

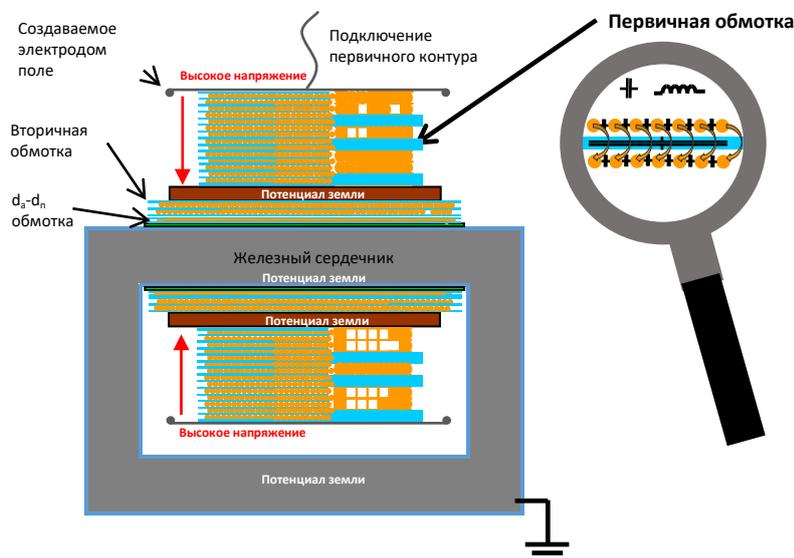
Трансформаторы и датчики напряжения для измерения качества электроэнергии в сетях среднего напряжения

В настоящий момент требования к качеству поставляемой потребителю электроэнергии становятся более жесткими, а соблюдение этих требований неотъемлемыми для генерирующих и распределяющих компаний. В недавнем прошлом считалось, что перебои в подаче электроэнергии и колебания напряжения среди прочих процессов оказывают наиболее значимое влияние на качество электроснабжения. Теперь пристальное внимание уделяется еще и мониторингу параметров импульсных помех и гармонических искажений, чей вклад в качество поставляемой электроэнергии стал весомее ввиду увеличения числа нелинейных нагрузок и децентрализованных возобновляемых источников энергии в сети.

В целях унификации европейских стандартов энергоснабжения были определены минимальные требования к параметрам качества электроэнергии, содержащиеся в EN 50160 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Этот документ должен рассматриваться в качестве промышленного стандарта для передаваемой электрической энергии, как для поставляемого производителем товара, что позволяет обоснованно ссылаться на приведенные требования к качеству ресурсов при составлении договоров и контрактов на их поставку. В феврале 2014 года государственный суд Германии однозначно определил электричество как продукцию, качество которой регламентировано «Законом об ответственности за качество продукции», следовательно, покупатель электроэнергии попадает под защиту закона «О защите прав потребителей». Таким образом, генерирующая или распределяющая компания становится юридически ответственной за выход из строя оборудования и убытки, понесенные потребителем, вызванные низким качеством электроэнергии в сети или на отдельном ее участке на стороне поставщика.

Вышеупомянутые факты привели к разработке и производству измерительных приборов, способных выполнить анализ параметров качества электроэнергии и автоматически сформировать отчет согласно EN 50160. Кроме того, и коммерческие цифровые счетчики все чаще оснащаются функцией мониторинга параметров качества. В то время как на стороне низкого напряжения измерительные приборы могут обрабатывать непреобразованный сетевой сигнал, в диапазоне среднего напряжения для мониторинга параметров сети необходимо использовать трансформаторы или датчики напряжения. Нередко требуется реализовать мониторинг уже существующей сети, однако установленные в прошлом трансформаторы напряжения, характеристики при работе на высоких частотах которых не описаны в сопроводительной документации или на шильдиках приборов, как правило, надежно выполняют измерительную функцию лишь при номинальной частоте в 50 Гц. При этом соответствие устройства EN50160 подразумевает возможность его корректной работы в диапазоне частот до 2 кГц. Таким образом, актуальным становится вопрос о возможности применения традиционных существующих преобразователей в требуемом частотном диапазоне.

За редким исключением, встроенные трансформаторы напряжения являются индуктивными преобразователями.

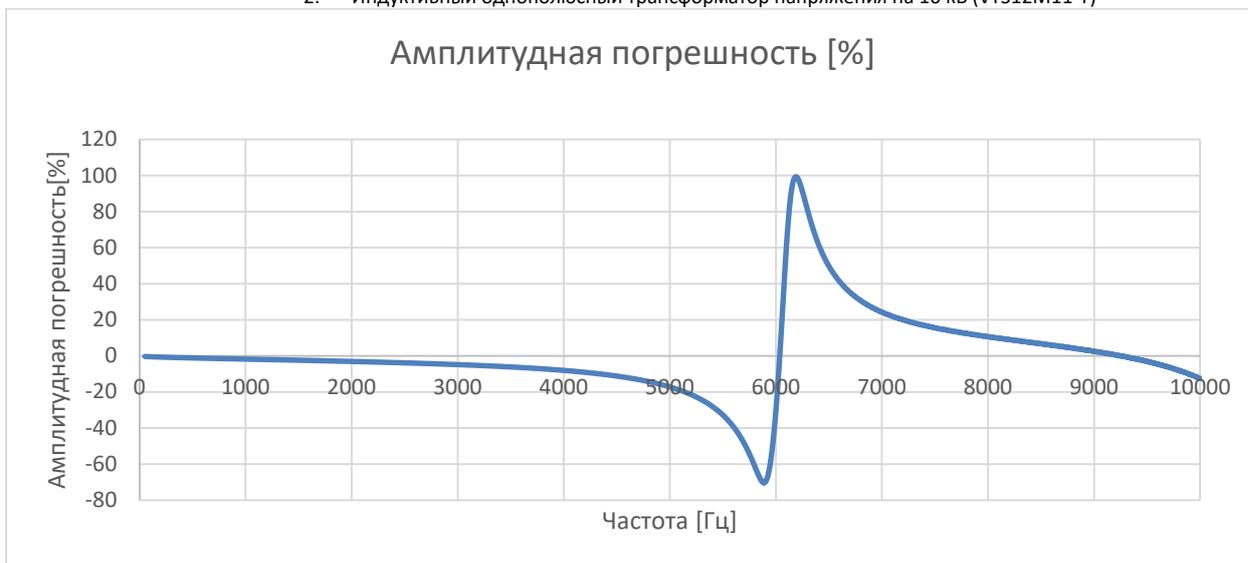


1. Схематическое изображение активной части трансформатора напряжения (средний уровень напряжения)

