

## **Применение телекоммуникационных технологий PLC при подключении объектов распределенной генерации к электрическим сетям**

**DAVID GIL (DG), ASIER LLANO (AL), FERNANDO CASTRO (FC), JOSE ANTONIO MORENO (JAM), SONIA MARTÍNEZ (SM), TXETXU ARZUAGA (TA)\***

**ZIV CG Automation, SPAIN**

### **Общая информация**

Объекты распределенной генерации (Distributed Energy Resources, DER – распределенные энергетические ресурсы) в настоящее время развернуты вдоль сетей среднего напряжения (СН) и низкого напряжения (НН) распределительных электрических сетей и являются неотъемлемым компонентом «умной» сети. Для подключения DER в электрическую сеть требуется обеспечение информационного обмена систем автоматизации управления в распределительных электросетевых компаниях с этими установками в режиме «всегда на связи». Наиболее привлекательными для обеспечения такой коммуникационной инфраструктуры являются технологии PLC (Power Line Communication).

В статье приводятся основные требования к интеграции распределенных энергетических ресурсов в распределительные электрические сети, особое внимание уделено интеграции в сеть НН. Описаны основные характеристики сети НН, используемой в качестве телекоммуникационного средства обмена информацией. Анализируются различные технологии PLC, которые можно использовать в качестве технологической основы для этой цели, например Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME). Как резюме, в статье рассматривается вопрос об особенностях функционирования новых технологий PLC совместно с унаследованными приложениями, такими как Advanced Metering Infrastructure (AMI), используемыми в системах учета ЭЭ, при их реализации поверх сети связи PLC.

### **Ключевые слова**

Интеграция объектов распределительной генерации, сети низкого напряжения, аварийное отключение, телекоммуникационные технологии PLC, PRIME, борьба с созданием изолированных участков сети после аварии.

### **НОВЫЕ ВЫЗОВЫ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ – АВТОПРОИЗВОДИТЕЛИ**

Автопроизводители, являясь особым субъектом в энергетическом секторе, представляют собой новый вид потребителей энергии – энергопредприятия, которые не только потребляют электроэнергию, но и вырабатывают ее и поставляют на рынок. Подобные компании, как правило, являются частными, и во многих странах электроэнергетические и коммунальные электросетевые компании обязаны по закону приобретать электроэнергию ЭЭ, выдаваемую в сеть энергопредприятиями. Тем не менее качество параллельной работы с сетью при подаче электроэнергии, подаваемой в электрическую сеть от собственных вырабатываемых энергоресурсов энергопредприятия, не гарантируется. По этой причине электроэнергетические и коммунальные сетевые компании должны быть обеспечены информационным обменом с энергопредприятиями при интеграции объектов DER в свои сети:

- Основные технологические параметры должны контролироваться в режиме реального времени, например напряжение, ток, активная и реактивная мощности.
- Энергетические или коммунальные компании должны предоставлять средства для отключения энергопредприятия от сети, если текущее состояние сети требует этого.
- Энергетические или коммунальные компании должны предотвратить случайное или несанкционированное повторное подключение к сети энергопредприятий, если условия подключения к электрической сети не выполняются.

Во многих странах объекты распределенной генерации устанавливаются вдоль сети НН, что усложняет процесс управления интеграцией этих объектов в сеть, поскольку энергетическим и/или коммунальным сетевым компаниям требуется собирать информацию от всех источников генерации, подключенных к сети СН или НН.

Многие объекты распределенной генерации, которые подключены к сети СН, располагают устройствами телемеханики контролируемого пункта с каналами связи по линиям электропередачи или по радио, что позволяет им осуществлять обмен информацией с энергетическими или коммунальными компаниями. Для низковольтных установок требуется новое поколение интеллектуальных электронных устройств для обеспечения определенного уровня дистанционного управления данным типом оборудования. Коммутационный аппарат, подключающий инвертор DER-оборудования к сети, по крайней мере должен быть под телеуправлением. Для энергетических или коммунальных компаний также требуется получение отдельных параметров электрического режима, таких как напряжение, активная и реактивная мощности. По причине наличия инвестирования в энергетические и коммунальные компании, они создают передовую инфраструктуру системы измерений, которая может стать третьей стороной телекоммуникационных услуг как альтернатива для интеграции с DER. Поэтому следует проанализировать возможность применения PLC-технологий для обеспечения телеуправления оборудованием распределенной генерации.

