

Системы телеметрии по металлоконструкциям:

перспективы промышленного применения

Статья обобщает результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности создания низкоскоростных каналов телеметрии с использованием имеющихся стандартных металлических конструкций в жилых зданиях, промышленных помещениях, нефтедобывающих установках. Приводится анализ возможных конфигураций каналов передачи данных этого типа. Раскрываются перспективы промышленного применения данной технологии передачи телеметрической информации.

Валерий Жижин

Введение

Данная публикация обобщает результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности реализации низкоскоростных (до 9,6 кбит/с) каналов телеметрии с использованием имеющихся стандартных металлических конструкций в жилых зданиях, промышленных помещениях, нефтедобывающих установках с регистрацией магнитной компоненты передаваемого сигнала. В зданиях и промышленных помещениях в качестве металлоконструкций могут выступать трубы систем тепло- и водоснабжения, вентиляционные короба. В нефтедобывающих установках — материалы насосно-компрессорных (далее — НКТ) труб.

Актуальность проведения исследований в этой области обусловлена следующими факторами:

- бурное развитие различных сенсорных систем сбора данных (IoT-систем), бытового и промышленного назначения;
- значительное удорожание работ по прокладке проводных коммуникаций, особенно в уже построенных зданиях;
- зачастую возникающая проблематичность организации беспроводных каналов телеметрии в ISM-диапазоне внутри зданий из-за различных негативных факторов — например, значительного затухания при распространении электромагнитной волны сквозь бетонные стены, наличия массивных металлических предметов, электромагнитной совместимости с другим оборудованием;
- актуальность задачи организации каналов скважинной телеметрии «забой-устье» в буровом и нефтедобывающем оборудовании.

В настоящее время в России исследованию альтернативных классических каналов передачи телеметрической информации уделяется недостаточное внимание.

Вместе с тем, по имеющимся публикациям в открытых источниках, в зарубежных странах

активно ведутся исследования и разработки в этой области.

В качестве примеров можно привести систему MagneLink MCS (фирма Lockheed Martin) — беспроводную систему связи through-the-earth, разработанную для удовлетворения потребностей горнодобывающей промышленности для экстренной связи после аварии, а также технологию LibertyLink, созданную американской фирмой Aura Communications Technology Inc.

Работа системы MagneLink MCS основана на передаче магнитных волн через землю без проводов и наземной инфраструктуры, которые в настоящее время требуются для связи с помощью стандартной радиопередачи. Это портативная двусторонняя система экстренной связи с поддержкой голоса и текста, работающая на расстояниях, достаточных для связи поверхности с глубокими подземными шахтами.

Система связи, основанная на LibertyLink, использует расширенную форму магнитной связи и позволяет обеспечить конфиденциальную беспроводную передачу аудио- и цифровых данных на короткие (порядка 1 м) расстояния. Конфиденциальность связи достигается за счет локализации магнитного поля в ограниченном пространстве в комбинации с несущей частотой 204 кГц.

Кроме этого, в настоящее время в беспроводных системах малого радиуса действия набирает популярность технология NFMI (Near Field Magnetic Induction — магнитная индукция ближнего поля), разработанная китайской компанией Cannice Technology. Интерес разработчиков систем малого радиуса действия к этой технологии связан прежде всего с тем, что она позволяет создавать локализованный в пространстве малопотребляющий низкоскоростной канал передачи данных с высокой помехозащищенностью.

Исследования возможностей инновационных технологий телеметрии и сбора данных

по металлическим конструкциям проводятся компанией ООО «Феррум Телеком» в инициативном порядке — как на собственные средства, так и в рамках гранта, предоставленного Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (заявка № С1- 37544, утверждена 1.03.2018).

Модели каналов телеметрии по металлоконструкциям

В результате проведенных НИОКР по перспективным методам передачи телеметрической информации были предложены и экспериментально исследованы следующие модели:

- металлоконструкция как ферромагнитный канал;
- металлоконструкция как элемент магнитной рамочной антенны;
- металлоконструкция как элемент двухпроводной симметричной открытой длинной линии.

