

Устройства аналоговой и цифровой электроники

УДК 621.316.722

DOI: 10.14529/power200310

АДАПТЕР-ТРАНСИВЕР ДЛЯ ВЧ-АППАРАТУРЫ PLC-ТЕХНОЛОГИЙ

И.В. Брякин¹, И.В. Бочкарев², С.В. Корякин¹

¹ *Институт машиноведения и автоматики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика,*

² *Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика*

Представлен анализ особенностей PLC-технологий, описаны используемые схемотехнические решения адаптеров для ВЧ-аппаратуры и режимы их функционирования. Предложен новый тип адаптеров-трансиверов, основанный на новом принципе построения, реализующем магнитоэлектрический эффект в структуре композитного материала. Одним из основных компонентов предложенных адаптеров, фактически осуществляющим трансляцию информационного ВЧ-сигнала в фазные провода линии электросети, является ферритовый стержень. Анализируются физические эффекты, лежащие в основе работы предложенного адаптера-трансивера. Основным отличительным свойством предложенного адаптера является отсутствие трансформаторной и гальванической связей между силовой высоковольтной линией электросети и низковольтными информационными цепями, что гарантированно обеспечивает блокировку воздействия рабочего высокого напряжения линии электросети на низковольтные цепи ВЧ-аппаратуры. За счет этого предложенный вариант адаптера-трансивера легко встраивается в типовую ВЧ-аппаратуру для PLC-технологий, обеспечивая новый качественный уровень ее функционирования. Разработанные новые типы адаптера-передатчика и адаптера-приемника прошли экспериментальную проверку в составе экспериментальной системы охранно-пожарной сигнализации, особенностью которой являлось использование двух видов каналов передачи: на основе беспроводных технологий с использованием радиоканала и с использованием PLC-технологий.

Ключевые слова: электросеть, PLC-технологии, конденсатор связи, фильтр присоединения, полосовой фильтр, ферромагнитный стержень, ВЧ-аппаратура, магнитоэлектрический эффект, электрическое поле, намагниченность, умный дом, охранно-пожарная сигнализация.

Введение

Технологии передачи данных по линиям электропитания PLC (Power Line Communications) имеют достаточно давнюю историю своего возникновения и нашли свое применение во многих сферах деятельности человека для различных систем удаленного мониторинга, сбора и передачи данных с использованием существующих линий электропитания, например, в комплексных системах безопасности, в системах удаленного контроля параметров и распределенного управления, в автоматике зданий и объектов особого режима и др. [1–3].

Передача данных по проводам электросети имеет существенные преимущества, к которым можно отнести:

- 1) низкие начальные капиталовложения, так как строительство сети не требует проведения работ, связанных с прокладкой кабеля;
- 2) быстрое развертывание сети;
- 3) возможность предоставления услуг практически во всех местах, где есть электропроводка.

Известно, что в настоящее время наблюдается интенсивный рост глобальной компьютеризации населения, предприятий и организаций, что привело к необходимости организации соответствующих компьютерных сетей [4]. Поэтому при рассмотрении вопросов выбора типа каналов передачи информации для компьютерных сетей особый интерес вызывают технические решения на основе именно PLC-технологии, являющейся проводной технологией и направленной на использование кабельной инфраструктуры силовых электросетей для организации высокоскоростной передачи данных и сигналов управления различными устройствами.

Обобщая, можно констатировать, что повсеместно возрастающая потребность в средствах телекоммуникаций как в глобальном, так и в локальном масштабах является фактором, порождающим повышенный интерес к средствам передачи данных именно по линиям электропитания [5–7]. В данном случае рассматриваемая PLC-технология является, в первую очередь, решением

проблемы «последней мили», используя так называемую внутридомовую электросеть [8, 9].

Особенности реализации PLC-технологии

В зависимости от скорости передачи PLC-технология делится на два основных типа:

1) узкополосную (NPL) с шириной спектра от 9 до 500 кГц и со скоростью до 1 Мбит/с;

2) широкополосную (BPL) с шириной спектра до 100 МГц и со скоростью до нескольких сот Мбит/с.

NPL ориентирован на применение в целом ряде современных технических систем:

1) АСУТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами);

2) АСКУЭ (автоматизированные системы контроля и учёта энергоресурсов);

3) СКУД (системы контроля и управления доступом);

4) ОПС (охранно-пожарная система);

5) умный дом;

6) различные виды диспетчеризации.

BPL, в свою очередь, используется в основном в следующих областях:

1) построение локальных сетей;

2) телефония;

3) организация доступа в Интернет;

4) видеонаблюдение;

5) комплексные системы безопасности.

Следует отметить, что BPL и NPL отличаются между собой прежде всего соотношением скорости/расстояния. Причем в PLC-технологии за основу принимается скорость полудуплексного или симплексного режимов передачи данных. Кроме того, повышение скорости целесообразно только для BPL-типа передачи информации, так как поднятие скорости NPL-типа приведёт к необоснованно дорогой реализации при примерно одинаковой стоимости BPL- и NPL-оборудования.

В общем случае спецификация стандарта PLC предусматривает:

1) высококачественную передачу телевизионных сигналов HDTV (высокой чёткости) и SDTV (стандартной чёткости);

2) передачу видеоизображения в форматах MPEG и Motion JPEG;

3) передачу голосовой информации VoIP-телефонии;

4) PLC-оборудование поддерживает функцию качества обслуживания (QoS), в частности четырёхуровневую систему приоритетов и возможность сегментации сети;

5) PLC-оборудование поддерживает все стандартные протоколы передачи информации стеков TCP/IP и классические абонентские интерфейсы [10, 11].

По прогнозу многих специалистов ожидается повсеместное внедрение систем так называемого «умного дома» (Digital Home), обеспечивающих активное взаимодействие с окружающей средой и

с людьми [12–16]. «Умный дом» является сетевой технологией будущего, обеспечивающей автоматизацию и дистанционный контроль технологического производства, офиса или жилого дома. Она объединяет в единую сеть управление оборудованием зданий, включая освещение, обогрев, вентиляцию и кондиционирование, охрану и доступ, средства мультимедиа и т. п. Внедрение системы на этапе проектирования зданий или в уже построенные здания позволяет уменьшить объем коммуникационных цепей и благодаря самотестированию повысить их надежность и срок службы. Одновременно решаются и задачи внедрения современных средств коммуникации, таких как высокоскоростной Интернет.

В качестве простого примера реализации системы «умного дома» на базе PLC-технологии можно привести сетевую платформу X-10, основной средой передачи которой является стандартная силовая электропроводка. Посредством данной платформы осуществляются разнообразные способы управления освещением, компонентами инженерных систем и бытовыми электроприборами. Кроме того, существующий дополнительный ассортимент мультимедийных и охранных устройств расширяет функциональные возможности базового комплекта X-10 по управлению освещением и электроприборами [17].

Практика применения систем «умного дома» выявила наличие проблемы, которая существенно влияет на эксплуатационные характеристики подобных систем в целом и требует соответствующего технического решения.

Для упрощения понимания постановки решаемой задачи рассмотрим одну из подсистем «умного дома», реализующую функцию типового варианта охранно-пожарной сигнализации (ОПС) и представленную соответствующей высокочастотной (ВЧ) аппаратурой.