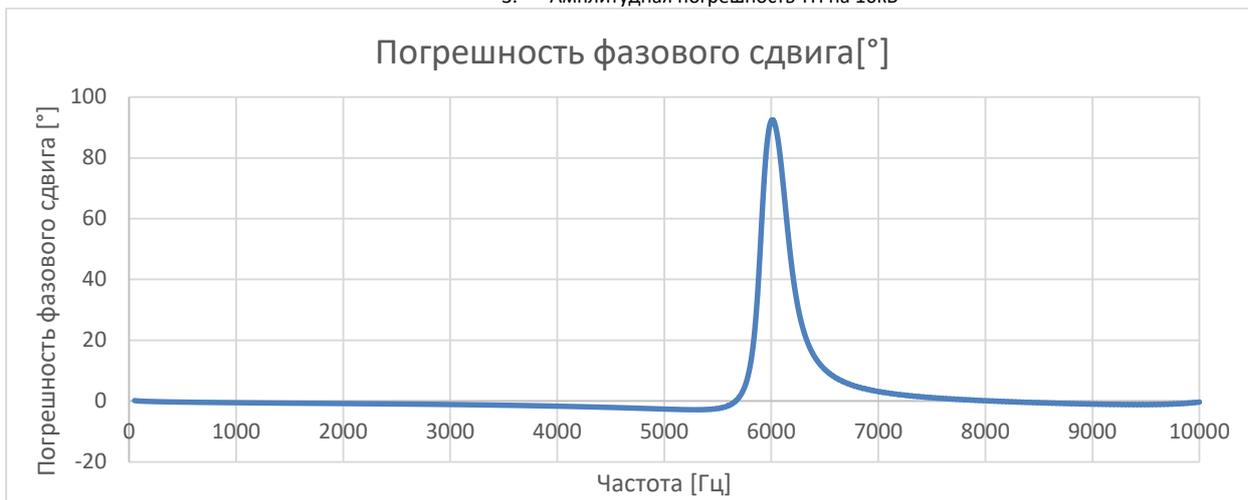
Их первичная обмотка в дополнение к омическому имеет сопротивление, обусловленное не только индуктивностью медной обмотки, а также паразитной ёмкостью систем изолированных друг от друга витков, что приводит к возникновению на определенной частоте резонанса в контуре. Для определения резонансной частоты коммерческие трансформаторы напряжения на 10кВ в настоящее время принято тестировать при помощи метода частотного сдвига с измерениями в 6400 точках в диапазоне частот до 10 кГц.



2. Индуктивный однополюсный трансформатор напряжения на 10 кВ (VTS12M11-T)



3. Амплитудная погрешность ТН на 10кВ



4. Погрешность фазового сдвига ТН на 10 кВ

Из графика видно, что резонанс происходит на частоте порядка 6 кГц, вблизи которой амплитудная погрешность достигает 100% а погрешность фазового сдвига 87 градусов. В то время как в диапазоне частоты от номинальной до порядка 5 кГц трансформатор относительно надежно передает сигнал с первичной обмотки, анализ качества параметров электрического тока с помощью данного устройства в диапазоне частот до 10 кГц будет некорректным.

Несмотря на нормативно регулируемые уровни напряжения, номенклатура каждого производителя измерительных преобразователей содержит большое количество трансформаторов напряжения с различными первичными катушками, позволяющих удовлетворить самые разнообразные требования заказчика. В случае если трансформаторы уже

поставлены заказчику, производитель может предоставить лишь грубые расчеты параметров резонанса, основанные на архивной технической документации. Однако на практике измеренная резонансная частота может отличаться от расчетной на несколько кГц, что ставит под вопрос правильность использования уже смонтированных устройств в требуемом частотном диапазоне.

Вклад технических и научных организаций CIGRE/CIREД («Мировой совет по большим энергетическим системам») обеспечивает операторов измерительных систем точной справочной информацией. Методическое пособие по измерениям параметров качества электроэнергии содержит нижеприведенную таблицу пригодности индуктивных ТН для анализа гармоник на различных уровнях напряжения.

	Уровень напряжения	Порядковые номера гармоник		
		2 ^я - 7 ^я	8 ^я - 20 ^я	21 ^я - 50 ^я
Среднее	10 кВ	Да	Да	Да
	20 кВ	Да	Да	Не определено
	30 кВ	Да	Нет	Нет
Высокое	60 кВ	Да	Да (?)	Не определено
	110 кВ	Да	Не определено	Нет
Экстравысокое	≥ 220 кВ	Не определено	Нет	Нет

