

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ - 037

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, многие образовательные курсы* в некоторой степени упрощают учебный материал в описании методов регистрации данных (data acquisition) и измерений высокой точности. Такие курсы должны уместить достаточно значительный объем знаний в небольшой по длительности период обучения. В особенности это справедливо после наступления эры цифровых микроконтроллеров – теперь материал по данным устройствам включается во многие курсы, посвященные электронике, и при этом сокращается время изучения основ измерений высокой точности и аналоговой электроники. Как результат, глубокие знания в области точных измерений, не воспринимаются как важные и необходимые для многих начинающих свою карьеру инженеров-разработчиков. Более того, многие из них следуют тем же допущениям и упрощениям, которые были получены во время образования. Задачей данного документа является рассмотрение наименее известных аспектов отдельной задачи точных измерений – анализа электрической мощности, и обсуждение заблуждений, связанных с упрощением подхода к проблеме измерений высокой точности.

Как пример, образование может учить нас такому постулату, что чем большее число битов имеет аналогово-цифровой преобразователь, и чем выше частота дискретизации, тем точнее на выходе результат. На самом деле данное утверждение не является гарантом точности устройства, так как существует много сторонних факторов, влияющих на конечную точность и производительность устройства гораздо сильнее, чем число бит АЦП.

Более того, в реальности частота дискретизации и битовое разрешение не являются наиболее приоритетными параметрами для разработчика измерительных систем высокой точности. Это не значит, что эти параметры вообще ничего не значат – нет, они конечно значат, однако ошибки при измерениях высокой точности не определяются выбранными значениями данных параметров. Ошибки при измерениях мощности с высокой точностью в основном определяются эффектами преобразования аналоговых сигналов во входном тракте измерительной системы, т.е. в той части измерительной системы, которая непосредственно подключена к испытываемому устройству/системе (EUT).

Лозунгом инженеров-разработчиков аппаратной части анализаторов N4L является «если подать на вход мусор, то и на выходе будет мусор». Важность высказывания в том, вне зависимости от частоты дискретизации и количества бит разрешения (использованного для получения цифрового сигнала), что если информация в виде сигнала, проходящая через аналоговый тракт и далее к устройствам ЦОС, не соответствует реальному измеряемому сигналу, то высокое разрешение АЦП и высокая частота дискретизации не смогут помочь, так как система будет работать с «плохими» данными.



Рисунок 1

* - в системе образования/повышения квалификации Великобритании

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

Newtons4th Ltd 1 Bede Island Road Leicester, LE2 7EA UK

Tel: +44 (0)116 230 1066

ЧТО ТАКОЕ УСТРОЙСТВО-КАРТА СБОРА ДАННЫХ (DAQ)?

Карта сбора данных (DAQ Card) представляет собой многоцелевое устройство, обеспечивающее дискретизацию входных аналоговых сигналов, как правило, оснащенное несколькими низковольтными входами. На Рис. 1 отображено размещение устройства DAQ в типичной цепи обработки сигнала, а именно между цепью/устройством преобразования сигнала и ПК. Такое размещение представляет собой значительную проблему для любой измерительной системы, основанной на применении карты DAQ в цепи обработки сигнала.

Дело в том, что именно в цепи преобразования сигнала происходит наибольшее число негативных факторов, напрямую влияющих на обрабатываемый далее, с помощью карты DAQ, сигнал. И карта DAQ не имеет возможности как-то повлиять на эти факторы и производительность цепи преобразования сигнала.

Ключевой проблемой является независимость функционирования цепи преобразования сигнала от карты DAQ, таким образом, между данными частями системы не связи. В такой ситуации цепь преобразования сигнала выполняет достаточно простые и фиксированные задачи:

1. Гальваническую развязку / изоляцию
2. Ослабление/усиление (как правило, одноступенчатое, без активного отслеживания и перенастройки уровня во время измерения в режиме реального времени)
3. Преобразование уровня напряжения/тока для соответствия входным параметрам карты DAQ

Кто-то может подумать - это всё что требуется, тем более что цепь обработки сигнала с DAQ требует именно такой функциональности:

Вход по напряжению: развязка по высокому напряжению и ослабление дифференциального сигнала до требуемого входного уровня карты DAQ. Дальнейшее преобразование сигнала в цифровую форму с помощью карты DAQ. Таким образом, цепь обработки сигнала готова.