Анализ основных функциональных модулей ОПС

В систему ОПС входят различные технические средства, которые в совокупности обеспечивают требуемый уровень безопасности. Основу этой системы составляют различные датчики физических величин, исполнительные устройства и вычислительно-управляющее устройство, например, компьютер или программируемый логический контроллер. В качестве датчиков в системах ОПС используют датчики дыма, детекторы светового излучения, датчики температуры, присутствия и движения, положения, давления и прикосновения, акустические и биологические датчики и т. п. Указанные датчики отслеживают отдельные зоны дома, например, контролируют параметры среды или происходящие в этих зонах события и результаты измерений передают через линии электропередачи на компьютер. Полученные сигналы

обрабатываются и при необходимости через эту же линию электропередачи передаются соответствующие сигналы на исполнительные устройства, которые принимают меры по устранению возгорания или предотвращения несанкционированного проникновения. Кроме того, они могут включить сигналы тревоги, блокировать входы, передать сообщения в государственные службы и т. п.

Система ОПС любой сложности и конфигурации предполагает наличие определенных условий подключения к существующим линиям электропередачи. В связи с этим рассмотрим обобщенную схему соединений элементов линии электропередачи, ориентированную на реализацию ОПС в формате PLC-технологий. Вариант такой обобщенной схемы соединений представлен на рис. 1, где ШП – шины подстанции; ШР – шинный разъединитель; В – выключатель; ЛР – линейный разъединитель; ВЗ – высокочастотный заградитель; ЭР₀...ЭР_N – электрические разъемы.

Действие подобной ОПС основано на том свойстве, что по проводам линий электросети можно передавать высокочастотные (ВЧ) колебания с частотой до 150 кГц, которые свободно распространяются до ближайшего приемного устройства, подключенного к этой электросети. В основе указанного ограничения лежит факт того, что при частотах более 150 кГц возрастают потери прохождения сигнала за счет ёмкости проводов и излучения части энергии в окружающее пространство. В связи с этим применение более высоких частот для передачи информации по сетевым проводам является нецелесообразным.

Традиционно для подключения PLC-оборудования к низковольтным электросетям от 110/220 В до 1 кВ используются либо защёлкивающиеся индуктивные ферритовые кольца, либо заложенное производителем вилочное подсоединение или межфазное сигнальное соединение специальным емкостным соединителем. Само присоединение ОПС к линии электропередачи осуществляется различными способами. При несимметричной схеме ВЧ-аппаратуру включают между проводом

(или несколькими проводами) и землей по схемам «фаза – земля» или «две фазы – земля». При симметричных схемах ВЧ-аппаратуру подключают обычно по схеме «фаза – фаза». При включении аппаратуры между проводами разных линий используют схему «фаза – фаза разных линий» [18].

В рассматриваемом случае используется схема подключения «фаза – фаза» через соответствующие типовые электрические разъемы (ЭР₀, ЭР₁, ..., ЭР_N) которые устанавливаются в помещениях при монтаже силовой электропроводки.

Следует отметить, что для подключения ОПС к проводам линий электросети необходимы специальные устройства обработки и присоединения, позволяющие отделить высокое напряжение от слаботочной аппаратуры и организовать соответствующий тракт для передачи ВЧ-сигналов. Одним из таких устройств является высокочастотный заградитель (ВЗ) (см. рис. 1).

Высокочастотные заградители отделяют ВЧ-тракт передачи сигнала от оборудования высокого напряжения подстанции, которое может иметь низкое сопротивление для высоких частот канала связи [17]. ВЗ состоит из силовой катушки (реактора), по которой проходит рабочий ток линии, и элемента настройки, присоединяемого параллельно катушке. Силовая катушка заградителя с элементом настройки образуют двухполюсник, который имеет достаточно высокое сопротивление на рабочих частотах. При этом для тока промышленной частоты 50 Гц ВЗ имеет незначительное сопротивление. ВЗ фактически служат для отделения шунтирующих ВЧ-тракт элементов (подстанций и ответвлений), которые при отсутствии заградителей могут привести к увеличению затухания тракта. Кроме того, ВЗ ослабляет влияние входного сопротивления подстанции или ответвления [19].

Высокочастотные свойства ВЗ характеризуются полосой заграждения, т. е. полосой частот, в которой сопротивление заградителя не меньше некоторого допустимого значения (обычно 500 Ом). Как правило, полоса заграждения определяется по допустимому значению активной составляющей

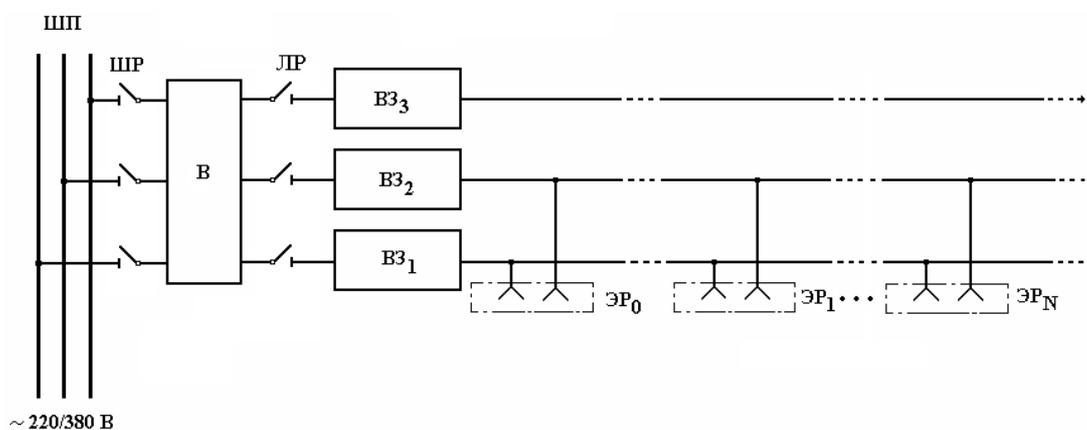


Рис. 1. Схема соединений элементов линии электропередачи

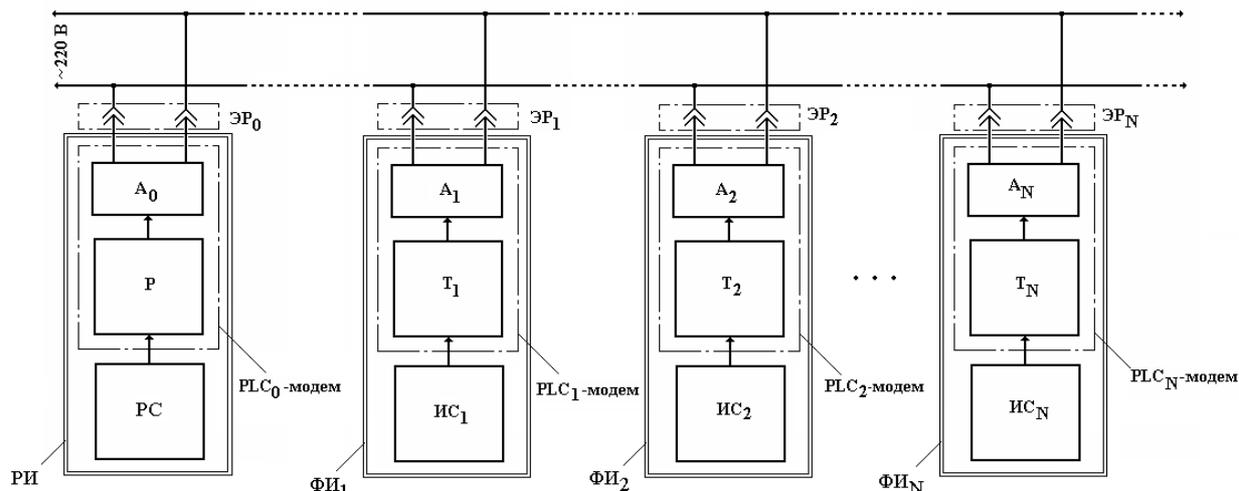


Рис. 2. Схема подключения функциональных модулей системы ОПС

полного сопротивления ВЗ, но иногда по допустимому значению полного сопротивления.