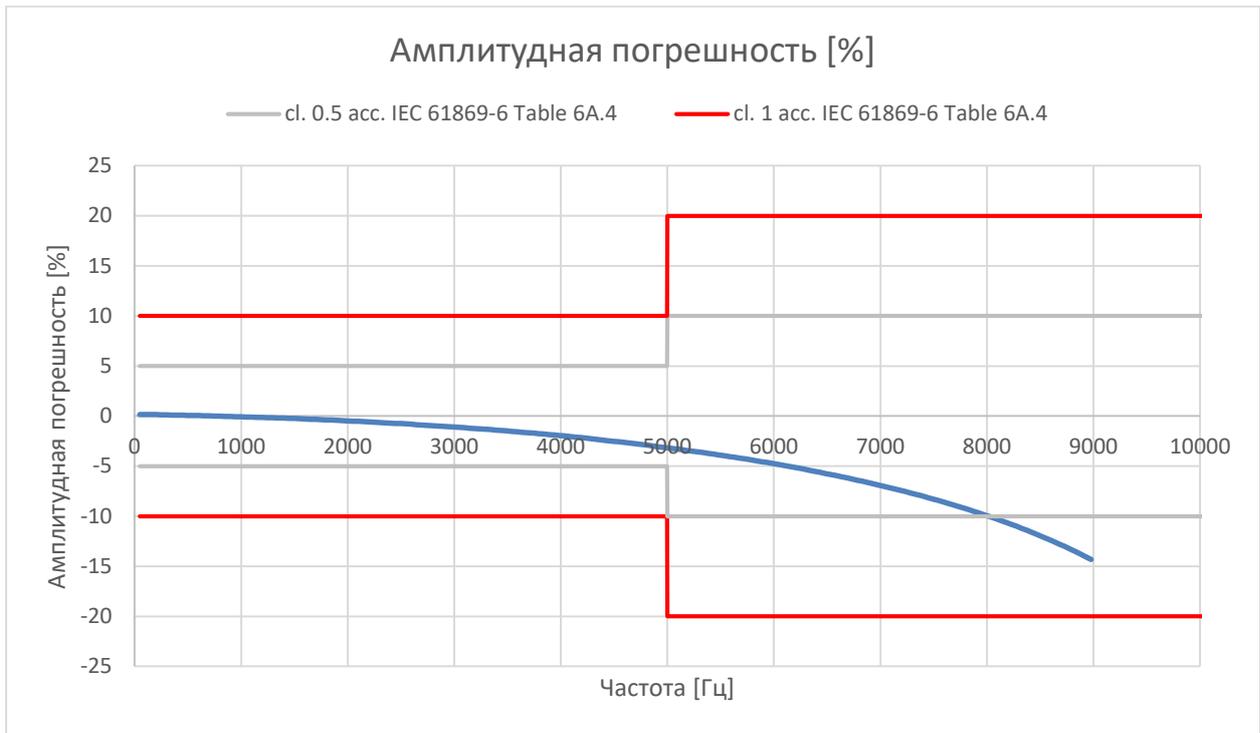
5. Пригодность индуктивных ТН для анализа гармоник (CIGRE/CIREД Guidelines for PQ monitoring WG C4.112 tech. b. 596)

Как указано выше, индуктивный трансформатор напряжения на 10 кВ может быть использован для анализа гармоник до 2,5 кГц, что согласуется с результатами экспериментальных измерений, представленных на рисунке 3. ТН на 20 кВ и 30 кВ пригодны для анализа гармоник до 20й и 7й включительно соответственно. Следовательно, для измерений в существующих системах согласно EN50160 допускается использовать любой ТН на 10 кВ, а трансформаторы на 20 и 30 кВ – ограничено, с учетом предоставленной изготовителем технической информации. Однако в современные национальные и международные стандарты все чаще включаются требования проведения анализа качества параметров электроэнергии в диапазоне до 10 кГц, что поднимает вопрос о правомочности использования традиционных индуктивных ТН.

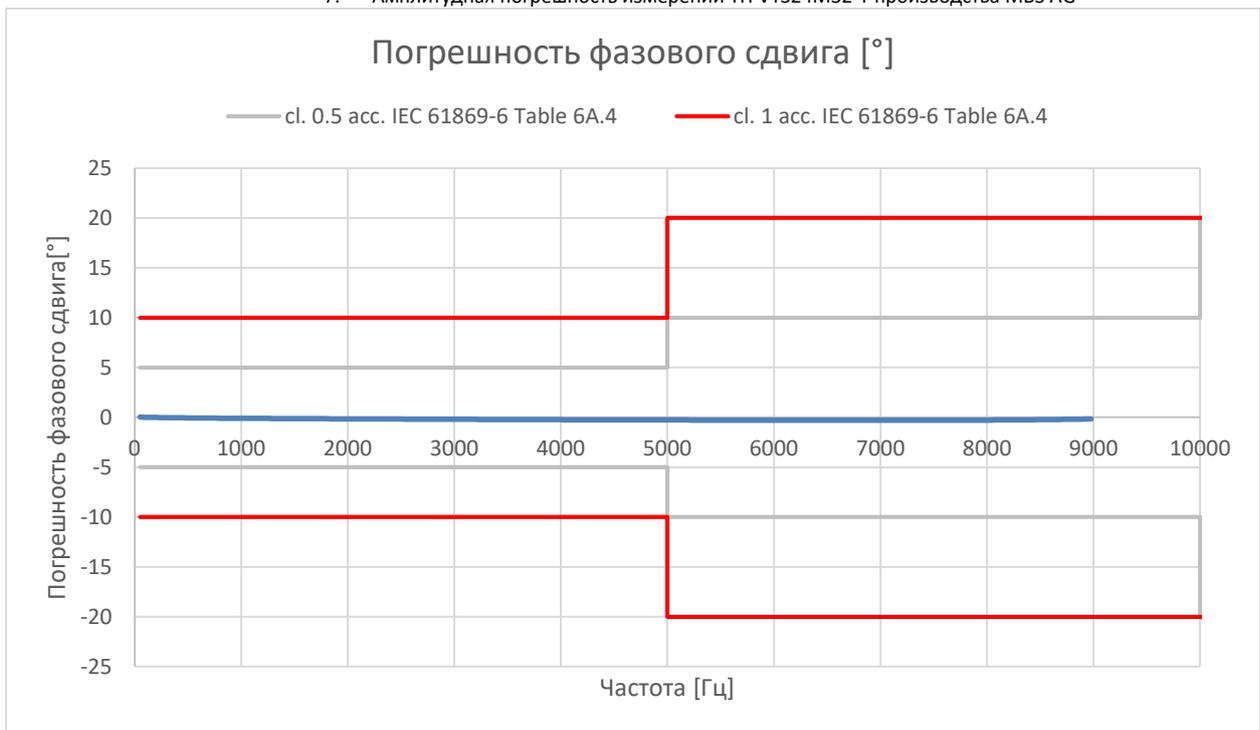
Компания MBS AG в ответ на современные запросы готова предложить заказчикам оптимизированный ТН на 24 кВ с широким частотным диапазоном, точность которых определена согласно МЭК 61869-6. Зависимость величины амплитудной и фазовой погрешности от частоты измеряемой сети представлена на изображениях ниже.