В случае использования телекоммуникационной технологии PLC архитектура системы представлена на Рис. 1. Она включает новые функции, которые будут выполняться на распределительной подстанции, где происходит управление всеми объектами распределенной генерации, подключенными к ее фидерам (аналогичным образом концентратор данных управляет всеми смарт-счетчиками, обслуживаемыми низковольтными фидерами). Также небольшие RTU-устройства (дистанционный передатчик) с PLC-технологией должны быть установлены в каждом устройстве распределенной генерации НН в качестве информационного датчика источника данных генерации для энергопредприятий.

В статье основной упор будет сделан на оценке возможностей расширения инфраструктуры PLC, уже развернутой для приложений смарт-измерений ЭЭ, с целью обеспечения информационного обмена с объектами распределенной генерации в сети НН. Анализ проводится на основе использования технологии PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME) [1].

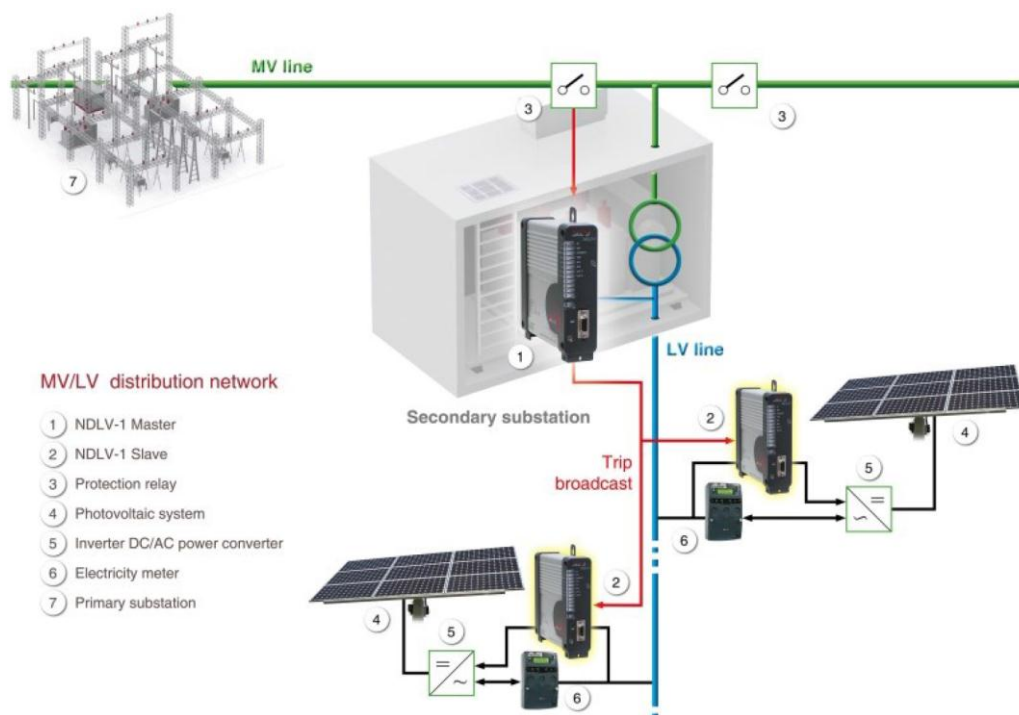


Рис. 1. Архитектура системы

## СЕТИ НН КАК СРЕДСТВО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Существует несколько документов, моделирующих сети НН как телекоммуникационный канал. В данном разделе будут обобщаться некоторые из основных исследований, которые изложены в разных работах [9, 3, 4, 11 и 7]. При моделировании сети НН как телекоммуникационного канала необходимо учитывать следующие основные аспекты:

- Шум. Какие внешние факторы могут мешать принимаемому сигналу.
- Импульсные характеристики канала. Как телекоммуникационный сигнал изменяется при распространении по сети НН.
- Импеданс канала. Как увеличить мощность PLC-сигнала, вводимого в сеть.