Различные схемы настройки и необходимый диапазон запираемых частот получают, используя конденсаторы, дополнительные катушки индуктивности и резисторы, имеющиеся в элементе настройки ВЗ. Все функциональные модули ОПС подключаются к проводам электросети через соответствующие стандартные электрические разъемы ($\text{ЭР}_0, \text{ЭР}_1, \dots, \text{ЭР}_N$), которые устанавливаются в помещениях при монтаже силовой электропроводки (рис. 2).

Следует отметить, что рассматриваемая ОПС, как и большинство подобных систем, использует принцип амплитудной модуляции и симплексный режим функционирования, что существенно упрощает используемые схемотехнические решения и их конструктивное исполнение. Сама система ОПС построена на двух типах функциональных модулей (ФМ). Первый тип ФМ ОПС – это регистратор информации (РИ), состоящий из регистратора сигнала (РС) и PLC_0 -модема, в состав которого, в свою очередь, входит ресивер (Р) (receiver) и адаптер (A_0). Второй тип ФМ ОПС представлен группой формирователей информации ($\text{ФИ}_1, \text{ФИ}_2, \dots, \text{ФИ}_N$). Каждый из этих формирователей информации представлен соответствующей совокупностью следующих элементов: источник сигнала ИС_n ; PLC_n -модем, состоящий из трансмиттера T_n и адаптера A_n , где $n = 1 \dots N$. При этом каждый ИС_n по существу представляет собой датчик, т. е. устройство преобразования контролируемых неэлектрических физических величин (тепло, свет, звук и т. п.) в электрические сигналы. Для рассматриваемого случая каждый такой датчик является источником первичной информации о том или ином контролируемом параметре в виде соответствующего сигнала сообщения, который в дальнейшем посредством модема преобразуется в выходной информационный сигнал трансмиттера.

В свою очередь группа функциональных модулей $\text{ФИ}_1 \dots \text{ФИ}_N$ фактически представляют собой комбинированные извещатели ОПС, реагирующие на изменения состояния параметров среды и передающие в симплексном режиме информацию об этих изменениях в виде ВЧ информационных сигналов через провода действующей электросети. Полученный таким образом ВЧ информационные сигналы через тракт передачи, образованный фазными проводами действующей электросети, поступают на функциональный модуль РИ, посредством которого ВЧ-сигналы трансформируются в низковольтные цепи электронных преобразователей РИ_n . В последующем ВЧ-аппаратурой РИ_n осуществляется соответствующая окончательная обработка этих сигналов.

Особый интерес представляет устройство адаптеров $A_1 \dots A_N$, посредством которых фактически осуществляется ввод ВЧ-сигнала непосредственно в фазные провода электросети или его вывод из тех же фазных проводов электросети в низковольтные устройства последующего преобразования.

Одним из основных компонентов адаптеров являются конденсаторы связи (КС) C_2 и C_3 высокого напряжения, включаемые на полное напряжение сети и обладающие достаточной электрической прочностью (рис. 3).

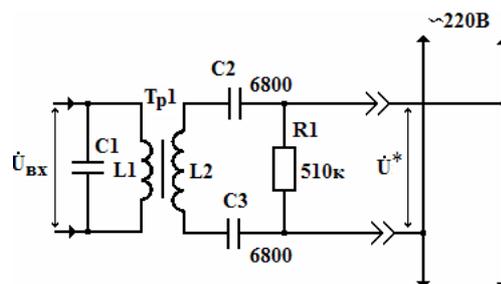


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема типичного адаптера-передатчика

Для лучшего согласования входного сопротивления линии и ВЧ-аппаратуры PLC-технологий емкость конденсатора должна быть достаточно большой. Существующие в настоящее время КС дают возможность иметь емкость присоединения на линиях любого класса по напряжению не меньше 3000 пФ. КС подключают к фильтру присоединения (ФП) в виде трансформатора T_{p1} на ферритовом сердечнике, содержащего первичную и вторичную обмотки с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 . Основная функция трансформатора, входящего в адаптер, заключается в согласовании и гальванической развязке силовой линии электропередачи и низковольтной ВЧ-аппаратурой ОПС [20, 21].

Степень согласованности ФП с нагрузкой в виде сопротивления линейного тракта характеризуется затуханием несогласованности [18]:

$$A_{НС} = 20 \lg \left| \frac{\dot{Z}_{ВХ.Ф} + \dot{Z}_{СЛ}}{\dot{Z}_{ВХ.Ф} - \dot{Z}_{СЛ}} \right|, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_{ВХ.Ф}$ – входное сопротивление ФП со стороны линии высокого напряжения при нагрузке ФП на активное сопротивление, равное сопротивлению входным цепям используемой ВЧ-аппаратуры PLC-технологий; $\dot{Z}_{СЛ}$ – номинальное значение характеристического сопротивления линейного тракта. Чем больше затухание несогласованности, тем лучше согласование ФП с линией электросети.

Соответствующим согласованием входного сопротивления ФП и линии электросети достигают минимальных потерь энергии ВЧ-сигнала.

В большинстве случаев ФП с КС образуют схему полосового фильтра ПФ, пропускающего определенную полосу частот. Информационный сигнал с выхода одного из трансмиттеров $T_1 \dots T_N$ поступает на вход соответствующего ФП в виде модулированного ВЧ-напряжения, представляющего собой сигнал вида

$$u_{вх}(t) = U_m(t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где $U_m(t) = U_0 + U_c(t)$ – огибающая сложного сигнала, связанная линейной зависимостью с сигналом сообщения $U_c(t)$; U_0 – значение амплитуды электрического напряжения несущей высокой частоты ω_0 .

При этом протекающий по первичной обмотке L_1 ФП ток ВЧ наводит во вторичной обмотке L_2 ФП трансформированное ВЧ-напряжение

$$u^*(t) = k_1 \cdot u_{вх}(t), \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент передачи T_{p1} .

Напряжение $u^*(t)$ является выходным информационным сигналом одного из функциональных модулей $ФИ_1 \dots ФИ_N$, которое через конденсаторы C_2 и C_3 ПФ поступает в соединительную линию электросети (высокочастотный тракт).

Ток промышленной частоты, проходящий через КС, достаточно мал (от десятков до сотен миллиампер), а падение напряжения на вторичной обмотке L_2 ФП не превышает нескольких вольт. Фактически ПФ согласует выходное сопротивление ВЧ электронных преобразователей соответствующих функциональных модулей $ФИ_1 \dots ФИ_N$ с входным сопротивлением линии электросети, обеспечивая при этом передачу с малыми потерями токов высокой частоты от ВЧ электронных преобразователей в линию электропередачи.

Далее рассмотрим особенности работы адаптера A_0 функционального модуля РИ, одним из основных компонентов которого также является КС C_4 высокого напряжения, включаемый на полное напряжение сети и обладающий достаточной электрической прочностью (рис. 4).

