

ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: ПРОСТОЙ ПУТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ

Лукас Дитрих (OMICRON electronics GmbH / Штуттгартский университет), Корд Мемпель (OMICRON electronics GmbH), Адриан Айзенманн (Штуттгартский университет)

lukas.dieterich@omicronenergy.com

Австрия

Краткое изложение

О возрастающем значении качества электроэнергии свидетельствует тот факт, что в электросетях всё чаще устанавливаются устройства для измерения и анализа параметров качества электроэнергии (PQ). В этой статье кратко описаны существующие стандарты МЭК для тестирования подобных устройств и представлен набор шаблонов для испытания измерителей PQ по стандарту IEC 62586-2 при типовых испытаниях изготовителем и эксплуатационных испытаниях на месте. Уже существующие планы испытаний, предоставляемые производителем испытательного комплекта, полностью переработаны с учетом последних изменений в стандартах, чтобы пользователь мог с легкостью выполнять такие испытания и, что самое важное, правильно оценивать их результаты. Представлены также выводы, сделанные по результатам испытания типового измерителя качества электроэнергии. Кроме того, авторы предлагают подходящий набор испытаний, которые можно выполнять при вводе в эксплуатацию или в ходе плановых проверок измерителей качества электроэнергии.

Ключевые слова

Качество электроэнергии, измерители качества электроэнергии, типовые испытания, испытательные шаблоны, IEC 61000-4-30, IEC 62586, EN 50160

1 Общие сведения

С увеличением количества распределенных энергоресурсов (таких, как фотовольтаические установки) и нестандартных нагрузок возрастают и требования к качеству энергии (PQ) в электросети. Компаниям необходимо доказать соответствие стандартам (например, EN 50160), промышленные предприятия включают пункт о качестве электроэнергии в договоры с поставщиками, и даже обычные пользователи всё чаще сталкиваются с проблемами, вызванными недостаточным качеством энергии. Согласно «Отчету по исследованию качества электроэнергии в Европе», убытки из-за низких показателей PQ составляют в ЕС более 150 млрд евро в год [1]. И проблема со временем будет только усугубляться, если учесть всё более широкое использование в электросетях преобразовательной техники и нелинейных элементов, которые еще больше снижают показатели PQ.

Для решения этой проблемы в электросетях и точках подключения всё чаще устанавливаются устройства для измерения качества электроэнергии. Но их неправильная работа или низкая точность могут привести к убыткам для оператора электросети. С другой стороны, у большей части промышленных предприятий, конечных пользователей и энергокомпаний, особенно небольших, нет опыта мониторинга качества электроэнергии, а зачастую и понимания, зачем это нужно делать. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что в ЕС инвестиции в мониторинг качества подаваемой электроэнергии и повышение этого качества составляют всего 10 % от упомянутой выше суммы [2].

Основными требованиями к системам мониторинга PQ являются высокая точность измерений и правильное функционирование прибора в эксплуатации. Но во многих случаях при установке новых измерителей PQ, а также в ходе дальнейших плановых испытаний и техобслуживания эти параметры не проверяются. Ведь, в отличие от тех же защитных реле, для измерителей PQ не прописаны правила и процедуры установки, плановых проверок или калибровки. В результате

неправильная работа и низкая точность прибора могут остаться незамеченными и привести к серьезным финансовым убыткам.

В настоящее время большинство устройств для измерения PQ в сетях ВН и СН классифицируются по стандарту IEC 61000-4-30 (устройства класса A или S). Требования к таким устройствам и типы выполняемых изготовителем испытаний определены в стандартах IEC 62586-1 и IEC 62586-2. В принципе, такие испытания могут использоваться для типовых, приёмочных и регулярных испытаний измерителей PQ. Однако испытания, описанные в стандарте, являются довольно сложными и затратными по времени. Вторая проблема касается оценки результатов испытаний, для которой иногда требуется серьезная постобработка множества зарегистрированных измерителем PQ показателей.

С другой стороны, для выполнения данных испытаний можно использовать уже имеющееся оборудование: в частности, для проверки измерителей PQ подходят многие из современных систем для тестирования защитных реле. А при использовании готовых планов испытаний и подходящих программных модулей и сам процесс по легкости вполне можно сравнить с испытанием реле.

В связи с этим в статье рассматриваются простые, понятные и практичные методы испытания устройств для измерений качества электроэнергии.

2 Показатели качества электроэнергии согласно стандарту МЭК 61000-4-30

В двух словах, качество электроэнергии — это уровень соответствия фактического сигнала в электросети идеальному синусоидальному сигналу. Традиционно под качеством электроэнергии понимается качество напряжения. Но в наши дни к показателям частоты и напряжения добавились такие критерии, как бесперебойность и характеристики тока.