Вход по току: развязка с помощью токового шунта (или подобным образом), подавление напряжения синфазного сигнала. Таким образом, карта DAQ получает соответствующий входному уровню дифференциальный сигнал, который далее преобразуется в цифровую форму. Таким образом, цепь обработки сигнала готова.

Звучит просто? Да, но по причинам, изложенным в данном документе, большинство систем, основанных на применении DAQ, не смогут достичь даже отдаленно приемлемых результатов в большинстве задач измерения электрической мощности. Зашумленные, искаженные сигналы, системы с неединичным коэффициентом мощности – при таких исходных условиях простые цепи преобразования сигнала не обеспечивают высокой точности преобразования, и маловероятно, что сама карта DAQ будет эффективна.

Типичные характеристики карты DAQ:

- Несколько входов, 2 ~ 60
- Входы неизолированные
- Один измерительный диапазон
- Низкое значение коэфф. CMRR < 80дБ
- Частота дискретизации 10квыб/с ~ 1Мвыб/с типично (с мультиплексированием)
- Макс. уровень входного напряжения <10В
- Данные каналов мультиплексируются

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

Newtons4th Ltd 1 Bede Island Road Leicester, LE2 7EA UK

Tel: +44 (0)116 230 1066

ПРОБЛЕМА #1 – НЕОБХОДИМОСТЬ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ (ИЗОЛЯЦИИ)

Если цепь измерения напряжения на основе DAQ используется для измерения напряжения выходного сигнала ШИМ инвертора, то в таком случае требуются междуфазные измерения. И как следствие, необходимость изоляции измерительных каналов для упрощения параллельного подключения между фазами L1~L2 (например). Изоляция (развязка) как правило, реализуется с помощью дифференциального пробника, с одним измерительным диапазоном (100:1, 1000:1 и т.д.).

При таком подходе,

во-первых: даже очень качественные пробники имеют погрешность около 1%, и это значительный источник ошибки измерения амплитуды сигнала, который будет проявляться при любых значениях коэффициента мощности системы. Качественные, даже экономичных модификаций, анализаторы мощности, как правило, имеют погрешность измеренного значения, не превышающую 0.1%. Прецизионные анализаторы мощности N4L имеют точность измеренного значения 0.01%.

во-вторых: дифференциальный пробник вносит определенный фазовую ошибку в измерение. Точное значение фазового сдвига, без детального исследования, как правило, неизвестно. Так как величина активной мощности (Вт) зависит коэффициента мощности ($\cos\phi$), любой фазовый сдвиг, вносимый пробником, является критичным для точности измерения мощности. Влияние фазового сдвига тем сильнее, чем ниже коэффициент мощности системы.

ПРОБЛЕМА #2 – ПРОБЛЕМА ЕДИНСТВЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

Во время измерения уровень напряжения может оставаться стабильным в разумных пределах (хотя зачастую это и не так), уровень тока может значительно меняться. Поэтому совершенно необходимо, чтобы у любой измерительной системы высокой точности, была возможность выбора измерительного диапазона, соответствующего уровню входящего сигнала. Чем ближе верхнее значение диапазона к пиковому значению входного сигнала (без обрезки), тем меньше будет погрешность измерительного диапазона.

Рассмотрим пример:

Система измерения тока на основе DAQ (10В, 16-бит), подключена к 10мОм шунтирующему сопротивлению, с максимальной мощностью рассеивания 4Вт и максимальным током до 20Аскз.

$$\text{Мощность рассеивания шунта (Вт)} = I^2 \times R = 20^2 \times 0.01 = 4 \text{ Вт}$$

Падение напряжения на шунтирующем 10 мОм сопротивлении при токе 20Аскз. составит 0.2В
При этом 16-бит 10В вход DAQ карты имеет максимальное разрешение:

$$\text{Разрешение по напряжению} = \frac{10}{2^{16}} = 152 \text{ мкВ}$$

Однако здесь также стоит добавить, что полученные значения не учитывают уровень влияния помех и нелинейность (в отношении амплитуды и частоты входного сигнала) характеристик самой DAQ карты, которые в значительной мере выше, чем у анализатора, предназначенного для измерения мощности.

