

Гетерогенная система связи, обеспечивающая когерентность устройств для построения самоорганизующихся сетей IPv6

Алексей ГУСАРОВ
gusarov.a@milandr.ru

Автоматизация учета потребления и управления энергоресурсами — одно из необходимых условий стабильности функционирования и удобства обслуживания современных энергосистем. Автоматизированная система контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭР) от компании «Миландр» обеспечивает регулярный сбор точной информации об энергоресурсах на всех этапах их движения от ввода на объекте до каждой из конечных точек потребления, предоставляет доступ к собранным данным для анализа состояния системы в целом, позволяет производить оперативное управление исполнительными механизмами приборов учета и контроля.

Центром системы является устройство сбора и передачи данных (УСПД) — промышленный компьютер, построенный на ядре ARM Cortex-A9 [1], собирающий и хранящий данные всех приборов учета, предоставляющий доступ для их обработки и управления приборами системы, а также обеспечивающий сетевое взаимодействие устройств между собой и с внешними потребителя-

ми. Основные устройства системы, УСПД и электросчетчики «Милур» (рис. 1) с протоколами Modbus и СПОДЭС, оснащены модулями связи — гетерогенными PLC/RF-модемами. Автономные устройства с батарейным питанием (квартирные радиомодули/счетчики импульсов, датчики температуры, влажности и т. д.) имеют только RF-интерфейс для обеспечения минимального потребления энергии [2].

PLC/RF-модемы построены на основе сигнального процессора собственной разработки 1657BH044 и поддерживают сетевое взаимодействие по двум интерфейсам: Power Line Communications (PLC) — передача данных по энергосетям 0,4 кВ и радиоканал (RF) в частотном диапазоне 868 МГц. Использование в качестве физического уровня заранее проложенных силовых кабелей и радиозфира позволяет избежать дополнительных расходов на сетевую инфраструктуру при внедрении АСКУЭР, а гетерогенность — наличие двух независимых интерфейсов с разными средами передачи — увеличивает стабильность и непрерывность сетевого взаимодействия даже во время работы при высоком уровне помех.

Сетевой стек модулей связи создан на основе общепринятых стандартов и протоколов, физические уровни реализованы в соответствии с российскими нормативными актами. Сетевой уровень стека поддерживает протокол IP версии 6 и UDP в качестве протокола канального уровня. Все сетевые устройства имеют стандартный IPv6 link-local-адрес и UDP-порты для снятия показаний или управления. При необходимости на УСПД могут быть настроены внешние IPv6-адреса для получения доступа к приборам через глобальную сеть Интернет. Таким образом, система может быть сконфигурирована как облако «умных» устройств, являясь частью набирающего популярность «Интернета вещей» (IoT). Система может горизонтально и вертикально масштабироваться, объединяя группы устройств в «умные» дома и «умные» города. Данные со всех УСПД могут направляться на центральный сервер для принятия

