

# ISPD – интеллектуальные датчики для контроля частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования

## 1. Назначение датчиков серии ISPD

Контроль технического состояния высоковольтного оборудования на основании измерения и анализа частичных разрядов (ЧР) в изоляции все более широко используется на практике. Для некоторых типов оборудования, например, для высоковольтных кабельных линий и элегазового оборудования, он является единственно возможным.

Практическому применению этого современного и эффективного диагностического метода препятствуют две его особенности:

- Высокая стоимость программно-технических комплексов, предназначенных для реализации метода диагностики состояния высоковольтного оборудования на основе регистрации и анализа частичных разрядов.

- Отсутствие общепринятой нормативной документации и пороговых критериев для оценки состояния оборудования. Это затрудняет применение данного метода, так как для проведения процедуры диагностики требуется наличие специально подготовленного персонала.

Для более эффективного практического внедрения метода контроля высоковольтной изоляции по параметрам частичных разрядов фирмой ДИМРУС разработана новая серия интеллектуальных датчиков марки ISPD (Intellectual Sensor for Partial Discharge).

При разработке этих датчиков были использованы современные технические и программные решения, в результате чего, во-первых, удалось снизить стоимость поставки оборудования. Во-вторых, внедрение экспертных алгоритмов дало возможность получать диагностические заключения, понятные персоналу.

### Достоинства датчиков частичных разрядов ISPD

Датчики серии ISPD от используемых в настоящее время средств регистрации и анализа частичных разрядов имеют два существенных отличия:

- Компактное универсальное исполнение электронной части датчиков, которое может быть использовано для контроля состояния изоляции различного высоковольтного оборудования. По этой причине стоимость датчиков ISPD существенно ниже, чем у используемых в настоящее время переносных приборов и систем мониторинга.

- В программное обеспечение датчиков ISPD встроена экспертная система, позволяющая в автоматическом режиме выявлять дефекты в изоляции, рассчитывать остаточный ресурс работы оборудования. Заключение экспертной части датчиков ISPD достаточны для организации оптимального управления эксплуатацией высоковольтного оборудования.

Эти технические и программные решения позволяют изменить функции и назначение систем контроля частичных разрядов в высоковольтном оборудовании. Из средств регистрации частичных разрядов, в которых задачей максимум была корректная отстройка от помех, устройства серии ISPD превратились в законченные интеллектуальные системы диагностического

мониторинга, позволяющие управлять работой и ремонтами оборудования по техническому состоянию.

## 2. Конструктивное исполнение датчиков

Основой интеллектуальных датчиков частичных разрядов серии ISPD является компактный универсальный электронный модуль, состоящий из трех плат.

Эти платы в датчике ISPD для гибкости функций и практического удобства имеют различное функциональное назначение, каждая из них решает свои задачи. Соединение плат между собой производится при помощи разъемов.

Назначение плат:

- Базовая процессорная плата для регистрации и обработки импульсов частичных разрядов. Она является универсальной для всех типов датчиков.

- Входная плата для подключения датчиков частичных разрядов и первичной

обработки сигналов. Различается для разных типов и количества подключаемых первичных датчиков частичных разрядов.

- Плата выходных интерфейсов и питания датчика. Имеет различное исполнение в зависимости от конструктивного исполнения датчика ISPD.

Базовая процессорная плата универсальной конструкции для всех типов датчиков автоматически определяет модификацию подключенных к ней входной и интерфейсной плат, что позволяет автоматически модифицировать встроенное программное обеспечение регистрации и экспертной обработки импульсов частичных разрядов.

Входная плата датчика ISPD имеет несколько модификаций, различающихся типом подключаемых датчиков частичных разрядов и количеством входных каналов. Физически все модификации входных плат имеют одинаковые размеры и подключаются к одному разъему процессорной платы.

В зависимости от модификации входной платы к ней могут подключаться: акустические датчики частичных разрядов (АС), датчики высокочастотного (HF), «более» высокочастотного (VHF) и сверхвысокочастотного (UHF) диапазонов частот.

Для проведения специальных измерений разработаны и производятся входные платы с возможностью подключения двух и даже трех датчиков одного или нескольких частотных диапазонов.

Плата выходных интерфейсов и источника питания имеет несколько модификаций. На каждой модификации платы располагаются один выходной интерфейс и один вид источника питания.

