

# Анализ процессов в системе электропитания при изменении тока нагрузки

УДК 621.317

Часть шумов и наводок, присутствующих в системах распределения питания (power delivery network, PDN), связана с воздействием одного из компонентов системы на другой по линии электропитания. В статье рассматриваются различные методы измерения таких шумов с использованием осциллографов.

Рассмотрим пример изменения формы тока и напряжения в шине питания мобильного устройства (смартфона, планшета или персонального органайзера) при включении каких-либо из встроенных в него модулей (например, фонарика, Wi-Fi-модуля, камеры и др.). На рис. 1<sup>\*</sup> видно, что на графике выходного напряжения регулятора напряжения (Voltage regulation module, VRM) сигнал имеет спад («просадку напряжения») в момент включения устройства, потребляющего ток. Спустя короткий промежуток времени уровень питающего напряжения возвращается к номинальному. Аналогичные описанному процессу явления можно наблюдать и в источниках питания других современных цифровых систем. В подавляющем большинстве современных цифровых схем применяются импульсные источники питания, характеризующиеся возникновением колебаний, которые появляются в ответ на изменение тока нагрузки и являются нежелательными для устойчивого функционирования системы.

Разработчики радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) заинтересованы в оценке параметров пульсаций тока и имеющихся шумовых процессов в сети питания, поскольку спад («просадка») напряжения может повлиять на работу других компонентов системы, запитанных от того же источника питания и находящихся на той же шине питания.

Чтобы произвести такого рода оценку, необходимо измерить параметры переходного процесса в шине электропитания, возникающего как реакция на увеличение потребления тока из-за подключения дополнительной нагрузки. Для этого нужно рассмотреть форму сигналов тока и напряжения в шине питания. На рис. 1 показаны кривая напряжения (канал C5, зеленый график) и кривая тока в цепи (канал C8, оранжевый график) на экране осциллографа.

Сначала мы должны выяснить, что происходило в шине питания до включения нагрузки, и ответить на вопросы:

- какое было среднее напряжение?
- какой был уровень пульсаций?

Затем нужно измерить параметры переходного процесса, возникшего в результате включения нагрузки в шину питания, и ответить на следующие вопросы:

- насколько сильно «просело» напряжение?
- сколько времени потребовалось для восстановления параметров питания до среднего значения напряжения ( $U_{mean}$ )?
- сколько времени потребовалось для выхода параметров питания на новый уровень после включения нагрузки?

Таким образом, мы получим количественные параметры состояния системы до, во время и после подключения нагрузки (рис. 2).

Далее будут рассмотрены три основных подхода для проведения данных измерений с помощью осциллографа, описанных в порядке сложности их реализации.

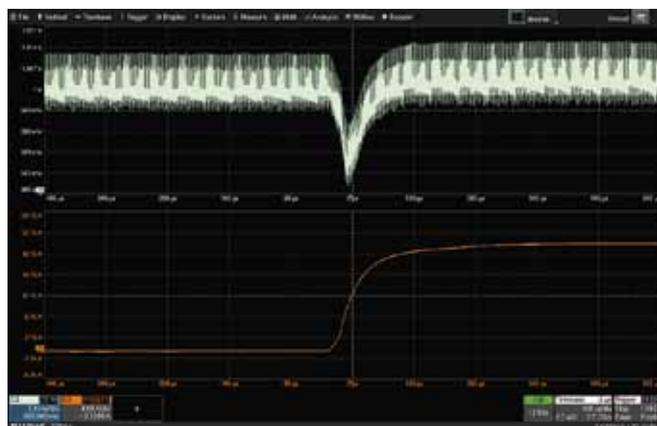


Рис. 1. Падение напряжения («проседание») на шине электропитания как отклик на нагрузку

\* Источник всех рисунков, приведенных в статье:  
<https://blog.teledynelecroy.com/2020/11/fundamentals-of-power-integrity-mutual.html#more>.



Рис. 2. Три этапа переходных процессов (откликов ИУ) при измерении пульсаций

Во всех примерах измерения будут проводиться на шине питания 1 В, длительность измерений будет составлять 1 мс, подключение нагрузки к шине питания будет осуществляться через 500 мкс после начала измерений.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ КУРСОРОВ

Достаточно широко используемый метод измерений переходных процессов на шине питания при анализе отклика на нагрузку (Transient Response) заключается в применении осциллографа с функцией курсорных измерений.