Во всех предложенных моделях для передачи информационного сообщения используется прямая или косвенная модуляция создаваемого магнитного потока. Это обусловлено потенциально высокой помехозащищенностью магнитного канала в условиях сложной электромагнитной обстановки в промышленных помещениях и относительной независимости распространения магнитного потока от наличия и конфигурации металлических предметов, в отличие от традиционных радиосистем телеметрии.

Металлоконструкция как ферромагнитный канал

Структурная схема модели ферромагнитного канала показана на рис. 1.

Данная модель предусматривает прямую модуляцию магнитного потока при передаче цифровых пакетов, где средой передачи является металлоконструкция, например фрагмент трубопровода системы тепло- или водоснабжения здания. В качестве передающего и приемного элементов используются катушки индуктивности, подключенные соответственно к токовому драйверу и входному усилителю приемного модуля.

Уровень напряжения сигнала U_2 на нагрузке приемного элемента определяется следующим выражением [1]:

$$U_2 = I_{1m} \times M \times 2\pi f_c \times \cos(2\pi f_c t), \quad (1)$$

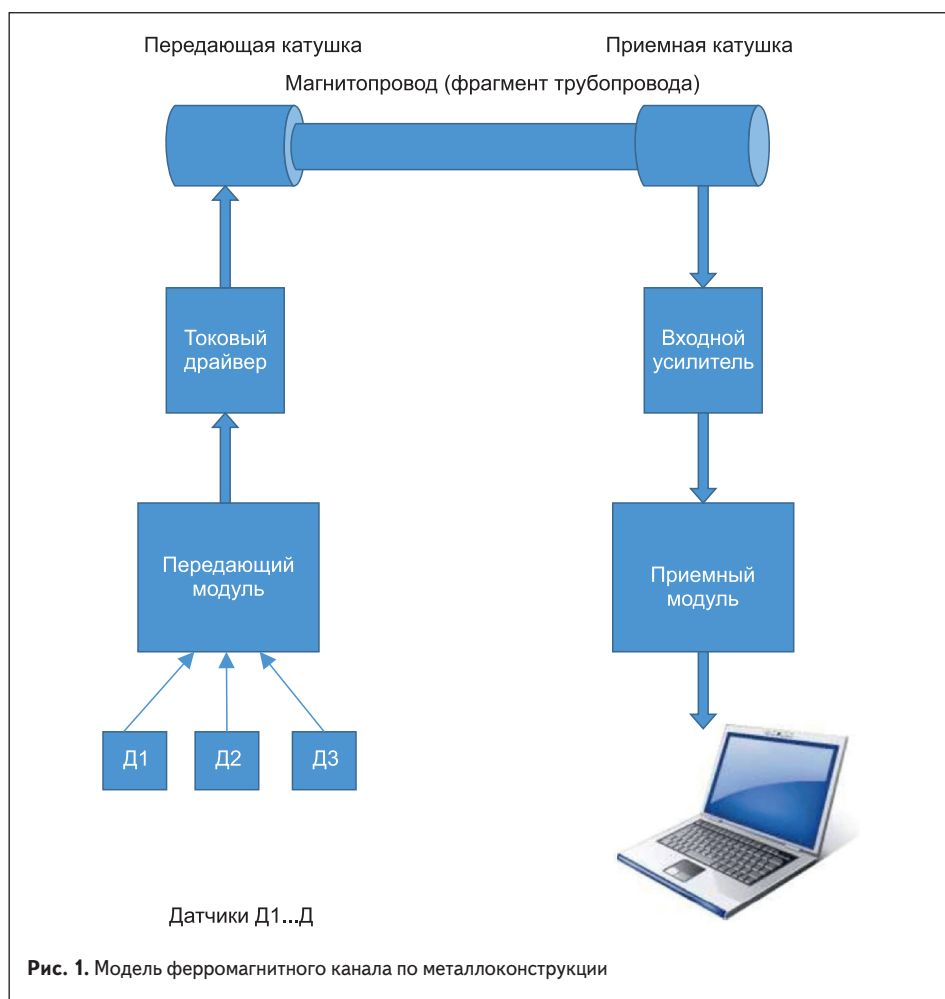
где I_{1m} — амплитуда тока в передающей обмотке; M — взаимная индуктивность, определяемая выражением [1]:

$$M = k_0 \times (L1 \times L2)^{0,5}, \quad (2)$$

где k_0 — коэффициент связи между обмотками; $L1$ — входная индуктивность; $L2$ — выходная индуктивность; f_c — частота несущей.