В стандарте IEC 61000-4-30 определены следующие показатели PQ:

- Стабильность частоты
- Характеристики напряжения
 - Отклонения амплитуды
 - Провалы, перенапряжения, прерывания
 - Гармоники и интергармоники
 - Несимметрия напряжений
 - Фликер
 - Быстрые изменения напряжения
- Характеристики тока
 - Отклонения амплитуды
 - Гармоники и интергармоники
 - Несимметрия токов
- Напряжение сетевых сигналов

Кроме того, испытываются и специальные функции устройств:

- Маркировка результатов измерений при обнаружении в данном временном интервале прерываний, провалов напряжения или перенапряжений
- Точность внутренних часов
- Изменения внешних влияющих параметров

Последствия недостаточного качества электроэнергии могут варьироваться от небольших возмущений до перерывов в подаче электроэнергии и повреждения подключенного к сети оборудования. К финансовым убыткам в промышленном секторе приводят, главным образом, провалы, всплески и короткие прерывания напряжения, а также переходные процессы [1].

3 Испытание устройств для измерения качества электроэнергии

3.1 Стандарты испытания устройств для измерения качества электроэнергии

Базовые правила тестирования устройств для измерения качества энергии определены в ряде стандартов IEC. Их взаимосвязь кратко описана ниже и наглядно представлена на Figure 1. Главным документом стандартизации измерений качества электроэнергии является стандарт IEC 61000-4-30, в котором описаны основные методы проверки и изложена классификация устройств (класс А либо S), включая требования к точности. Этот документ ссылается на правила общей спецификации устройств в стандарте IEC 62586-1 и фактическое описание (типов) испытательных сигналов в стандарте IEC 62586-2. В исключительных случаях при тестировании учитывают также дополнительные стандарты: IEC 61000-4-2, 61000-4-7 и 61000-4-15.

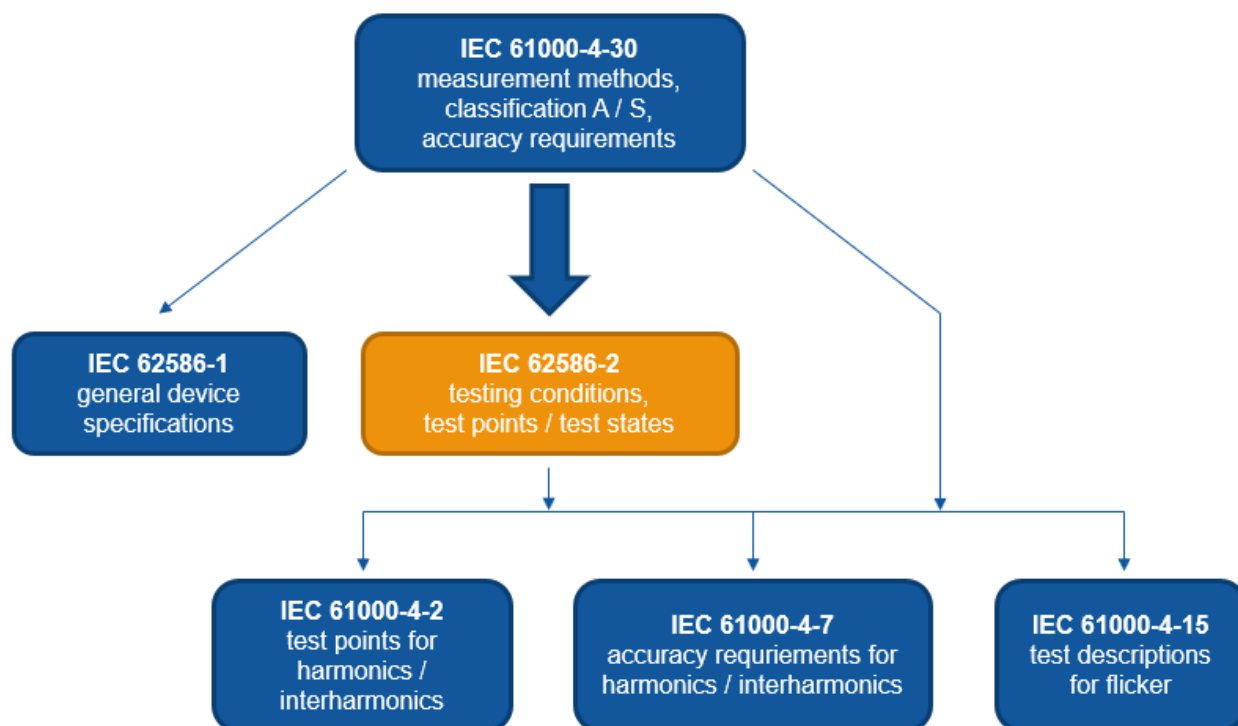


Рис. 1. Схема применения стандартов IEC по испытанию устройств для измерения качества электроэнергии