### Шум в сети НН

Есть несколько способов, чтобы классифицировать причины нарушения сигнала, которые могут возникнуть в сети [8], тем не менее для PLC предпочтительны параметры классификации, которые сформулированы в [3], – частота и временной интервал, периодичность или его синхронизация с сетью. На основе таких параметров классификация шума может выглядеть следующим образом:

- фоновый шум/помехи,
- импульсный шум,
- синхронный шум (в сети),
- узкополосный шум.

#### *Фоновый шум/помехи*

Фоновый шум является широкополосным и имеет статичный характер. Его удельная мощность достаточно низкая по сравнению с другими нарушениями, но его изучение интересно тем, что оно всегда имеет предмет исследования. Как правило, фоновый шум можно найти в сети НН [9, 4, 12]. Данные материалы указывают на потерю уровня сигнала до 35 дБ/декаду со значениями -90 дБ (Вт/Гц) на частоте 9 кГц и -125 дБ (Вт/Гц) на частоте 95 кГц. Эти цифры меняются в зависимости от времени, и их значения зависят от потребления электроэнергии. Показания стабильны в часы пик. С другой стороны, в часы пиковых нагрузок, коэффициент шума может быть в пределах от 15 дБ и даже выше 20 дБ.

Хотя шум по своей природе может отличаться от одной сети НН к другой (это зависит от различных типов нагрузок – двигатели, освещение и пр.), на основании статистических данных фоновый шум может быть рассчитан по следующей формуле [4]:

$$N(f) = 10^{K-3.95 \times 10^{-5} f} \left[ \frac{W}{Hz} \right]$$

где  $K$  – переменная нормального распределения с усредненной  $\mu = -8,64$ . Стандартное отклонение  $\sigma$  величины  $K$  составляет 0,5 (измеряется при входном импедансе 50 Ом). Если перевести функцию распределения мощности в формулу напряжения, применима следующая формула:

$$N(f) = \sqrt{50} \times 10^{\frac{K}{2} - 1,975 \times 10^{-5} \times f} \left[ \frac{V_{RMS}}{Hz} \right]$$

Данная формула для вычисления шума удобнее, поскольку многие устройства связи (несколько сотен) делят коммуникационную среду сети НН, чьи устройства имеют высокий входной импеданс, чтобы минимизировать его эффект для разделяемой среды передачи данных.

Основываясь на результатах [10], в городской сети мощность шума может составлять около 73 дБ VRMS, а за городом значения шума могут достигать 48 дБ VRMS.

### ***Импульсный шум***

Импульсный шум характеризуется короткой продолжительностью по сравнению со временем, процессов, происходящих в телекоммуникационных системах. Его природа связана с преходящими эффектами, которые возникают, например, при включении компьютера или телевизора.

В некоторых статьях [3] продолжительность импульсного шума ограничена 100 мкс. Другие ссылки [11] определяют различные ограничения по продолжительности (между 1 мкс и 48 мс), хотя некоторые авторы считают последний отрезок в качестве пульсирующего шума.

Амплитуда, длительность и частота импульсных шумов очень разнообразна. Можно считать, что чем выше продолжительность, тем меньше амплитуда, и наоборот.

Импульсные шумы можно классифицировать по периодичности:

- Аперiodический импульсный шум. Этот тип шумов может достигать очень больших значений амплитуды, таких как 2 кВ. Они могут быть вызваны включением разъединителя.
- Синхронный периодически возникающий импульсный шум в сети. Этот тип шумов может быть вызван некоторыми инверторами АС–DC/DC–АС. Он является периодическим (та же частота, как и частота сети или одной из ее гармоник) импульсным сигналом.
- Асинхронный периодически возникающий импульсный шум в сети. В этом случае период шума не имеет ничего общего с частотой сети. Это может быть вызвано различными коммутационными состояниями электрических машин (повторяющиеся помехи).