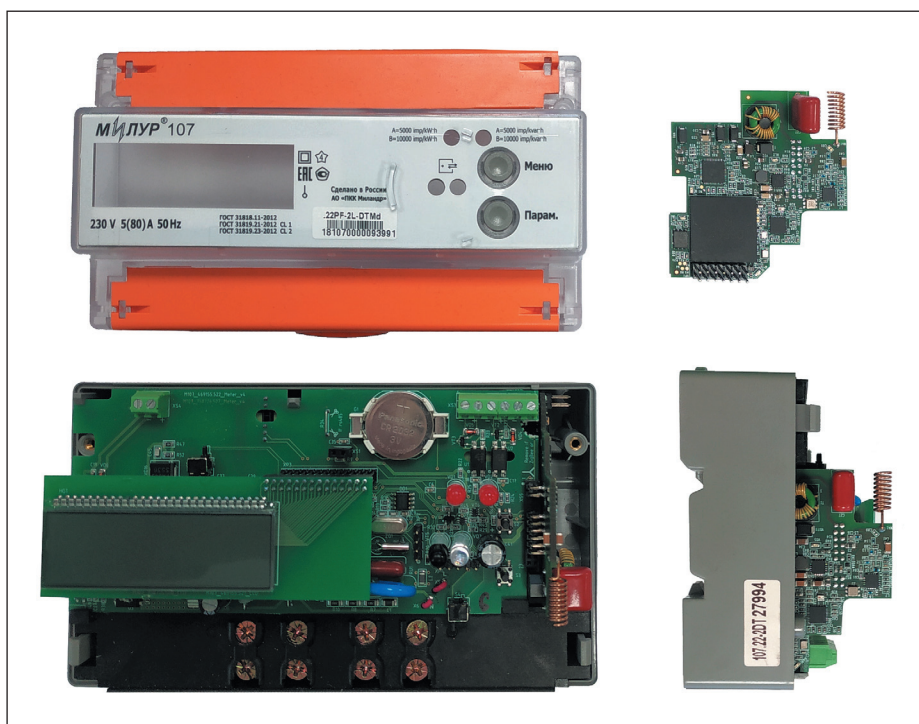


Рис. 1. Электросчетчик «Милур-107» с PLC/RF

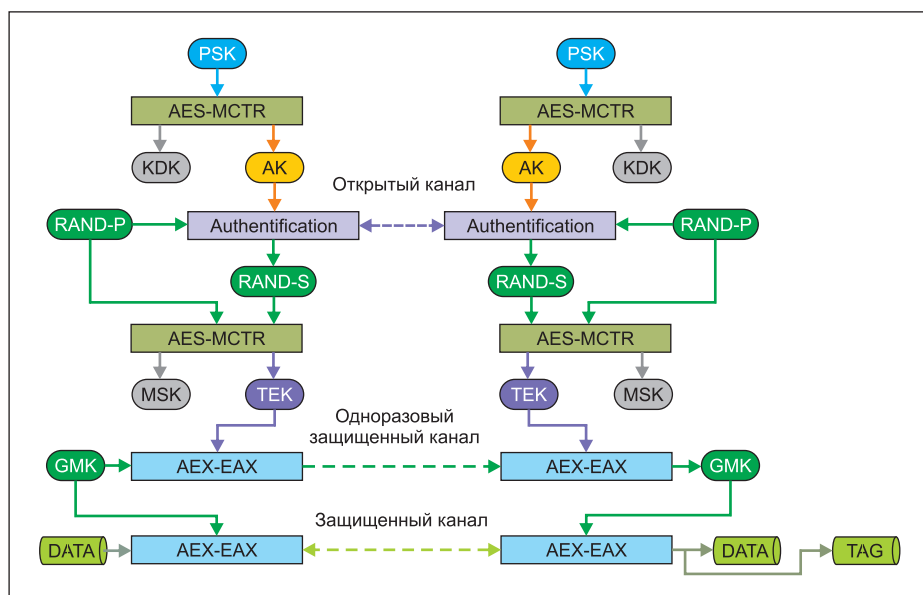


Рис. 2. Установка защищенного канала связи

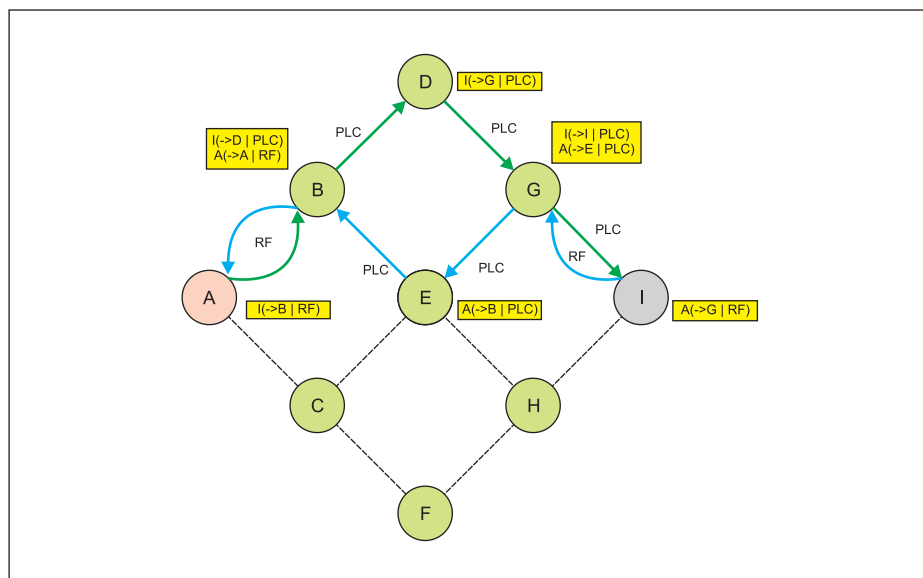


Рис. 3. Несимметричные маршруты гетерогенной сети

устанавливается временный защищенный EAP-канал (рис. 2) — по нему устройство передает информацию о себе (производитель и название, серийный номер, версия ПО и т. д.), которая передается по сети гетерогенных модемов на УСПД, где происходит решение о принятии или отклонении запроса на присоединение устройства (например, на основе белых списков приборов учета данного объекта). В случае успешной регистрации устройству передаются параметры сети, рекомендуемые настройки, текущий сессионный ключ, параметры шифрования канального уровня и информация о режимах пониженного энергопотребления (сна) и расписании опроса (для устройств с батарейным питанием).