3.2 Настройка испытания

К испытательным комплектам, предназначенным для проверки измерителей PQ, существует ряд типовых требований:

- 3 выходных канала по напряжению
- 3 выходных канала по току
- Высокая точность (должна соответствовать классу испытываемого устройства)
- Программные модули для правильного моделирования показателей качества электроэнергии
- Поддержка испытательным устройством работы с автоматическими планами испытаний
- Возможность синхронизации начала испытаний и их запуска по триггеру

В некоторых испытаниях синхронизация испытательного комплекта с измерителем качества электроэнергии является обязательной: например, при оценке реакции на кратковременный фликер

P_{st} или неопределенность тактовой частоты. Для других испытаний синхронизация по времени является не обязательной, но крайне полезной функцией, поскольку значительно упрощает процедуру.

В практической части для этой статьи мы использовали испытательные комплекты OMICRON CMC 256 plus и CMC 430, поскольку оба они отвечают требованиям к точности для тестирования измерителей PQ класса A. Проверку проходили измерители Siemens SICAM Q200 и Eberle PQI-DA (оба соответствуют классу A по стандарту IEC 61000-4-30). Для синхронизации по времени был подключен блок CMGPS 588. В ряде испытаний для контрольных измерений использовался комплект CMC 430 со встроенной функцией Enerlyzer Live. Полная схема испытаний изображена на Figure 2.

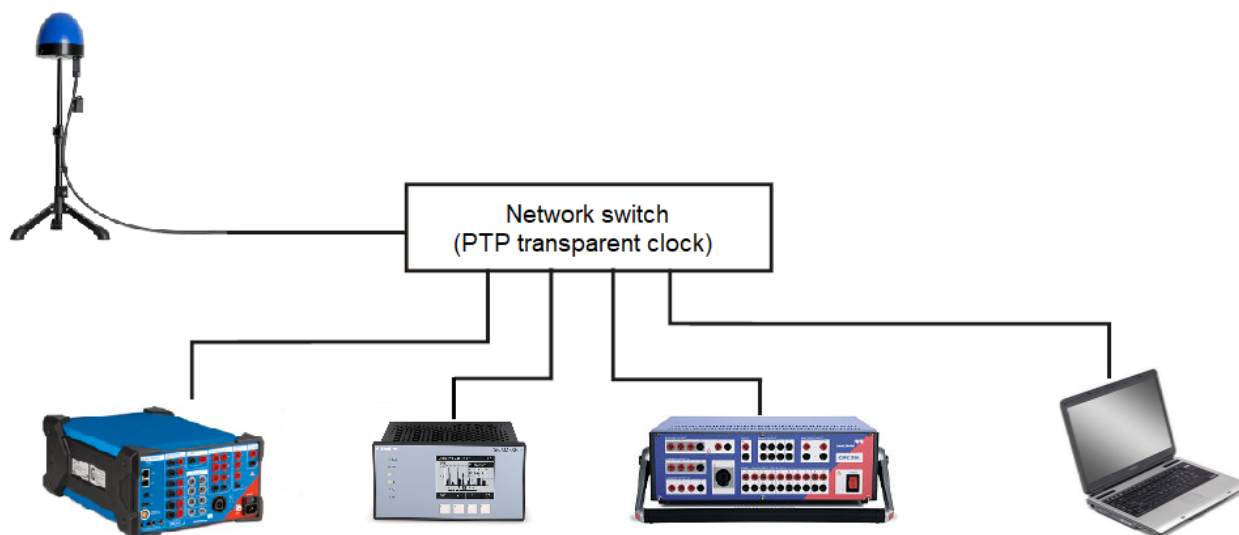


Рис. 2. Схема тестирования измерителей PQ: CMGPS (вверху), CMC 430 (слева), SICAM Q200 (по центру), CMC 256plus (справа), компьютер (права на изображения принадлежат OMICRON [3] и Siemens [4]).

3.3 Шаблоны испытаний

Испытание измерителей качества электроэнергии — довольно трудоемкий процесс. Поэтому для них разрабатываются шаблоны (планы) с инструкциями по выполнению процедур и оценке результатов. Там изложена вся необходимая информация по проведению испытаний, в частности содержатся настройки испытательного комплекта и испытываемого объекта, а также параметры испытательного сигнала.

Содержимое шаблонов автоматически адаптируется под конкретный измеритель в соответствии с указанными номинальными значениями его напряжения и частоты.

