

# Гармонический анализ: выявление проблем целостности сигналов в системах питания

Симран Нанда, Keysight Technologies

К современным сетям питания могут подключаться самые разнообразные устройства: импульсные источники питания, регулируемые электроприводы с преобразованием частоты, источники бесперебойного питания, светодиодные осветительные приборы, зарядные устройства, инверторные преобразователи, генераторы и многие другие. Причём размер и надёжность многих таких устройств определяется, в первую очередь, входящими в их состав нелинейными компонентами. Это требует от разработчиков особого внимания к влиянию нелинейных токов на качество напряжения в сети питания.

Импульсные источники питания широко применяются в электронном оборудовании – компьютерах, мониторах, телевизорах и другом. Обычно эти устройства потребляют нелинейный (импульсный) ток и поэтому являются сильными источниками гармоник в сети питания (см. рис. 1). Это справедливо и для приводов с преобразованием частоты, которые часто применяются для управления двигателями переменного тока, например, в бытовой технике или в системах отопления, вентиляции и кондиционирования. Даже светодиодные лампы, несмотря на малую потребляемую

мощность, могут порождать гармоники достаточно высокого уровня при параллельном включении большого числа устройств.

Отрицательное влияние гармоник хорошо известно: перегрев кабелей и трансформаторов, ток в нейтральном проводнике, неожиданное срабатывание автоматических выключателей, повышенное электромагнитное излучение и сокращение срока службы электродвигателей и трансформаторов. Кроме того, для питания с учётом этих гармоник приходится использовать кабели большего сечения и трансформаторы с запасом мощности, что

влечёт за собой дополнительные расходы. Чтобы смягчить эти проблемы при разработке новых устройств, нужно оценить реальный уровень гармоник, что может оказаться весьма непростой задачей.

## Добропорядочные ПОТРЕБИТЕЛИ В СЕТИ ПИТАНИЯ

Конечно, проблемы чрезмерного уровня гармоник выходят далеко за пределы тестируемого устройства. Любое искажение напряжения или снижение качества питания влияет на всех потребителей, подключённых к рассматриваемому участку сети. Гармонические токи и напряжения могут сложным образом взаимодействовать с другим оборудованием, подключённым к сети питания, порождая трудно диагностируемые проблемы.

Чтобы минимизировать эти проблемы, инженеры-энергетики проверяют, являются ли их устройства «добропорядочными потребителями» в сети питания и не ухудшают ли они качество сигнала переменного тока для других потребителей. Измерение коэффициента нелинейных искажений (КНИ, THD), коэффициента мощности и уровня гармоник в сети питания является хорошим показателем того, как тестируемое устройство влияет на качество питающего напряжения.

Рекомендации IEEE и IEC описывают методы выполнения измерений и определяют максимальные уровни гармоник для мощных электронных устройств, подключённых к сети питания (IEEE 519, IEC 61000-3-2). Многие стандарты, относящиеся к качеству питания, регламентируют уровень гармоник, поскольку это позволяет рациональным способом указать контролируемые пределы искажений. Например, в таблице показаны пределы гармонических токов, определённые в IEC 61000-3-2 класс А (оборудование, потребляющее <16 А на фазу).

Если источник питания укладывается в описанные выше пределы, он будет оказывать минимальное влияние