### ***Узкополосный шум***

Узкополосный шум влияет только на небольшую часть полосы пропускания канала связи PLC. Этот шум может быть вызван резонансными эффектами сопротивления линии НН, которые концентрируют большую часть мощности шума в определенных частотах. Также данный тип шума могут вызвать частотные селективные устройства, подключенные к сети, например импульсные источники питания. Кроме того, радиовещание (АМ) может стать еще одним источником возникновения узкополосного шума в линиях НН.

### **Импульсная характеристика канала**

Частотную характеристику канала трудно спрогнозировать в низковольтных ЛЭП. Это зависит от точки измерения, от топологии сети, а также от распределения нагрузки. Некоторые данные [3] показывают, что затухание может достигать значений и в 100 дБ/км. Тем не менее в некоторых промышленных низковольтных ЛЭП длиной 750 м можно видеть ослабление всего в 20 дБ. В этом случае не так четко можно увидеть экспоненциальную зависимость между затуханием и расстоянием. Также можно найти пределы затухания начиная от 40 дБ до 100 дБ. Групповая задержка в полосе CENELEC А незаметна [2] для узкополосных коммуникаций, где длительность передачи символа намного выше.

Для цифровых схем модуляции фазы, фазовые вариации со временем могут иметь достаточную значимость. Некоторые данные [3] показывают, что такие вариации должны быть ниже, чем  $\pm 10^\circ$  [3], будучи, возможно, когерентными демодуляциями.

### **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ PRIME ДЛЯ СЕТЕЙ НН**

PRIME является системой связи, специально разработанной для преодоления проблем использования PLC в сети НН. Это узкополосная OFDM-система (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), которая поддерживается PRIME-Alliance. Система PRIME была стандартизирована ITUT G.9901 [5] и G.9904 [6], кроме того она была стандартизирована по IEEE как часть стандарта IEEE P1901.

Система PRIME состоит из трех уровней связи, как представлено на Рис. 2:

- Уровень конвергенции (совмещения) CL отвечает за размещение единицы данных протокола на уровне MAC.
- Уровень MAC отвечает за предоставление механизма, позволяющего создать сеть PRIME. Он также контролирует доступ всех узлов к общему каналу Powerline.
- Уровень PHY отвечает за прямую связь между узлами сети.

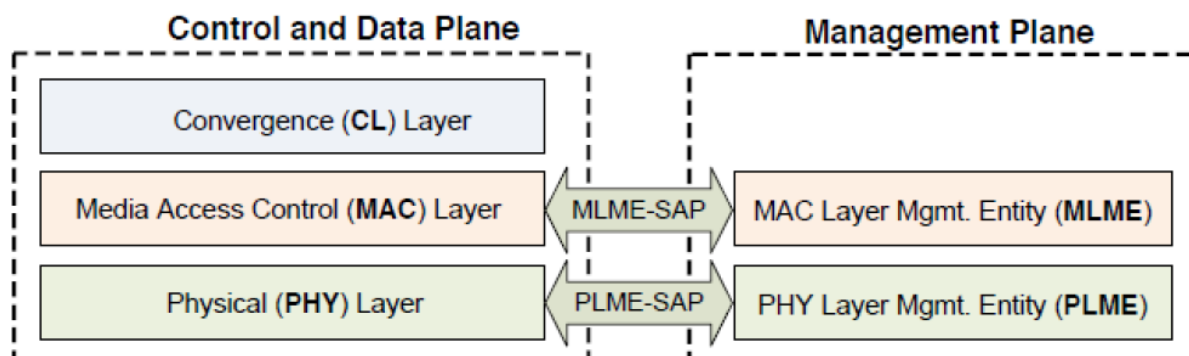


Рис. 2. Уровни связи системы PRIME

Обычно PHY-уровень отвечает за преодоление помех, с которыми можно столкнуться в сети (шум и импульсная характеристика канала). В нашем случае PRIME PHY уровень на основе OFDM имеет 97 вспомогательных частот в CENELEC A-Band (от 41,992 кГц до 88,867 кГц). Хотя есть шесть различных схем модуляции, доступных для всех простых вспомогательных частот, в данной области используются только сверхточные режимы кодирования (DBPSK, DQPSK, D8PSK). Из-за особенностей MAC частота ошибок  $10^{-3}$  считается отличным показателем для обеспечения того, что значение будет правильно согласовано с уровнем приложений связи. Даже худшие значения величины  $10^{-2}$  могут быть достаточными, чтобы поддерживать связь. В качестве эталона на Рис. 3 показано поведение PRIME-системы в селективном частотном канале. Наблюдается снижение чувствительности приемника менее 2 дБ из-за данного вида помех.

