



Обзорная статья

УДК 621.394.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188272>

EDN: <https://www.elibrary.ru/TWUYAL>

ОБЗОР МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ ПО СТАЦИОНАРНЫМ И БОРТОВЫМ СЕТЯМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В.Е. Мартиросов , В.В. Егоров , М.К. Золотенкова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

skb-4@bk.ru

Цитирование: Мартиросов В.Е., Егоров В.В., Золотенкова М.К. Обзор методов цифровой связи по сетям электропитания // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188272>

Аннотация. В данной обзорной статье рассматриваются вопросы цифровой передачи данных с использованием в качестве каналов связи сетей электропитания. Такие системы передачи данных относятся к классу технологий PLC (*Power Line Communications*). Наиболее широко системы PLC связи применяются на объектах промышленных предприятий и в зданиях жилого сектора при организации автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов (электричества, тепловой энергии, водоснабжения и др.). В бортовых сетях электропитания эти технологии могут применяться при организации удаленного доступа к разнесенным бортовым системам с целью контроля и автоматизированного управления их параметрами, в том числе и в условиях интенсивной радиоэлектронной борьбы. Из гражданских применений можно также отметить возникший в 2000-х годах всплеск развития PLC технологий при построении концепции так называемого «умного дома».

В силу разнородности решаемых с привлечением PLC технологий задач в дальнейшем рассмотрении ограничимся классом PLC систем связи, применяемых при передаче данных по стандартным сетям электропитания 0,4 кВ. Цель данной работы – исследовать отмечаемые в научно-технической литературе проблемы

недостаточной надёжности и устойчивости цифровой связи в используемых на практике PLC системах.

В статье проведён всесторонний обзор научно-технической литературы и проанализирован ряд известных типовых технических решений, направленных на увеличение скорости и помехоустойчивости PLC систем. Для PLC системы связи, выполненной на базе сети электропитания многоэтажного корпуса, проведены исследования помеховой обстановки в регламентированном международными стандартами диапазоне рабочих частот. В процессе исследований были выявлены нелинейные свойства PLC канала связи, выполненного на типовой сети электропитания, которые существенно влияют на качество и устойчивость передачи по ней информационных данных. Их учёт обязателен при выборе вида модуляции и способа передачи цифровых данных в целом.

Ключевые слова: PLC; стандарты проводной связи; импульсные сетевые помехи, виды модуляции; помехоустойчивость связи.

OVERVIEW OF DIGITAL COMMUNICATION METHODS OVER POWER SUPPLY NETWORKS

V.Y. Martirosov , V.V. Egorov  , M.K. Zolotenkova 

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

 skb-4@bk.ru

Citation: Martirosov V.Y., Egorov V.V., Zolotenkova M.K. Overview of digital communication methods over power supply net-works // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188272>

Abstract. This review article discusses the issues of digital data transmission using power supply networks as communication channels. These data transmission systems belong to the PLC (Power Line Communications) technology class. PLC communication systems are widely used in industrial facilities and residential buildings for the implementation of automated systems for monitoring and accounting of energy resources (electricity, heat, water, etc.). In onboard power supply networks, these technologies can be used to provide remote access to distributed onboard systems for

monitoring and automated control of their parameters, including in the context of intense electronic warfare. In terms of civilian applications, the surge in the development of PLC technologies in the 2000s can be observed in the construction of the so-called "smart home" concept.

Due to the heterogeneity of the tasks solved with the involvement of PLC technologies, in the further consideration, we will limit ourselves to the class of PLC communication systems used in the transmission of data over standard 0.4 kV power supply networks. The purpose of this work is to investigate the problems of insufficient reliability and stability of digital communication in PLC systems used in practice, which are noted in the scientific and technical literature.

The article provides a comprehensive review of the scientific and technical literature and analyzes a number of well-known standard technical solutions aimed at increasing the speed and noise immunity of PLC systems. For the PLC communication system, which is based on the power supply network of a multi-storey building, studies of the interference environment in the range of operating frequencies regulated by international standards were carried out. In the course of the studies, the nonlinear properties of the PLC communication channel, which is based on a typical power supply network, were identified, which significantly affect the quality and stability of the transmission of information data. Their consideration is mandatory when choosing the type of modulation and the method of transmitting digital data in general.

Keywords: PLC; impulse noise; types of modulation; wire communication standards.

Введение

Технологии передачи данных по силовым сетям электропитания известны достаточно давно, но долгое время не получали широкого применения ввиду высокой сложности организации устойчиво работающих каналов связи. Низкие скорости передачи данных, неизбежные при несущих частотах в пределах диапазона длинных волн (не более 0,5 МГц) с привлечением бинарных дискретных сигналов без многоканального уплотнения, долгое время делали связь по сети электропитания неконкурентоспособной по отношению к активно

развивающимся стандартам беспроводной связи. Однако наблюдаемый в настоящее время существенный рост уровня помех в радиодиапазоне (в том числе создаваемых в качестве средств радиоэлектронной борьбы), а также угрозы несанкционированного доступа к информации приводят к тому, что актуальность проводных каналов связи начала нарастать. При этом в настоящее время для них может быть обеспечена достаточно высокая надёжность и мобильность организации каналов связи, защищенных от несанкционированного доступа в радиоэфире.

Обсуждаемый в статье способ организации связи носит название PLC (Power Line Communication) технологии (связь по сетям электропитания), тенденции роста интереса к которым становятся заметней, причем как в научно-инженерном, так и в коммерческом сегментах деятельности.

Связь по сетям электропитания может решать задачу передачи телеметрической информации как на борту авиационной техники с использованием силовых сетей питания, так и на предприятиях, осуществляющих управление воздушным движением или относящихся к производственному сектору авиационной и космической техники с целью повышения надёжности и обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа.

Стандарты PLC технологии для систем цифровой связи

Возрастающий научно-технический и коммерческий интерес к цифровой связи по стандартным сетям электропитания подтверждается разработкой новых международных стандартов и появлением на рынке современных инженерных PLC систем. В частности, в публикации [1] представлен современный стандарт G3-PLC, регламентирующий применение PLC связи для задач коммуникации интеллектуальных сетей и приложений Интернета вещей в различных отраслях народного хозяйства.