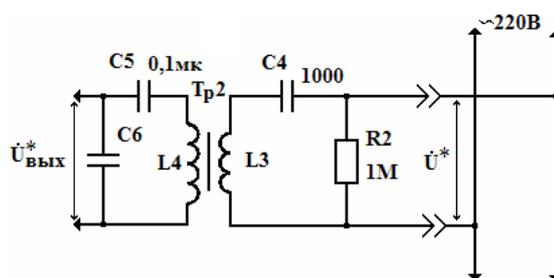


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема типового адаптера-приемника

КС подключают к ФП в виде трансформатора T_2 на ферритовом броневом сердечнике, содержащем первичную и вторичную обмотки с индуктивностями соответственно L_3 и L_4 . Для рассматриваемого адаптера A_0 ФП с КС точно так же, как и для других адаптеров, образуют схему полосового фильтра ПФ, пропускающего определенную полосу частот. Трансформированное ВЧ-напряжение $u^*(t)$ одного из функциональных модулей $ФИ_1 \dots ФИ_N$ через соединительную линию электросети поступает на вход функционального модуля РИ. Возникающий при этом ток ВЧ, проходя через C_4 по первичной обмотке L_3 ФП, наводит во вторичной обмотке L_4 ФП трансформированное ВЧ-напряжение:

$$u_{вх}^*(t) = k_2 \cdot u^*(t) = k_1 \cdot k_2 \cdot U_m(t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad (4)$$

где k_2 – коэффициент передачи T_{p2} .

Напряжение $u_{вх}^*(t)$ является, в свою очередь, входным информационным сигналом функционального для модуля РИ, которое через конденсатор C_5 попадает на вход низковольтных цепей электронных преобразователей функционального модуля РИ, где и происходит его последующая первичная и вторичная обработка. При этом ток промышленной частоты, проходящий через C_4 , и соответствующее падение напряжения на первичной обмотке L_3 ФП также представляют собой

относительно малозначимые величины. Отметим, что индуктивность L_4 совместно с конденсатором C_5 образует дополнительный фильтр (ДФ) по схеме резонансного контура с последовательным соединением. Собственная частота колебаний ДФ настроена на частоту ВЧ информационного сигнала, что обеспечивает резонанс напряжений и благодаря этому передачу самого ВЧ информационного сигнала с минимальными потерями и существенным подавлением электрических сигналов промышленной частоты.

Настройка ДФ на нужную частоту производится подключением к индуктивности L_4 ФП конденсатора C_5 соответствующей емкости, определяемой по формуле, пФ [19]:

$$C = 25,3 \cdot 10^6 / (f^2 \cdot L), \quad (5)$$

где f – частота ВЧ информационного сигнала, кГц; L – индуктивность реактивной компоненты резонансного контура с последовательным соединением, мГ.

Схемотехническое решение адаптера на новом физическом принципе

Несмотря на то, что применяемые схемотехнические решения большинства компонентов ФМ имеют хорошие функциональные показатели и имеют возможность оперативной адаптации к изменившимся условиям эксплуатации, существует реальная проблема при использовании традиционных адаптеров ФМ ОПС для организации передачи информационных сигналов по линиям электропитания. Это прежде всего связано с тем, что существующие электросети изначально не предназначались для передачи данных. Кроме того, эксплуатируемые электросети характеризуются высоким уровнем шумов и быстрым затуханием высокочастотного сигнала, а также тем, что коммуникационные параметры линии электросети, постоянные для традиционных физических сред, существенно меняются во времени в зависимости от текущего варианта распределения нагрузки в этой линии. Следует также отметить, что специфической особенностью линий электросети является весьма разветвленная древовидная топология, что существенно усложняет процесс настройки используемой аппаратуры, прежде всего адаптеров, на рабочий режим.

В связи с этим существует острая необходимость в разработке нового типа адаптера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий, ориентированного на эффективную работу в указанных условиях. Для решения данной задачи предлагается вариант построения адаптера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий с использованием новых физических принципов. Предлагаемый подход предполагает полное отсутствие в составе нового типа адаптера таких компонентов, как КС, ФП и ДФ, которые являются обязательными звеньями традиционных

адаптеров для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий, что существенно упростит согласование ФМ ОПС, повысит надежность передачи информационных сигналов и эффективность функционирования ОПС в целом.

Рассмотрим вариант такого адаптера для группы функциональных модулей $\Phi И_1 \dots \Phi И_N$ (рис. 5), включающий измерительную катушку (ИК) индуктивностью L_1 с ферритовым стержнем $\Phi С_1$, а также конденсатор-модулятор C_1 [22].

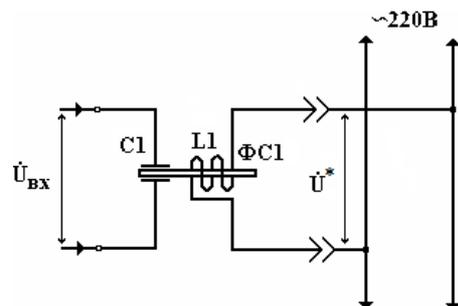


Рис. 5. Новое схемотехническое решение адаптера-передатчика

Данный адаптер ориентирован на передачу амплитудно-модулированного информационного ВЧ-сигнала в симплексном режиме функционирования. Одним из компонентов адаптеров $A_1 \dots A_M$, фактически осуществляющим трансляцию информационного ВЧ-сигнала в линию электросети, является круглый ферритовый стержень ($\Phi С_1$), физические свойства которого легли в основу нового принципа построения адаптера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий [23].

Следует отметить, что по технологии изготовления ферриты можно отнести к объемным композиционным материалам (КМ), которые представляют собой механически взаимодействующие смеси магнитоэлектрической и пьезоэлектрической подсистем. Существующая взаимосвязь магнитных, электрических и упругих свойств КМ приводит к тому, что в КМ возможны перекрестные эффекты, связывающие между собой магнитные и электрические характеристики материала. Примером такого свойства КМ является магнитоэлектрический эффект (МЭ), под которым, в широком смысле, подразумевается возникновение магнитного момента в структурах КМ при воздействии на эти структуры электрического поля в отсутствие магнитного поля и инициации при этом взаимодействия магнитоэлектрических и пьезоэлектрических компонент КМ.

Внешнее магнитное поле приводит к появлению деформации и механических напряжений магнитоэлектрической компоненты, которые передаются в пьезоэлектрическую компоненту. Наличие пьезоэлектрического эффекта приводит к индуцированию электрической поляризации (прямой МЭ-эффект) [24]:

$$P_i = \alpha_{ij} H_j, \quad (6)$$

где P_i – электрическая поляризация; H_j – напряженность магнитного поля; α_{ij} – МЭ-восприимчивость.

В свою очередь, при воздействии внешнего электрического поля возникает деформация пьезоэлектрической компоненты с последующей передачей механических напряжений в магнитоstrictionную компоненту, вследствие чего и происходит ее намагничивание (инверсный МЭ-эффект):

$$M_i = \alpha_{ji} E_j, \quad (7)$$

где M_i – намагниченность; E_j – напряженность электрического поля; $\alpha_{ji} = \alpha_{ij}$ – МЭ-восприимчивость.