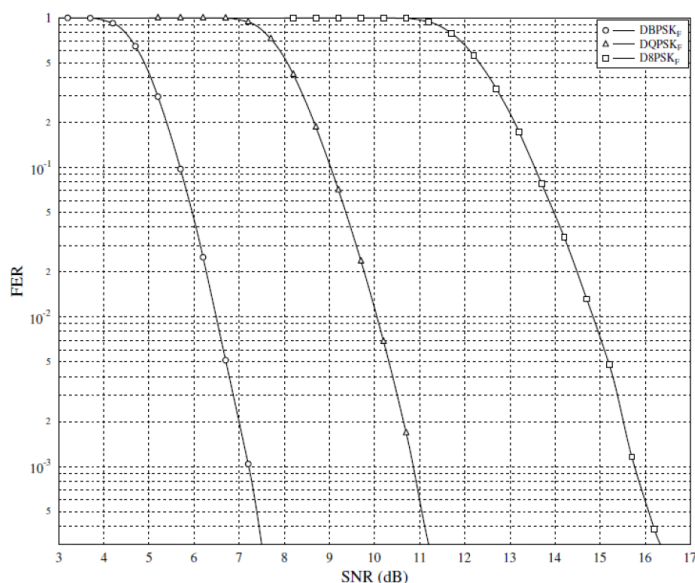


Рис. 3. Поведение PRIME-системы при нарушениях

Также очень хорошие реакции PRIME наблюдаются при наличии импульсных шумов. Для длительности импульса меньше, чем 500 мкс, амплитуда колебания шума 20 дБ (в сравнении с пиком импульсного шума на фоне шумов) в системе PRIME составила только 7,5 дБ.

Выводом по данному разделу является то, что надежные схемы модуляции для PRIME-системы также подходят для приложений телемеханики. Возникает следующий вопрос: каковы имеющиеся возможности для использования PRIME в сети с уже развернутой системой интеллектуального учета электроэнергии (Smart Metering)?

### ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ ПО СЕТИ НН В PRIME-СИСТЕМЕ

В соответствии со спецификацией PRIME [1], время передачи делится на MAC-кадры. Базовый узел и узел оказания услуг могут получить доступ к каналу в период поочередного использования канала связи (Shared Contention Period, SCP) или запросить период без контролируемого доступа (Contention-Free Period, CFP). Что касается последнего, базовый узел отвечает за предоставление доступа к CFP. Следующий рисунок показывает структуру MAC-кадра.



Рис. 4. Спецификация структуры кадров в PRIME

Длина MAC-кадра составляет 276 символов OFDM (OFDM каждый символ длится 2,24 мс), что составляет 618,24 мс. Максимальная длина для SCP возникает только тогда, когда нет выделенного доступа к каналу (CFP), что является основой для приложений смарт-измерений. Следует обратить внимание, что по крайней мере один слот сигнала (4 символа) всегда присутствует (один генерируется базовым узлом). Если сервисные узлы должны преобразовываться в коммутаторы, то длина SCP уменьшается на 4 символа.

Сервисные узлы, реализующие приложения телемеханики, могут либо подключиться к каналу (как и любой другой PRIME-узел), либо потребовать CFP. В первом случае приложения телеуправления будут конкурировать за доступ к каналу измерительной смарт-системы. Тем не менее они могут конкурировать путем назначения более высокого уровня приоритета MAC, чем тот, который связан с применением смарт-измерений. Во втором случае приложения телемеханики сокращают время, доступное для приложений смарт-измерений, которые могут повлиять на производительность системы и, что еще хуже, на стабильность сети, потому что весь трафик контроля отвечает за поддержание топологии сети связи во время SCP.