При наличии шаблонов пользователю не требуется перед началом работы досконально изучать стандарты, указанные в подразделе 3.1. Все необходимые испытания выполняются по шаблону автоматически и прерываются только появлением на экране диалоговых окон с информацией для пользователя. Каждый шаблон позволяет пользователю вносить сведения об испытательном комплекте и объекте испытаний. Кроме того, в шаблоны можно вносить и индивидуальные изменения (в частности, выбирать выполняемые этапы испытания, указывать длительность интервала «до события», задавать амплитуду фликера и т. п.).

3.4 Оценка

Если срабатывание реле защиты выявляется изменением состояния двоичных сигналов, то с оценкой работы измерителей PQ всё не так просто. В некоторых случаях для оценки достаточно

считать соответствующие показатели на экране измерителя PQ. Однако в большинстве случаев оценка формируется на основе считанных показателей и расчетных значений из памяти измерителя PQ. А по ряду испытаний вообще требуется дополнительная обработка полученных значений.

Созданные шаблоны после выполнения каждого испытания автоматически отображают запрос на его оценку. Пользователю предлагается выбрать один из трех вариантов: *Успешно / Неуспешно / Без оценки*. Оценка впоследствии можно изменить, выбрав *Оценка вручную*. Поэтому рекомендуем на первом этапе выбирать пункт *Без оценки*. А затем, после обработки данных дополнительными средствами, например Excel, выставлять финальную оценку.

Испытательные шаблоны содержат инструкции и необходимые средства для оценивания, в том числе шаблоны Excel для постобработки результатов. Это позволяет быстро оценить показатели, не тратя время на сверку со стандартами.

4 Типовые и приемочные испытания по IEC 62586

Часть планов испытаний была разработана ранее, сразу после появления IEC 62586. Они затем были обновлены и расширены с целью охвата всех испытаний, предписанных IEC 62586-2. Без внимания остались лишь некоторые испытания, например температурное влияние. Шаблоны дополнены руководством, предоставляющим пользователю исчерпывающую информацию по испытанию измерителей PQ.

Поскольку в уже упомянутых диалоговых окнах отображается основная информация по каждому отдельному испытанию, перечитывать стандарты нет нужды. При этом структура каждого шаблона согласуется с соответствующим разделом стандарта IEC 62586-2. То же относится к именованию и нумерации испытаний. Поэтому если дополнительная информация все же потребуется, ее можно будет легко найти в документе.

Шаблоны позволяют выполнять типовые и приемочные испытания. Конечно, такие испытания обычно выполняются изготовителями устройств PQ или крупными энергетическими предприятиями для оценки определенных измерителей PQ на соответствие техническим условиям. Однако такие преимущества, как простота настройки и возможность использовать уже имеющиеся комплекты, приобретенные для испытания защитных реле, расширяют круг потенциальных пользователей. В разделе 5 рассматривается использование соответствующего набора шаблонов для приемочных и эксплуатационных испытаний на месте.

4.1 Примеры испытаний

Большинство необходимых условий испытания можно создать на основе таких простых характеристических форм, как линейно изменяемые сигналы, последовательности или отклонения одного или двух параметров напряжения или тока. Сложные на первый взгляд сигналы можно также представить в виде следующего уравнения из IEC 62586-2 [5]:

$$u_H(t) = \sqrt{2}U_{din} \cdot \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) + [1 + A_m \cdot \cos(2\pi f_m t + \varphi_m)] \cdot 0,1 \cdot \sqrt{2}U_{din} \cdot \cos(2\pi M f_n t + \varphi_M) \quad (1)$$

В котором:	$u_H(t)$	Временная развертка напряжения, коэффициент H гармонического спектра	В
	U_{din}	Номинальное напряжение	В
	f_n, f_m	Номинальная частота, частота модуляции	Гц
	$\varphi_n, \varphi_m, \varphi_M$	Фаза основного, модулирующего, гармонического сигнала	°
	A_m	Амплитуда модуляции	В
	M	Порядок гармоник	-

Расшифровывается это уравнение следующим образом: выходное гармоническое напряжение с определенным порядком гармоник, которое модулируется на частоте f_m и суммируется с номинальным напряжением.

Для большинства испытательных сигналов мы выполнили контрольные измерения, чтобы убедиться, что по времени и точности выходной сигнал соответствует требованиям стандарта. На Figure 3 изображен сигнал по стандарту, а на Figure 4 — такой же сигнал, подаваемый испытательным устройством.