Данный стандарт на физическом уровне предполагает использование бинарной фазовой манипуляции с частотным уплотнением (OFDM-BPSK), что позволяет эффективно использовать выделенные участки спектра и добиться

достаточно высоких скоростей передачи информации. Стандарт утверждён и рекомендован для применения Международным союзом электросвязи в 2011 году [2] (Рекомендация МСЭ-Т G.9955). Он определяет требования как для разработчиков PLC-модемов, так и для разработчиков бытовой аппаратуры, в контексте минимизации помех, создаваемых электроприборами в резервируемых стандартом диапазонах частот. Последние включают в себя диапазоны CENELEC-A (35,9–90,6 кГц), CENELEC-B (98,4–121,9 кГц), ARIB (154,7–403,1 кГц) и FCC (154,7–487,5 кГц).

Существует также множество работ [3, 4, 5, 6 и 7], в которых достаточно подробно освещаются как специфика использования приведённых выше диапазонов рабочих частот, так и проблемы, возникающие при организации PLC связи в реальных практических приложениях.

На основании стандарта G.9955 в мировой практике активно разрабатываются технологии и модемы автоматизированной системы коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ). Например, в [8] приводятся характеристики для модемов, применяемых в приборах учёта электроэнергии АО «Концерн Энергомера»: скорость передачи данных до 45 кбит/с, способ модуляции – OFDM, рабочий диапазон частот передачи данных составляет 30 – 90 кГц, что в целом находится в рамках диапазона CENELEC-A. Важно упомянуть, что обозначенная выше скорость передачи данных это фактическая канальная скорость с учётом применяемого шифрования (AES-128) и кодирования. При этом информационная скорость передачи значительно ниже.

В публикации [9] упоминается стандарт PRIME, позволяющий достигать скорости передачи данных до 1 Мбит/с. Данный стандарт упоминается в документе Международного союза электросвязи G.9904 [10] и помимо диапазона CENELEC-A использует диапазоны ARIB и FCC. Данный стандарт применяется в том числе и в России, например, в приборах учёта электроэнергии фирмы «ООО НПК Инкотекс» (приборы учёта электроэнергии «Меркурий») [11].

Регламентирующий документ [10] был утверждён Международным Союзом Электросвязи в 2014 году. Вот уже более 10 лет он активно применяется, однако до сих пор возникают проблемы, связанные с качеством передачи данных по

сетям электропитания. Причины этих проблем были описаны ещё в 2007 году в работе [4] и до сих пор сохраняют свою актуальность. Работа [4] является обзором актуальной ситуации по PLC технологиям на 2007 год и, в частности, указывает на следующие проблемы организации каналов связи: внутренние переотражения и многолучевое распространение сигналов.

Переотражения сигнала в случае рассмотрения узкополосной PLC системы имеет смысл анализировать с точки зрения модели длинной линии связи [12], в которой присутствуют стыки несогласованных между собой по импедансам отрезков линий (с учётом и относительно рабочей частоты системы PLC).

Каждый такой стык формирует отражённую волну, которая несинфазно складываясь с излучаемым колебанием может приводить к тому, что в определённых физических точках линии связи передача сигналов становится невозможна. Этот эффект проявляется в тех случаях, когда необходимая дистанция связи становится сопоставима с длиной волны рабочей частоты PLC-системы.

Данная проблема может решаться путём передачи сигнала на нескольких частотах, например, с использованием модуляции S-FSK. В случае применения OFDM- BPSK, с передачей информационных данных на множестве поднесущих частот [13], проблема переотражений сигналов приводит к снижению скорости передачи, что создаёт определённые препятствия при организации PLC-связи.

Многолучевое распространение применительно к системам PLC имеет схожую природу и вызвано приёмом отражённых волн от большого количества неоднородностей в разветвлённой линии передачи. В отличие от переотражений в исходной ненагруженной сети электропитания, многолуче́вость в PLC является фактором с высокой долей случайности, так как сеть в общем случае является динамической структурой, параметры которой могут меняться в зависимости от подключения к ней электрических приборов, потребляющих энергию, в различных точках сети.

Подавление сигнала в PLC канале может также возникать за счёт наличия во входных цепях электропитания бытовой техники фильтров подавления радиочастотных электромагнитных помех. В этом случае импеданс сети на

данных частотах значительно снижается и передатчику PLC может не хватить мощности для передачи данных в режектируемой фильтрами частотной полосе.

Импульсные помехи и виды модуляции в PLC системах цифровой связи

Присущие низовым сетям электропитания импульсные помехи являются циклостационарными случайными процессами [14], так как они следуют периодически с удвоенной частотой напряжения сети электропитания (рисунок 1).

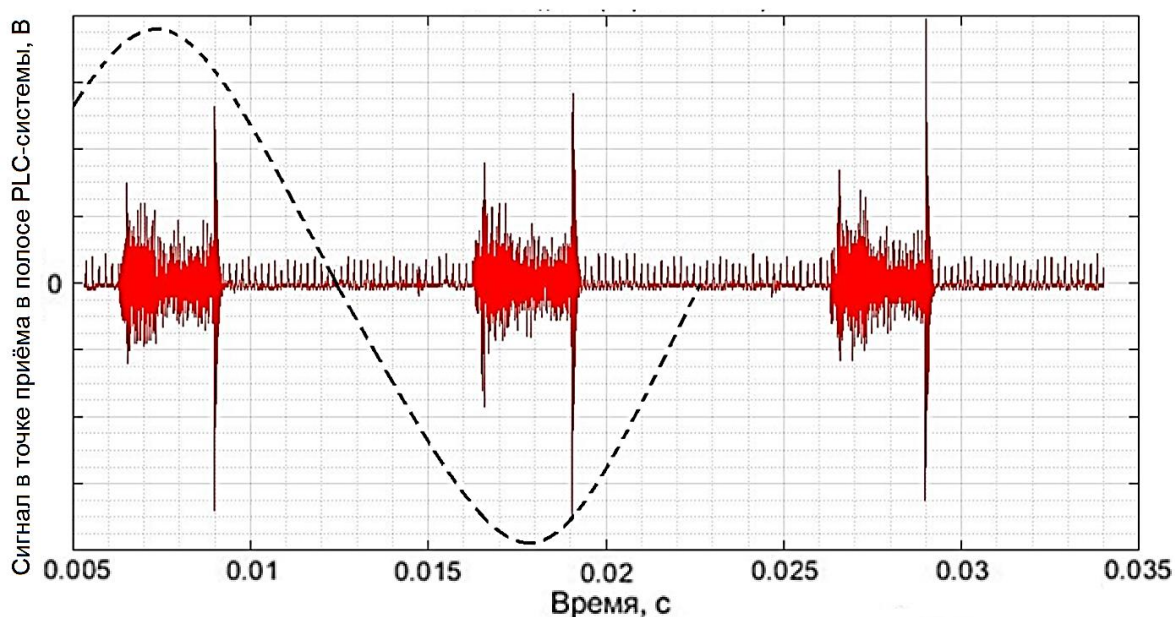


Рисунок 1 – импульсные сетевые помехи на входе PLC-приёмника

Пунктирной линией показана осциллограмма гармонического напряжения сети электропитания следующего с частотой 50 Гц. Очевидно, что импульсные помехи формируются в области экстремальных значений напряжения питания. Это связано с временной диаграммой работы двухполупериодных выпрямителей подключённых к сети электроприборов, в которых импульсное потребление тока происходит в моменты времени соответствующие экстремумам напряжения питания сети.