Чтобы увидеть и оценить уровень пульсаций на шине в состоянии «без нагрузки», необходимо просто расположить линии вертикальных курсоров на наблюдаемых пиках напряжения на осциллограмме – один курсор в верхней и один в нижней части кривой – и считать значение. Функция курсорных измерений в осциллографах Teledyne LeCroy обеспечивает автоматическое вычисление разницы показаний с отображением полученного значения. На рис. 3 курсоры показывают уровень пульсаций 19,81 мВ (величина  $\Delta$  – в зеленом овале в левой нижней части экрана).

Среднее напряжение ( $U_{mean}$ ) затруднительно точно измерить с помощью курсоров. Для этого необходимо найти на осциллограмме область, где график напряжения является наиболее «плотным», и установить там курсор (голубая стрелка на рис. 4). Однако нужно иметь в виду, что этот способ не является достаточно точным методом измерения среднего напряжения. На рис. 4 показано измеренное среднее напряжение 999,81 мВ, что довольно близко к ожидаемой величине напряжения на данной шине (1 В).

Далее аналогично выполняется измерение пульсаций и среднего напряжения в стабильном состоянии после активации нагрузки (этап установления)  $U_{ном.}$ . Поскольку измерения с помощью вертикального курсора охватывают все собранные отсчеты данных и включают значения с других этапов реакции испытуемого устройства (ИУ) на нагрузку,

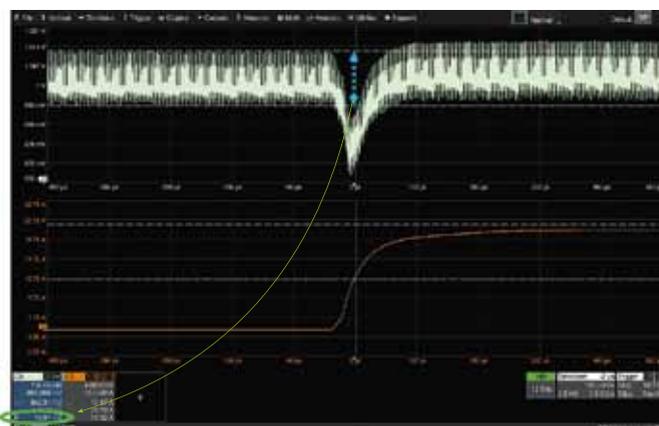


Рис. 3. Измерение пульсаций с помощью курсоров

то это означает, что точного разделения этих этапов не обеспечено. Тем самым не учитываются различия между предварительным состоянием (до нагрузки), этапом включения нагрузки и установившимся состоянием на шине питания.

Метод использования курсоров также сложнее с точки зрения учета динамики связанных процессов изменения тока и напряжения на шине. Чтобы оценить, насколько сигнал уменьшился по амплитуде («просел»), можно выполнить измерение от наиболее плотной по яркости области осциллограммы напряжения ( $U_{mean}$ ) до пика, соответствующего минимальному значению (самое нижнее на графике). На рис. 5 это значение составляет около 31 мВ (размах указан голубой стрелкой, полученное значение отмечено зеленым цветом в нижнем левом углу). Но опять же, надо помнить, что данный результат включает в себя все пульсации сигнала, присутствующие в захваченных данных.

Чтобы оценить время восстановления (время, необходимое для возвращения к определенному процентному значению от уровня напряжения  $U_{ном.}$ ), следует установить