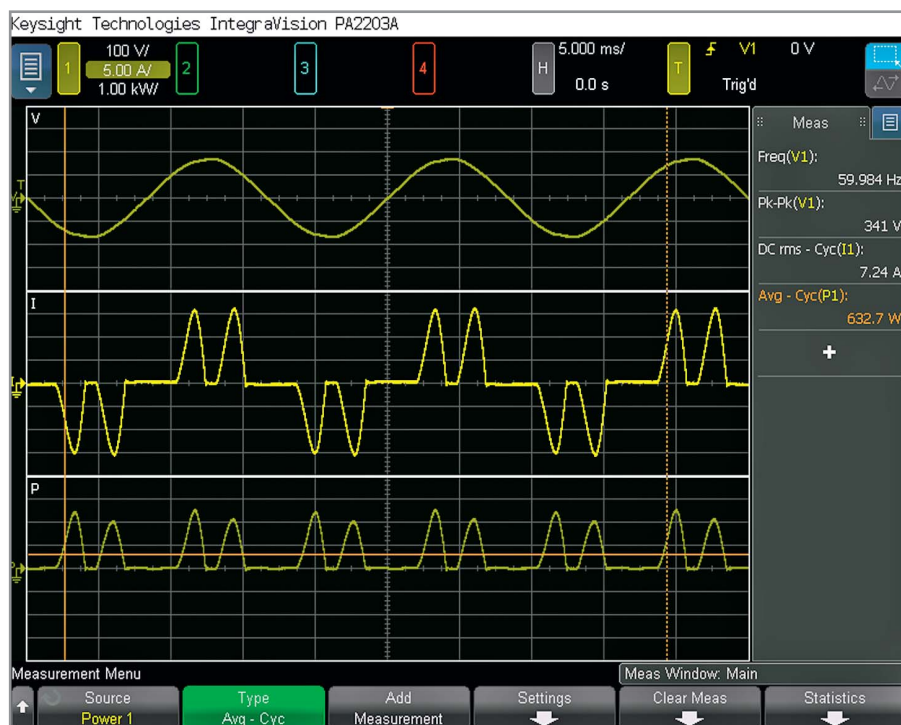


Рис. 1. Пример входных сигналов импульсного источника питания: верхняя развёртка – немного искажённое входное напряжение; средняя развёртка – ток, потребляемый источником от сети (характерная форма для нелинейной нагрузки); нижняя развёртка – потребляемая мощность

на качество питания. Гармонический анализ является превосходным инструментом, помогающим выявлять причины ухудшения качества сигнала и обеспечивать значения параметров, определённые стандартами.

### ОБЗОР ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для разложения сложных периодических сигналов на набор простых синусоид гармонический анализ использует преобразование Фурье. Исходный сигнал может иметь сложную произвольную форму и, скорее всего, не описываться аналитической функцией. Однако сигнал можно оцифровать и пропустить через анализатор гармоник, который разложит его на группу синусоид (гармоник), сумма которых очень близка к форме исходного сигнала. Этот процесс иллюстрируется рисунком 2.

Известно, что гармоники распределяются по частотам. Самая низкая ненулевая гармоника называется основной частотой (или первой гармоникой, фундаментальной гармоникой). Частоты всех остальных гармоник кратны частоте первой гармоники. Так вторая гармоника вдвое больше основной частоты, третья – втрое больше и так далее.

### ГАРМОНИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТИ

Рассмотрим простую систему, состоящую из источника переменного тока и нагрузки. Средняя мощность, поступающая из источника в нагрузку за один период сетевого напряжения, описывается следующим уравнением:

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt, \quad (1)$$

где  $T$  – период сетевого напряжения,  $v(t)$  – напряжение на нагрузке, а  $i(t)$  – ток через нагрузку. Подставляя вместо  $v(t)$  и  $i(t)$  формулу для гармоник, получаем следующий результат:

$$P_{avg} = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\phi_{vn} - \phi_{in}). \quad (2)$$

Эта формула более полезна: разложение  $P_{avg}$  на сумму гармоник позволяет рассчитать мощность, передаваемую на каждой гармонической частоте. Например, если необходимо узнать, какую мощность передаёт девятая гармоника, можно рассчитать это непо-

### Максимальное допустимое значение тока для гармоник, определённое в стандарте IEC 61000-3-2 класс A

| Нечётные гармоники, n | Макс. ток, А         | Чётные гармоники, n | Макс. ток, А        |
|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 3                     | 2,3                  | 2                   | 1,08                |
| 5                     | 1,14                 | 4                   | 0,43                |
| 7                     | 0,77                 | 6                   | 0,30                |
| 9                     | 0,40                 | 8–40                | $0,23 \times 8 / n$ |
| 11                    | 0,33                 | –                   | –                   |
| 13                    | 0,21                 | –                   | –                   |
| 15–39                 | $0,15 \times 15 / n$ | –                   | –                   |

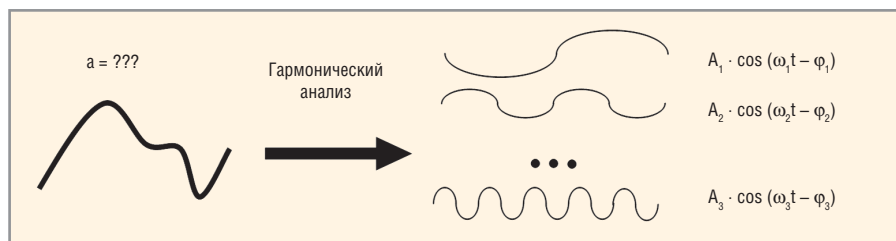


Рис. 2. Гармонический анализ раскладывает сложные периодические сигналы произвольной формы на набор синусоид