Данный эффект был проанализирован в работе [15], в которой показана спектральная плотность мощности дискретных по частоте с шагом 100 Гц помех, создаваемых синхронно всеми подключёнными к сети электроприборами (рисунок 2).

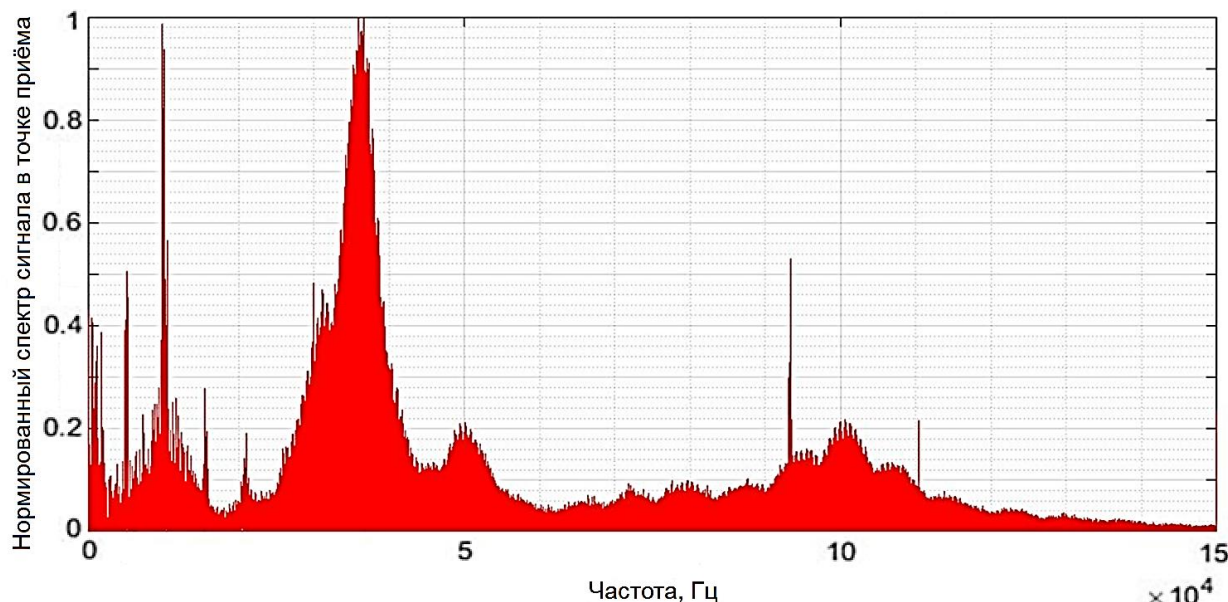


Рисунок 2 – спектральная плотность мощности помех (дискретных с шагом 100 Гц) в стандартной сети электропитания

Показанный выше эффект был известен достаточно давно. В 1975 году компанией Pico Electronics на его основе был разработан один из первых промышленных стандартов PLC-связи под названием X-10 [16], который предназначался для решения задач домашней автоматизации. Передача данных в нём осуществляется в моменты времени пересечения синусоидой сети электропитания нулевых значений. При этом за период сетевого напряжения передаётся два бита информации, то есть канальная скорость передачи данных в нём составляет 100 бит в секунду (при частоте сети электропитания 50 Гц). На рисунке 3 приведена иллюстрация принципа формирования информационных импульсов в стандарте X-10.



Рисунок 3 – принцип синхронного формирования сигнала стандарта X10

На данный момент такой способ PLC-коммуникации является достаточно устаревшим, но тем не менее применяется, так как являясь синхронным по отношению к напряжению сети электропитания позволяет улучшить помехоустойчивости связи.

Подводя итоги по рассмотренным выше материалам можно сделать вывод о том, что, несмотря на бурное развитие технологии PLC в последнее десятилетие, проблема организации качественного и устойчивого канала связи до сих пор кардинально не решена. В основном к таким заключениям приходят авторы работ [4] и [17]. Работа [17] представляет собой достаточно подробный обзор применения OFDM в сочетании с различными видами фазовой манипуляции. В работе авторами приводится некоторая цепочка рассуждений, в рамках которой виды модуляции в узкополосной PLC эволюционно располагаются в следующем порядке: BPSK, FSK, S-FSK, DCSK и, наконец, как «вершина эволюции», упоминается OFDM (Рисунки 4-7).