### Приложения телемеханики, использующие CFP

Возможность иметь CFP для приложений телемеханики является весьма привлекательной, но следует отметить, что могут возникать неявные постоянные задержки из-за

используемого свойства временного уплотнения. В худшем случае для этой задержки будет длина MAC-кадра 618,24 мс (команда телеуправления должна направляться по базовым узлам при запуске MAC-кадра).

Другой аспект связан с нижней длиной посылки для SCP. Стабильность сети PRIME зависит от правильного обмена контрольной информацией между узлами обслуживания и базовым узлом. Данная контрольная информация обменивается внутри SCP, и ему присваивается высокий приоритет MAC (уровень приоритета 1). Если выполнение этой связи ухудшается из-за сокращения длины SCP, стабильность сети связи будет значительно снижена.

Некоторые расчеты авторов показывают, что снижение SCP до 230 символов будет в незначительной степени влиять на стабильность сети. Это означает, что SCP для приложений телеуправления будет возможно (с продолжительностью до 30 символов – обратите внимание, что в самой надежной модуляции, DBPSK<sub>F</sub>, каждый символ содержит 48 бит). Единственным недостатком этого варианта является временное уплотнение, что означает в худшем случае задержку MAC-кадра.

### **Приложения телемеханики, конкурирующие с приложениями смарт-измерений**

При данном раскладе устройства телемеханики конкурируют со смарт-счетчиками для доступа к каналу в течение передачи SCP. В связи с характером данных телемеханики им требуется назначать более высокий приоритет, чем у смарт-счетчиков, но более низкий приоритет, чем у PRIME данных управления сетью из-за его влияния на стабильность сети связи.

Имея в виду степень важности данных, которые передаются, можно предположить, что текущее использование канала организованное узлами смарт-измерений, может означать, что одновременно пытаются получить доступ к каналу максимум 3-4 устройства (скорее, 2-3). Моделирование, выполненное авторами, показывает, что нагрузка системы телемеханики может также конкурировать с нагрузкой смарт-измерений. Только одно условие, как было сказано выше, назначает более высокий приоритет. В этом случае полученные задержки для 95 % нагрузки телемеханики будут меньше, чем 30 мс из-за алгоритмов доступа канала CSMA/CA.

### **ПЕРЕДАЧА ТРАФИКА ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ ПО СЕТИ NH (FSK)**

Другая возможность состоит в применении подхода *similar-to-a-teleprotection* (аналогично *телезащите*), что позволит энергетическим и коммунальным компаниям управлять состоянием коммутационных аппаратов в сети. Для этого может быть использована хорошо зарекомендовавшая себя схема модуляции – частотная манипуляция Frequency Shift Keying, (FSK). В этой схеме модуляции данные передаются с помощью сдвига частоты непрерывной величины в двоичной форме (к одной или другой) из двух дискретных частот. Этап приема основан на согласованных фильтрах. Выход из согласованных фильтров будет сравниваться для принятия решения, если была получена первая частота, вторая, или ни одна из них. На следующем рисунке схематически изображен такой ресивер.



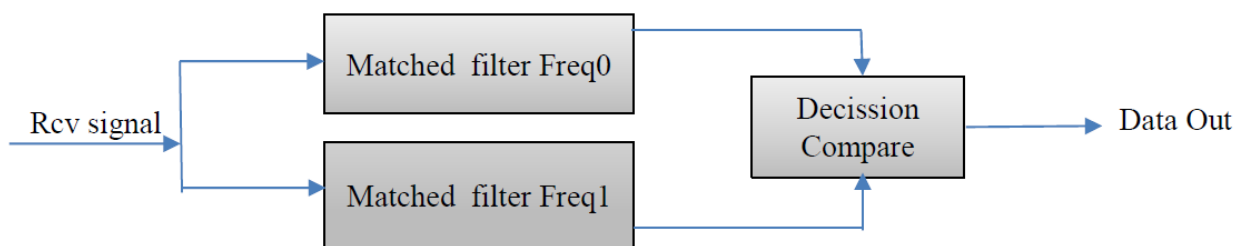


Рис. 5. Схема фильтрации при использовании FSK

В предыдущих разделах были описаны серьезные проблемы с шумом сигнала РКС в сети НН. FSK-модуляция является устойчивой к шуму и позволит получать полезные данные в таких каналах связи. Также это дает возможность работать с группой современных систем учета ЭЭ.