6. VTS24M32-T



7. Амплитудная погрешность измерений ТН VTS24M32-Т производства MBS AG



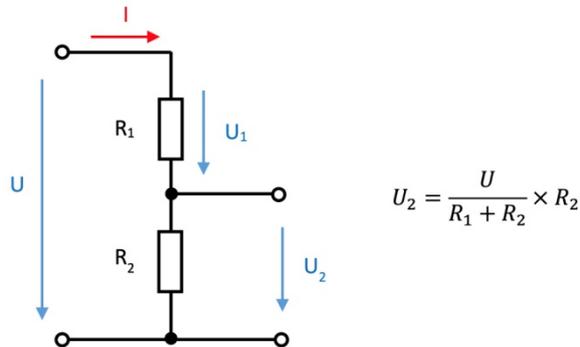
8. Фазовая погрешность измерений ТН VTS24M32-Т производства MBS AG

Оптимизированный ТН производства MBS имеет класс точности 0,5 в диапазоне частот от 50 Гц до 8 кГц, соответствует классу точности 1 в интервале от 8 до 10 кГц и гарантирует достоверность данных при анализе параметров качества электроэнергии в указанных диапазонах с требуемой точностью без использования элегазовой изоляции в конструкции устройства.

Применяемые в сетях низкого напряжения стандарты уже содержат указания по работе в диапазонах вплоть до 150 кГц, что со временем будет распространено и на устройства и сети среднего напряжения. В свою очередь, современные анализаторы параметров качества способны анализировать гармоники до 150 кГц, что уже однозначно необходимо для мониторинга состояния системы и нашло отражение в нормативном документе IEC 61000-2-2, часть 2.2, от мая 2018 («Электромагнитная совместимость. Часть 2: Условия окружающей среды. Раздел 2: Уровни совместимости для низкочастотных проводимых помех и прохождения сигналов в низковольтных системах коммунального энергоснабжения»).

Комитет по стандартам EN 50160 уже обсуждает нормы частотных уровней совместимости до 150 кГц, и перспективным представляется планирование измерений параметров качества электроэнергии в данном интервале частот для сокращения расходов на модернизацию систем в будущем, т.к. анализ состояния параметров сети в диапазоне до 150 кГц с использованием индуктивных трансформаторов невозможен, и даже для ТН на 24 кВ производства MBS первая точка резонанса смещается в интервал от 10 до 20 кГц.

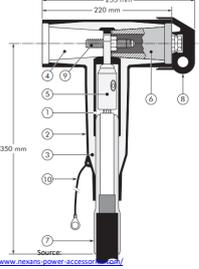
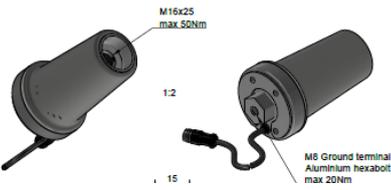
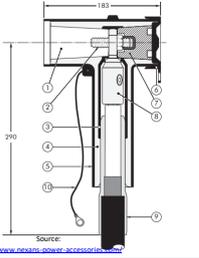
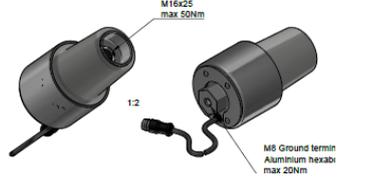
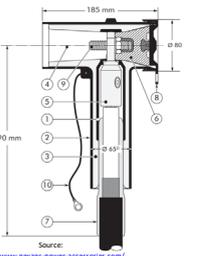
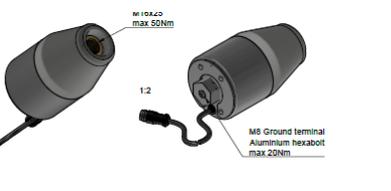
Датчики напряжения, сконструированные на базе делителя напряжения, позволяют преодолеть вышеупомянутые ограничения. Принципиальная схема делителя напряжения приведена ниже:



9. Принципиальная схема делителя напряжения

Уже в настоящий момент датчики напряжения в основном устанавливают в подстанциях существующих сетей с целью проведения дополнительных измерений на стороне среднего напряжения. Традиционным местом установки датчиков в распределительном устройстве являются т-образные кабельные адаптеры, однако измерительные панели старого типа часто не подлежат модернизации с применением индуктивных ТН ввиду банальной нехватки места. Инновационные датчики напряжения, приходящие на смену традиционным трансформаторам, позволяют организовать простой монтаж, более эргономичную сборку, и предназначены для установки в пазы т-образных кабельных адаптеров на место заглушки, что не требует дополнительного пространства или изменения конфигурации установки.

Габаритные размеры заглушек стандартных кабельных адаптеров унифицированы и определены согласно IEC 50181, в то время как формы пазов компактных т-образных коннекторов незначительно разнятся в зависимости от изготовителя. Для установки в стандартные адаптеры разработан датчик VSPxx-S (IEC 50181), в компактные - VAPxx-S, в новые компактные коннекторы фирмы Nexans (480TB) - VCPxx-S. Запатентованный дизайн измерительных датчиков производства MBS обеспечивает простой монтаж, не требующий высокой квалификации или специального инструмента, безопасность обслуживающего персонала, надежную фиксацию устройств в сборке, правильность измерений и отсутствие утечек.

<p>Интерфейс тип C согл. IEC 50181 →VSPxx-S</p>		
<p>Универсальный компактный датчик, совместим с Nexans (430ТВ), nkt, Tycso, Südkabel, Cellpack →VAPxx-S</p>		
<p>Компактный датчик Nexans 480ТВ →VCPxx-S</p>		

10. Типы форм датчиков напряжения (ур. изоляции 12 или 24 кВ), устанавливаемых в кабельные адаптеры
Для монтажа в комплектные распределительные устройства с воздушной изоляцией при первичной установке и модернизации разработаны датчики VS1xx-S.