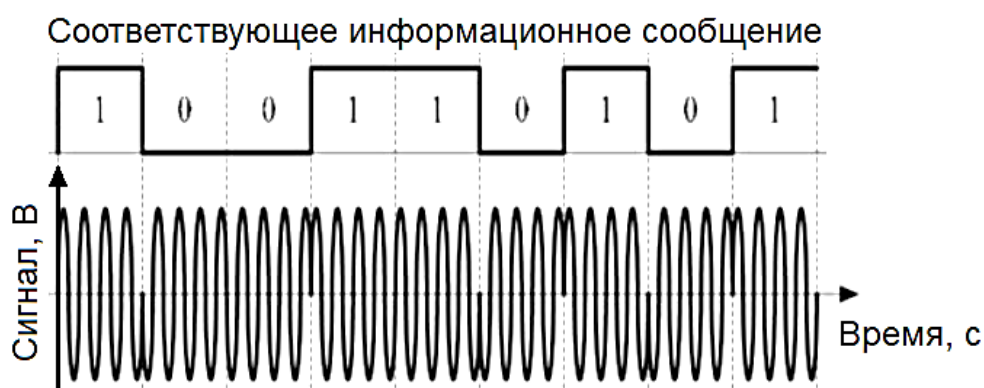


Рисунок 4а – временные характеристики BPSK-сигнала

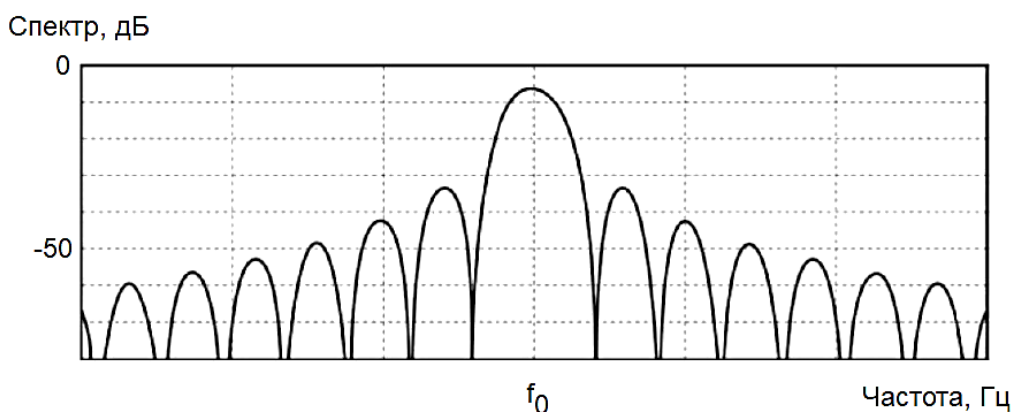


Рисунок 4б – спектральные характеристики BPSK-сигнала

На рисунке 4б величина f_0 соответствует несущей частоте PLC - системы.

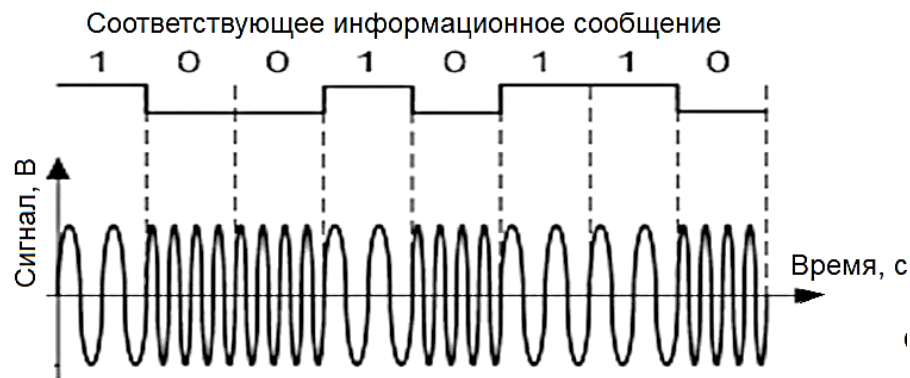


Рисунок 5а – временные характеристики FSK-сигнала и S-FSK-сигнала.

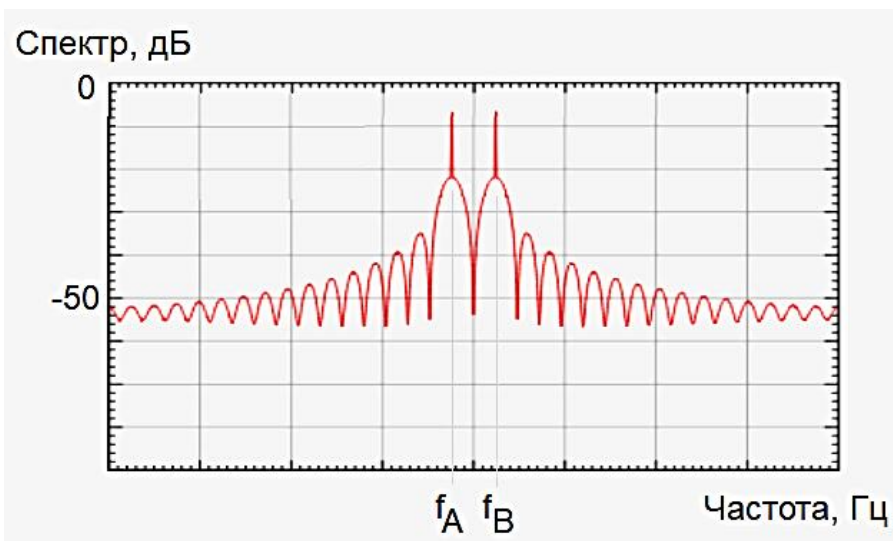


Рисунок 5б – спектральные характеристики FSK-сигнала

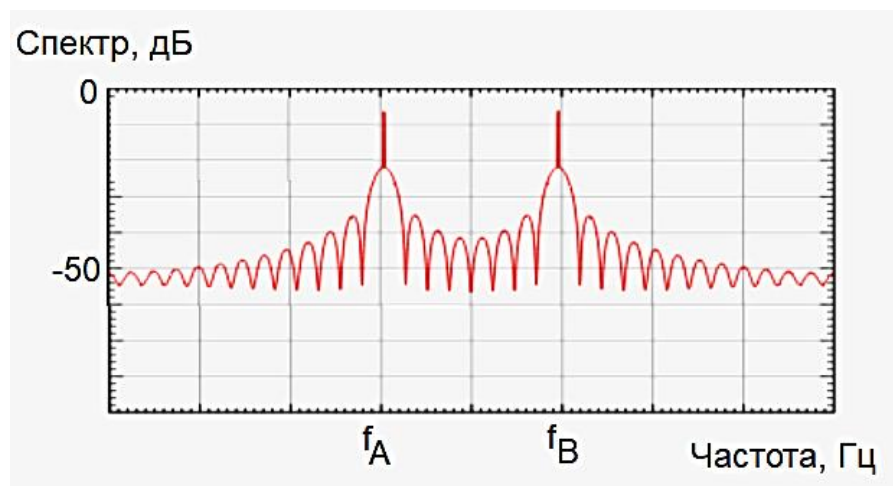


Рисунок 5в – спектральные характеристики S-FSK-сигнала

На рисунках 5б и 5в величины f_A и f_B соответствуют частотам, на которых осуществляется передача символов алфавита системы.