Падение напряжения 152мкВ на сопротивлении 0.01Ом происходит при значении тока 15.2мА. Таким образом, ошибка полного измерительного диапазона (20А) может быть рассчитана как:

$$\text{Погрешность диапазона (\%)} = \left(\frac{0.0152}{20} \right) \times 100 = 0.08\%$$

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

Полученное значение погрешности не выглядит так уж плохо, однако необходимо помнить, что рассматриваемая система имеет только один измерительный диапазон. Вне зависимости от того, будет ли измеряться сигнал 20А или 200мА, погрешность разрешения (дискретизации), равная 0.08% будет основана на 20А полном измерительном диапазоне.

Такая погрешность может быть более точно названа как «ошибка дискретизации полного диапазона». Т.е. чем больше разница между значением входного тока и значением максимального тока, который может протекать через шунтирующий резистор, тем погрешность измерения будет выше.

Например, если значение тока входного сигнала составляет 200мА, то погрешность полного диапазона 0.08% внесет те же 15.2мА ошибки дискретизации в результат измерения. В процентном отношении это выглядит так:

$$\text{Погрешность разрешения (при 200мА вх. сигнале) (\%)} = \left(\frac{0.0152}{0.2} \right) \times 100 = 7.6\%$$

Полученное значение погрешности велико и определяет основной недостаток измерительных устройств без активной системы выбора диапазона.

АКТИВНАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА ДИАПАЗОНА? ЧТО ЭТО?

Активная система выбора диапазона отличается тем, что может реагировать на изменения измеряемого сигнала в момент процесса измерения, перестраивая диапазон измерения в зависимости от пикового значения входного сигнала (формы сигнала), и уменьшая, таким образом, погрешность диапазона (дискретизации). Для работы системы требуется связь в режиме реального времени между аналоговой входной цепью и основным ЦПУ, когда активная система выбора диапазона может перестроить диапазон почти моментально, при изменении входного сигнала по амплитуде. Канал коммуникации между аналоговым трактом и ЦПУ является высокоскоростным, поэтому всегда обеспечивается выбор соответствующего измерительного диапазона, что минимизирует погрешности диапазона и оптимизирует погрешности в цепи обработки сигнала.



Рисунок 2

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

На рисунке 2 представлен пример того, как активная система выбора диапазонов реагирует на изменение входного сигнала, динамически подстраивая диапазон измерения при изменении амплитуды входного сигнала.

Активный диапазон на рисунке обозначен голубым цветом. Также очевидно, что погрешность разрешения снижается при уменьшении измерительного диапазона.

Как пример, предположим, что активная система выбора диапазона использует 14-бит АЦП с диапазонами, представленными на рисунке 2 выше. Сопротивление шунтирующего резистора остается прежним – 0.01 Ом. Полный диапазон АЦП составляет +/-3Впк. Хотя разрешение АЦП ниже, чем в ранее приведенном примере, погрешность разрешения будет ниже почти по всех случаях:

$$\text{Разрешение по напряжению} = \frac{3}{2^{14}} = 183 \text{ мкВ}$$

$$\text{Погрешность диапазона (\%)} = \left(\frac{183 \text{ мкВ}}{3 \text{ В}} \right) \times 100 = 0.006\%$$

При измерении входного сигнала со значением тока 200мА, активная система выбора диапазона анализатора мощности N4L автоматически установит 300мАпк диапазон.

Таким образом, текущая погрешность измерения тока с учетом дискретизации, составляет:

$$\text{Погрешность измерения тока (А)} = 0.006\% \times 0.3 = 18 \text{ мкА}$$

$$\text{Погрешность разрешения (200мА вх. сигнал, диапазон 300мАпк) (\%)} = \left(\frac{0.000018}{0.2} \right) \times 100 = 0.009\%$$

Данный пример является наглядным объяснением, почему активная система выбора диапазона является необходимой при динамических измерениях с высокой точностью.

Предположение, что более высокое разрешение АЦП обеспечивает более высокую точность измерения, не всегда является верным – особенно в задачах анализа электрической мощности. Такие параметры как выбор диапазона, линейность характеристик, джиттер, ошибки аналоговой природы и многие другие факторы, определяют точность системы, и АЦП с низким разрешением часто может оказаться предпочтительнее, чем АЦП с высоким разрешением. Детальный обзор вопроса о разрешении АЦП рассмотрен в отдельном документе «*Битовое разрешение АЦП – чем выше, тем лучше?*».

ПРОБЛЕМА #3 - МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Большинство устройств DAQ распределяют свою частоту дискретизации между измерительными каналами, т.е. карта DAQ последовательно обрабатывает (дискретизирует) данные отдельного канала и затем переходит к следующему, т.е. производит мультиплексирование данных.