Возможные способы передачи информации о техническом состоянии контролируемого оборудования: проводные интерфейсы RS-485 и POE, беспроводные интерфейсы Bluetooth и LoRa. При помощи интерфейса связи Bluetooth производится передача исходной и диагностической информации на сравнительно небольшое расстояние, до 10÷30 метров. При помощи беспроводного интерфейса марки LoRa (Long Range) информация о



Рис. 1. Примеры конструктивного исполнения датчиков серии ISPD

результатах работы системы мониторинга может передаваться на большие расстояния, до километра, но только в небольших объемах.

Питание электронной части датчиков ISPD может осуществляться от источников различного типа, располагаемых на общей плате с техническими средствами выходных интерфейсов. Это может быть стандартный блок AC/DC, питание по сети Ethernet (POE), батарея долгого срока службы (до 5 лет), солнечная панель, возможна организация комбинированного питания датчика.

Конструктивное исполнение корпуса датчика ISPD зависит от того, на каком высоковольтном оборудовании будет проводиться монтаж: на трансформаторе, КРУЭ, высоковольтном кабеле и т. д. Различные модификации корпуса датчика возможны даже для одного вида оборудования, если оно имеет технические особенности в конструкции.

Стандартно на корпусе интеллектуального датчика ISPD есть входной разъем, к которому подключается первичный датчик частичных разрядов, хотя возможна поставка модификации со встроенным внутрь корпуса первичным датчиком частичных разрядов.

Внутри корпуса могут быть встроены первичные датчики частичных разрядов трех типов: ультразвуковой, датчик контроля растекания поверхностных токов диапазона VHF и электромагнитная антенна UHF диапазона частот.

### 3. Экспертная диагностическая система

Максимальным преимуществом интеллектуальных датчиков частичных разрядов перед обычными датчиками является наличие в программном обеспечении встроенной экспертной системы, ориентированной на решение вопросов оптимального управления эксплуатацией высоковольтного оборудования.

При помощи этой экспертной системы производится определение типа дефекта в изоляции, являющегося источником частичных разрядов.

Далее производится оценка опасности выявленных дефектов для дальнейшей эксплуатации оборудования.

На последнем этапе работы экспертной системы определяется остаточный ресурс изоляции, количественно равный времени до перехода оборудования в категорию «предавварийное состояние».

Знание остаточного ресурса оборудования позволяет решить вопрос об оптимальных сроках и объемах проведения ремонтных и сервисных работ.

Встроенная в интеллектуальный датчик ISPD экспертная диагностическая система позволяет в автоматическом режиме решать несколько важных задач.

#### 3.1. Фильтрация импульсов помех

Наиболее сложной задачей, в максимальной степени влияющей на достоверность работы методов регистрации и анализа частичных разрядов, является эффективная отстройка от высокочастотных помех.

Фильтрация импульсов помех при регистрации частичных разрядов обычно осуществляется двумя группами методов: аппаратными и алгоритмическими.

Аппаратные методы фильтрации:

- Начальная фильтрация помех осуществляется за счет использования в измерительных приборах входных цепей с фиксированной частотной полосой пропускания. Необходимый диапазон частот выбирается так, чтобы максимально эффективно регистрировать импульсы тех частот, в которых можно ожидать импульсы от частичных разрядов от дефектов, возникающих в оборудовании.

- Регистрируются только те высокочастотные сигналы, длительность которых не превышает определенного времени. Сигналы, представляющие собой периодические колебания, не должны регистрироваться, так как они не могут генерироваться дефектами в изоляции.

- Регистрируемые высокочастотные импульсы должны следовать через определенные интервалы времени. Это тоже определяется физическими особенностями возникновения и развития дефектов в изоляции.

Если прибор контроля частичных разрядов имеет два и более входных канала, и позволяет проводить синхронную регистрацию по этим каналам, то в нем могут быть реализованы более сложные аппаратные средства отстройки от помех. Эти методы базируются на сравнении сигналов на входах от одного и того же частичного разряда в изоляции:

- Контроль разницы во времени прихода импульсов на разные входы измерительного прибора. В литературе этот метод часто называется «Time Of Arrival» - разница во времени прибытия. Метод базируется на том, что чем дальше датчик будет располагаться от места возникновения разряда, тем позже туда попадет высокочастотный импульс от разряда.