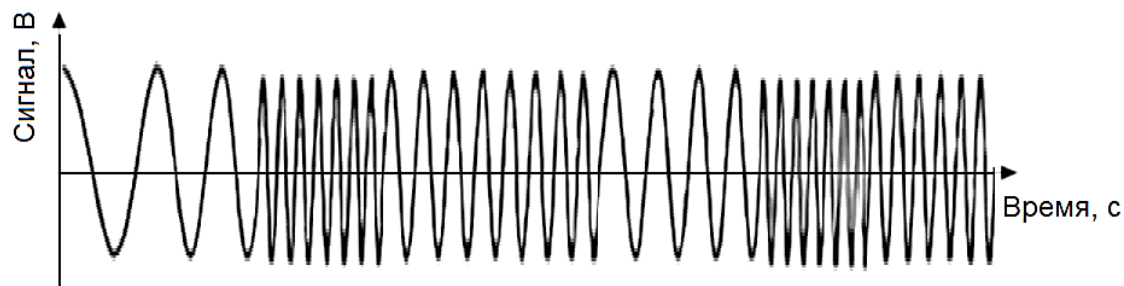


Рисунок 6а – временные характеристики DCSK

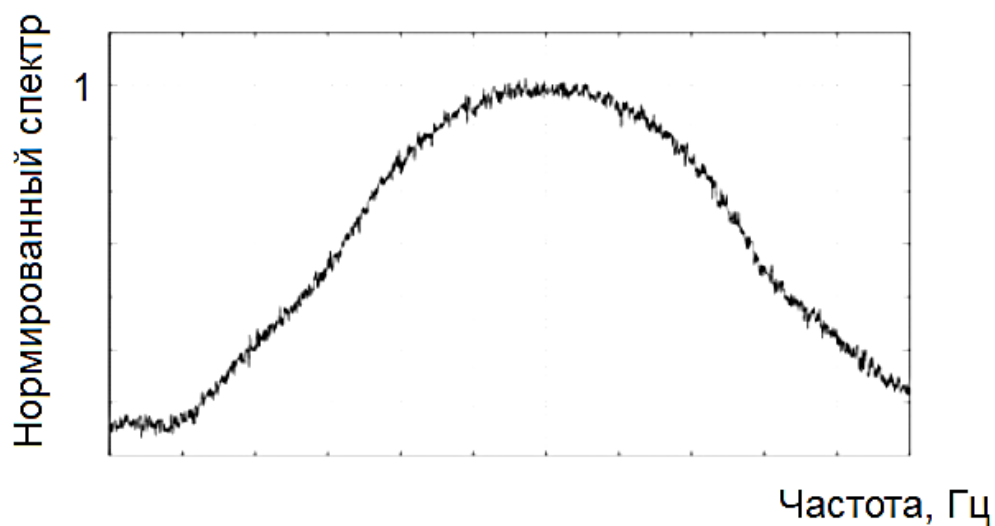


Рисунок 6б – спектральные характеристики DCSK

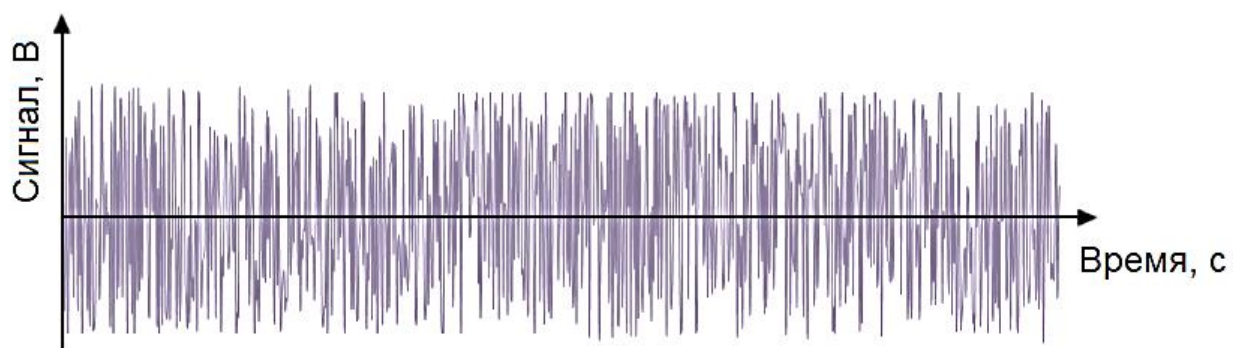


Рисунок 7а – временные характеристики OFDM

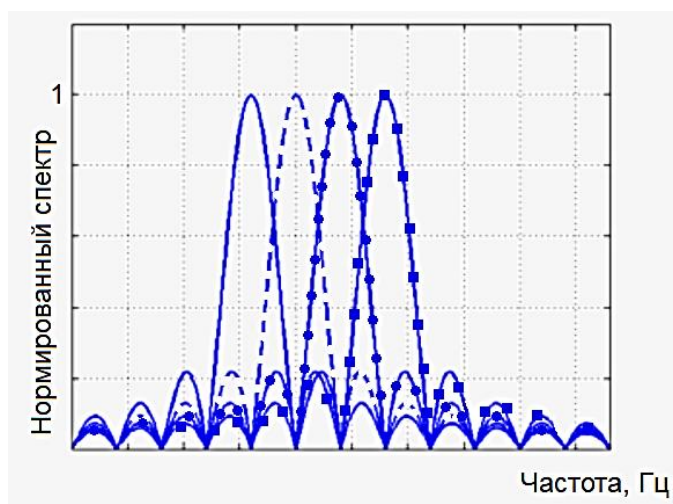


Рисунок 7б – спектральные характеристики OFDM

С одной стороны преимущества OFDM действительно теоретически очевидны, так как открывают не только возможности наиболее эффективного использования частотного спектра с точки зрения скорости передачи информации, но и позволяют сохранять работоспособность канала даже при подавлении части поднесущих частот. Последнее приведёт к некоторому снижению скорости передачи данных, но канал связи будет продолжать функционировать.

С другой стороны, важным критерием для узкополосного PLC-модема, технологически изначально работающего на низкой скорости передачи информации, является его стоимость, которая связана со сложностью применяемых решений в том числе в части модуляции. OFDM является достаточно сложным видом модуляции, требующим высокой точности расстановки частот поднесущих и формирования самих парциальных сигналов и их спектров (спектры Найквиста) для того, чтобы избежать межсимвольных и межканальных искажений. Все эти проблемы в современных высокоскоростных системах связи решаются формированием и распаковкой группового сигнала алгоритмами цифровой обработки сигналов в специализированных процессорах, которые являются достаточно сложными и дорогостоящими устройствами.

В реальности же (и об этом также упоминается в работе [17]) уровень помех в сети электропитания может быть настолько значителен, что иногда сводит на нет все преимущества в скорости по отношению к более простым видам модуляции, например, таким как FSK-модуляции. При этом модем для работы с OFDM сигналами значительно превышает по стоимости модем FSK, что в условиях массового применения является значительной преградой для его применения в PLC системах связи.