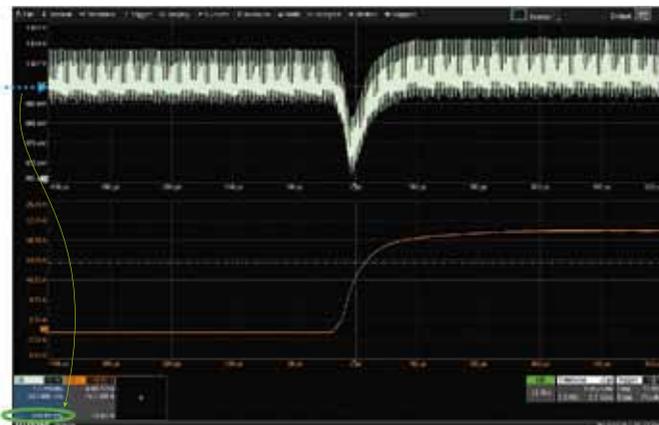


Рис. 4. Измерение среднего напряжения с помощью курсора

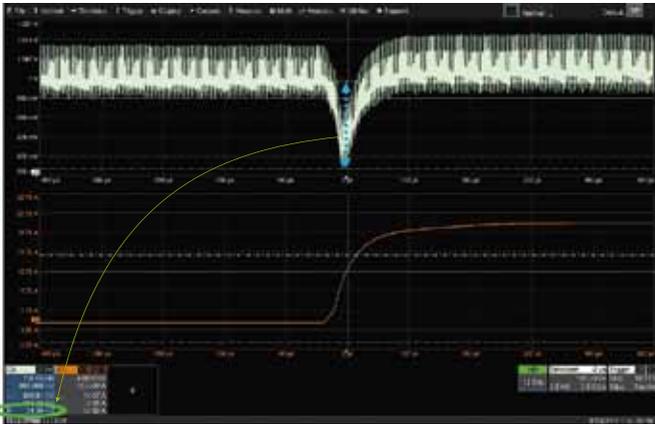


Рис. 5. Оценка спада напряжения с помощью курсоров

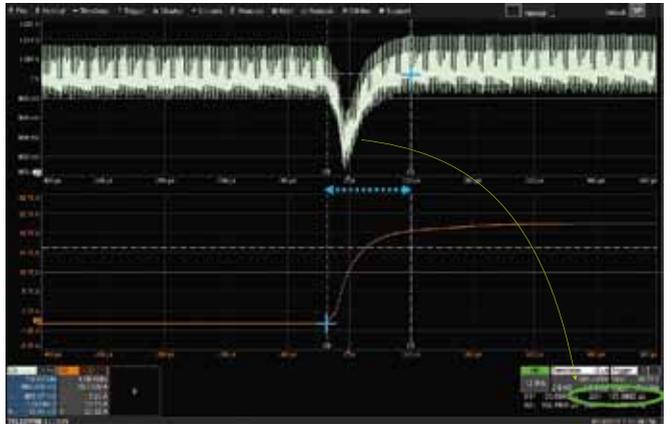


Рис. 6. Курсорные измерения времени восстановления напряжения

один горизонтальный курсор на точку, где ток начинает расти по мере приложения нагрузки, а другой – на точку графика, где напряжение восстановилось до требуемого значения, которое нужно измерить (рис. 6).

В данном примере показано измерение интервала времени восстановления до уровня 10% от спада, который имел значение 31 мВ. Таким образом, второй горизонтальный курсор расположится в точке, где напряжение снизится на 3,1 мВ (параметр C5) после подачи нагрузки по сравнению со значением в устойчивом состоянии. Установки курсоров для измерения времени выполняются путем размещения горизонтального курсора № 1 в точке, где начинает расти ток, а курсора № 2 – в точке достижения напряжением конечного уровня.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ «РАСТЯЖКА» И «ПАРАМЕТРЫ»

Более сложный способ измерения переходных процессов и откликов устройства на нагрузку при помощи осциллографа – использование цифровой растяжки и режима измерения параметров.

Применение растяжки ограничивает измерения только одним участком осциллограммы, например в виде выделенной на кривой зоне, соответствующей предварительному состоянию ИУ до нагрузки. Однако при этом растяжка обеспечивает лучшее отображение и детализацию поведения составляющих высокочастотного сигнала.

На рис. 7 справа на экране показаны две области увеличения сигналов C5 и C8 (Z5 и Z8), которые отображают напряжение шины до включения нагрузки (светло-зеленый цвет) и уровень тока (оранжевый цвет) как увеличение соответствующих осциллограмм. В областях увеличения четко видно, что ток еще не начал расти – это является подтверждением правильности выбора области выделения на форме сигнала для измерений.

Далее в приборе к результату растяжки напряжения (Z5) можно применить функцию измерения «Параметр», чтобы определить численно уровень пульсации до включения нагрузки (в примере – 19,88 мВ) и рассчитать фактическое среднее значение напряжения (999,665 мВ).

Простое перемещение области увеличения на экране позволит увидеть те же измерения на участке кривой, описывающей статус устройства после активации нагрузки. Также имеется возможность создать новые растяжки этой области сигнала в строке параметров осциллографа с целью сохранить для анализа ранее сформированные Zoom-окна на его дисплее. На рис. 8 показаны как уровень пульсаций (пик-пик), так и среднее напряжение, значения которых на этапе установления электропитания на шине немного выросли, до 22,04 мВ и 1 В соответственно (на рис. 8 значения в нижнем левом углу – выделены зеленым цветом).