Экспериментально установлено, что для стального магнитопровода k_0 существенно зависит от расстояния между передающей и приемной катушками.

Метод может быть использован для организации внутрицеховых каналов телеметрии на дистанциях, не превышающих 50–60 м.

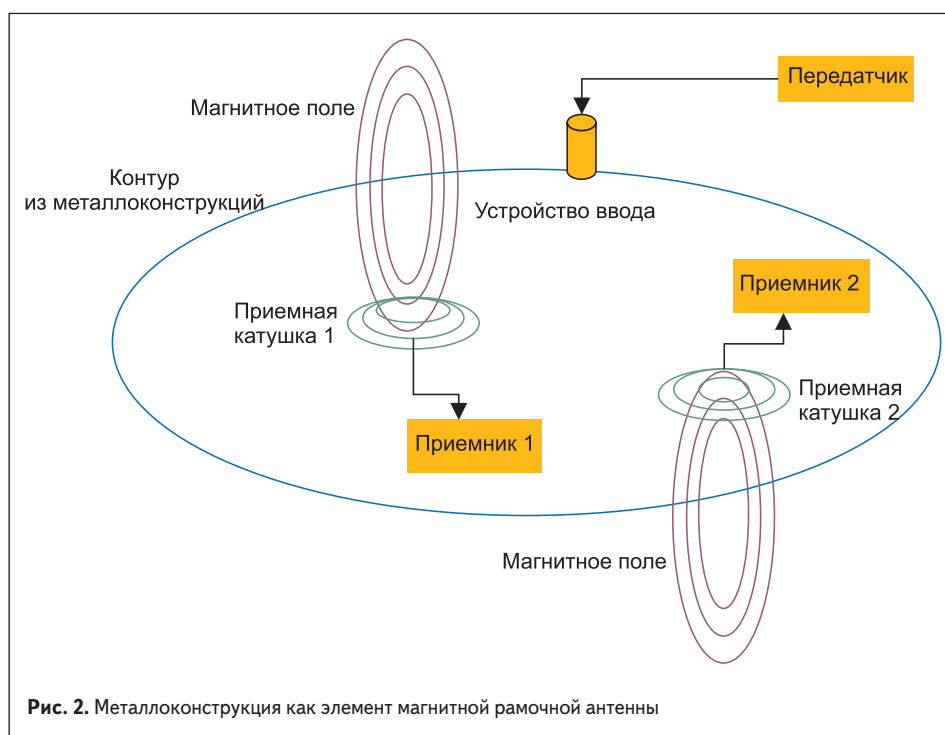


Металлоконструкция как элемент магнитной рамочной антенны

Обобщенная схема данной модели показана на рис. 2.

Передатчик токовых посылок через индуктивное устройство ввода — ферритовое кольцо

с обмоткой — подключен к металлоконструкциям здания, образуя замкнутый контур (рамку), в результате чего в контуре наводятся токовые импульсы, создающие магнитное поле, перпендикулярное плоскости рамки. Приемные устройства, расположенные в этом же



помещении, внутри рамочного пространства осуществляют прием магнитного сигнала на ферритовые антенны или многovitковые плоские катушки.

Дополнительной опцией данного метода является возможность осуществления беспроводной подзарядки микропотребляющих приемных устройств.

Данный метод может быть применен для передачи команд и беспроводной подзарядки устройств, входящих в систему «умный дом», а также IoT-устройств.