Инженерно-технические решения для PLC систем цифровой связи

При рассмотрении инженерно-технических решений, помимо упомянутой выше системы X-10, следует также указать на результаты НИОКР “Информационная система энерго ресурсосбережения ИСЭРС”, выполненной в первой половине 2000-х годов [18,19]. В системе ИСЭРС по стандартным сетям

электропитания в девяти многоэтажных корпусах МАИ с большого массива (около сотни) произвольно расположенных датчиков расхода энергоресурсов осуществлялся сбор, передача, обработка и ежечасное системное отображение на мониторе центрального терминала информационных данных о расходе энергоресурсов: электроэнергии, теплоэнергии и воды. Для передачи данных с локальных терминалов корпусов на центральный терминал системы были использованы каналы внутренней АТС (Автоматическая телефонная станция) предприятия. Структурная схема каналообразующей аппаратуры системы ИСЭРС для одного из корпусов института (идентификатор корпуса – i) показана на рисунке 8 [19].

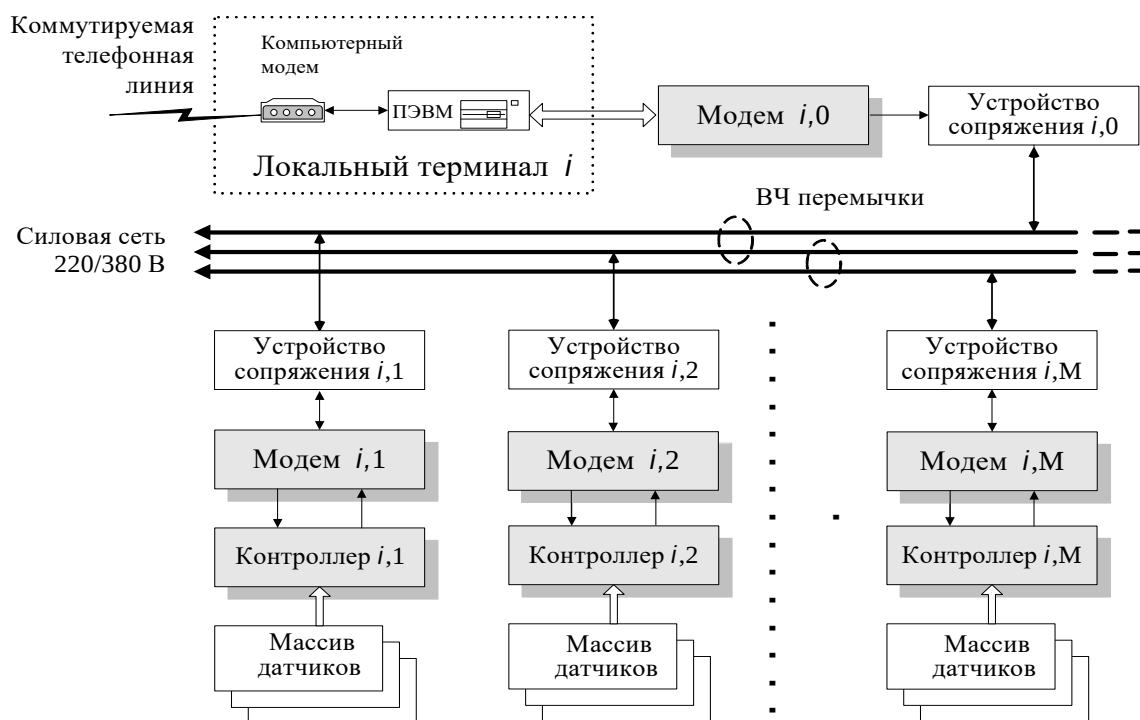


Рисунок 8 – структурная схема каналообразующей аппаратуры ИСЭРС

В системе ИСЭРС на рабочих частотах порядка 110 кГц была применена синхронизированная с сетью малоиндексная FSK модуляция с неразрывной фазой, обработка сигналов которой проводилась на цифровом сигнальном процессоре (DSP), что обеспечило многолетнюю надёжную работу системы. Данная разработка, можно сказать, опередила своё время, так как основной бум развития PLC начался на несколько лет позже, приблизительно в 2007-08 годах.

Можно указать на патенты [20, 21], в которых применяется синхронизация частот приёма и передачи с частотами гармоник сети электропитания. При этом в отличие от X-10 суть синхронизации заключается не в отправке радиоимпульсов при пересечении нуля гармоникой сетевого напряжения, а в формировании синхронизированных с частотой сети несущих колебаний, что очевидно повышает помехоустойчивость и надёжность системы связи.

В 2023 г. также был зарегистрирован патент на изобретение [22], получившее позже (в 2024 году) бронзовую медаль салона изобретений «XXVII Московский международный салон изобретений и инновационных технологий». Данное изобретение предполагает использование двухчастотных посылок DTMF-стандарта, перенесённых на несущую частоту диапазона CENELEC A, для реализации передачи данных по стандартным сетям электропитания. Данное решение интересно с точки зрения минимизации стоимости и доступности применяемой элементной базы, однако не использует синхронизацию с частотой сети электропитания, что очевидно снижает его потенциальную помехоустойчивость.

В источнике [23] представлены существующие на рынке микросхемы для организации канала связи PLC как импортного, так и отечественного производства. Например, микросхема TDA5051AT, которая позволяет организовать канал связи на основе ASK-модуляции, а микросхемы в KP1446XK1 производства ОАО «Ангстрем» и ST7538/ST7540 фирмы «ST Microelectronics» позволяют организовать канал, основанный на модуляции вида FSK.

В источнике [24] приводится достаточно подробный анализ принципов работы и характеристик микросхемы серии EV8xxx фирмы «Semtech», которые могут работать в различных режимах работы и поддерживают стандарты ITU-T G.9903 (G3-PLC), ITU G.9902, ITU-T G.9904 (PRIME), IEEE P1901.2 и IEC-61334 (S-FSK). Кроме того, они поддерживают фирменный высокопроизводительный режим 4GPLC, основанный на OFDM.

Отдельно стоит отметить концепцию организации дуплексной связи. Рассмотренные выше способы передачи информации могут быть организованы как в режиме полудуплекса (что применяется чаще всего), так и в дуплексном

виде, что способно вдвое ускорить передачу информации в канале PLC. Данным исследованиям посвящены работы [25] и [26].

Также имеет смысл упомянуть о так называемых гетерогенных PLC-RF модемах, в которых используется дублирование информации по различным разнородным каналам связи. Например, в работе [14] рассматривается организация такого канала связи, где передача данных осуществляется одновременно по сети электропитания и по радиоканалу. Концепция такого подхода заключается в том, что такое резервирование способно повысить надёжность связи. Кроме того, в многоступенчатой системе передачи данных радиоканалы могут чередоваться с каналами PLC.

Заключение

Проведённый в статье обзор международных стандартов и анализ распространённых в инженерной практике методов построения PLC систем передачи данных позволили выявить и исследовать причины недостаточной устойчивости и надёжности их работы, заключающиеся в нелинейных свойствах самого канала связи.