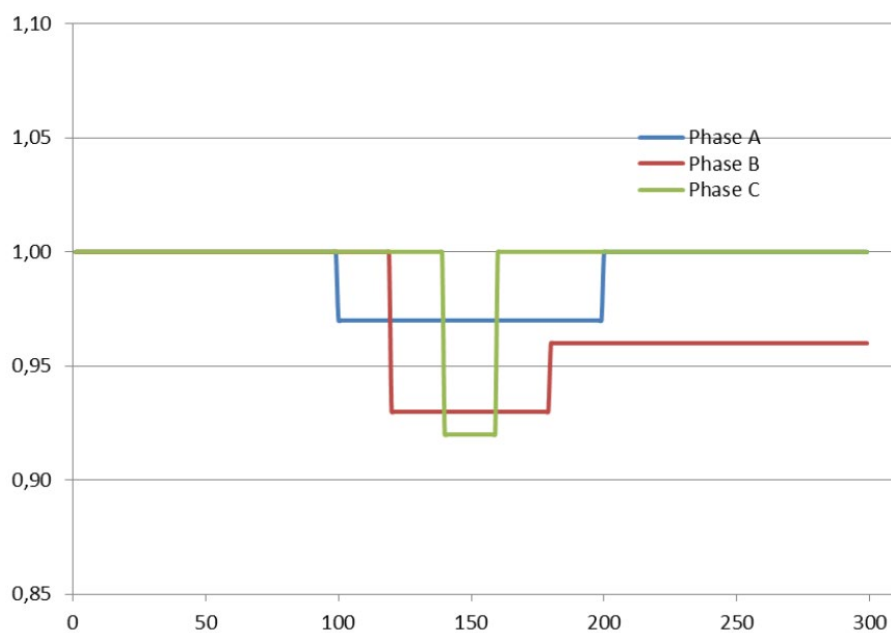


Рис. 3. Описанный в стандарте испытательный сигнал; ось X — время (в полуциклах); ось Y — напряжение (в относительных единицах) (источник: IEC 62586-2 [5])