Как вариации дизайна данного метода можно предложить следующее:

- Прокладка по периметру помещения, складского стеллажа проводного токового контура (магнитной рамочной передающей антенны), внутри которого расположены приемные устройства. Данный метод может быть использован в торговом оборудовании при обновлении информации в электронных ценниках [2], в системах складской логистики — коммуникация с электронными метками.
 - Установка по периметру информационного или рекламного щита проводного контура, образующего магнитную рамочную антенну. К контуру может быть подключен NFC-модуль для передачи информации на абонентские устройства (смартфоны, планшеты) с поддержкой NFC. Метод может быть использован в системах дополненной реальности, которые в последнее время приобретают все большую популярность.
- Применительно к данной модели уровень напряжения сигнала на нагрузке приемного элемента определяется выражением [1]:

$$U_{\text{вых}}(t) = \mu_0 \times f_c \times Q \times n \times S_{\text{пр}} \times S_{\text{пер}} \times I_m \times \cos(2\pi f_c t) \times (1/(R^2 + h^2)^{3/2}), \quad (3)$$

где Q — добротность приемного колебательного контура, состоящего из индуктивности

плоской катушки и параллельно подключенного конденсатора; n — количество витков приемной катушки; $S_{\text{пр}}$ — площадь приемной катушки; $S_{\text{пер}}$ — площадь передающей магнитной рамки; I_m — амплитуда тока в рамке; R — радиус рамки; h — расстояние от центра рамки до точки приема.

Металлоконструкция как элемент двухпроводной симметричной открытой длинной линии

Структурная схема данной модели канала передачи информации представлена на рис. 3.

Металлоконструкция служит одним из проводников симметричной длинной линии. Вторым виртуальным проводником длинной линии могут стать шина защитного заземления, шина «нейтраль» силовой электросети, заземление в грунт через стальную пластину. Проводники подключаются к передающему устройству. Ввод токового сигнала осуществляется через инжектор (каплер) емкостного типа.

Поскольку в отличие от классической длинной линии погонные параметры индуктивности L_0 и емкости C_0 металлоконструкции носят случайный характер, рассматриваемая линия будет несогласованной, то есть оптимальное сопротивление нагрузки не будет равно волновому сопротивлению $\rho = (L_0 \times C_0)^{0,5}$.

Для максимизации тока передаваемого сигнала (минимизации реактивного сопротивления линии) целесообразно в точке приема заземлить металлоконструкцию одним из вышеперечисленных способов. Как показано в работе [3], в этом случае схема замещения короткозамкнутой длинной линии представляет собой последовательную цепь, состоящую из сопротивления потерь R_p и реактивной нагрузки Z_p . Тогда ток $I(t)$ в линии будет определяться как:

$$I(t) = U_c(t)/(Z_p 2 + R_p 2)^{0,5}, \quad (4)$$

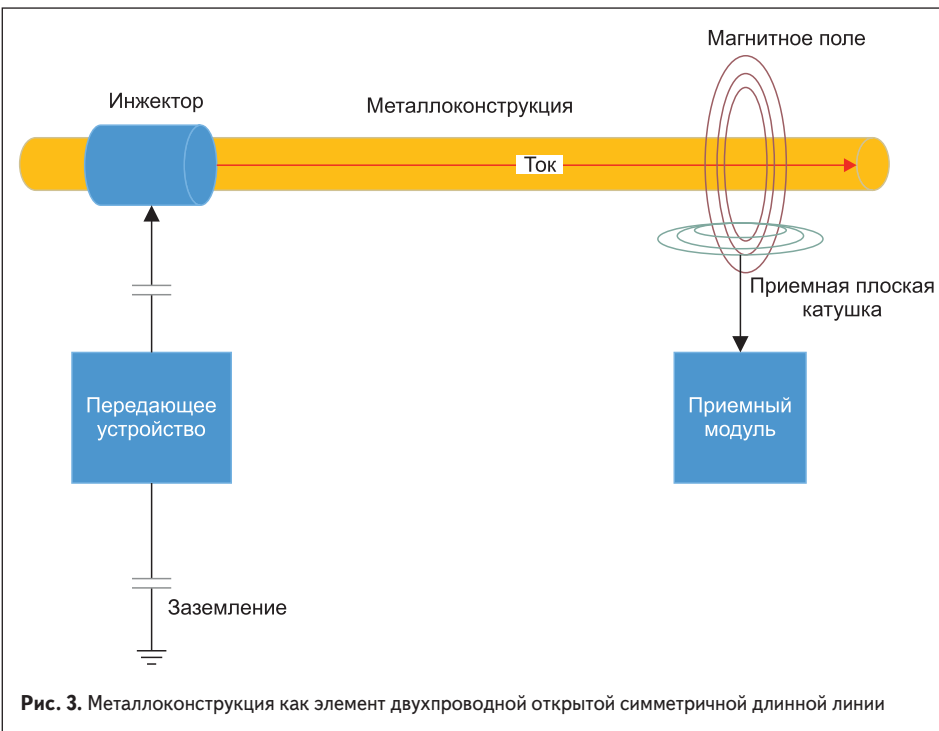


Рис. 3. Металлоконструкция как элемент двухпроводной открытой симметричной длинной линии

где $U_c(t)$ — напряжение сигнала на выходе передатчика;

$$Z_p = -j \times \rho \times \text{tg}(2\pi \times f_c(L_0 \times C_0)^{0,5} \times l),$$

f_c — несущая частота сигнала;
 l — длина линии.

Регистрация сигнала на приемном конце производится либо на плоскую катушку, размещаемую перпендикулярно плоскости поперечного сечения металлоконструкции на минимально возможном расстоянии от нее, либо на катушку индуктивности, размещенную на ферритовом кольце, охватывающем металлоконструкцию. Возможно также использование интегрального датчика магнитного поля.

В настоящее время для реализации приемного элемента рассматривается возможность применения высокочувствительных интегральных сенсоров магнитного поля, основанных на эффектах магнитной анизотропии (АМР-датчики) и гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР- датчики) [4].

При регистрации магнитного потока на плоскую катушку амплитуда напряжения выходного сигнала $U_{\text{вых}}(t)$ может быть оценена как:

$$U_{\text{вых}}(t) = \mu_0 \times 2\pi \times f_c \times Q \times n \times S_{\text{пр}} \times H_m \times \cos(2\pi f_c t), \quad (5)$$

где μ_0 — универсальная магнитная постоянная; Q — добротность приемного колебательного контура, состоящего из индуктивности плоской катушки и параллельно подключенного конденсатора; n — количество витков; $S_{\text{пр}}$ — площадь катушки; H_m — амплитуда напряженности магнитного поля в точке регистрации;

$$H_m = I_m/(2\pi \times r), \quad (6)$$

где I_m — амплитуда тока в линии; r — расстояние до плоскости катушки.

Рассмотренная модель может быть использована при выборе и оценке конфигурации каналов телеметрии по металлоконструкциям на значительные расстояния, порядка 1 км.

В рассмотренной модели канальная частота несущей выбирается в диапазоне 100–500 кГц. Данный диапазон обусловлен минимизацией влияния скин-эффекта [5] при распространении сигнала по металлоконструкции и минимизацией потерь на излучение. Применительно к рассматриваемому методу скин-эффект заключается в вытеснении внутренним магнитным полем тока проводимости к внешним границам проводника (металлоконструкции), что приводит к возрастанию его электрического сопротивления. Ширина области вытеснения Δ (скин-слой) определяет эквивалентное сечение проводника и уменьшается с ростом частоты сигнала:

$$\Delta = (\rho_3/(\pi \times f_c \times \mu_a))^{0,5}, \quad (7)$$

где ρ_3 — электрическое удельное сопротивление проводника; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость материала проводника.

Конкретное значение частоты несущей определяется на этапе предпроектного обследования объекта размещения системы телеметрии.

Преимуществами рассмотренных методов передачи информации по сравнению с традиционными Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee являются:

- высокая помехозащищенность каналов передачи, поскольку регистрируется только магнитная компонента передаваемого сигнала;
- проникновение с малым ослаблением сквозь железобетонные конструкции;
- слабая зависимость распространения от конфигурации металлических предметов в помещении;
- решение проблемы электромагнитной совместимости с другим оборудованием за счет пространственной ограниченности области ближнего магнитного поля.

Для передачи данных в рассмотренных каналах телеметрии могут применяться стандартные протоколы Modbus RTU и Modbus TCP.