Авторами выполнен поиск и анализ существующих и актуальных на текущий момент стандартов PLC-связи, позволивший произвести условное деление PLC-систем на широкополосные и узкополосные. Особое внимание уделялось анализу частотных диапазонов, а также вопросам применения и проблемам внедрения узкополосных PLC. Также проведено исследование актуальных технических решений узкополосных PLC-систем — как в области структурных решений, так и в области представленной на рынке элементной базы, позволяющей упростить инженерную разработку системы связи.

Подводя итоги обзора можно сделать вывод о том, что несмотря на наличие множества актуальных исследований проблема помехозащищённости PLC-связи пока кардинально не решена. Наиболее свежие публикации сводятся в основном к гетерогенным решениям, которые фактически маскируют, но не решают проблемы связи PLC. Решение же актуальных вопросов связи для модемов PLC

необходимо искать исходя из свойств самого канала передачи информации, в качестве которого используются стандартные сети электропитания 0,4 кВ.

Именно сложность и неординарность характеристик данного канала приводит к тому, что оптимизация технических решений с точки зрения баланса стоимости модема и обеспечиваемой им помехоустойчивости связи до сих пор является актуальной научно-технической задачей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. The G3-Alliance is dedicated to advancing two cutting-edge technologies: G3-Hybrid and G3-PLC // Интернет-ресурс <https://g3-alliance.com/technologies/> (дата обращения 01.10.2025)
2. Рекомендация МСЭ-Т G.9955. СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ. Сети доступа – Сети внутри помещений. Узкополосные приемопередатчики, использующие мультиплексирование с ортогональным разделением частот, в системах связи по линиям электропередачи – Спецификация физического уровня. Утверждена 16.12.2011.
3. Hrasnica H., Haidine A., Lehnert R. Broadband Powerline Communications Net-works. - John Wiley & Sons, Chichester, 2004, 275 p.
4. M. S. Yousuf and M. El-Shafei, "Power Line Communications: An Overview - Part I," 2007 Innovations in Information Technologies (IIT), Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 218-222, doi: 10.1109/IIT.2007.4430363.
5. Охрименко В. Ю. PLC-технологии. Часть 1 // Электронные компоненты. - 2009. - №10. - С. 58-55.
6. Охрименко В. Ю. PLC-технологии. Часть 2 // Электронные компоненты. - 2009. - № 11. - С. 50-53.

7. Охрименко В. Ю. PLC-технологии. Часть 3 // Электронные компоненты. - 2009. - № 12. - С. 58-61.
8. АСКУЭ на базе канала связи G3-PLC. URL: https://www.energomera.ru/ru/products/askue/variants/askue_plcg3 (дата обращения 01.10.2025)
9. Технологии PLC. URL: <https://www.incotexcom.ru/technologies/plc> (дата обращения 10.12.2025)
10. Recommendation ITU-T G.9903. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks: Switzerland: Approved in 2017-08-13 / International Telecommunication Union (ITU), 2017. – 232 p.
11. Счётчики Инкотекс Меркурий. URL: <https://www.incotexcom.ru/contacts> (дата обращения 10.12.2025)
12. Бутковский, А.Г. Структурная теория распределенных систем - М.: Наука, 1977. - 320 с.
13. Охрименко В. Ю. Широкополосная PLC-технология: проблемы и решения // Электронные компоненты - 2010. - №1 - С. 43-49.
14. Antoni J. Cyclostationarity by examples // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2009. - Vol. 23, № 4. - pp. 987-1036, doi:10.1016/j.ymssp.2008.10.010
15. Разумова О. Д. Анализ помех, создаваемых бытовыми электроприборами в сетях электропитания // Гагаринские чтения - 2022: Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVIII, Москва, 12–15 апреля 2022 года. - Москва: Издательство "Перо", 2022. - С. 307.
16. Елисеев Н. Технология x10 - управление "умным" домом // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2007. - № 7(81). - С. 32-36.
17. Охрименко В.Ю. Узкополосная PLC-технология: OFDM-модуляция // Время Электроники. - 2010. - №. 9. - С. 42.
18. Мартыросов, В. Е., Мелехин С.В. Аппаратура передачи данных по стандартным сетям электропитания // Труды МАИ. - 2011. - № 49. - С.68

19. Мартиросов В.Е. Информационная система энерго ресурсосбережения (ИСЭРС) // Труды МАИ. - 2006. - № 22. - С.10
20. Мартиросов В.Е., Гуськов А.П., Мелехин С.В. Локальная система контроля и сбора данных. Патент RU 2178951 C1, 27.01.2002
21. Мартиросов В.Е., Гуськов А.П., Мелехин С.В. Система передачи и приема модулированных сигналов по сети электропитания. Патент RU 2178952 C1, 27.01.2002
22. Егоров В.В. Частотно-импульсный модем для передачи данных по сетям электропитания Патент № 2815411 C1, 14.03.2024
23. Троицкий Ю, Нестеров А., Ширяев А. Анализ помех, создаваемых бытовыми электроприборами в сетях электропитания // Современная электроника. - 2008. - №8 - С. 18-21.
24. Передача информации по сетям электропитания с помощью ИС компании Semtech. URL: <https://www.icquest.ru/publications/4-semtech/2015/681> (дата обращения 10.12.2025)
25. Рогожников, Е.В., Дмитриев Э.М., Абенов Р.Р. Полнодуплексная система передачи данных по цепям питания. Аналоговая компенсация, концепция построения и проблемы организации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. - 2019. - Т. 13, № 8. - С. 21-27. - DOI 10.24411/2072-8735-2018-10297.
26. Prasad G. In-band full-duplex power line communications // University of British Columbia, 2019.

References

1. The G3-Alliance is dedicated to advancing two cutting-edge technologies: G3-Hybrid and G3-PLC. URL: <https://g3-alliance.com/technologies/> (accessed 01.10.2025)
2. Recommendation ITU-T G.9955. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Access networks – In premises networks Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers – Physical layer specification. Approved 16.12.2011.