Обобщая, можно констатировать, что при воздействии внешнего магнитного поля в структуре КМ происходит изменение поляризации, и наоборот, при приложении внешнего электрического поля происходит изменение намагниченности. Подобные МЭ-взаимодействия в КМ, в линейном приближении, могут быть описаны системой уравнений вида [24]:

$$\begin{cases} S = s \cdot T + d^T \cdot E + q^T \cdot H; \\ D = d \cdot T + \varepsilon \cdot E + \alpha \cdot H; \\ B = q \cdot T + \alpha \cdot E + \mu \cdot H, \end{cases} \quad (8)$$

где T и S – механические напряжение и деформация; D – электрическая индукция; E – электрическое поле; B – магнитная индукция и H – магнитное поле; s – коэффициент податливости; ε и μ – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости; d и q – соответственно пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты; α – МЭ-коэффициент (восприимчивость).

В связи с тем, что МЭ-эффект в КМ обусловлен взаимодействием электрической и магнитной подсистем через упругие деформации, значительное усиление МЭ-эффекта наблюдается в области электромеханического резонанса (ЭМР). Частота такого резонанса определяется в первую очередь геометрическими размерами образца, модулями податливости и плотностью материала, а величина МЭ пропорциональна пьезоэлектрическому и пьезомагнитному модулям и обратно пропорциональна модулю упругости и диэлектрической проницаемости материала. Рассматриваемый МЭ интересен тем, что позволяет создавать принципиально новые функциональные устройства различного назначения для твердотельной электроники. С учетом МЭ-эффектов (8) рассмотрим особенности работы нового типа адаптера.

При подаче информационного сложного ВЧ-сигнала $u_{\text{вх}}(t) = U_m(t) \cdot \sin \omega_0 t$ на специальный модулятор в виде конденсатора C_1 , образованного двумя полумонолитными цилиндрическими металличе-

скими электродами, в рабочем пространстве между этими электродами создается переменное электрическое поле (ЭП):

$$E(t) = u_{\text{вх}}(t)/h = E_m(t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad (9)$$

где h – средняя величина зазора между электродами модулятора-конденсатора C_1 ; $E_m(t)$ – амплитуда огибающей напряженности переменного ЭП.

Это ЭП направленно воздействует на элементы структуры материала ФС, также расположенного в этом рабочем пространстве. В результате воздействия на материал ФС переменного электрического поля, направленного вдоль поперечного сечения ФС, в структуре материала ФС проявляется соответствующий физический МЭ-эффект [24]. При воздействии переменного ЭП в некотором объеме V ферромагнетика возникает локальное напряженно-деформированное состояние, изменяющееся во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$. С учетом этого, используя уравнения электродинамики и электростатики, можем записать уравнения смещения элементов среды КМ в следующем виде:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 \delta_i}{\partial t^2} = V \cdot \frac{\partial^p T_{ij}}{\partial x_j} + (1-V) \cdot \frac{\partial^m T_{ij}}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где δ_i – смещение элементов среды КМ; $\rho = V \cdot {}^p \rho + (1-V) \cdot {}^m \rho$ – средняя плотность вещества КМ, V – объемная доля пьезоэлектрика; ${}^p \rho$ и ${}^m \rho$ – плотности соответственно пьезоэлектрической и ферромагнитной составляющих КМ; ${}^p T_{ij}$ и ${}^m T_{ij}$ – компоненты тензора напряжений соответственно пьезоэлектрической и ферромагнитной составляющих КМ.

Из анализа выражения (10) следует, что все без исключения параметры и характеристики рассматриваемого состояния определяются вектором смещения материальных элементов структуры ФС:

$$\dot{\delta}_V(x_n, t) = \delta_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega t}, \quad (11)$$

где $\delta_V^*(x_n)$ – модулированное действующее значение гармонически изменяющегося во времени векторного поля $\dot{\delta}_V(x_n, t)$

В результате этого смещения возникающая локальная деформация элементов структуры ФС будет сопровождаться соответствующим изменением намагниченности локального объема V :

$$\Delta M_V(x_n, t) = \lambda \cdot d_V(x_n, t), \quad (12)$$

где λ – коэффициент преобразования энергии смещения элементов среды КМ в энергию магнитного поля.

Исходя из (11) и (12), можно утверждать, что в зоне непосредственного воздействия переменного электрического поля в структуре КМ возникает область переменной намагниченности:

$$\dot{M}_V(x_n, t) = M_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega t}. \quad (13)$$

При этом магнитоstrictionные и пьезоэлектрические компоненты структуры ФС, представляющие собой скоррелированные системы, начинают механически взаимодействовать друг с другом в локальном объеме V , что приводит к возникновению соответствующих перекрестных МЭ-эффектов. В результате этого активизируются подобные процессы и на других участках структуры ФС, соседних с локальным объемом V , что в итоге превращает весь физический объем ФС в самоорганизующуюся систему перекрестных МЭ-эффектов.

Таким образом, эволюционирующий процесс возникновения перекрестных МЭ-эффектов по всей длине и во всем объеме ФС приводит к возникновению потока стоячей МЭ-волны Φ_{pm} , состоящей из элементарных составляющих dP и dM , каждая из которых создана соответственно элементарным намагниченным или электрически поляризованным объемом dV . Причем на частоте электромеханического резонанса (ЭМР) на всей длине ФС фактически укладывается один период стоячей МЭ-волны, возбужденной в структуре материала ФС, в пучности которой расположена ИК с индуктивностью L_1 .

Поток МЭ-индукции Φ_{pm} пересекает витки ИК с индуктивностью L_1 , в результате чего его составляющая в виде переменного потока намагниченности Φ_m индуцирует в обмотке ИК соответствующий электрический сигнал:

$$u_{\text{ВЫХ}} = w \cdot d\Phi_m / dt, \quad (14)$$

где $\Phi_m = q \cdot s \cdot m \cdot M$; w – число витков ИК; q – соответствующая константа связи; s и μ – соответственно площадь поперечного сечения и магнитная проницаемость ФС; M – переменная намагниченность материала ФС, реструктуризирующее магнитное поле окружающего ФС-пространства.

С учетом (13) для стоячей волны намагниченности можем записать:

$$M = 2M_m(t) \cdot \sin kx \cdot \sin \omega_0 t, \quad (15)$$

где $M_m(t)$ – модулированная амплитуда переменной намагниченности; $k = 2\pi / \lambda_0$ – волновое число материала ФС; λ_0 – длина стоячей МЭ-волны на циклической частоте ω_0 ЭМР.

Подставив (15) в (14), окончательно получим:

$$u_{\text{ВЫХ}} = q \cdot w \cdot s \cdot \frac{dM}{dt} = q \cdot s \cdot w \cdot \omega_0 \cdot \mu \cdot \frac{dM_m(t)}{dt} \times$$

$$\times \sin kx \cdot \cos \omega_0 t = U_m^*(t) \cdot \cos \omega_0 t$$

или для комплексного значения напряжения на обмотке ИК:

$$\dot{U}^* = U^*(t) \cdot e^{i(\omega_0 t + \pi/2)}, \quad (16)$$

где $U^*(t)$ – действующее значение огибающей выходного напряжения информационного сложного сигнала адаптера-передатчика.