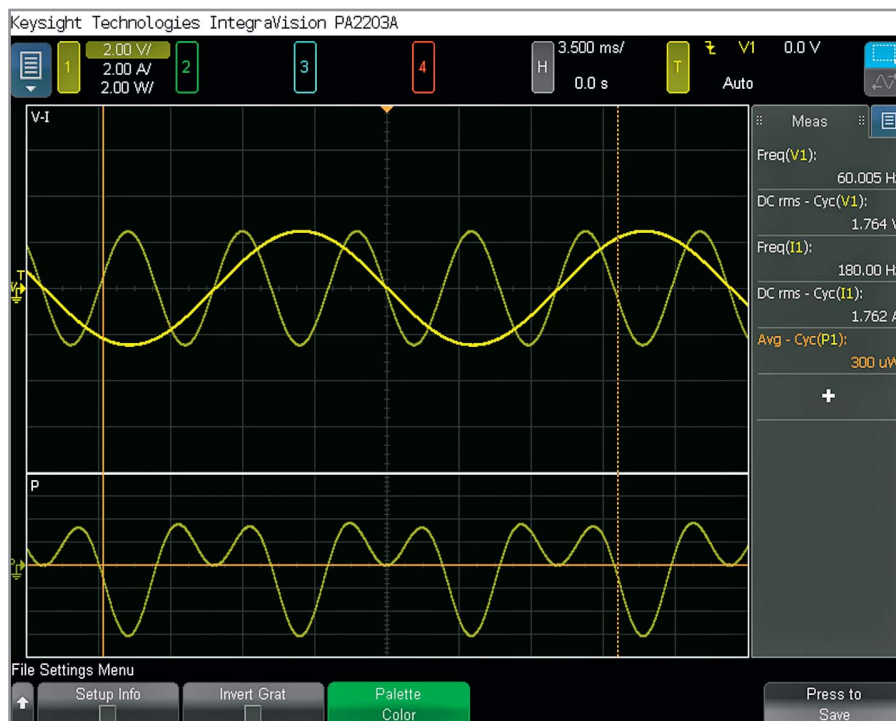


Рис. 3. Показания анализатора мощности – средняя мощность равна нулю

средственно, умножив ток и напряжение девятой гармоники на косинус сдвига фазы между ними:

$$P_{avg9} = \frac{V_9 I_9}{2} \cos(\phi_{v9} - \phi_{i9}).$$

Из приведённого уравнения можно сделать интересный вывод – соответствующие гармоники должны присутствовать и в токе, и в напряжении. В противном случае средняя мощность этой гармоникой не передаётся. Например, если напряжение содержит только основную частоту, а ток содержит только третью гармонику, то средняя

мощность будет равна нулю, как показано на рисунке 3. Анализатор мощности в данном случае показывает, что генератор подаёт сигнал напряжения, содержащий только основную частоту (60 Гц), а сигнал тока содержит только третью гармонику (180 Гц). Нижняя развёртка показывает потребляемую мощность: средняя мощность, передаваемая за период частоты 60 Гц, равна нулю, несмотря на то, что развёртки тока, напряжения и мощности имеют значительную амплитуду.

Если напряжение представляет собой чистую синусоиду, а ток не синусоида-



**Рис. 4. Пример измерения гармоник, показывающий, что 15-я гармоника слишком велика и не укладывается в требования стандартов к качеству сетей питания**

лен, то мощность будет передаваться только основной частотой. Все высшие гармоники сигнала тока будут непродуктивными.

Одной из целей проектирования систем питания является достижение максимального коэффициента мощности, который описывается уравнением:

$$\text{Коэффициент мощности} = \frac{W}{VA} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}}$$

Однако гармоники, не передающие мощность, препятствуют достижению этой цели. Они не дают вклада в  $P_{avg}$ , но увеличивают составляющую  $V_{rms} I_{rms}$ . Дополнительное напряжение и/или ток гармоники не используются, но система питания всё-таки вынуждена передавать ток и напряжение этих гармоник и нести соответствующие потери. Поэтому, чтобы максимально эффективно передавать мощность, нужно минимизировать уровень высших гармоник.