Падение напряжения можно количественно оценить, применяя функцию растяжки в момент активации нагрузки (растяжка Z3 – голубой цвет), измеряя минимальное

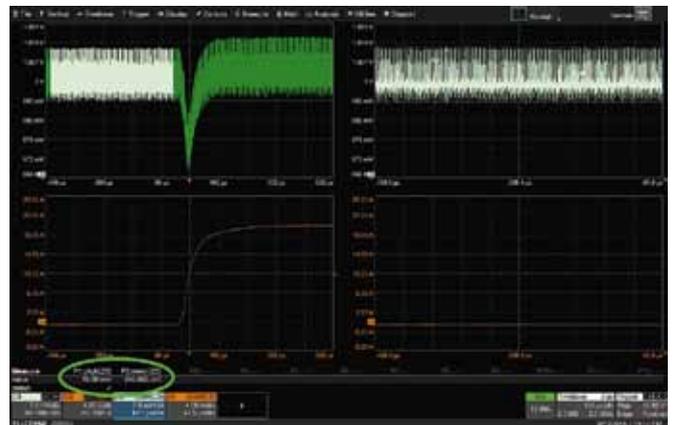


Рис. 7. Растяжка графиков параметров в одной области кривой (один из этапов измерения)



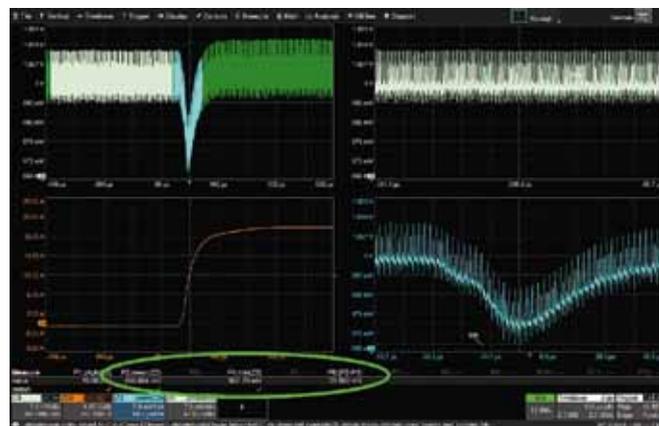
**Рис. 8.** Функция «Растяжка»: измерение уровня пульсаций (пик-пик) и среднего напряжения (этап после подключения нагрузки)

напряжение ( $U_{\text{мин.}}$ ) для этого события и далее вычитая  $U_{\text{мин.}}$  из значения среднего напряжения в состоянии до начала протекания тока нагрузки (рис. 9). Опять же отметим, что этот метод по-прежнему будет не самым подходящим и точным для измерений, потому что некоторые из отсчетов пульсаций были включены в массив данных для участка падения напряжения.

Измерения отклика параметров электропитания на нагрузку и временных интервалов этих процессов может быть выполнено, как описано выше – с помощью курсоров, размещенных на растяжках осциллограмм. В этом случае легче оценить их расположение на кривой, потому что график сигнала растянут и оператор может лучше рассмотреть поведение и флуктуации всех ВЧ-компонентов.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ПО DIGITAL POWER MANAGEMENT

Наиболее точным методом анализа процессов на шине электропитания являются измерения, выполненные с использованием программного обеспечения (ПО) Digital Power Management компании Teledyne LeCroy, которое предоставляет пользователю широкие возможности измерений и позволяет лучше понимать происходящие процессы. Данное ПО позволяет проводить измерения представляющих интерес сигналов для каждого цикла включения с целью оценки изменения параметров шины питания в результате воздействия какого-то определенного устройства. Учитывая это, формулируется тезис данного способа тестирования: «При известной частоте ШИМ-преобразования, сигнал которого вероятно вызывает пульсации, необходимо обеспечить синхронизацию измеряемых сигналов с помехами с целью наблюдения изменений в каждом из циклов» (рис. 10). На рис. 10, слева на экране, представлены интересные сигналы напряжения / тока на шине – параметры C5 / C8 соответственно,