- Сравнение амплитуд импульсов, зарегистрированных в нескольких каналах прибора. Импульс, который имеет максимальную амплитуду, обычно соответствует датчику, который расположен максимально близко к месту возникновения частичного разряда. Чем дальше датчик будет располагаться от места возникновения разряда, тем меньше будет амплитуда импульса. Этот метод часто используется для определения дефектной фазы трехфазного оборудования, когда используются три фазных датчика. За истинный частичный разряд принимается импульс с максимальной амплитудой, все остальные импульсы бракуются как помехи, наведенные с дефектной фазы на датчики в других фазах.

Алгоритмические методы борьбы с помехами:

- Для максимальной информативности работы экспертной диагностической системы регистрация импульсов частичных разрядов должна производиться с привязкой к синусоиде питающей сети. В этом случае можно построить привязанное к фазе распределение импульсов ЧР, которое обычно обозначается как фазочастотное PRPD распределение. Это очень важное распределение импульсов ЧР, потому что только на его основании производится определение типа дефекта в изоляции оборудования. Использование PRPD также позволяет проводить фильтрацию синхронных и асинхронных помех.

- После того, как импульс частичного разряда будет зарегистрирован, появляется возможность определить его частотные свойства и скорость затухания. Эти параметры для каждого дефекта в изоляции являются уникальными и имеют примерно одинаковую величину. Таким образом, можно не только выделить импульсы частичных разрядов на фоне помех, но и при необходимости разделить импульсы от нескольких дефектов в изоляции. На таком принципе работает время-частотное распределение импульсов, которое называется в литературе PD-Map.

- Многоканальное синхронное измерение импульсов ЧР дает возможность проводить различный дополнительный анализ импульсов, включающий в себя фильтрацию синхронных и асинхронных помех и локацию мест возникновения дефектов в высоковольтном оборудовании.

### 3.2. Расчет интегральных параметров ЧР

Каждому типу дефекта в изоляции высоковольтного оборудования соответствует определенная частота возникновения частичных разрядов, определяемая параметром импульсов на период синусоиды питающей сети. Реальная частота возникновения импульсов может составлять от нескольких сотен на один период питающей сети до одного импульса в несколько минут, т. е. через сотни периодов сети.

В зависимости от типа ожидаемых дефектов в изоляции контролируемого оборудования в регистрирующем приборе необходимо проводить статистическую обработку и соответствующим образом настраивать параметры усреднения информации.

По результатам проведенной статистической обработки импульсов частичных разрядов рассчитываются интегральные параметры импульсов частичных разрядов.

Существует несколько типов интегральных параметров, при помощи которых описывают наличие и степень развития дефектов в изоляции.

В первую очередь это количественные параметры единичных наиболее характерных импульсов частичных разрядов. Указывается амплитуда или самых больших, или наиболее часто возникающих импульсов. Амплитуда показывается в размерности регистрируемого сигнала от датчика, т. е. в милливольтках. Если измерительная схема предварительно калибровалась при помощи градуировочного генератора, то амплитуда импульсов указывается в размерности заряда, т. е. в пикокулонах.

В качестве интегральных параметров используются также количественные (частотные) оценки регистрируемых импульсов частичных разрядов. Они показывают, какое количество импульсов возникает в единицу времени. При помощи таких параметров разделяют периодические и случайные импульсы частичных разрядов.

Наиболее корректно в качестве интегральных параметров частичных разрядов использовать энергетические параметры, так как они определяют разрушающее воздействие частичных разрядов на состояние изоляции. Чаще всего на практике применяется универсальный энергетический параметр PDI (**P**artial **D**ischarge **I**ntensity), который соответствует суммарной мощности частичных разрядов.

### 3.3. Определение типа дефекта в изоляции

Определение типа дефекта в изоляции базируется на основе анализа физических процессов возникновения и развития частичных разрядов в высоковольтной изоляции.

Сам по себе такой анализ является сложным и трудоемким, но на практике существует много формальных признаков, знание которых позволяет достаточно корректно определить тип дефекта.

- В зависимости от типа возникшего дефекта частичные разряды могут возникать на положительной или отрицательной полуволне питающего напряжения, или на двух сразу.

- Частичные разряды могут возникать на участке роста питающего напряжения или в районе максимума приложенного напряжения.

- Амплитуда частичных разрядов может возрастать по мере роста напряжения питающей сети или будет оставаться постоянной, не зависящей от фазы напряжения питающей сети.