Обобщая, можно констатировать, что резонансное воздействие переменного ЭП напряженностью $E_m(t) \cdot \sin \omega_0 t$ с циклической частотой ω_0 ЭМР на компоненты структуры материала ФС активизирует следующую последовательность физических процессов:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{ВХ}}^* &\Rightarrow E_m(t) \cdot \sin \omega_0 t \Rightarrow \delta_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \Rightarrow \\ &\Rightarrow M_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \leftrightarrow P_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2M_m(t) \cdot \sin kx \cdot \sin \omega_0 t \Rightarrow \dot{U}^*. \end{aligned} \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что трансляция ВЧ информационного сигнала из низковольтной части ФИ в фазные провода высоковольтной линии электросети осуществляется на частоте ЭМР ФС и определяется фактически только конструктивными параметрами самого ФС.

Подобный адаптер можно предложить и для функционального модуля РИ ОПС (рис. 6), включающего ИК индуктивностью L_2 с ферритовым стержнем ФС₂ и конденсатор-модулятор C_2 .

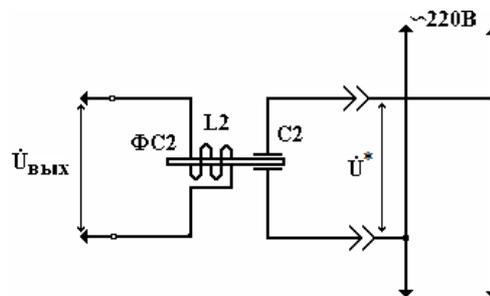


Рис. 6. Новое схемотехническое решения адаптера-приемника

Принцип работы и особенности функционирования адаптера-приемника для функционального модуля РИ ОПС аналогичны рассмотренным ранее для адаптера-передатчика группы функциональных модулей ФИ₁...ФИ_N ОПС:

$$\begin{aligned} \dot{U}^* &\Rightarrow E_m(t) \cdot \sin \omega_0 t \Rightarrow \delta_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \Rightarrow \\ &\Rightarrow M_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \leftrightarrow P_V^*(x_n) \cdot e^{i\omega_0 t} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2M_m(t) \cdot \sin kx \cdot \sin \omega_0 t \Rightarrow \dot{U}_{\text{ВЫХ}}^*. \end{aligned} \quad (18)$$

Отличие данного адаптера состоит лишь в том, что источником ВЧ информационного сигнала для него являются непосредственно фазные провода высоковольтной линии электросети. При этом, информационный сигнал в виде ВЧ-напряжения \dot{U}^* посредством конденсатора-модулятора C_2 возбуждает в структуре материала ФС₂ соответствующие МЭ-процессы, которые индуцируют в ИК индуктивностью L_2 выходное ВЧ-напряжение $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}^*$, являющееся передаваемым информационным сигналом, что фактически подтверждает наличие состоявшейся трансляции ВЧ информационного сигнала из высоковольтных линий электросети в низковольтные цепи электронных пре-

образователей функционального модуля РИ для последующей его обработки.

Экспериментальная проверка

Разработанные новые типы адаптера-передатчика и адаптера-приемника прошли апробацию в составе экспериментальной системы ОПС, особенностью которой являлось использование двух видов каналов передачи:

1) на основе беспроводных технологий (радиоканал);

2) с использованием PLC-технологий.

Структурно данная система ОПС состояла из пяти ФИ и одного РИ. При этом каждый из ФИ располагался в соответствующем отдельном помещении на разных этажах административного здания, а РИ, в свою очередь, размещался в его полуподвальном этаже в помещении дежурного оператора. Канал связи между каждым ФИ и РИ организовывался через существующую внутри здания линию электропередачи посредством сетевых адаптеров-трансиверов нового типа, подключенных к соответствующим комнатным электрическим розеткам.

В качестве ИС каждого из пяти ФИ при проведении эксперимента был использован извещатель пожарный тепловой ИП 114-5-А2, содержащий два рабочих контакта, соединенных спайкой из легкоплавкого материала. Под влиянием повышенной температуры материал спайки расплавляется, в результате чего рабочие контакты разрываются, активизируя тем самым сигнал тревожного оповещения. Пороговая температура такого типа электромеханического теплового датчика составляет 75 °С. Следует отметить, что стандартный извещатель ИП 114-5-А2 был модернизирован без нарушения его функциональности и конструктивных особенностей путем добавления в свободное пространства нижней части его корпуса малогабаритного радиомодуля (МР), содержащего, в свою очередь, следующие функциональные элементы: автономный источник питания – ИП в виде литиевой батарейки GP CR2032 напряжением 3 В; формирователь кода адреса датчика – ФКА; генератор высокой частоты – ГВЧ; транмиттер – Т с излучающей антенной (ИА) (рис. 7).

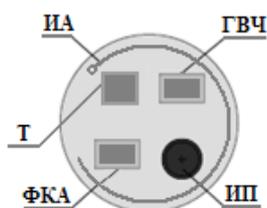


Рис. 7. Устройство встраиваемого радиомодуля

Рассмотрим более подробно особенности функционирования экспериментальной системы

ОПС в процессе ее натуральных испытаний. Монтаж всей системы ОПС в контролируемых пяти помещениях осуществлялся простым размещением в них ИС конкретного ФИ и включением выходных вилочных разъемов каждого ФИ в соответствующие электрические розетки.

Активация конкретного МР соответствующего ФИ осуществлялась путем разрыва спая рабочих контактов самого извещателя тепловым воздействием, что в результате приводило к формированию ИА в окружающем пространстве амплитудно-модулированной числоимпульсным кодом адреса датчика монохроматической электромагнитной волны частотой 27,12 МГц и радиусом действия 5...10 м. В этом случае само возникновение электромагнитной волны являлось извещающим фактором возникновения внештатной ситуации (пожара) в контролируемом помещении, а ее информационная составляющая в виде числоимпульсного кода адреса ИС фактически определяла пространственную локализацию пожара.

При срабатывании конкретного ИС соответствующего ФИ между ним и функциональной преобразовательной частью этого же ФИ организовывался беспроводной канал (радиоканал) передачи информационного сигнала. Функциональной преобразовательной частью ФИ осуществлялись прием кодированного радиосигнала и его последующее преобразование в электрический информационный сигнал с частотой $f_0 = \omega_0/2\pi$, который уже посредством адаптера-передатчика рассматриваемого ФИ транслировался в действующую линию электропередачи. В свою очередь, полученный информационный сигнал, распространяясь по всей разветвленной линии электропередачи, через адаптер-приемник РИ поступал в функциональную преобразовательную часть РИ.

В связи с тем, что каждый ИС соответствующего ФИ имел свой уникальный числоимпульсный код адреса, то РИ без особых проблем осуществлял не только соответствующую идентификацию каждого из активированных ИС, но и гарантированно определял пространственную локализацию имитируемого пожара внутри административного здания.

Экспериментальные исследования нового типа адаптера-трансивера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий доказали практическую состоятельность предложенного технического решения. Кроме того, они подтвердили возможность и целесообразность его применения в NPL PLC-технологиях, ориентированных на использование в устройствах управления уличным освещением, в системах сигнализации, вентиляции и кондиционирования. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что применение нового типа адаптера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий позволит достаточно просто решать задачи объединения различных приборов и устройств в рам-

ках концепции «умного дома» с возможностью централизованного управления ими.