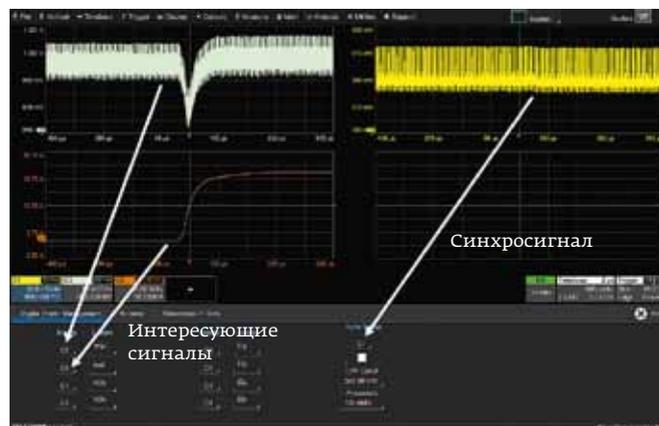


**Рис. 9.** Использование параметров в области увеличения для анализа различий между тремя состояниями ИУ

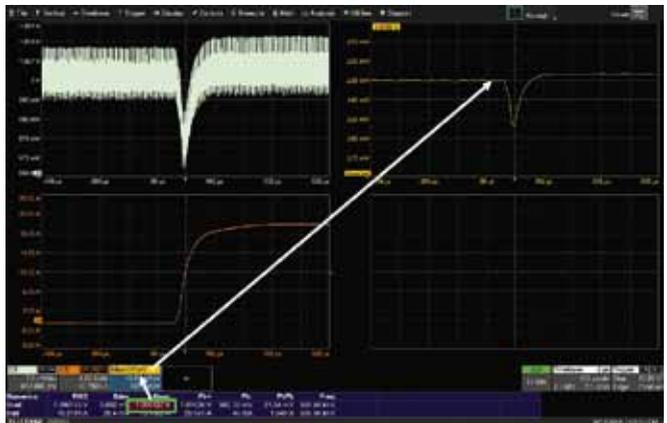
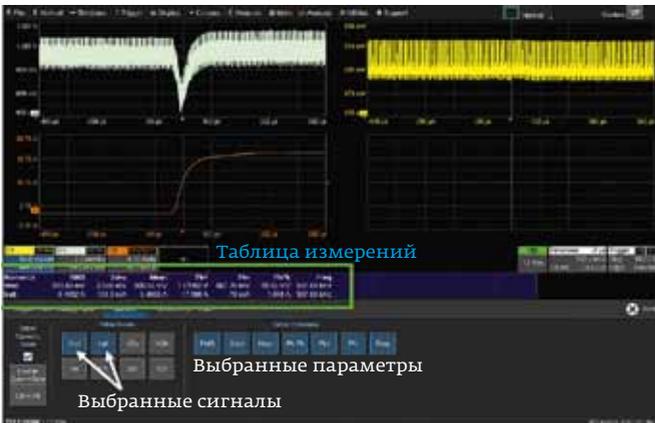
справа – меню настройки тактовой синхронизации с помехой (SyncSetup).

Выполняя измерения этим способом, пользователь имеет возможность выбрать два интересующих сигнала: напряжение и ток, и далее программное обеспечение автоматически вычисляет среднеквадратичное значение (RMS), среднее отклонение (deviation), пиковые значения (положительное и отрицательное) и значение пик-пик этих двух сигналов за каждый цикл. Данное ПО разработано специально для измерений мощности цифровых устройств, в том числе для анализа переходных процессов на шине электропитания: выбросов, пульсаций и провалов (рис. 11). Оператор просто выбирает в меню те параметры, которые необходимы для наблюдения и включения в таблицу измерений.

Включение функции Zoom+Gate (рис. 12) автоматически создает новые окна цифрового увеличения для каждой кривой и привязывает все измерения к одной и той же области масштабирования. Все графики и их цифровые растяжки синхронизированы, поэтому при выполнении



**Рис. 10.** ПО Digital Power Management синхронизирует измерения с периодом известной помехи



**Рис. 11.** Все значения параметров для анализа переходных процессов на шине электропитания вычисляются автоматически

**Рис. 13.** Форма сигнала за цикл – пульсации на кривой удалены

панорамирования (параллельного переноса области увеличения) будет выполняться обновление результатов измерений для всех сигналов одновременно.