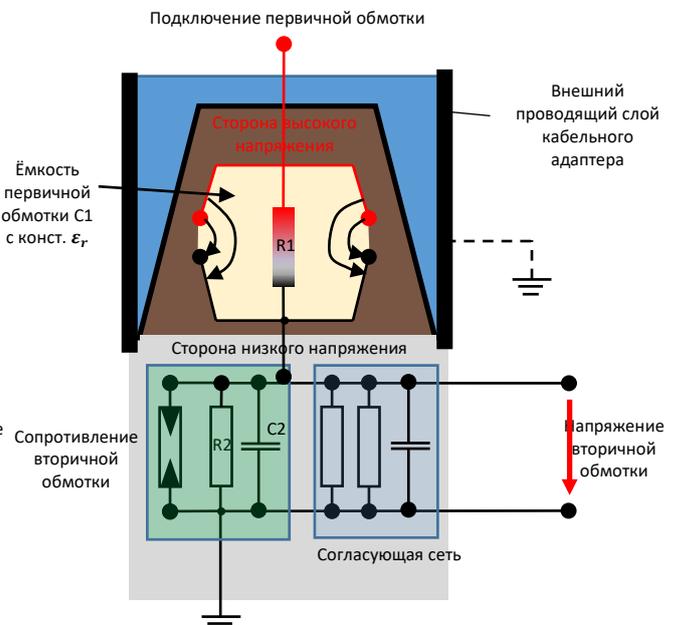
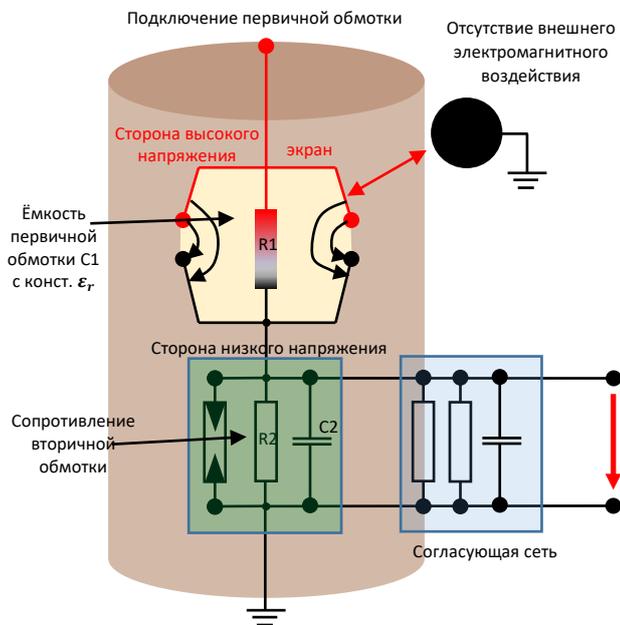


11. Датчик напряжения VS1xx-S для установки в распределительные устройства с воздушной изоляцией
В то время как класс точности датчика при работе на номинальной частоте 50 Гц гарантирован изготовителем и указывается на шильдике прибора, технические характеристики устройства при работе на других частотах не содержатся в прилагаемой документации. Как правило, производители лишь ограничиваются замечанием о том, что омические делители хорошо способны транслировать гармоники высших порядков. Но так ли это?
Омический делитель состоит из двух омических резисторов, чьи сопротивления, помимо прочего, имеют индуктивную и емкостную паразитные составляющие. Вокруг высоковольтного резистора также образуется емкость, так что в технической литературе вышеупомянутые делители называются омико-емкостными.

Датчик напряжения для КРУ с воздушной изоляцией



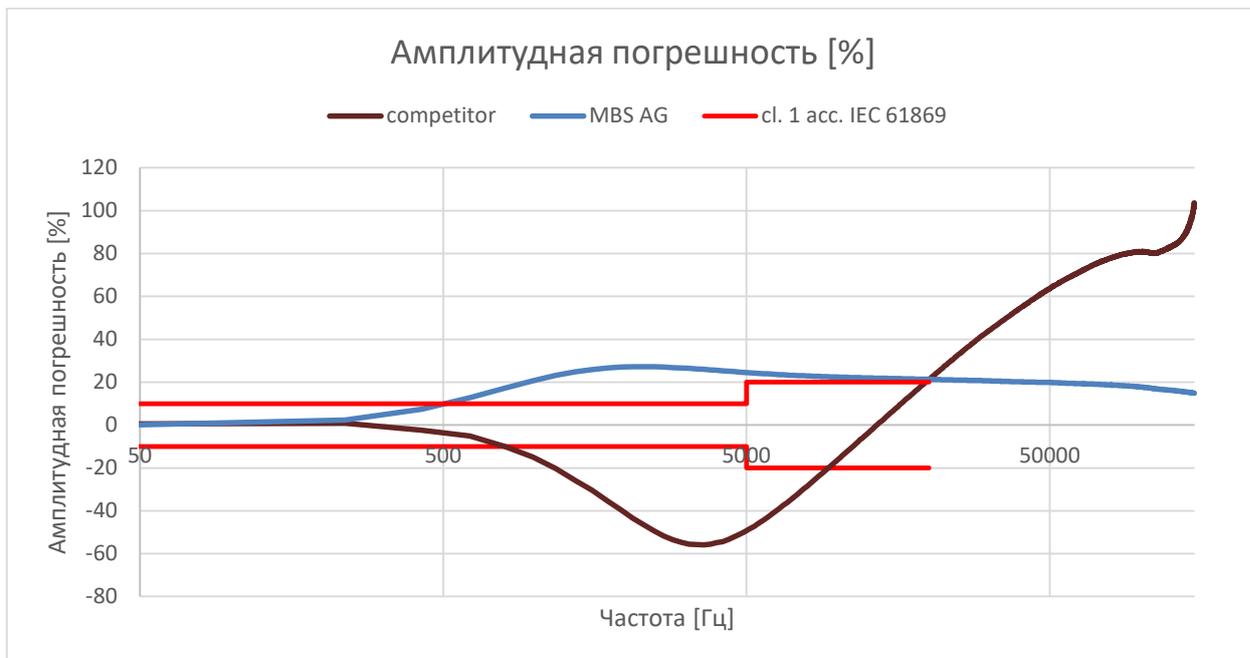
Датчик напряжения для установки в кабельный адаптер на место зашлупки