**Простые способы измерения гармоник**

Первым важным шагом перед выполнением гармонического анализа является измерение КНИ (THD), особенно, если цель заключается в диагностике проблем качества питания. Это можно сделать цифровым мультиметром, спо-

собным измерять истинную среднеквадратичную мощность и обладающим достаточной полосой пропускания и частотой дискретизации для измерения высших гармонических составляющих. Если уровень THD достаточно низок (менее 3–5% по амплитуде), то можно считать, что никаких проблем с гармониками нет. Но если THD слишком высок, или вы хотите измерить энергоэффективность устройства, то одного измерения THD недостаточно. Нужно определить уровни всех гармоник.

Также может понадобиться выполнение нескольких циклов измерений для оценки энергоэффективности устройства в разных режимах работы и с разными нагрузками. Если воспользоваться для этого приборами общего назначения (цифровыми мультиметрами, анализаторами спектра или осциллографами), то сбор данных и последующая их обработка для гармонического анализа может занять очень много времени. Кроме того, сравнение уровней гармоник с опубликованными стандартами может оказаться очень трудоёмкой процедурой.

Современные анализаторы мощности упрощают и ускоряют этот процесс за счёт функций, специально предназначенных для гармонического анализа. Сбор данных, обработка в частотной области и гармонический анализ явля-

ются встроенными функциями прибора. Обычно анализаторы мощности обладают высокой частотой дискретизации и графическим дисплеем, который позволяет исследовать форму сигнала, как на осциллографе. Такая визуализация действительно бесценна, поскольку сразу можно увидеть, что вы измеряете именно то, что вам надо, и что неверное подключение не оказывает негативного эффекта на процесс тестирования.

Анализатор мощности может предоставить и другую полезную информацию, такую как измерение THD, частоты, амплитуды, фазы напряжения, тока и мощности, причём одновременно. После проверки схемы измерения вы просто запускаете гармонический анализ, и анализатор мощности отображает уровень гармоник в табличной форме и/или в виде линейчатой диаграммы.

Кроме того, многие анализаторы мощности имеют встроенную функцию отбраковки по предельным значениям, основанную на действующих стандартах. Это позволяет быстро и с удобством получать сведения о соответствии уровня гармоник установленным пределам.

Применение анализатора мощности для решения описанных выше проблем – минимизации высших гармоник для достижения максимальной энергоэффективности – позволяет быстро исследовать состав гармоник. Например, если взять устройство, создающее гармоники, как показано на рисунке 4, то можно увидеть, что сигнал тока, как и ожидалось, содержит в основном нечётные гармоники. Однако 15-я гармоника нехарактерно высока и выходит за пределы требований IEC 61000-3-2. Если ваше устройство должно соответствовать требованиям этого стандарта, то данную проблему надо решать.

Гармонический анализ может дать полезную информацию для решения проблем качества сигналов в системах питания, использующих импульсные преобразователи. Применение современного анализатора мощности позволяет просто и понятно моделировать сложное взаимодействие сигналов тока и напряжения. Гармонический анализ поможет создать устройство с минимальным уровнем высших гармоник, которое ведёт себя как «добропорядочный потребитель» в сети питания.



**ДИПОЛЬ**



**Распродажа**

## Анализаторы параметров полупроводников Keysight серии B2900A со склада «Диполь»

Параметрические анализаторы серии обеспечивают лучшие в своём классе рабочие характеристики при невысокой стоимости.

- Максимальные значения параметров источника до 210В, до 3,03 А (непрерывном режиме)/ до 10,5 А (в импульсном режиме)
- Максимальное разрешение 10 фА / 10 нВ
- Наилучший в отрасли уровень собственных шумов (с фильтром) 10 мкВскз / 1 нВскз / Гц
- Графический интерфейс: 4 режима отображения на дисплее с диагональю 10,9 см
- Интегрированные функции: источник и измеритель напряжения / силы тока, генератор импульсов и сигналов произвольной формы

### Сомневаетесь в выборе?

**Выездные демонстрации и специальные ценовые предложения помогут принять решение и сэкономить бюджет**

- Скорость поставки. Более 400 наименований продукции находится на складе и готовы к отгрузке в любой момент.
- Точность измерений. Услуги первичной и периодической поверки от собственной метрологической лаборатории.
- Уверенность в оборудовании. Собственный сервисный центр и трехлетняя гарантия от производителя.

Реклама

Санкт-Петербург / Москва / Нижний Новгород  
www.dipaul.ru / info@dipaul.ru / тел. (812) 702-12-66