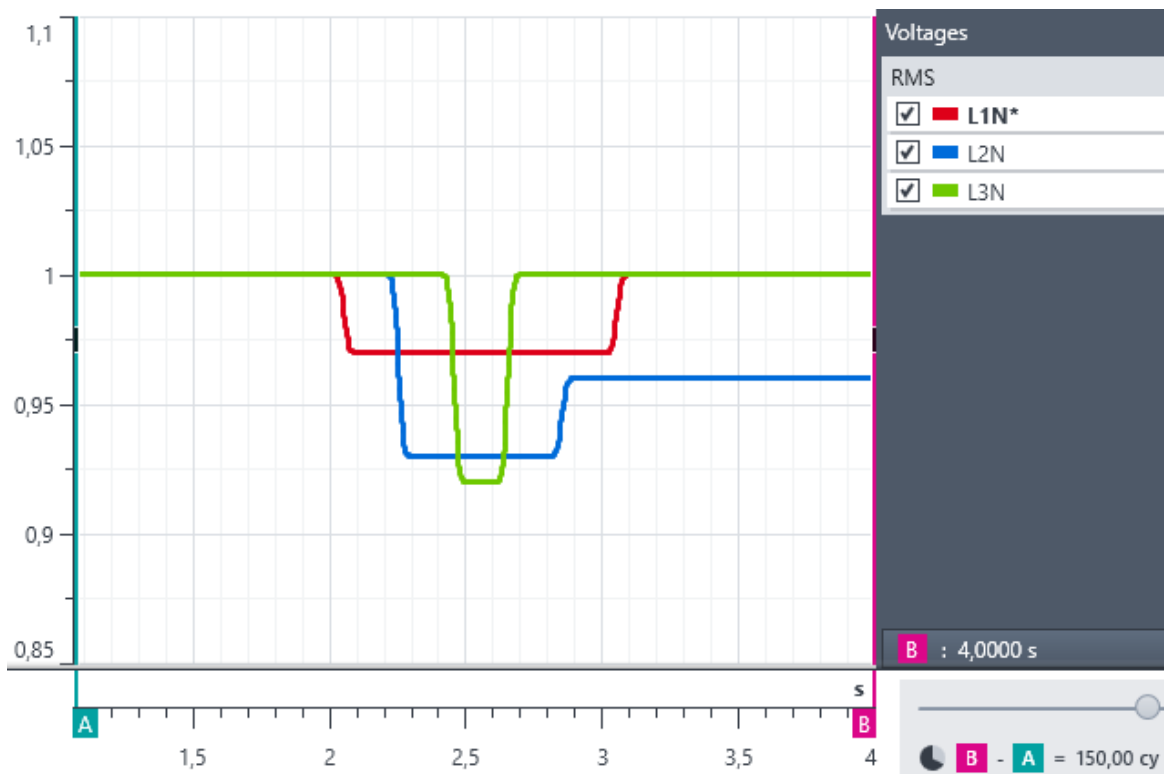


Рис. 4. Сигнал, подаваемый при контрольном измерении

4.2 Выводы из результатов испытаний измерителей PQ с помощью шаблонов

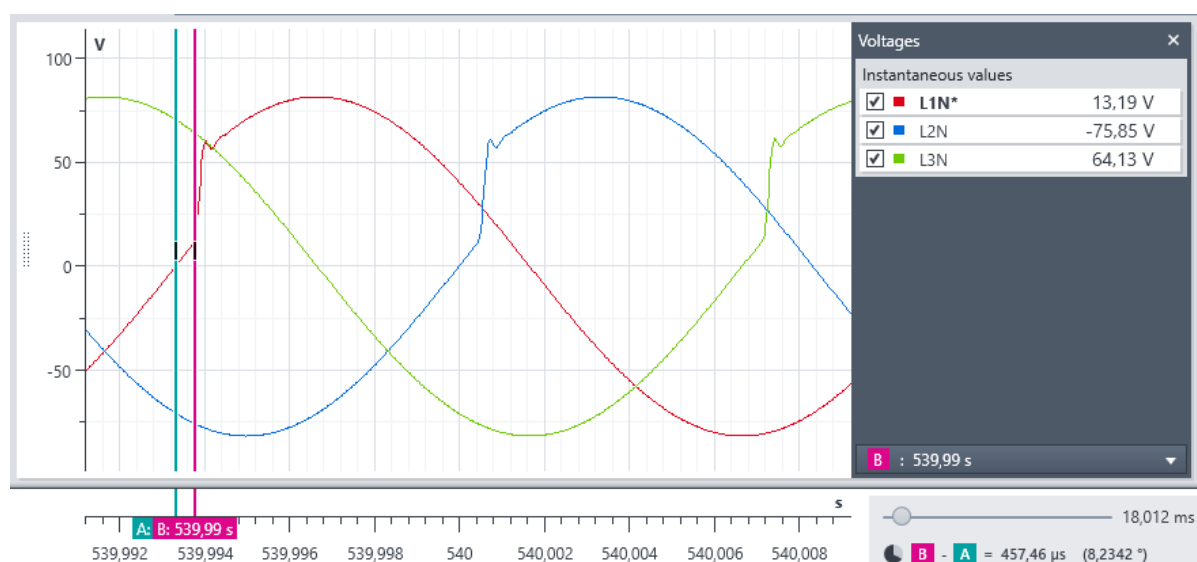
Общие выводы. Во-первых, мы выяснили, что шаблоны выполнены правильно и генерируют испытательные сигналы надлежащим образом. Во-вторых, мы поняли, что выполнение и оценка всех испытаний, описанных в IEC 62586-2, занимает около двух недель — даже с учетом экономии времени благодаря использованию шаблонов.

Более конкретные выводы касаются синхронизации времени и регулировки *длительности интервалов «до события» и «после события»*. Синхронизация времени и запуск испытаний по триггеру значительно упрощают оценку измеренных показателей, а в некоторых испытаниях использование внешнего источника синхросигналов и вовсе является обязательным. Это, в частности, все испытания с проверкой на *отсутствие прерываний и перекрытий*, где требуется оценить определенную последовательность измеренных значений. Это также необходимо для всех испытаний с *агрегацией измеренных значений*, которые длятся в течение полных десяти минут. Сигнал перед событием (*время до события*) и после события (*время после события*) характеризуется номинальными значениями параметров и отображает нормальное состояние электросети. Для большинства испытаний, предполагающих оценку мгновенных значений, эти интервалы не столь важны ввиду высокой скорости и точности измерений, выполняемых анализатором PQ. Однако, например, при определении краткосрочного фликера (P_{st}) обязательно нужно задать *время до события*, поскольку фликер P_{st} формируется в течение десяти минут, и при резком переходе от нулевого сигнала к заданному испытательному сигналу результат измерения будет недостоверным. Таким же образом, требуемая точность максимального мгновенного фликера ($P_{inst,max}$) достигается лишь через несколько минут после подачи постоянного сигнала события. Кроме того, наши исследования показали, что время установления различно для каждого измерителя PQ.

4.3 Ограничения и возможности усовершенствования

В ходе испытаний были обнаружены определенные ограничения используемых приборов и программного обеспечения.