Является это проблемой?

Конечно, да. И достаточно значительной проблемой при измерениях мощности. Анализатор мощности должен дискретизировать сигналы напряжения и тока каждого измерительного канала одновременно. Это необходимо для точного определения фазового сдвига между каналами напряжения/тока, а также амплитудных соотношений между каналами напряжения. Если входные данные не дискретизируются одновременно, это неизбежно повлияет на точность измерения межфазных скз. параметров и активной мощност (Вт).

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

В качестве примера ниже приведено измерение межфазного скз. напряжения:

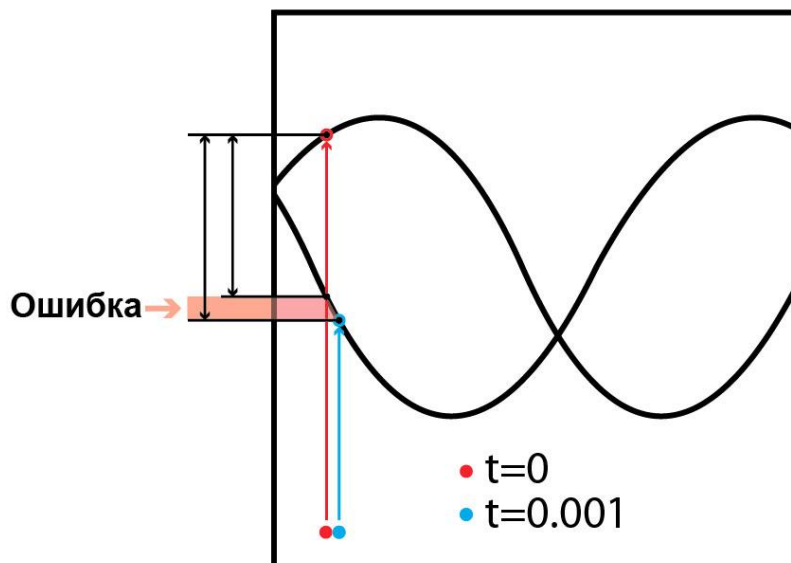


Рисунок 3. Мультиплексирование измеренных скз. значений напряжения приводит к ошибкам

Рисунок 3 иллюстрирует появление ошибок при распределенной дискретизации в типичной измерительной системе на основе DAQ, из-за временного сдвига между отсчетами ($t = 0$ и $t = 0.001$).

Последовательная (отсчет за отсчетом) обработка выборок при межфазных измерениях с использованием процесса мультиплексирования картой DAQ, приводит к некорректным измерениям мощности. Все анализаторы мощности N4L дискретизируют входные аналоговые сигналы по всем каналам одновременно, что требует параллельной обработки исходных выборок, и является нетривиальной задачей при дискретизации сигналов в МГц частотном диапазоне при разрешении 14 бит.

Для анализаторов мощности компания N4L разработала цепь преобразования-передачи сигнала, специально предназначенную для синхронной дискретизации данных по 12 аналоговым каналам (6 – для напряжения, 6 – для тока), а также данных по входам скорости и моменту вращения, необходимых для некоторых задач. Управление, сбор и обработка выборок осуществляется комбинацией ПЛИС и ЦСП, с запатентованными цепями разрядки.

ПРОБЛЕМА #4 – ОТСЛЕЖИВАЕМОСТЬ? ЧТО ТАКОЕ ОТСЛЕЖИВАЕМОСТЬ?

Анализатор мощности должен не только обеспечивать точные измерения мощности, но быть в состоянии «доказать» правильность измерений по отношению к отслеживаемому эталону (traceable reference).

До тех пор, пока измерительное устройство высокой точности, точнее его результаты измерений, не подтверждены отслеживаемым эталоном с соответствующими расчетными значениями неопределенностей, на технические спецификации такого устройства полагаться не имеет смысла. Точность, «основанная на схмотехническом дизайне» не является достаточным условием точности, так как любое измерительное устройство высокой точности должно быть отслеживаемо (traceable) до первичного эталона в соответствии с ISO17025.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ? ЭТО ПРОСТО ПОГРЕШНОСТЬ КАЛИБРАТОРА?