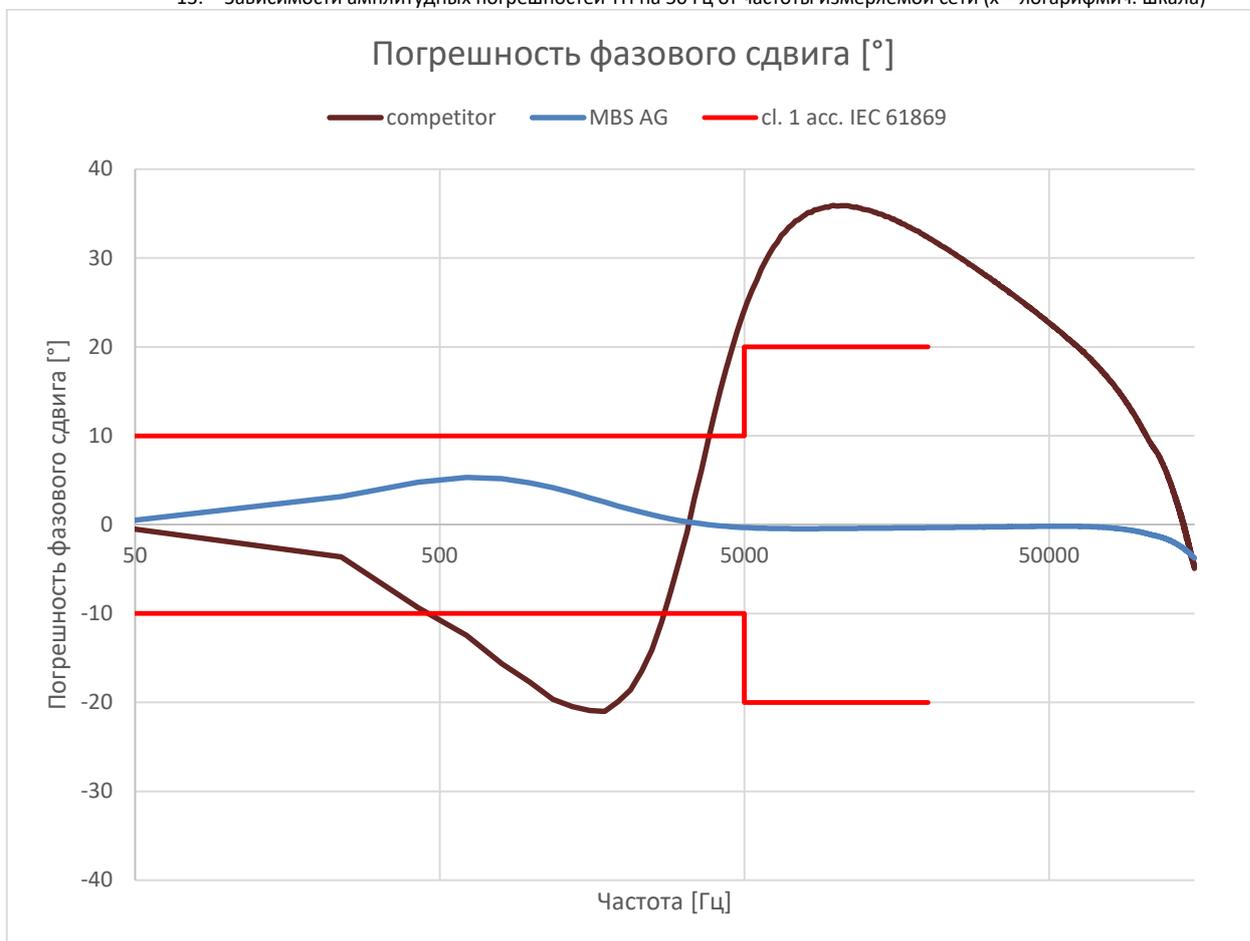
12. Принципиальные схемы датчика напряжения VS1xx-S и VAPxx-S

Ёмкость первичного резистора должна быть откалибрована на вторичной стороне. Для изготовления высокоточных датчиков внутри них из пассивных электронных компонентов была реализована согласующая цепь для точной калибровки устройства уже после заливки цепей материалом компаунда.

На следующих иллюстрациях приведены графики зависимости амплитудной и фазовой погрешности в зависимости от сетевой частоты в диапазоне от 50 Гц до 150 кГц для датчика производства MBS и конкурирующего производителя.



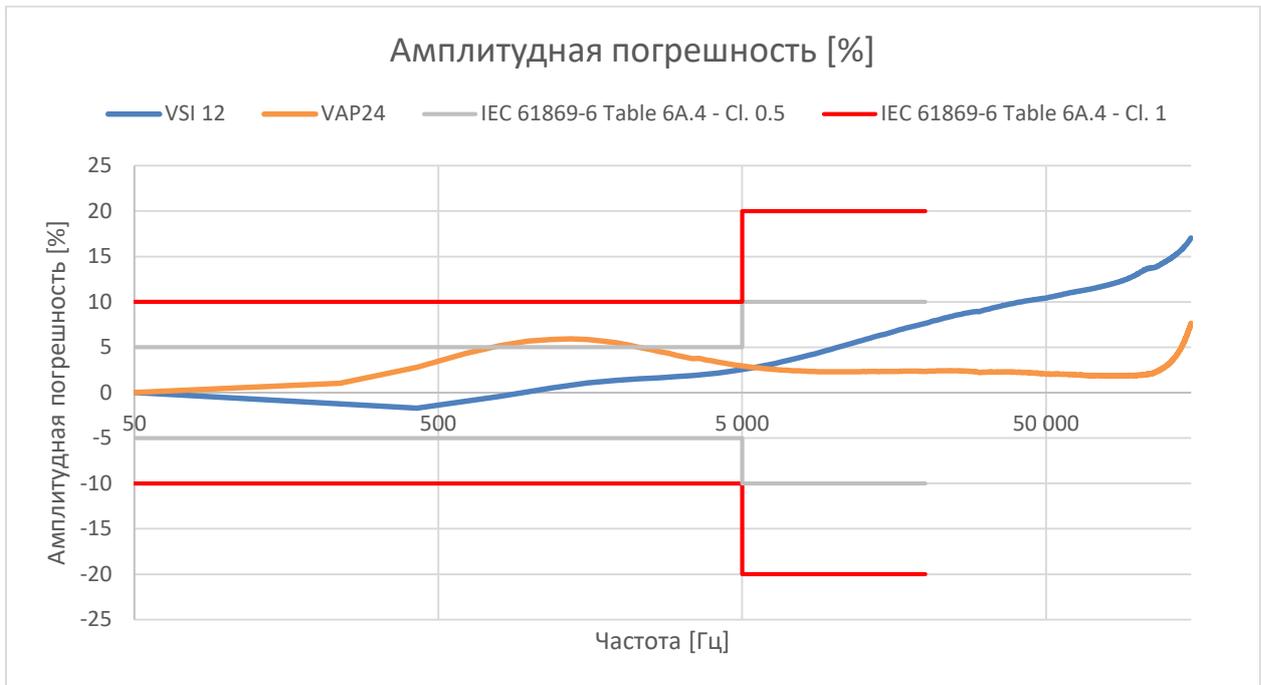
13. Зависимости амплитудных погрешностей ТН на 50 Гц от частоты измеряемой сети (x – логарифмич. шкала)