- Разряды могут возникать на участках изоляции при приложении фазного или линейного напряжений трехфазной питающей сети, в каждом случае они будут связаны с фазой соответствующего напряжения.

Все характерные признаки того или иного дефекта лучше всего выявлять и анализировать при помощи стандартного PRPD распределения импульсов частичных разрядов. На этом распределении как раз показывается связь времени возникновения зарегистрированных импульсов частичных разрядов и их амплитуд с фазой напряжения питающей сети.

Для каждого типа дефекта существуют характерное распределение импульсов частичных разрядов на PRPD распределении, своеобразный специфический аналог «отпечатка пальца» дефекта, свойственный только этому виду дефекта в изоляции.

Соответственно, сам процесс диагностики типа дефекта в изоляции по форме PRPD очень похож на процедуру дактилоскопической экспертизы. Задача стоит в нахождении в имеющейся базе отпечатков похожего, который более всего соответствует анализируемому PRPD распределению.

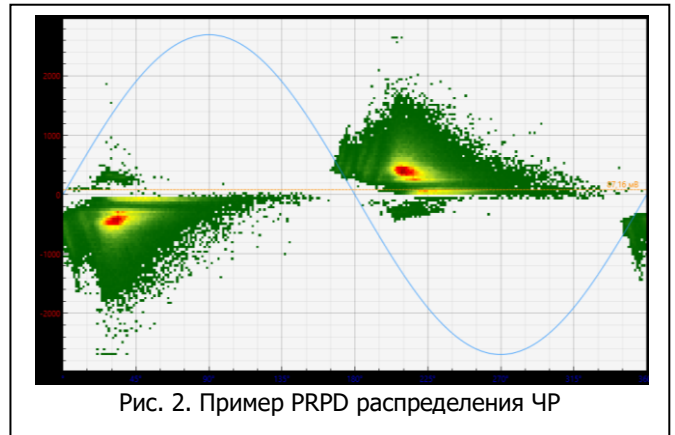


Рис. 2. Пример PRPD распределения ЧР

Исходно количество возможных типов дефектов в изоляции, диагностируемых по форме PRPD, незначительно, не более пяти. Это дефекты на высоковольтном и земляном электродах, дефекты внутри изоляции, плавающий потенциал и, наверное, расслоение внутри изоляции.

В силу особенностей конструктивного исполнения изоляционных элементов различного высоковольтного оборудования количество возможных типов дефектов, которые могут возникнуть в изоляции, значительно возрастает.

Реальная экспертная система диагностики дефектов в изоляции, работающая с высоковольтным оборудованием разных типов, должна уметь различать не менее 20 разных дефектов и их модификаций. Для этого в базе данных экспертной системы должно храниться соответствующее количество «отпечатков пальцев» в виде базовых или опорных PRPD распределений.

Используя эту информация экспертная система должна на основании анализа одного PRPD распределения выявлять один или даже несколько дефектов в изоляции контролируемого оборудования.

Итоговая достоверность работы любой системы контроля частичных разрядов зависит от соотношения количества (PDI) импульсов, которые были отнесены экспертной системы к диагностированным дефектам в анализируемом PRPD распределении, к общему количеству импульсов.

Наличие неучтенных экспертной системой высокочастотных импульсов в PRPD распределении говорит о наличии хотя бы одной из двух проблем:

- Недостаточная эффективность работы аппаратных и алгоритмических средств фильтрации высокочастотных помех, в результате чего не все импульсы помех

отфильтровываются. Чем больше пропущено помех, тем ниже будет эффективность работы системы контроля ЧР.

- Отсутствие в базе данных экспертной системы такого базового PRPD распределения, которое будет соответствовать распределению импульсов, оставшихся после проведения диагностики. Дополняя базу данных новыми базовыми PRPD распределениями, иногда даже экзотическими и редко встречающимися, можно повышать достоверность работы оборудования контроля и анализа частичных разрядов.

### 3.4. Остаточный ресурс оборудования

Наиболее важным и самым ожидаемым для эксплуатационного персонала является итоговое заключение системы мониторинга и диагностики о расчетной величине остаточного ресурса изоляции высоковольтного оборудования.

Само понятие остаточного ресурса в разных литературных источниках имеет достаточно много определений и различный смысл. Это является следствием того, что в этих источниках понятие остаточного ресурса используется при решении разных технологических задач.