После регистрации в сети каждое устройство получает короткий 16-битный логический адрес, и все внутрисетевое взаимодействие происходит с использованием данного типа адресации. Длинные (64-битные) адреса, сформированные из серийных номеров ПУ, используются только при регистрации и поиске маршрутов. Применение короткой адресации и сжатия канальных и сетевых заголовков позволяет сократить объем накладных расходов на передачу данных и увеличить пропускную способность сети для передачи полезной нагрузки (рис. 3). При этом внешнее обращение (с УСПД или ПО опроса) происходит с использованием IPv6-адресов, построенных на основе серийных номеров приборов учета, а внутри сети уже транслируется в короткие адреса на каждом канале «точка-точка». Все устройства, оснащенные PLC/RF-модемами, поддерживают ретрансляцию пакетов, полноценную маршрутизацию с указанием длинного адреса устройства назначения, адреса следующего узла сети и используемого сетевого интерфейса.

Сеть работает по алгоритму реактивной маршрутизации LOADng (рис. 4). При необходимости послать пакет на узел происходит поиск записей о нем в таблице маршрутизации. При их отсутствии происходит запуск поиска маршрута: узел, желающий передать пакет, генерирует пакет поиска короткого адреса для длинного адреса искомого узла (Route request — RREQ), записывает в него свои длинный и короткий адреса и отправляет его всем соседним устройствам (широковещательный канальный домен). При получении пакета RREQ каждый из узлов генерирует запись таблицы маршрутизации с длинным адресом инициатора поиска, коротким адресом узла, от которого был получен пакет, интерфейсом, по которому был получен пакет, и инкрементальной метрикой, основанной на скорости и качестве канала. При отсутствии в таблице маршрутизации уже существующей аналогичной записи с лучшей метрикой она сохраняется, а пакет поиска ретранслируется дальше всем соседним устройствам.

решений, основанных на анализе больших данных о потреблении не только отдельных квартир, но и домов и целых микрорайонов. Сбор информации о потреблении на всех этапах позволяет регулярно проверять баланс между станциями распределения (подстанции, котельные и т. д.), вводами в дома и квартирами конечных потребителей и находить утечки или неисправности систем транспортировки энергоресурсов.

Доступ к приборам учета возможен только в рамках сессии с парольной защитой, поддерживаемой между устройством и считывающим ПО. Все данные канального уровня сетевой инфраструктуры шифруются протоколом AES128 с использованием сессионных ключей, которые могут заменяться как регулярно по расписанию, так и посредством прямого запроса УСПД. Все пакеты данных

также содержат цифровую подпись, что добавляет аутентификацию и дополнительную защиту от изменения передаваемых данных. Распространение сессионных ключей происходит по одноразовому защищенному каналу сетевого уровня, устанавливаемому между модемом УСПД и настраиваемым устройством с помощью схемы открытого распределения ключей (протокол EAP).

При включении любого из сетевых устройств происходит поиск поддерживаемых сетей в зоне видимости. Затем устройство будет производить попытки регистрации в каждой из сетей, передавая им свой серийный номер и информацию, полученную на основе ключа шифрования производителя. Обход списка найденных сетей выполняется в порядке ухудшения качества связи. В случае успешной проверки ключа

