выносную плату генератора с его аппаратной частью внутри осциллографа. Детерминированная компонента джиттера сравнительно невелика и не является определяющей по сравнению со случайным джиттером.

**Оценка влияния параметров цифровых сигналов на характеристики межтактового джиттера**

Как отмечается в [4], джиттер может проявлять зависимость от размаха цифрового сигнала, битовой скорости и характера битовой последовательности. Для оценки такого влияния использовалась схема, приведённая на рисунке 5. Рассматривались цифровые сигналы с напряжением 1,2; 3,3 и 5 В и скоростью 1, 10 и 20 Мбит/с (битовый интервал  $T=1000, 100$  и  $50$  нс соответственно), а также с пятью различными типами битовых последовательностей:

- тип 1: с равномерным распределением логических единиц и нулей (...101010...);
- тип 2: с преобладанием логических единиц (...110110...);
- тип 3: с преобладанием логических нулей (...001001...);
- тип 4: с малым количеством логических нулей (...11110...);
- тип 5: с малым количеством логических единиц (...00001...).

В качестве оцениваемой характеристики было выбрано максимальное значение модуля межтактового джиттера  $J_M$  не менее чем за  $N=8000$  циклов захвата сигнала. При таком значе-

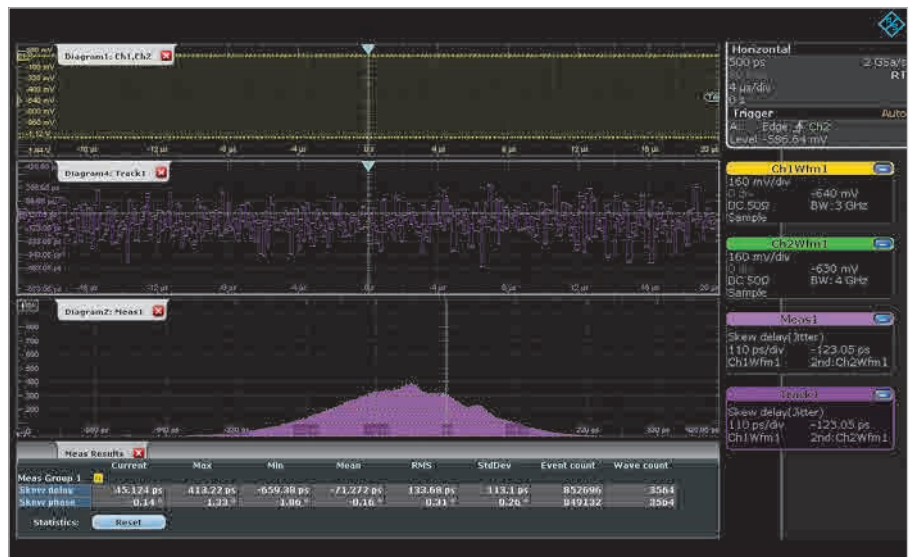


Рис. 9. Результат измерений характеристик джиттера временной задержки зависимых цифровых сигналов

нии  $N$  можно говорить о статистически достоверной оценке предельного джиттера. В результате 45 циклов измерений с представлением результатов, аналогичным рисунку 7, были получены оценки значения  $J_M$  приведённые в таблице 1.

В качестве характеристики влияния джиттера на передачу бит в цифровом потоке целесообразно ввести параметр  $P=2 \times J_M / T$ , значения которого, выраженные в процентах, приведены в таблице 2. Значения  $P$  для каждой комбинации параметров цифрового сигнала характеризуют максимальную долю джиттера в длительности передачи единичного бита.

Анализ полученных результатов позволяет прийти к следующим важным для практики проектирования быстродействующих ЦУ выводам:

1. Повышение напряжения питания микросхем, вызывающее увеличение размаха цифрового сигнала, всегда приводит к снижению межтактового джиттера. Поэтому, на первый взгляд, высокоскоростные цифровые устройства целесо-

образно проектировать с применением компонентной базы, работающей с повышенным напряжением электропитания, но это противоречит современным тенденциям её развития [4, 6].

2. Увеличение размаха цифрового сигнала снижает зависимость джиттера от характера битовой последовательности.
3. С повышением скорости передачи отношение межтактового джиттера к битовому интервалу увеличивается. Оно резко возрастает вблизи предельной битовой скорости, что является существенным фактором в её ограничении.
4. Равномерное распределение нулей и единиц в битовом потоке ориентировочно соответствует среднему значению межтактового джиттера.
5. Переход к протоколам передачи данных, при которых в битовом потоке преобладают нули или единицы, способен привести к изменению джиттера на 10...20%, что открывает дорогу к оптимизации и некоторому повышению предельно допусти-

Таблица 1. Оценочные значения  $J_M$  для цифровых сигналов с различными характеристиками

Скорость, Мбит/с	Размах сигнала, В	Значение $J_M$ , нс, для цифровых сигналов типа				
		1	2	3	4	5
1	1,2	1,209	0,904	1,342	0,853	1,132
	3,3	0,803	0,618	0,686	0,620	0,793
	5,0	0,628	0,403	0,630	0,500	0,589
10	1,2	0,744	0,623	0,575	0,831	0,950
	3,3	0,377	0,407	0,413	0,405	0,416
	5,0	0,265	0,289	0,379	0,280	0,249
20	1,2	1,014	0,906	1,022	1,080	1,277
	3,3	0,358	0,394	0,372	0,497	0,470
	5,0	0,253	0,307	0,280	0,258	0,310