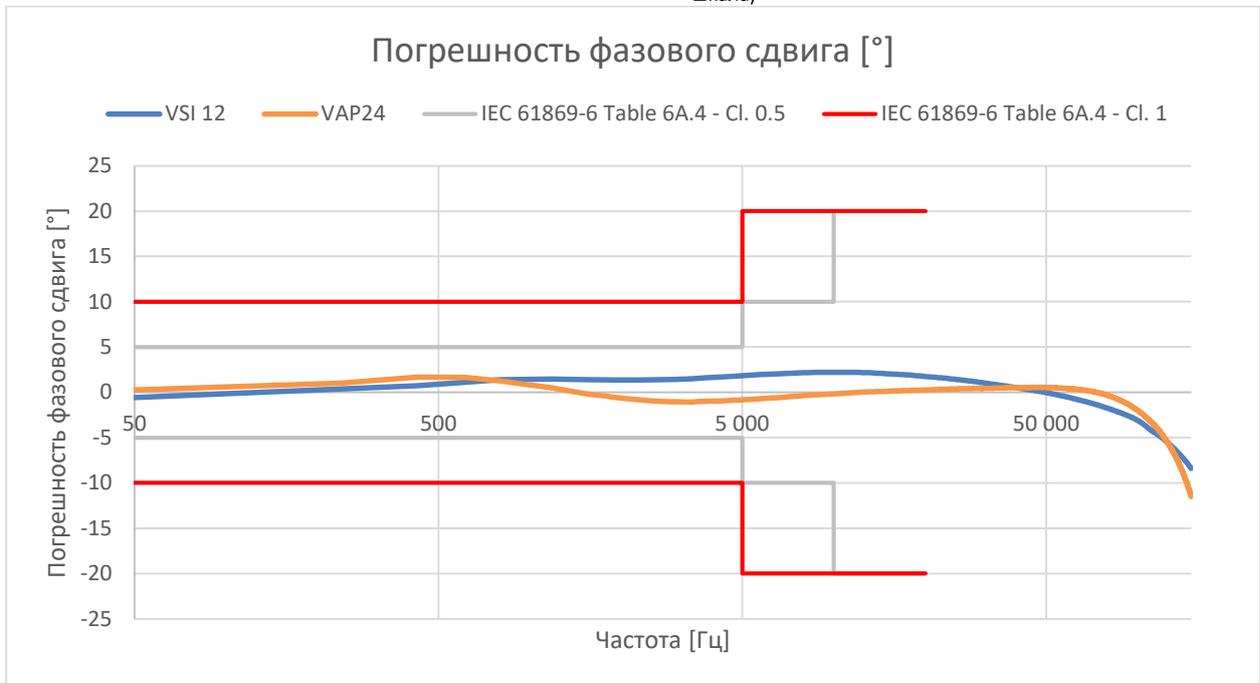
14. Зависимости фазовых погрешностей ТН на 50 Гц от частоты измеряемой сети (x – логарифмич. шкала)

Как видно из графиков, оба сенсора не соответствуют минимальным требованиям МЭК 61869-6 для устройств класса точности 1. Для оптимальной передачи датчиком параметров сети согласующая схема должна быть оптимизирована и на высоких частотах.

В настоящий момент MBS AG готова предложить пользователям калиброванный в широком диапазоне частот (до 150 кГц) датчик напряжения для установки в кабельные адаптеры или КРУ с воздушной изоляцией, который имеет класс точности 1 в соответствии с МЭК 61869-6. Измеренные величины погрешностей в зависимости от сетевой частоты представлены на изображениях, расположенных ниже.