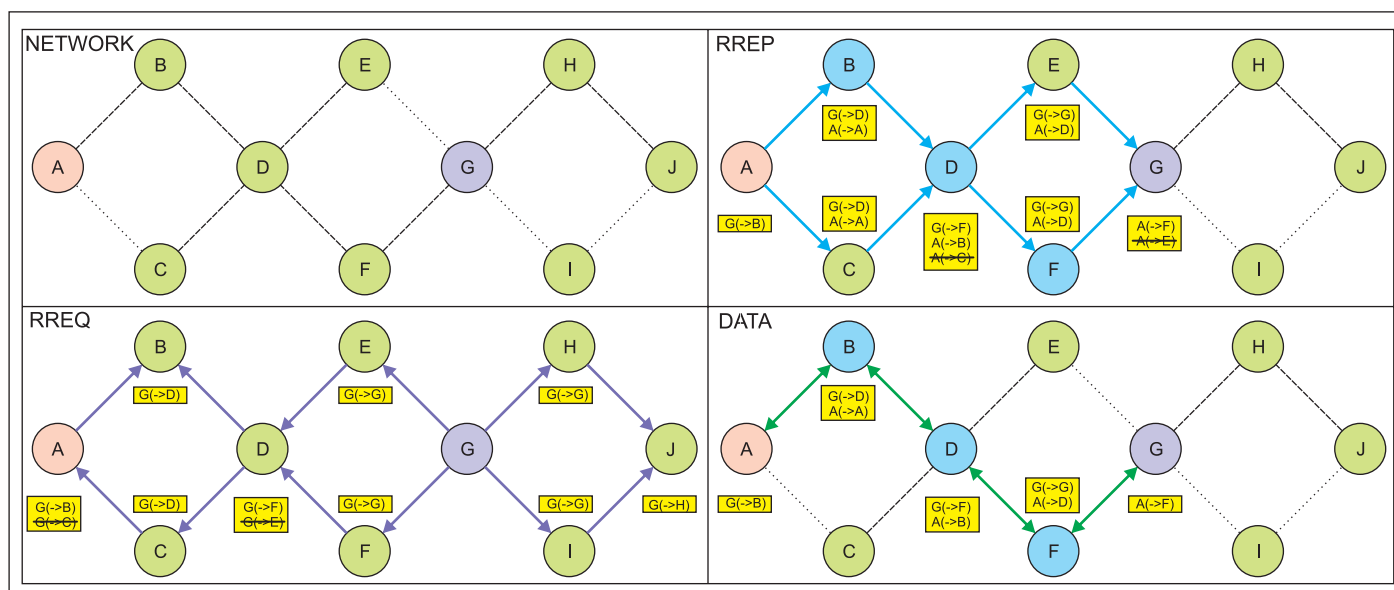


Рис. 4. Алгоритм маршрутизации LOADng

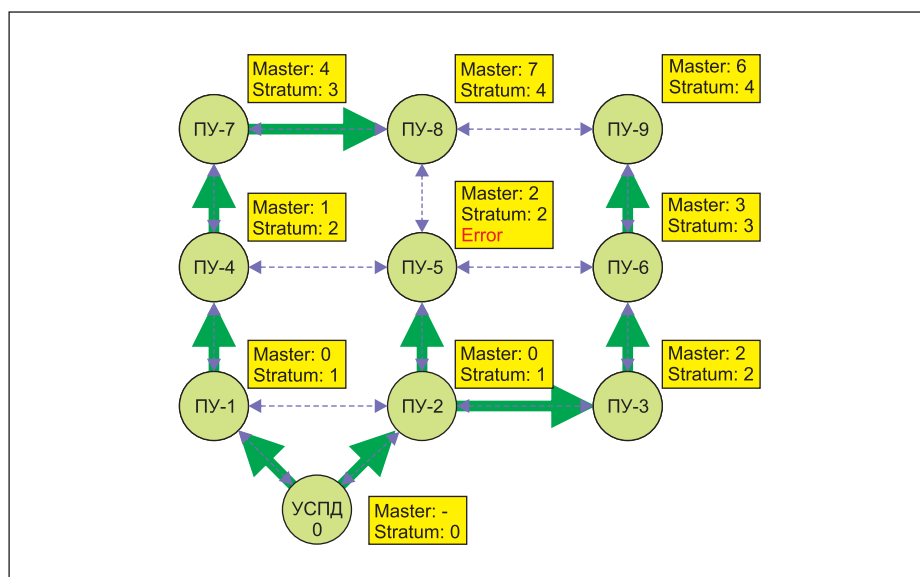


Рис. 5. Работа сервиса MTP

Для синхронизации времени приборов учета модули связи используют протокол MTP (Mesh Time Protocol), основанный на протоколе точного времени (PTP — стандарт IEEE 1588), адаптированный к условиям гетерогенной сети [3]. В отличие от оригинального PTP, работающего поверх сетевого уровня IP, MTP действует на канальном и частично физическом уровне, что позволяет уменьшить задержку, вносимую дополнительными уровнями сетевого стека, и сократить накладные расходы на сетевые заголовки пакета и, как следствие, оказывать меньшее влияние на пропускную способность сети. Алгоритм применяет пары пакетов Sync — Follow Up и Delay Request — Delay Response, аналогичные PTP для коррекции времени и измерения задержек передачи. Измерение задержек выполняется независимо для каждого из сетевых интерфейсов из-за разностей физических каналов передачи данных. Для выбора наиболее качественного источника времени алгоритм использует понятие слоев часов (Stratum) и разброс коррекции (рис. 5).

Основным источником времени является УСПД, устанавливающий часы на соответствующем PLC/RF-модеме, считающемся нулевым слоем. Модемы, получающие время от него, считаются слоем один, их последователи — слоем два, и т. д. Чем меньший слой имеют часы модема, тем меньше суммарная накопленная ошибка времени и точнее часы. Раз в 2 мин модемы, имеющие источник времени, посылают пару пакетов Sync — Follow Up. Принимающие их устройства сохраняют информацию обо всех возможных соседних источниках времени. Для каждого из них рассчитывается средняя коррекция относительно текущего времени и ее дисперсия. Собрав информацию о соседних устройствах, модем выбирает из них мастер-часы с минимальным слоем и отклонением (рис. 6).