Это не так просто, что калибратор с малым уровнем погрешности поможет установить неопределенность любого калибровочного процесса. Необходимо дополнительно знать следующее:

- 1) Неопределенность самого калибратора
- 2) Повторяемость результатов измерения, полученных анализатором или измерителем во время калибровки
- 3) Разрешение по результату измерения, полученного анализатором или измерителем во время калибровки



Рисунок 4. Пример процесса калибровки анализатора ПРИЗМА-450 с помощью Fluke 6105A

**Неопределенность = Неопределенность калибратора +
Повторяемость результатов измерения + Разрешение по результату измерения**

Второй пункт из приведенного выше списка представляет собой определенную трудность для систем на основе DAQ, так как процесс определения повторяемости результатов является крайне продолжительным. Сам процесс определения повторяемости результатов системы, состоящей из калибратора, анализатора/измерителя и дополнительного оборудования/аксессуаров, состоит из нескольких тестов, отличается значительной продолжительностью и не является простым. И самое важное, что параметры точности прецизионного измерительного оборудования должны включать в себя результаты испытаний на повторяемость.

Конечно, все три условия – испытания можно выполнить, но стоимость инвестированного в этот процесс времени может оказаться в разы больше, чем приобретение специализированного анализатора мощности. И может оказаться так, что если и задаться выполнением полного расчета неопределенностей, то к моменту выполнения задачи, выяснится, что все проблемы, связанные с аналоговыми входными цепями, описанными в данном документе, являются очевидными, и экономический смысл разработки отслеживаемой (traceable) системы для измерения мощности с высокой точностью на основе DAQ, является незначительным.

ПРОБЛЕМА #5 – ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ (NO-GAP)

Важное требование непрерывной (No-Gap) обработки данных в режиме реального времени при измерении электрической мощности часто игнорируется даже некоторыми производителями анализаторов мощности. Функционирование в режиме реального времени подразумевает цепь обработки сигнала, в которой функции сбора, обработки и удаления данных выборок происходит «на лету» (on-the-fly). Такой подход исключает использование буфера для накопления данных выборок, тем более, что накопление данных выборок при требуемых скоростях быстро переполнит любую доступную в системе память.

Анализатор мощности или устройство регистрации данных (DAQ)?

ПОЧЕМУ ОБРАБОТКА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ТАК ВАЖНА?

Допустим, есть электромотор, управляемый инвертором с ШИМ, и вращающийся с частотой 0.1Гц, и необходимо провести поцикловый (по периодам, cycle-by-cycle) анализ мощности системы. Системы обоих типов – на основе буфера (например, на основе DAQ) и с непрерывной обработкой в режиме реального времени (например, у анализаторов N4L серии ПРИЗМА), потребуют достаточное количество выборок для представления одного полного периода (10 секунд данных по каждому каналу при частоте выборки 2Мвыб/с – почти 240Мвыборок для 6-фазной системы).

В системе с непрерывной обработкой данных в режиме реального времени, длина окна «регистрации данных» (или «измерительного окна»), с продолжительностью 10 секунд (в данном случае), не требует затрат памяти, так как данные обрабатываются «на лету». После обработки, расчетные величины аккумулируются в памяти, а исходные выборки сигнала удаляются. Таким образом, память требуется только для небольшого объема аккумулированных данных, например данных по потребленной активной мощности (интеграция по мощности) и только на время длительности измерительного окна. Конечно, это кбайты памяти, а не Гбайты.

Системы, использующие буфер памяти, работают с выборками данных иным образом – вместо обработки каждой выборки «на лету», они сохраняются в памяти (буферизуются). И это является проблемой, так как глубина памяти является конечной величиной и, в конечном счете, она закончится.

Помимо проблемы конечного объема памяти, есть и другая, связанная с тем, что по окончании длительности окна «регистрации данных», буфер памяти будет заполнен огромным количеством первичных данных выборок, и потребуются значительная вычислительная мощность системы, чтобы эти первичные данные преобразовать в величины Вскз, Аскз, Вт, ВА, ВАр и т.д. И чем большее количество выборок требуется обработать, тем больше на этот процесс требуется времени, поэтому потребуется задержка между завершением одного окна «регистрации данных» и началом следующего.