- Основной недоработкой ПО *Test Universe*, точнее, его специализированного модуля для моделирования явлений PQ, является недостаточный выбор настроек и вариантов для определенных сигналов, в частности гармоник и интегармоник тока. Эти испытания были добавлены в последнюю версию стандарта, и PQ модуль не успели соответствующим образом дополнить.
- Выходное напряжение вспомогательного источника СМС 256plus ограничено 264 В DC. При тестировании некоторых измерителей могут потребоваться более высокие значения (может понадобиться дополнительный источник напряжения DC).
- Стандартом определены рекомендуемые номинальные значения напряжения и тока для измерителей PQ, включая измерители с прямым подключением. И вот для последних диапазон амплитуд выходного напряжения может оказаться недостаточным. Однако с большинством самых распространённых типов анализаторов PQ и со всеми анализаторами, подключаемыми через измерительные трансформаторы, проблем не возникнет.
- Внутренняя системная частота комплекта СМС 256 plus для выдачи аналоговых сигналов составляет 10 кГц. Соответственно, аналоговый дискретный выходной сигнал генерируется каждые 0,1 мс. Это следует учитывать при моделировании скачков фазы, которые происходят на каждой фазе при прохождении сигнала через нуль. На частоте 50 Гц задержка между фазами составит 6,67 мс ($t = \frac{1}{3} \cdot 20 \text{ ms} = 6,6\bar{6} \text{ ms}$). В этом случае при настройке (шаблона) испытания необходимо должным образом округлить значения сигнала. На Figure 5 изображены выходные сигналы:
 - а) без надлежащего округления значений. Скачки фазы не происходят точно в точке прохождения через нуль;
 - б) с надлежащим округлением значений. В этом случае оставшаяся задержка находится в границах погрешности для испытания измерителей PQ класса А.



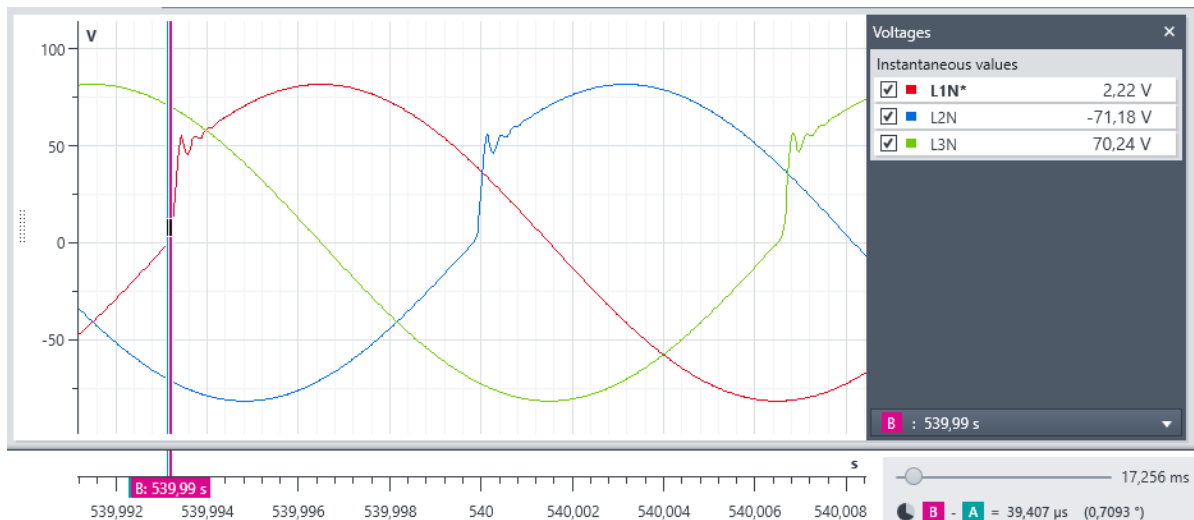


Рис. 5. Выходные сигналы для испытания со скачками фаз: а) без надлежащего округления значений (вверху); б) с надлежащим округлением значений (внизу)

5 Плановые испытания

При установке или плановых испытаниях количество испытаний должно быть существенно уменьшено. Длительность всей процедуры должна быть сокращена с 2 недель до, например, 2 часов (подобно испытаниям реле защиты).

Прежде всего мы исключили испытания, бесполезные при установке или плановой проверке, основываясь на следующих критериях:

- Проверка метода измерения: правильность реализации метода измерения проверяется при типовых испытаниях, для конечного пользователя точность измеренных величин важнее, чем точность метода измерений.
- Предсказуемый результат: как подсказывает опыт, выполнять испытания с предсказуемым результатом не стоит. Например, без применения гармонических искажений показатель измерения суммарного коэффициента гармонических искажений будет близок к нулю.
- Практическая польза: испытание не приносит практической пользы, если пользователь не способен понять или расшифровать его результат, а также если вероятность возникновения явления с заданными параметрами крайне мала. Например, нет особого смысла испытывать реакцию устройств на напряжение уровнем 10 % от номинального значения при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, поскольку такие условия на подстанции вряд ли возникнут. А если они все же возникают, перед оператором встают куда более актуальные проблемы, чем недостаточная точность устройств для измерения качества электроэнергии.
- Применимость: некоторые испытания просто невозможно воспроизвести в полевых условиях.

Далее, мы оценили полезность каждого испытания для плановой проверки с учетом его длительности, сложности и значимости. В результате был составлен перечень испытаний общей длительностью около часа (это длительность лишь самого испытания — без оценки результата, чтения информации в диалоговых окнах и т. д.). Список представлен на Figure 6. В настоящее время это лишь проект, требующий обсуждений.