Заключение

Одним из основных компонентов систем передачи данных по проводам электросети является адаптер для присоединения аппаратуры связи к линии электропередачи. Разработанный адаптер-ресивер базируется на использовании нового физического явления, которое прежде в PLC-технологиях не применялось: в нем для передачи сигнала используется инверсный магнитоэлектрический эффект в объемных композиционных материалах, который является комбинацией пьезомагнитного и пьезоэлектрического эффектов, связанных упругими взаимодействиями. Используется возможность управлять магнитными параметрами феррит-пьезоэлектрических композитов посредством внешнего ВЧ электрического поля, создаваемого посредством специального модулятора, образованного двумя полуцилиндрическими металлическими электродами. В рабочем пространстве модулятора размещают ферритовый стержень, в котором в результате механического взаимодействия ферритовой и пьезоэлектрической подсистем возникает МЭ-эффект. Именно ферритовый стержень, являясь одним из основных компонентов предложенных адаптеров, фактически осуществляет трансляцию информационного ВЧ-сигнала в фазные провода линии электросети. При этом реализован резонансный характер инверсного магнитоэлектрического эффекта, заключающийся в пиковом увеличении МЭ-эффекта на частоте электромеханического резонанса.

Основным отличительным свойством предложенного адаптера для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий является отсутствие какой-либо трансформаторной и гальванической связей между высоковольтной линией электросети и низковольтными цепями ФМ ОПС, так как в данном случае функционирование адаптера основано на новых физических принципах. Следует отметить, что именно это свойство гарантированно обеспечивает блокировку воздействия рабочего высокого напряжения линии электросети на низковольтные цепи ВЧ-аппаратуры PLC-технологий.

Благодаря этой особенности предложенный вариант адаптера легко встраивается в используемую типовую ВЧ-аппаратуру для PLC-технологий, обеспечивая тем самым новый качественный уровень ее функционирования. Это в свою очередь позволяет использовать типовую ВЧ-аппаратуру для PLC-технологий без существенных изменений и без особых настроечных процедур для линий электросети с различными параметрами и условиями эксплуатации, что, в конечном счете, обеспечивает эффективность применения PLC-технологий для различных систем удаленного мониторинга, осуществляющих оперативный контроль работоспособности технологического оборудования посредством сбора и передачи данных.

В перспективе планируется развитие представленной идеи применительно к BPL PLC-технологиям, ориентированным на использование в домашних компьютерных сетях, сети Интернет, цифровом телевидении, VoIP, IPTV и других высокоскоростных приложениях.

Литература

1. *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines* / H.C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, T.G. Swart. – Wiley, 2010. – 536 p. DOI: 10.1002/9780470661291
2. *Intelligent Buildings: Design, Management & Operation* / edited by Derek Clements-Croome. – London: Thomas Telford Publishing, 2004. – 408 p. DOI: 10.1680/ib.32668
3. Вставская, Е.В. Способ передачи информации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением / Е.В. Вставская, Е.В. Костарев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2011. – Вып. 13, № 2 (219). – С. 8–84.
4. Моррисси, П. Реализация технологии BPL / П. Моррисси // *Сети и системы связи*. – 2005. – № 12. – С. 79–81.
5. Yousuf, M.S. *Power line communications: an overview* / M.S. Yousuf, M. El-Shafei // *4th International IEE Conference on Innovations in Information Technology*. – 2007. – Part 1. – P. 218–222.
6. Невструев, И.А. Построение сетей доступа передачи информации по электрическим сетям / И.А. Невструев, А.В. Арсеньев // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2007. – Т. 3, № 3. – С. 12–19.
7. Sarafi, A.M. *Hybrid Wireless-Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas* / A.M. Sarafi, G.I. Tsiropoulos, P.G. Cottis // *IEEE Commun. Mag.* – 2009. – Вып. 47. – P. 140–147. DOI: 10.1109/mcom.2009.5307478
8. Kabalci, Y. *Communication Methods for Smart Buildings and Nearly Zero-Energy Buildings* / Y. Kabalci // *Energy Harvesting and Energy Efficiency*. – 2017. – Vol 37. – P. 459–489. DOI: 10.1007/978-3-319-49875-1_16
9. Mandava, S. *Spectral Analysis and Comparison of Single-Carrier PLC Modules in Narrowband Power Line Communication System* / S. Mandava, A. Gudipal, G. Vidhya Sagar // *Advances in Systems, Control and Automation*. – 2017. – Vol. 442. – P. 199–212. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6_19

10. Hrasnica, H. *Broadband Powerline Communications Networks* / H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert. – John Wiley & Sons, 2004. – 290 p. DOI: 10.1002/047002092x
11. Оксман, В. *Высокочастотная связь NARROWBAND PLC для автоматизации распределительных сетей 6-20/0,4 КВ И SMART GRID стандарт G3, G.HNEM* / В. Оксман // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. – 2015. – № 11 (76). – С. 11–20.
12. Сопер, М.Э. *Практические советы и решения по созданию «Умного дома»* / М.Э. Сопер. – М.: ИТ Пресс, 2007. – 432 с.
13. Харке, В.Н. *Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве* / В.Н. Харке. – М.: Техносфера, 2006. – 292 с.
14. Кашкаров, А.П. *Электронные схемы для «умного дома»* / А.П. Кашкаров. – М.: ИТ Пресс, 2007. – 255 с.
15. Гололобов, В.Н. *«Умный дом» своими руками* / В.Н. Гололобов. – М.: ИТ Пресс, 2007. – 416 с.
16. Huh, J. *Advanced metering infrastructure design and test bed experiment using intelligent agents: focusing on the PLC network base technology for Smart Grid system* / J. Huh, S. Otgonchimeg, K. Seo // *The Journal of Supercomputing*. – 2016. – Vol. 72. – P. 1862–1877. DOI: 10.1007/s11227-016-1672-4
17. Тесля, Е.В. *«Умный дом» своими руками. Строим интеллектуальную цифровую систему в своей квартире* / Е.В. Тесля. – СПб.: Питер, 2008. – 219 с.
18. Микуцкий, Г.В. *Высокочастотная связь по линиям электропередачи* / Г.В. Микуцкий, В.С. Скитальцев. – М.: Энергия, 1987. – 448 с.
19. Шкарин, Ю.П. *Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи* / Ю.П. Шкарин. – М.: ИТФ «Энергопрогресс», 2001. – 72 с.
20. Некрасов, М. *Электромагнитные компоненты для телекоммуникационного оборудования и сетей передачи данных компании PCA Electronics* / М. Некрасов // *Компоненты и технологии*. – 2005. – № 5 (49). – С. 30–32.
21. *Верхулевский, К. Электромагнитные компоненты PCA Electronics – бюджетные решения с высоким качеством* / К. Верхулевский // *Компоненты и технологии*. – 2018. – № 4 (201). – С. 10–6.
22. Брякин, И.В. *Модулятор на базе С-Антенны* / И.В. Брякин // *Вестник КРСУ*. – Бишкек: КРСУ, 2015. – Т. 15, № 9. – С. 112–116.
23. Пат. 1873 *Кыргызская Республика. Способ возбуждения феррозонда и устройство модулятора для его осуществления* / И.В. Брякин; заявитель и патентообладатель Брякин И.В. – № 20150063.1; заявл. 08.06.2015; опубл. 30.06.2016, Бюл. № 6. – 8 с.
24. Брякин, И.В. *Способ возбуждения феррозондов на основе магнитоэлектрического эффекта* / И.В. Брякин // *Проблемы автоматики и управления*. – 2016. – № 2 (31). – С. 73–83.

Брякин Иван Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения и автоматики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика; bivas2006@yandex.ru.

Бочкарев Игорь Викторович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика; elmech@mail.ru.