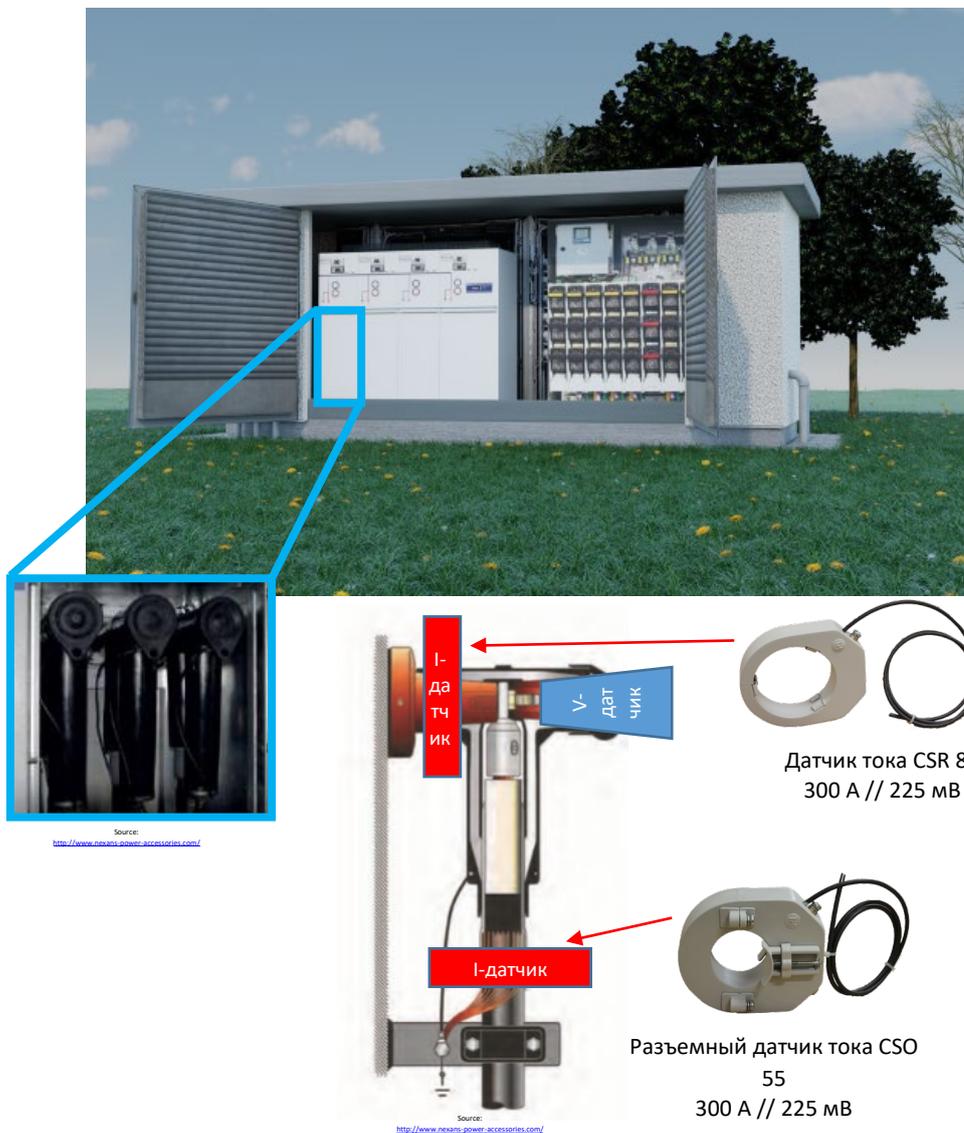


15. Зависимости амплитудных погрешностей калиброванных ТН VAP и VSI от частоты измеряемой сети (х – логарифмич. шкала)



16. Зависимости фазовых погрешностей калиброванных ТН VAP и VSI от частоты измеряемой сети (х – логарифмич. шкала)

Датчики напряжения обычно используются в комплекте с совместимыми датчиками тока. MBS AG производит специальные датчики тока с выходным сигналом по напряжению для установки в РУ на проводники и стандартные кабельные адаптеры различных производителей.



17. Схема монтажа датчиков тока и напряжения в локальном РУ на стороне среднего напряжения

При выборе измерительного устройства следует обратить внимание на тот факт, что максимальное генерируемое напряжение на вторичной обмотке рассматриваемых в статье датчиков напряжения не превышает 10 В, что согласуется с диапазонами входных сигналов различных измерительных приборов и современными национальными европейскими нормами (напр. в Германии $3,25/\sqrt{3}$ В). В отличие от распространенных в настоящее время классических измерительных трансформаторов с токовым сигналом 1 или 5 А на вторичной обмотке или номинальным вторичным напряжением $100/\sqrt{3}$ В, датчики тока традиционно изготавливаются с максимальным напряжением на вторичной обмотке 225 или же 333 мВ.

В то время как сопротивление для входов датчика тока ограничено лишь нижним порогом в 20 кОм, датчики напряжения должны точно соответствовать входному сопротивлению измерительного устройства с учетом сопротивления соединительного кабеля. Т.к. датчик напряжения калибруется для работы с определенной нагрузкой, последующая замена типа измерительного устройства или параллельное подключение дополнительного блока зачастую невозможны.

Сегодня в странах передовых энергетик уже активно идет полномасштабная модернизация сетей и локальных подстанций с реализацией мониторинга состояния сетей и качества электроэнергии на всех уровнях напряжения. В ходе разработки новых стандартов и первых мероприятий по модернизации объектов генерации и распределения электроэнергии на уровне среднего напряжения в первую очередь внимание уделяется датчикам напряжения и тока. Подключаемые к ним измерительные приборы должны соответствовать международному стандарту безопасности измерений CAT IV по МЭК. Примером используемых в упомянутых приложениях устройств может послужить UMD 710MVU от фирмы PQ Plus.



- 3.25/√3 В; вход для датчика напряжения (средний уровень).
- Частота дискретизации 28.8 кГц.
- Анализ до 128й гармоники.
- Функция осциллографа для тока и напряжения.
- Анализ параметров качества напряжения согласно EN 50160 (class A), EN 61000-2-2, EN 61000-2-4, EN 61000-2-12.
- Встроенный регистратор событий.
- Опционально – регистрация супрагармоник в диапазоне частот от 2 до 9 кГц.

18. UMD 710MVU с низковольтным входом для датчиков напряжения

В дополнение к подходящим для датчиков напряжения входам среди достоинств прибора можно выделить возможность обрабатывать данные на основе метода FFT (анализ на основе быстрого преобразования Фурье) в интервале частот от номинальной до 9 кГц.

Датчики напряжения допускают входное сопротивление измерительного прибора свыше 200 кОм. Это значение вместе с требуемой длиной соединительного кабеля должно быть сообщено производителю датчика при размещении заказа для точной калибровки в соответствии с необходимой конфигурацией. Возможность варьировать подключенную нагрузку в широком диапазоне, как у обычных трансформаторов напряжения, потребовала бы активной электроники на стороне датчика, что способно значительно сократить срок их службы. Сделав ставку на надежность и долговечность, компания MBS AG сосредоточилась на разработке пассивных устройств, рассчитанных на срок службы до 30 лет.

В настоящее время в дополнение к датчикам напряжения с уровнем изоляции до 12 или 24 кВ MBS готовит к выходу частотнооптимизированную (до 150 кГц) модель на 36 кВ.



19. Частотнооптимизированный датчик напряжения с уровнем изоляции 36 кВ

Помимо широкого частотного диапазона (от 9 до 150 кГц) стабильной работы согласно нормам IEC при выборе датчика напряжения необходимо обратить внимание на следующие пункты:

- стойкость к скачкам температур и резкому изменению влажности окружающего воздуха;
- широкий диапазон рабочих температур и температур хранения;
- крепежный винт должен быть изготовлен из металла, дабы предотвратить его износ или повреждения при высоких моментах затяжки в сочетании с использованием литых конструкций;
- габаритные размеры должны позволять монтировать оборудование без изменения конфигурации сборки;
- датчики по возможности не должны повреждаться в процессе испытания методом VLF (СНЧ) при установке в т-образные кабельные коннекторы;
- датчик должен быть изготовлен с использованием пассивной технологии, с целью снижения стоимости, увеличения срока службы и надежности устройства.

Роланд Бюргер (MBS AG) и Иенс Шюбель (PQ Plus)