3. Hrasnica H., Haidine A., Lehnert R. Broadband Powerline Communications Net-works. *John Wiley & Sons*, Chichester, 2004, 275 p.
4. M. S. Yousuf and M. El-Shafei, "Power Line Communications: An Overview - Part I," *2007 Innovations in Information Technologies (IIT)*, Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 218-222, doi: 10.1109/IIT.2007.4430363.
5. Okhrimenko V. Yu. *PLC-tekhnologii. Chast 1* (PLC technologies. Part 1). Electronic components, 2009, no 10, pp. 58-55.
6. Okhrimenko V. Yu. *PLC-tekhnologii. Chast 2* (PLC technologies. Part 2). Electronic components. 2009, no 11, pp. 50-53.
7. Okhrimenko V. Yu. *PLC-tekhnologii. Chast 3* (PLC technologies. Part 3). Electronic components. 2009, no 12, pp. 58-61.
8. *ASKUE na baze kanala svyazi G3-PLC* (ASCUE is based on the G3-PLC communication channel). URL: https://www.energomera.ru/ru/products/askue/variants/askue_plcg3 (accessed 01.10.2025)
9. *PLC tekhnologii* (PLC technologies). URL: <https://www.incotexcom.ru/technologies/plc> (accessed 10.12.2025)
10. Recommendation ITU-T G.9903. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks: Switzerland: Approved in 2017-08-13, International Telecommunication Union (ITU), 2017, 232 p.
11. *Schetchiki Inkoteks Merkurii* (Incotex mercury counters). URL: <https://www.incotexcom.ru/contacts> (accessed 10.12.2025)
12. Butkovskiy. A.G. *Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem* (The structural theory of distributed systems). *Nauka*, 1977, 320 p.
13. Okhrimenko V. Yu. *Shirokopolosnaya PLC-tekhnologiya: problemy i resheniya* (Broadband PLC technology: problems and solutions). Electronic components. 2010, no 1, pp. 43-49.
14. Antoni J. Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009, Vol. 23, no 4, pp. 987-1036, doi:10.1016/j.ymssp.2008.10.010

15. Razumova O. D. *Analiz pomekh sozdavayemykh bytovymi elektropriborami v setyakh elektropitaniya* (Analysis of interference caused by household electrical appliances in power supply networks). *Gagarinskiye chteniya - 2022: Sbornik tezisov rabot mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii XLVIII* (Gagarin Readings - 2022: Collection of abstracts of the International Youth Scientific Conference XLVIII), Moscow, 2022, 307 p.
16. Eliseyev N. *Tekhnologiya kh10 - upravleniye "umnym" domom* (X10 technology - smart home management) *Electronics: Science, Technology, business*, 2007, no 7(81), pp. 32-36.
17. Okhrimenko V.Yu. *Uzkopolosnaya PLC-tekhnologiya: OFDM-modulyatsiya* (Narrowband PLC technology: OFDM modulation). *Electronics Time*, 2010, no 9, 42 p.
18. Martirosov. V.E.. Melekhin S.V. *Apparatura peredachi dannykh po standartnym setyam elektropitaniya* (Data transmission equipment over standard power supply networks). *Trudy MAI*, 2011, no 49, 68 p.
19. Martirosov. V.E. *Informatsionnaya sistema energo resursosberezheniya (ISERS)* (Energy Resource Conservation Information System (ISERS)). *Trudy MAI*, 2006, no 22, 10 p.
20. Martirosov V.E.. Guskov A.P.. Melekhin S.V. *Lokalnaya sistema kontrolya i sbora dannykh* (A local monitoring and data collection system). Patent RU 2178951 C1, 27.01.2002
21. Martirosov V.E.. Guskov A.P.. Melekhin S.V. *Sistema peredachi i priyema modulirovannykh signalov po seti elektropitaniya* (The system of transmission and reception of modulated signals over the power supply network). Patent RU 2178952 C1, 27.01.2002
22. Egorov V.V. *Chastotno-impulsnyy modem dlya peredachi dannykh po setyam elektropitaniya* (Pulse frequency modem for data transmission over power supply networks). Patent RU 2815411 C1, 14.03.2024
23. Troitskiy Yu. Nesterov A.. Shirayayev A. *Analiz pomekh. sozdavayemykh bytovymi elektropriborami v setyakh elektropitaniya* (Interference analysis. generated by household electrical appliances in power supply networks) *Sovremennaya elektronika*, 2008, no 8, pp. 18-21.

24. Peredacha informatsii po setyam elektropitaniya s pomoshchyu IS kompanii Semtech. URL: <https://www.icquest.ru/publications/4-semtech/2015/681> (accessed 10.12.2025)

25. Rogozhnikov. E.V.. Dmitriyev E.M.. Abenov R.R. *Polnodupleksnaya sistema peredachi dannykh po tsepyam pitaniya. Analogovaya kompensatsiya. kontseptsiya postroyeniya i problemy organizatsii* (Full-duplex power transmission system. Analog compensation, the concept of building and the problems of organization). T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2019. Vol. 13, no 8, pp. 21-27. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10297.

26. Prasad G. In-band full-duplex power line communications. University of British Columbia, 2019.

Информация об авторах

Владимир Ервандович Мартиросов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 408 «Инфокоммуникации», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; SPIN-код: 5971-7952; AuthorID: 502373; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8662-9667>; Scopus Author ID: 6603598882; e-mail: marti_ve@mail.ru

Василий Валерьевич Егоров, старший преподаватель кафедры 408 «Инфокоммуникации», старший преподаватель кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов», начальник СКБ-4 «Сигнал», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; AuthorID: 943227; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4553-0494>; Scopus ID: 57198083844; e-mail: skb-4@bk.ru

Мария Константиновна Золотенкова, ассистент кафедры 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств», ассистент кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов», инженер СКБ-4 «Сигнал», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; SPIN-код: 3707-8628; AuthorID: 1291383; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0791-086X>; Scopus Author ID: 57877141700; e-mail: zolotenkovamk@mai.ru

Information about the authors

Vladimir Y. Martirosov, Ph.D. (Eng.), Professor, Professor at Department no. 408 "Infocommunications", Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; SPIN-code: 5971-7952; AuthorID: 502373; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8662-9667>; Scopus Author ID: 6603598882; e-mail: marti_ve@mail.ru

Vasily V. Egorov, Senior lecturer at Department no. 408 "Infocommunications", Senior lecturer at Department no. 704 "Information and Control Systems of Aircraft", Head of SKB-4 "Signal", Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; AuthorID: 943227; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4553-0494>; 57198083844; e-mail: skb-4@bk.ru

Maria K. Zolotenkova, Assistant at Department no. 404 "Design, Technology and production of radio-electronic devices", Assistant at Department no. 704 "Information and control complexes of aircraft", engineer SKB-4 "Signal", Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; SPIN-code: 3707-8628; AuthorID: 1291383; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0791-086X>, Scopus Author ID: 57877141700; e-mail: zolotenkovamk@mai.ru

Получено 02 апреля 2026 ● Принято к публикации 28 мая 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 02 April 2026 ● Accepted 28 May 2026 ● Published 25 June 2026