В системах обслуживания оборудования по техническому состоянию величина остаточного ресурса количественно равна времени эксплуатации оборудования, оставшемуся до перехода его в категорию «предавариальное состояние». На основании остаточного ресурса определяется оптимальный срок и объем проведения ремонтных и сервисных работ.

Для того, чтобы корректно оценить остаточный ресурс, экспертная система мониторинга и диагностики должна комплексно анализировать текущее техническое состояние оборудования. При этом необходимо обязательно учитывать все изменения технического состояния, которые произошли с оборудованием на предшествующих этапах эксплуатации.

Процедура прогнозирования развития технического состояния оборудования обычно производится с использованием математических моделей оборудования, которые часто называют цифровыми двойниками.

Изменение технического состояния оборудования в эксплуатации происходит по совокупности двух сценариев, которые называют нормальным и аномальным. Нормальное изменение состояния происходит по мере постепенного износа и старения оборудования. На определенных этапах эксплуатации в оборудовании возможно возникновение дефектов, каждый из которых ускоряет процесс старения изоляции. Это дефектное или аномальное изменение технического состояния.

Изменение скорости ухудшения параметров в процессе эксплуатации зависит от типа возникшего дефекта и особенностей конструкции оборудования. Корректно математически описать влияние различных дефектов, а тем более их совокупности, на скорость изменения технического состояния оборудования в цифровом двойнике практически невозможно.

Оптимальным решением для учета аномальных процессов ухудшения состояния является использование адаптивных математических моделей, в которых предусмотрены алгоритмы автоматической корректировки коэффициентов и параметров цифрового двойника оборудования.

Целью адаптации является учет влияния выявленных экспертной системой дефектов и степени их развития на текущее состояние оборудования. Это приводит к тому, что для каждой единицы контролируемого оборудования создается своя уникальная математическая модель,

максимально корректно учитывающая особенности конструкции и эксплуатации оборудования.

Определение остаточного ресурса высоковольтной изоляции оборудования по частичным разрядам является очень сложной технологической процедурой, так как имеет свои специфические особенности:

- Высоковольтная изоляция практически всегда рассчитана на полный срок службы оборудования.
- В исправной высоковольтной изоляции частичные разряды отсутствуют или очень малы. Если они и есть, то они стабильны по своему количеству и уровню.

В силу этих особенностей оценка величины остаточного ресурса изоляции по частичным разрядам должна производиться только на основании анализа параметров аномального износа. Этот износ однозначно связан с появлением и развитием дефектов, приводящих к деградации изоляции. Математические модели ускорения старения изоляции должны максимально корректно учитывать возникновение и прогнозировать развитие дефектных состояний.

Дополнительной особенностью расчета является то, что математическая модель, описывающая изменение остаточного ресурса изоляции, строится на основе учета не всех частичных разрядов, а только тех, которые были учтены при определении типов возникших в изоляции дефектов.

Импульсы высокочастотных помех и все не идентифицированные частичные разряды, которые не были включены экспертной диагностической системой в «отпечатки пальцев» выявленных дефектов, в математической модели расчета остаточного ресурса не должны учитываться.

### 3.5. Датчик ISPD - базовый элемент системы управления эксплуатацией оборудования

Достоинствами интеллектуальных датчиков серии ISPD являются не только наличие разных конструктивных модификаций, способных работать в различных диапазонах частот и эффективно отфильтровывать импульсы высокочастотных помех.

Главным преимуществом практического применения датчиков ISPD является наличие в них встроенной автоматизированной экспертной системы, способной осуществлять весь вышеприведенный комплекс аналитической обработки исходной информации.

Итогом работы экспертной системы является описание выявленных дефектов и расчетная величина остаточного ресурса работы изоляции. Полная информация о зарегистрированных частичных разрядах и полученные экспертные заключения могут быть переданы по проводному или беспроводному интерфейсам на общий сервер управления эксплуатацией оборудования со специализированным программным обеспечением.

В результате интеллектуальный датчик частичных разрядов марки ISPD является законченным диагностическим устройством, его выходная информация не нуждается в дополнительной обработке. В ней уже содержатся все сведения, необходимые для организации эффективной, надежной и безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования.