Template	Topic	Number	Description
6.1	Frequency	A1.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.2	Voltage magnitude	A2.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.3	Flicker	F6.2.1	Check response characteristic for sinusoidal and rectangular voltage changes
6.3	Flicker	F6.2.2	Check response characteristic for sinusoidal and rectangular voltage changes
6.4	Swells, dips	A4.1.2 a)	Check amplitude and duration accuracy for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.2 b)	Check amplitude and duration accuracy for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 a)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 b)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 c)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 d)	Check threshold for swells and dips
6.5	Voltage unbalance	A5.1.4	Check accuracy of voltage unbalance measurement
6.6	Voltage harmonics	A6.2.1	Check measuring uncertainty – single even harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.2	Check measuring uncertainty – single odd harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.3	Check measuring uncertainty – single high harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.4	Check measuring range – low end
6.6	Voltage harmonics	A6.2.5	Check measuring range – high end
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.2	Check measuring uncertainty – single low order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.3	Check measuring uncertainty – single medium order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.4	Check measuring uncertainty – single high order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.5	Check measuring range – low end
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.6	Check measuring range – high end
6.8	MSV	A8.2.1 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.8	MSV	A8.2.2 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.8	MSV	A8.2.3 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.13	RVC	A13.4.1	Check correct detection of RVC in a polyphase system
6.14	Current magnitude	A14.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.15	Current harmonics	A15.2.1	Check measuring uncertainty – single even harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.2	Check measuring uncertainty – single odd harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.3	Check measuring uncertainty – single high harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.4	Check measuring range – low end
6.15	Current harmonics	A15.2.5	Check measuring range – high end
6.16	Current interharmonics	A16.2.2	Check measuring uncertainty – single low order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.3	Check measuring uncertainty – single medium order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.4	Check measuring uncertainty – single high order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.5	Check measuring range – low end
6.16	Current interharmonics	A16.2.6	Check measuring range – high end
6.17	Current unbalance	A17.1.5	Check accuracy of current unbalance measurement

Рис. 6. Перечень испытаний для плановых проверок измерителей PQ (IEC 62586-2).

6 Выводы и дальнейшие планы

В 17 шаблонах собрано около 250 отдельных испытаний измерителей качества электроэнергии по критериям четкости, применимости и удобства использования. Используемые вместе с 90-страничным руководством пользователя, шаблоны позволяют выполнить все испытания измерителей PQ, предписанные IEC 62586-2 и IEC 61000-4-30, даже не экспертам в этой области.

Кроме того, представлен проект списка испытаний измерителей PQ для плановых проверок. В него, в частности, включены испытания, результаты которых имеют важное значение для конечных пользователей, будь то энергокомпании или промышленные предприятия.

Концепция плановых испытаний будет дорабатываться и совершенствоваться. С научной точки зрения, текущий набор испытаний должен быть оценён и скорректирован. Для практических исследований мы ищем партнеров, чтобы убедиться, что выбранные испытания пригодны для полевых условий, а их результаты обеспечивают необходимые сведения о функциональности и точности измерителей PQ.

Литература

- [1] J. Manson и R. Targosz, «European Power Quality Survey Report,» Leonard Energy, 2008.
- [2] R. Targosz и D. Chapman, «The Cost of Poor Power Quality,» Leonardo Energy, 2015.
- [3] OMICRON, CMGPS 588 User Manual, Klaus: OMICRON, 2015.
- [4] Siemens, «Siemens.com,» 2019. [В Интернете]. Available: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/netzqualitaet-und-messung/netzqualitaetsrekorder-sicam-q200.html>. [Дата обращения: 21. Januar 2019].
- [5] IEC, 62586-2:2017 Power quality measurement in power supply systems - Part2: Functional tests and uncertainty requirements, Geneva: IEC, 2017.

OMICRON — ведущий мировой производитель высокотехнологичного испытательного и диагностического оборудования для предприятий электроэнергетической отрасли. Устройства OMICRON позволяют с высокой точностью оценивать состояние первичного и вторичного оборудования энергосистем. Компания также предоставляет услуги по вводу устройств в эксплуатацию, тестированию и диагностике оборудования, консультированию и обучению персонала.

Клиенты из более чем 160 стран доверяют опыту компании OMICRON, используя высококачественное передовое оборудование ее производства. Сервисные центры компании расположены по всему миру, что позволило создать обширную базу знаний и обеспечить всестороннюю поддержку клиентов. Благодаря всем этим преимуществам, а также развитой дистрибьюторской сети компания прочно занимает лидирующие позиции в области электроэнергетики.

Посетите наш веб-сайт, чтобы
узнать больше о компании и
получить контактную информацию
по региональным офисам.