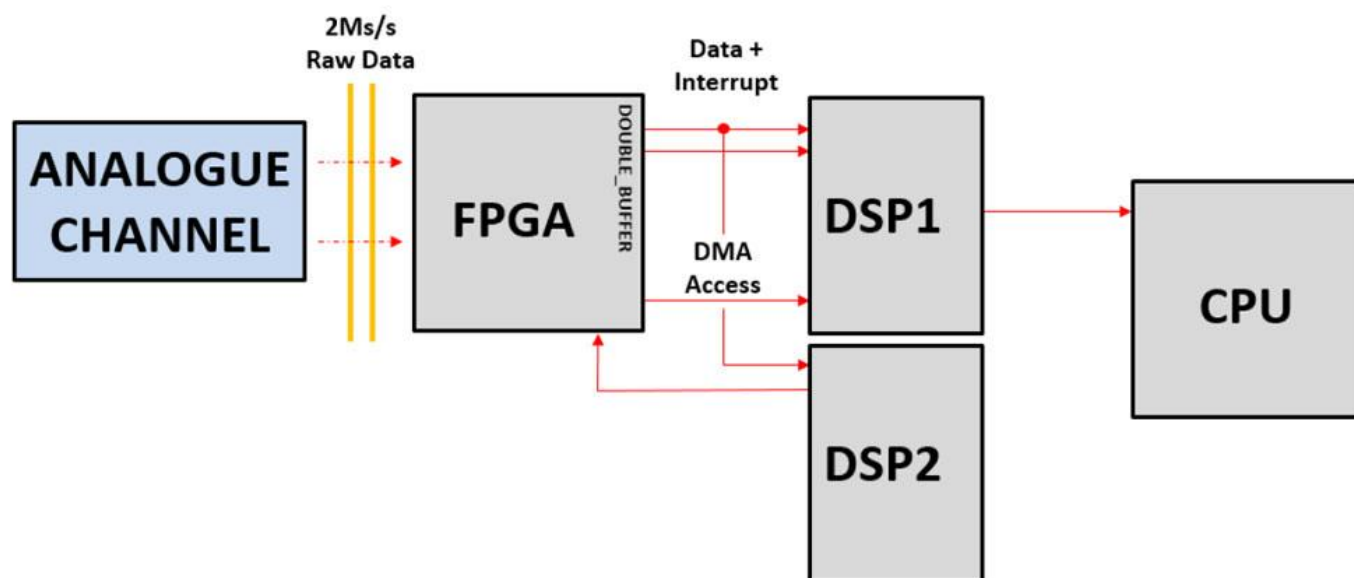


Рисунок 5. Цепь непрерывной обработки сигнала в режиме реального времени, с двойным ЦСП/ПЛИС компании N4L (упрощенная)

В ситуациях, когда окно «регистрации данных» оказывается продолжительным по времени, устройства на основе DAQ имеют значительные ограничения:

- Снижение частоты дискретизации – неидеальное решение, так как приведет к сужению полосы частот по теореме Найквиста
- Увеличение объема памяти – дорогое решение, которое приведет к увеличению промежутков между окнами «регистрации данных», так как потребуются больше математических вычислений для большего числа выборок между окнами «регистрации данных». Решается одна проблема и создается другая.

Ни одно из приведенных выше решений не является предпочтительным, так как приведет к низкой производительности при измерениях. Измерение мощности будет иметь значительные ограничения до тех пор, пока не будет реализована непрерывная обработка данных в режиме реального времени.

Анализатор, обеспечивающий настоящий непрерывный анализ данных (true no-gap), должен поддерживать постоянное значение частоты дискретизации, вне зависимости от длительности окна «регистрации данных».

ВЫВОДЫ

Системы регистрации данных DAQ являются предельно универсальными, обеспечивают выполнение ключевых измерений во многих задачах и предметом данного документа не является утверждение обратного в какой-либо мере. Однако, при решении множества измерительных задач, системы на основе DAQ не предоставляют ответа в ситуации, когда требуется измерение параметров электрической мощности с высокой точностью.

Измерения высокой точности, реализованные в анализаторах N4L серии ПРИЗМА, требуют отдельных аналоговых и цифровых цепей обработки сигнала, цепей коммуникации между ними в виде топологий состоящих из двойных ПЛИС/ЦСП. По правде говоря, только подобная цепь обработки сигнала, обеспечивает производительность и точность, столь востребованные в современной науке и промышленности. Высокие требования включают непрерывный анализ в режиме реального времени, отслеживаемые значения точности (traceability) и повторяемость результатов измерения. Выполнение таких требований возможно только в системе с непрерывной и связной обработкой сигнала.

Дополнительную информацию по прецизионным анализаторам мощности серии ПРИЗМА вы можете найти на сайтах www.n4l.ru, www.newtons4th.com