#### 4. Применение датчиков ISPD

Универсальные интеллектуальные датчики частичных разрядов серии ISPD могут применяться:

- Для проведения разовых и периодических измерений частичных разрядов в высоковольтной изоляции, в том числе на токоведущих частях.
- В качестве базового элемента при создании систем мониторинга, предназначенных для стационарного контроля состояния изоляции оборудования.
- В качестве интеллектуальных датчиков частичных разрядов, предназначенных для использования в составе различных систем управления эксплуатацией высоковольтного оборудования.

При помощи датчиков серии ISPD можно проводить измерение частичных разрядов в изоляции КРУ, концевых и соединительных муфт кабельных линий, оборудования с элегазовой изоляцией (КРУЭ), в высоковольтном оборудовании бакового исполнения (в силовых трансформаторах, выключателях и т. д.)

#### 5. Технические параметры датчиков ISPD

В зависимости от назначения, технических возможностей интеллектуального датчика марки ISPD, а также типа высоковольтного оборудования, в котором планируется проводить регистрацию импульсов частичных разрядов, технические параметры датчика могут изменяться.

В настоящее время разработано и производится более 20 модификаций интеллектуальных датчиков частичных разрядов серии ISPD, отличающихся количеством входных каналов, частотными свойствами регистрируемых импульсов, исполнением корпуса датчика, условиями его монтажа на оборудовании.

Для удобства создания сложных и эффективных систем мониторинга и диагностики изоляции оборудования по частичным разрядам в датчиках ISPD предусмотрено несколько способов подключения и передачи информации в управляющую систему АСУ-ТП более высокого уровня. Это различные современные проводные и беспроводные интерфейсы связи.

Наиболее важная информация о технических возможностях, параметрах и конструктивном исполнении каждой модификации датчика серии ISPD содержится в его маркировке.

Пример технической маркировки датчика ISPD:  
ISPD-AAA/BVV/CCC/DDD/EEE.

В этой технической маркировке датчика приняты следующие обозначения:

- AAA – диапазон регистрируемых импульсов частичных разрядов. Может быть выбран один или два из доступных: AC, HF, VHF или UHF.
- BVV – внешний интерфейс датчика для связи с системой АСУ-ТП. Выбирается из четырех доступных: POE, RS4, BLU или LoRa.

- CCC – тип входного напряжения для встроенного в датчик источника питания. Этот может быть: AC, DC, POE или Solar Panel.
- DDD – наличие и тип встроенного в общий корпус датчика частичных разрядов. Доступные для выбора первичные датчики частичных разрядов различных диапазонов частот: AC, VHF или UHF.
- EEE – технический номер модификации корпуса датчика ISPD. Обычно корпус выбирается в зависимости от типа контролируемого высоковольтного оборудования и условий эксплуатации. В зависимости от вида корпуса датчики серии ISPD могут эксплуатироваться в помещениях или вне помещений.

По дополнительным договорам возможна поставка заказчикам интеллектуальных датчиков частичных разрядов серии ISPD, имеющих специальное конструктивное исполнение. Такие специализированные OEM датчики частичных разрядов разрабатываются и изготавливаются фирмой ДИМРУС по заказным спецификациям.

#### Параметры регистрируемых импульсов ЧР:

Датчик ISPD-AC	
Диапазон частот, кГц	30 ÷ 50
Динамический диапазон сигналов, dB	70
Датчик ISPD-HF	
Диапазон частот, МГц	0,1 ÷ 25,0
Динамический диапазон сигналов,	1мВ ÷ 5В
Датчик ISPD-VHF	
Диапазон частот, МГц	2 ÷ 50
Динамический диапазон сигналов, dB	70
Датчик ISPD-UHF	
Диапазон частот, ГГц	0,4 ÷ 2,0
Динамический диапазон сигналов, dB	70
Многоканальное исполнение датчиков	
Синхронно регистрируемых каналов	до 3
Возможные сочетания нескольких каналов в одном датчике	2HF 2UHF 2HF+AC 3VHF

#### Технические параметры датчиков ISPD:

Источник питания датчика, по выбору	AC 24В DC 10В POE Battery Solar Panel
Интерфейс связи с АСУ-ТП, по выбору	RS-485 Ethernet Bluetooth LoRa
Потребляемая мощность, Вт	1 ÷ 5
Габаритные размеры электроники, мм	60*40*90
Диапазон рабочих температур, град	-40 ÷ +80