Искомое устройство, получив пакет RREQ, генерирует ответный пакет, содержащий собственный длинный и короткий адреса, а также адреса инициатора поиска (Route Response — RREP). Данный пакет в зависимости от настроек сети может быть отправлен как адресно (используя запись о маршруте до инициатора поиска, добавленную в таблицу маршрутизации на прошлом шаге), так и широковещательно (всем соседним устройствам, например для построения несимметричного маршрута в случае несимметричного физического канала или при использовании узлов с различной мощностью передатчика). Пакет RREP возвращается к инициатору, используя записи таблицы маршрутизации промежуточных устройств, но заново пересчитывая метрику для обратного маршрута. После получения

ответа инициатором между узлами присутствуют установленные каналы связи (два или один в случае симметричного маршрута), которые могут применяться для обмена данными. Время жизни (Time to live — TTL) записи о маршруте в таблице маршрутизации составляет 60–120 с. Каждый успешно проходящий по каналу пакет сбрасывает этот счетчик до максимального значения. В случае разрыва маршрута (например, при выключении одного из промежуточных устройств или появлении помехи в одном из интерфейсов) после нескольких попыток передачи TTL истекает и маршрут перестраивается заново. Использование реактивной маршрутизации позволяет ячеистой сети адаптироваться к изменяющимся условиям канала, а также к изменяющемуся состоянию и расположению сетевых узлов.