FSK-модем можно использовать для отправки и получения данных от энергопредприятий. Очевидно, что это решение не будет быстрее, но в некоторых случаях развертывание может обеспечить хорошее средство борьбы с шумом. Возможно, самое интересное приложение связано с использованием FSK-модема как устройства защиты оборудования ВН. В этом случае энергетические и коммунальные компании могут получить уровень надежности связи выше, чем  $10^{-3}$  (при SNR 6 дБ), а безопасность передачи лучше, чем  $10^{-6}$  при SNR 6 дБ. Это вполне допустимо, когда энергетическим и муниципальным компаниям нужно только передавать телесигнал ON/OFF энергопредприятиям для управления состоянием выключателя на устройства DER.

Используя данный подход, можно контролировать линию ВН и определить, существует ли ошибка передачи в линии связи, а также отследить момент потери связи с распределительной ПС (выход согласованных фильтров будет равен нулю в обоих случаях). FSK-модем может также отправить команду на выключатель или активировать сигнал для дальнейшего принятия решения. Это необходимо, чтобы избежать ответвлений в сетях НН.

## Выводы

В статье показаны возможности использования технологии связи по линиям НН для интеграции комплексов DER в электрические сети. Некоторые возможности уже доступны для энергетических и коммунальных компаний. Рассмотрены несколько вариантов передачи информации, например с использованием существующих систем AMI на основе PRIME (либо в конкуренции с трафиком измерений или временем резервирования канала для этого приложения) или с использованием подхода *similar-to-a-teleprotection* (аналогично телезащите) для отправки команд включения-выключения коммутационных аппаратов оборудования энергопредприятий.

*Перевод и адаптация текста - М. Задонская, А. Вериго, ЗАО «РТСофт», 2015г.*

## Литература

1. PRIME Alliance. PRIME Alliance home page. URL: <http://www.prime-alliance.org> (visitado 24-06-2013).
2. Nuria González-Prelcic y col. «A Channel Model for the Galician Low Voltage Mains Network». Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2001 IEEE International Symposium on. 2001, pages 365–370.
3. O. G. Hooijen. «A Channel Model for the Low-Voltage Power-Line Channel; Measurement and Simulation Results». Power Line Communications and Its Applications, 1997. ISPLC 1997. IEEE International Symposium on. 1997.
4. O. G. Hooijen. «A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium». Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 40.4 (1998), pages 331–336. ISSN: 0018-9375. DOI: 10.1109/15.736218.
5. ITU-T. G.9901 Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers – Power spectral density specification. Norm. 2012.
6. ITU-T. G.9904 Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks. Norm. 2012.
7. Wenqing Liu, M. Sigle y K. Dostert. «Channel phase distortion and its influence on PLC systems». Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on. 2012, pages 268–273. DOI: 10.1109/ISPLC.2012.6201341.
8. L. M. Millanta y M. M. Forti. «A classification of the powerline voltage disturbances for an exhaustive description and measurement». Electromagnetic Compatibility, 1989, IEEE 1989 National Symposium on. 1989, pages 332–336. DOI:10.1109/NSEMC.1989.37202.
9. J. B. O’Neal Jr. «The Residential Power Circuit as a Communication Medium». En: Consumer Electronics, IEEE Transactions on CE-32.3 (1986), pages 567–577. ISSN: 0098-3063. DOI: 10.1109/TCE.1986.290080.
10. A. A. Smith. «Power Line Noise Survey». En: Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on EMC-14.1 (1972), pages 31–32. ISSN: 0018-9375. DOI: 10.1109/TEMC.1972.303202.
11. M. Tlich y col. «Novel approach for PLC impulsive noise modelling». En: Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on. 2009, pages 20–25. DOI: 10.1109/ISPLC.2009.4913397.
12. R. M. Vines y col. «Noise on Residential Power Distribution Circuits». Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on EMC-26.4 (1984); pages 161–168. ISSN: 0018-9375. DOI: 10.1109/TEMC.1984.304217.