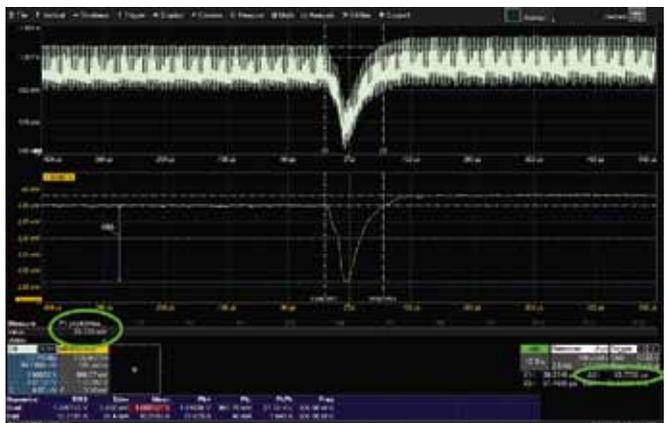
измерения спада напряжения, потому что теперь пользователь может измерить значение пик-пик без паразитного влияния присутствующих в сигнале пульсаций. Полученное при использовании ПО значение просадки напряжения на форме сигнала за цикл – 23,7 мВ (рис. 14) – существенно меньше, чем значение 31 мВ, ранее рассчитанное «вручную» с использованием курсоров, так как при вычислении значения спада присутствие в сигнале реальных пульсаций исключается из расчета.

При нажатии на иконку измерения в таблице, ПО будет отображать на экране значения этого параметра для каждого цикла как форму сигнала в течение этого цикла (per-cycle waveform) (рис. 13). За счет вычисления среднего напряжения в каждом цикле ( $U_{mean}$ ), алгоритм ПО реализует удаление высокочастотных аperiодических компонент и пульсаций при измерении представляющих интерес сигналов электропитания. Таким образом, значения параметров определяются формой сигнала за период (цикл), и теперь пользователь может достоверно оценить, как меняется во времени именно среднее напряжение шины  $U_{mean}$  (справа на рис. 13 – указано стрелкой).

Кроме того, ПО облегчает измерение таких показателей, как время установления при включении нагрузки и время обратного восстановления до номинального напряжения, потому что точку начала и конца измерений легче выбрать на форме сигнала, когда не нужно с трудом искать, где находится среднее значение напряжения внутри пульсаций.

Это имеет ряд очевидных преимуществ при выполнении вышеперечисленных тестов, в том числе для

*Перевод с англ. А.Шиганова (АО «ПриСТ»)*



**Рис. 12.** Один клик на «Enable Zoom+Gate» обеспечивает растяжку и синхронизацию кривых и привязывает все измерения к одной и той же области масштабирования

**Рис. 14.** Использование курсоров и измерение параметров за период сигнала обеспечивают более достоверные данные для анализа



**6,16 ГВыб/с**  
Дискретизация



**4 ГБ/канал**  
Память



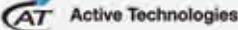
**5 Впп**  
Уровень выхода



**175 пс**  
Длительность фронт /среза



**2 ГГц**  
Диапазон частот



**СЕРИЯ АКИП-3426**



**Сенсорный дисплей**



**4-B-1**

**Самый быстрый  
16 битный AWG**

**Многоканальная  
СИСТЕМА**



**До  
32 аналоговых  
каналов**

**До  
128 цифровых  
каналов**



**SPG DPG**



## Генераторы сигналов произвольной формы **АКИП-3426**

АКИП-3426-2	АКИП-3426-4	АКИП-3426-8
<b>2 канала</b>	<b>4 канала</b>	<b>8 каналов</b>
<b>АКИП-3426-2D –</b> дифференциальные выходы	<b>АКИП-3426-4D –</b> дифференциальные выходы	<b>АКИП-3426-8D –</b> дифференциальные выходы
8 синхронизированных цифровых канала	16 синхронизированных цифровых канала	32 синхронизированных цифровых канала

- Цифровые выходы обеспечивают скорость передачи данных до 1,54 Гбит
- До 16384 определяемых пользователем форм сигналов обеспечивает возможность создания сложных сценариев с наиболее эффективным использованием памяти
- LAN-интерфейс для дистанционного управления

119071, г. Москва, 2-й Донской пр., д. 10, стр. 4; тел.: +7 (495) 777-5591; факс: +7 (495) 640-3023  
 196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, д. 18, лит. В, офис 202; тел./факс: +7 (812) 677-7508  
 620089, г. Екатеринбург, ул. Цвиллинга, д. 58, офис 1; тел./факс: +7 (343) 317-3999; ek@prist.ru