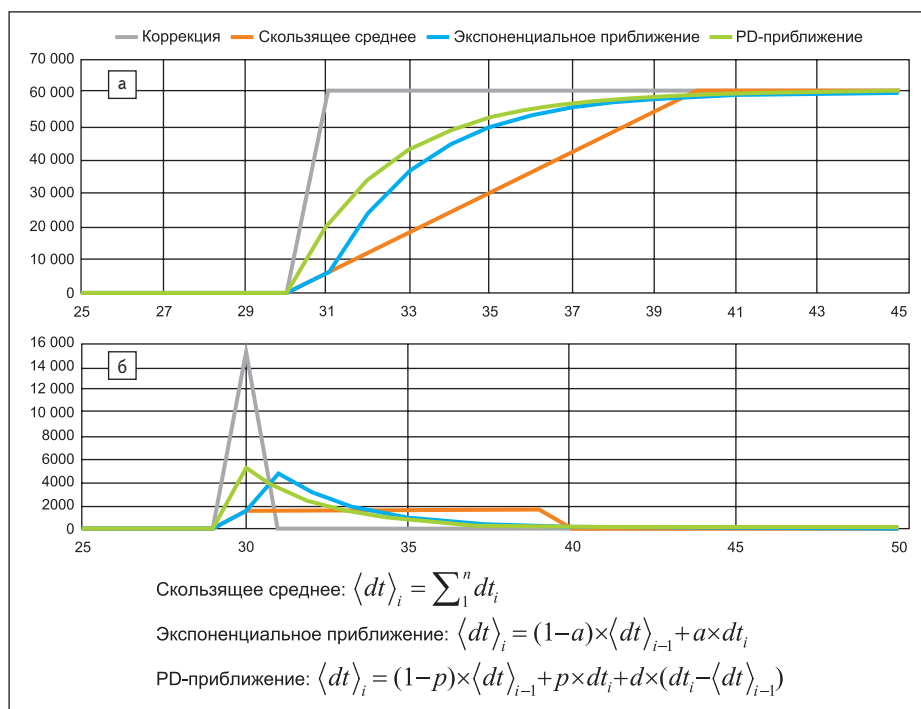


Рис. 6. Усреднение ошибки коррекции времени: а) перестроение часов; б) одиночная ошибка

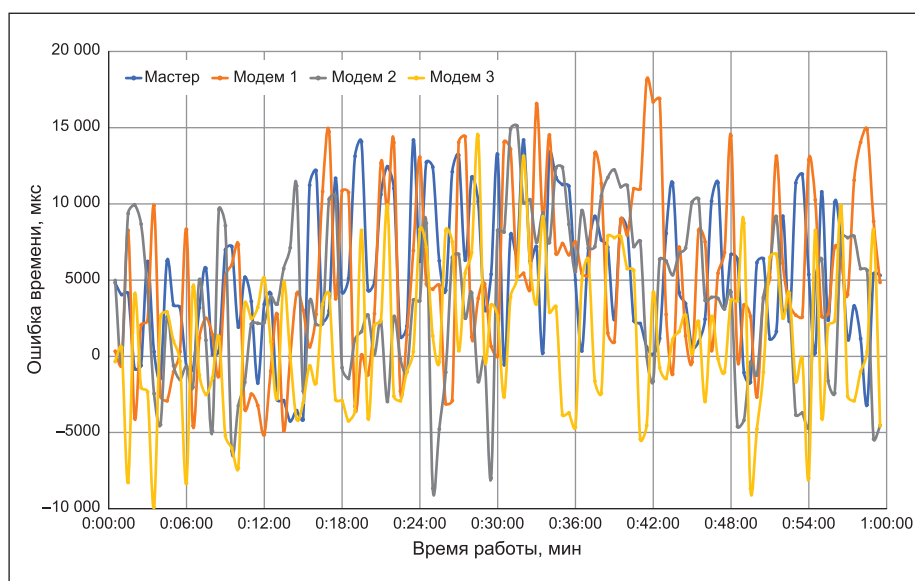


Рис. 7. Отклонение времени на нескольких модемах

Для вычисления среднего отклонения используется PD-регулятор, основанный на экспоненциальном приближении скользящего среднего. Данный подход позволяет оперативно реагировать на перестроение мастер-часов и сглаживать единичные ошибочные выбросы. В настоящий момент достигнута точность синхронизации часов на модемах порядка 10–15 мс. Синхронизация часов ПУ производится установленными в них модемами раз в сутки при расхождении времени более чем на 1 с (рис. 7).

В результате работы алгоритма МТР каждое устройство хранит информацию о текущем выбранном мастере часов и его слое, что может быть использовано как маршрут до УСПД с метрикой в виде количества ретрансляций, равной слою собственных часов. Данный маршрут может быть использован как вспомогательный при ретрансляции или при необходимости срочной асинхронной отправки пакетов (например, квартирным радиомодулем при воздействии на магнитную пломбу счетчика воды или газосигнализатором при превышении порога концентрации).

Обновленная версия АСКУЭР в данный момент развернута на территории компании «Миландр» и на тестовых объектах ЖКХ. Результаты работы положительные, повысилось качество и стабильность связи с устройствами, исчезла необходимость в ручной настройке маршрутизации, облегчена синхронизация времени для ПУ, что открыло дополнительные возможности использования системы, в частности для получения стоп-кадра сети — одновременного снятия показаний всех ПУ на объекте.

Литература

1. Мякочин Ю., Шедяков Д., Кареев К. УСПД на базе Cortex-A9. Вклад в построение надежных систем для ЖКХ // Электроника: НТБ. 2016. № 8.
2. Мякочин Ю., Бирюков М., Гусаров А., Карпов И. Квартирный радиомодуль для системы АСКУЭ // Электроника: НТБ. 2017. № 2.
3. Кареев К. Механизм синхронизации времени для гетерогенных PLC/RF-модемов // Электронные компоненты. 2017. № 9.