Корякин Сергей Владимирович, аспирант, Институт машиноведения и автоматики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика; srgkoryakin1@gmail.com.

Поступила в редакцию 27 апреля 2020 г.

ADAPTER-TRANSCIVER FOR HF EQUIPMENT PLC TECHNOLOGY

I.V. Bryakin¹, bivas2006@yandex.ru,

I.V. Bochkarev², elmech@mail.ru,

S.V. Koryakin¹, srgkoryakin1@gmail.com

¹ Institute of Engineering and Automation NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic,

² Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic

The paper analyses the features of PLC technologies and describes the circuitry solutions for HF equipment adapters used and their operation modes. It also proposes a new type of transceiver adapters based on a new construction principle that implements a magnetoelectric effect in the structure of a composite. One of the main components of the proposed adapters, which actually translates the HF information signal into the phase wires of the power line, is a ferrite core. The physical effects underlying the operation of the proposed transceiver adapter are analyzed. The main distinguishing feature of the proposed adapter is the absence of transformer and galvanic connections between the high-voltage power line of the power supply network and low-voltage information circuits, which ensures that the effect of the operational high voltage of the power supply line on the low-voltage circuits of HF equipment is blocked. This allows for an easy integration of the proposed version of the adapter-transceiver into standard HF equipment for PLC technologies, boosting the level of its function. The developed new types of adapter-transmitter and adapter-receiver were experimentally tested as part of an experimental fire alarm system, which uses two types of transmission channels: based on wireless technologies employing a radio channel and a PLC technologies-based one.

Keywords: power supply network, PLC technology, communication capacitor, connection filter, bandpass filter, ferromagnetic rod, high-frequency equipment, magnetoelectric effect, electric field, magnetization, smart home, fire alarm.

References

1. Ferreira H.C., Lampe L., Newbury J., Swart T.G. *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Wiley, 2010, 536 p. DOI: 10.1002/9780470661291
2. *Intelligent Buildings: Design, Management & Operation*, edited by Derek Clements-Croome. London, Thomas Telford Publishing, 2004, 408 p. DOI: 10.1680/ib.32668
3. Vstavskaya Y.V., Kostarev Y.V. [The method of transmitting information over the power network and its application in the construction of automated control systems for outdoor lighting]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Management, Radio Electronics*, 2011, iss. 13, no. 2, pp. 81–84. (in Russ.)
4. Morrisi P. Realizatsiya tekhnologii BPL [Implementation of BPL technology]. *Networks and communication systems*, 2005, no. 12, pp. 79–81. (in Russ.)
5. Yousuf M.S., El-Shafei M. Power line communications: an overview. *4th International IEE Conference on Innovations in Information Technology*, 2007, Part 1, pp. 218–222.
6. Nevstroyev I.A., Arsenyev A.V. [Construction of access networks for the transmission of information over electric networks]. *Electrical and Information Complexes and Systems*, 2007, vol. 3, no. 3, pp. 12–19. (in Russ.)
7. Sarafi A.M., Tsiropoulos G.I., Cottis, P.G. Hybrid Wireless-Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas. *IEEE Commun. Mag.* 2009, vol. 47, pp. 140–147. DOI: 10.1109/mcom.2009.5307478
8. Kabalci Y. Communication Methods for Smart Buildings and Nearly Zero-Energy Buildings. *Energy Harvesting and Energy Efficiency*, 2017, vol 37, pp. 459–489. DOI: 10.1007/978-3-319-49875-1_16
9. Mandava S., Gudipalli A., Vidhya Sagar G. Spectral Analysis and Comparison of Single-Carrier PLC Modules in Narrowband Power Line Communication System. *Advances in Systems, Control and Automation*, 2017, vol. 442, pp. 199–212. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6_19
10. Hrasnica H., Haidine A., Lehnert R. *Broadband Powerline Communications Networks*. John Wiley & Sons, 2004, 290 p. DOI: 10.1002/047002092x
11. Oksman V. [High-frequency communication NARROWBAND PLC for automation of distribution networks 6-20 / 0.4 kV AND SMART GRID standard G3, G.HNEM]. *Automation and IT in the energy sector*, 2015, no. 11 (76), pp. 11–20. (in Russ.)

12. Soper M.E. Prakticheskiye soveti i resheniya po sozdaniyu “Umnogo doma” [Practical tips and solutions for creating a “Smart Home”]. Moscow, NT Press Publ., 2007, 432 p.
13. Harke V.N. Umnyy dom. *Ob'yedineniye v set' bytovoy tekhniki i sistem kommunikatsiy v zhilishchnom stroitel'stve* [Smart House. Networking household appliances and communication systems in housing]. Moscow, Technosphere Publ., 2006, 292 p.
14. Kashkarov A. *Elektronnyye skhemy dlya “umnogo doma”* [Electronic circuits for the “smart home”]. Moscow, NT Press Publ., 2007, 255 p.
15. Gololobov V.N. “Umnyy dom” svoimi rukami [“Smart home” with your own hands]. Moscow, NT Press Publ., 2007, 416 p.
16. Huh J., Otgonchimeg S., Seo K. Advanced metering infrastructure design and test bed experiment using intelligent agents: focusing on the PLC network base technology for Smart Grid system. *The Journal of Supercomputing*, 2016, vol. 72, pp. 1862–1877. DOI: 10.1007/s11227-016-1672-4
17. Teslya E.V. “Umnyy dom” svoimi rukami. *Stroim intellektual'nyu tsifrovuyu sistemu v svoey kvartire* [“Smart home” with your own hands. We are building an intelligent digital system in our apartment]. St. Petersburg, Peter Publ., 2008, 219 p.
18. Mikutsky G.V., Skital'tsev V.S. *Vysokochastotnaya svyaz' po liniyam elektropredachi* [High-frequency communication over power lines]. Moscow, Energy Publ., 1987, 448 p.
19. Shkarin Yu.P. *Vysokochastotnyye trakty kanalov svyazi po liniyam elektropredachi* [High-frequency paths of communication channels on power lines]. Moscow, NTF Energoprogress Publ., 2001, 72 p.
20. Nekrasov M. [Electromagnetic components for telecommunication equipment and data transmission networks of PCA Electronics]. *Components and Technologies*, 2005, no. 5 (49), pp. 30–32. (in Russ.)
21. Verkhulevsky K. [Electromagnetic components of PCA Electronics – budget solutions with high quality]. *Components and Technologies*, 2018, no. 4 (201), pp. 10–16. (in Russ.)
22. Bryakin I.V. [Modulator based on the C-Antenna]. *Bulletin of KRSU. Bishkek: KRSU*, 2015, vol. 15, no. 9, pp. 112–116. (in Russ.)
23. Bryakin I.V. *Sposob возбуждения феррозонда i ustroystvo modulyatora dlya yego osushchestvleniya* [A method for exciting a flux gate and a modulator device for its implementation]. Patent KR, no. 1873, 2016.
24. Bryakin I.V. [A method for exciting flux-gates based on the magnetoelectric effect]. *Problems of Automation and Control*, 2016, no. 2 (31), pp. 73–83. (in Russ.)

Received 27 April 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Брякин, И.В. Адаптер-трансивер для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий / И.В. Брякин, И.В. Бочкарев, С.В. Корякин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 97–109. DOI: 10.14529/power200310

FOR CITATION

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Koryakin S.V. Adapter-Transceiver for HF Equipment PLC Technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 97–109. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200310