Таблица 2. Значения параметра  $P$  для цифровых сигналов с различными характеристиками

Скорость, Мбит/с	Размах сигнала, В	Значение $P$ , %, для цифровых сигналов типа				
		1	2	3	4	5
1	1,2	0,242	0,188	0,268	0,171	0,226
	3,3	0,160	0,124	0,137	0,124	0,159
	5,0	0,126	0,081	0,126	0,100	0,118
10	1,2	1,488	1,246	1,150	1,662	1,900
	3,3	0,754	0,814	0,826	0,810	0,832
	5,0	0,530	0,578	0,758	0,560	0,498
20	1,2	4,056	3,624	4,088	4,320	5,108
	3,3	1,432	1,576	1,488	1,988	1,880
	5,0	1,012	1,128	1,120	1,032	1,240

мой по критерию джиттера битовой скорости. Некоторые протоколы, например USB 2.0 [9], используют специальные виды кодирования, которые позволяют уменьшить количество фронтов и спадов в цифровом сигнале.

6. По-видимому, для любого источника цифрового сигнала существует битовая скорость, оптимальная по критерию минимизации джиттера, которая, однако, весьма далека от значения, соответствующего предельному быстродействию.

В общем случае характеристики джиттера будут зависеть и от других особенностей формирования и передачи цифровых сигналов, включая технологию изготовления интегральных компонентов, топологию печатного узла ЦУ и т.д.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Явление джиттера всегда сопровождается процессы формирования и обработки цифровых сигналов при современных битовых скоростях. Анализ джиттера является важным этапом отладки ЦУ, обеспечения их

стабильного, надёжного функционирования, а также обязательным условием для достижения предельно возможного их быстродействия, если это необходимо. Оценка характеристик джиттера должна проводиться с использованием высококачественных осциллографов, пробников и другой оснастки, которые не оказывают существенного влияния на результаты измерений.

Анализ джиттера, реализованный в осциллографах серии R&S RTO в базовом варианте, позволяет получить оценки границ вариаций цифровых сигналов во времени. Автоматическое измерение амплитудно-временных параметров джиттера даёт возможность упростить и ускорить отладку ЦУ. Опция R&S RTO-K12 обладает существенно более широкой функциональностью, достаточной для получения временных и статистических характеристик различных показателей джиттера и позволяющей при необходимости оценить действительность схемотехнических, конструкторских и технологических мер по их снижению.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Новожилов О.П.* Основы цифровой техники. – М.: Радиософт, 2004. – 528 с.
2. *Эннс В.И., Кобзев Ю.М.* Проектирование КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 454 с.
3. *Кечиев Л.Н.* Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.
4. *Кечиев Л.Н.* Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с.
5. *Лемешко Н.В., Кечиев Л.Н., Захарова С.С.* IBIS-модели и их применение в задачах ЭМС. – М.: Грифон, 2016. – 192 с.
6. *Каледов Л.А.* Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Лань, 2007. – 400 с.
7. *Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю.* и др. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2000. – 400 с.
8. R&S RTO Digital Oscilloscope. User Manual. V.11. – 1332.9725.02-11. – 2429 p.
9. Universal Serial Bus Specification: [http://www.usb.org/developers/docs/usb20\\_docs/#usb20spec](http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/#usb20spec)



**Системы преобразования энергии**

## SCHAEFER

**Источники питания AC/DC**

- Вход: однофазная и трехфазная сеть переменного тока
- Мощность от 100 Вт до 500 кВт
- Выход: от 5 до 800 В постоянного тока
- Диапазон рабочих температур от -40 до +75°C

**Источники питания DC/DC**

- Вход: от 10 до 800 В постоянного тока
- Разнообразные конструктивные исполнения

**DC/AC-инверторы**

- Вход: от 20 до 800 В
- Выходы: однофазное и трехфазное напряжение
- Частота выходного напряжения от 40 до 800 Гц с подстройкой

**AC/AC-преобразователи**

- Преобразование переменного напряжения в однофазное и трехфазное с частотой от 40 до 800 Гц

**Области применения**

- Промышленная автоматизация
- Железнодорожный транспорт
- Испытательное оборудование
- Энергетика
- Оборонная промышленность
- Нефтегазовая промышленность

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



## Простой выбор источника питания

Компания XP Power предлагает широкий ряд стандартных и конфигурируемых устройств электропитания AC/DC и DC/DC. Источники питания сочетают подтверждённую надёжность с габаритами и ценой, соответствующими практически любому требованию.



### Источники питания открытого типа

- от 5 до 350 Вт
- Компактная конструкция
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



### Конфигурируемые источники питания

- от 25 до 5000 Вт
- Высокоэффективная конструкция
- Работа от одно- и трёхфазной сети
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



### Для монтажа на DIN-рейку

- от 5 до 960 Вт
- Сверхкомпактные
- AC/DC- и DC/DC-преобразователи



### Корпусированные источники питания

- от 25 до 5000 Вт
- Высокоэффективная конструкция
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



### DC/DC-преобразователи

- от 0,25 до 750 Вт
- Монтаж в отверстия печатной платы и поверхностный монтаж
- Для железнодорожного и медицинского оборудования



### Высоковольтные источники питания

- До 500 кВ и 200 кВт
- Конструкция модульного типа и для монтажа в стойку
- Входное напряжение переменное и постоянное