К недостаткам представленных методов следует отнести высокую пиковую мощность канального сигнала (порядка 40–50 Вт), частичное рассеяние магнитного потока на металлоконструкциях, особенно в системах центрального отопления, имеющих рамочную геометрию, необходимость проведения тщательных предпроектных исследований металлоконструкций.

Экспериментальная проверка методов и перспективы промышленного применения

Как показали предварительные маркетинговые исследования, в настоящее время наиболее востребованы системы промышленной телеметрии по уже имеющимся металлическим конструкциям на дистанциях 50 м и выше. Это прежде всего автоматизированные системы сбора данных со счетчиков тепло- и водоресурсов, от сигнализирующих датчиков аварийных ситуаций — например, датчиков протечки воды, в жилых и производственных помещениях.

Особый интерес представляет организация каналов телеметрии «забой-устье» в буровых и нефтедобывающих установках, а также каналов сигнализации «забой-поверхность» для угольных шахт.

Поэтому основное внимание было уделено разработкам каналов передачи информации с использованием имеющихся металлоконструкций именно в этих областях.

В результате выполнения НИОКР, проведенной в рамках гранта (заявка № С1- 37544, утверждена 1.03.2018), и многочисленных дополнительных исследований получены следующие результаты.

По ферромагнитному каналу

Были проведены измерения коэффициента передачи сигнала на фрагментах вертикального стояка труб центрального отопления различных зданий. В качестве приемного и передающего элементов применялись катушки индуктивности, содержащие по 50 витков и намотанные непосредственно на трубе. Измерения проводились на частоте 100 кГц.

Аппроксимированный график зависимости коэффициента передачи от расстояния приведен на рис. 4.

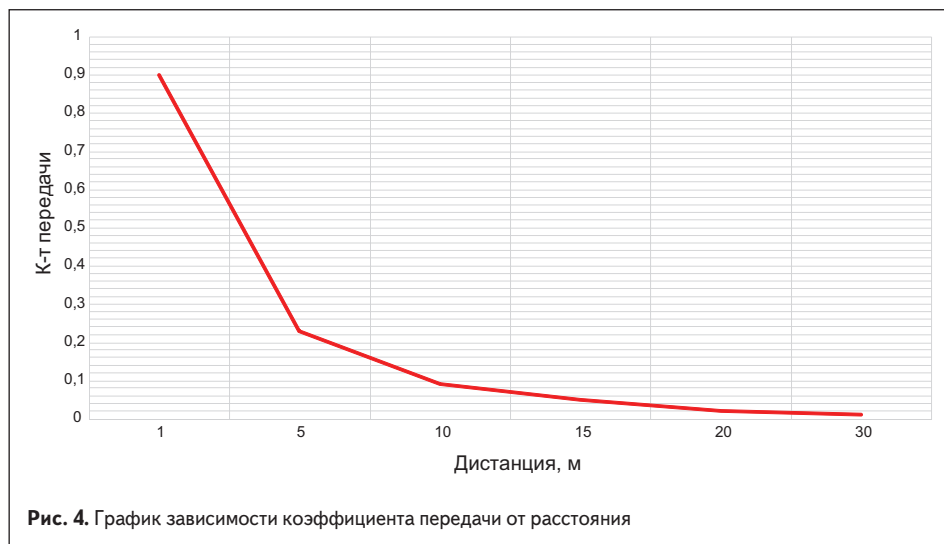


Рис. 4. График зависимости коэффициента передачи от расстояния

Из представленного графика можно сделать вывод, что распространение сигнала по ферромагнитному каналу определяется коэффициентом связи между катушками, который имеет достаточно сложную зависимость от расстояния между ними. Аппроксимация полученных данных позволяет сделать следующий вывод:

- на дистанции порядка 4–5 м коэффициент связи спадает обратно пропорционально расстоянию;
- на дистанциях свыше 5 м наблюдается плавный переход к обратной квадратичной зависимости от расстояния.

Данный метод передачи применим для организации полудуплексных каналов телеметрии по стальным металлоконструкциям на дистанции до 50 м. Для упрощения технологических процедур монтажа катушек возможно их изготовление по технологии гибких печатных плат.

По металлоконструкциям как элементу магнитной рамочной антенны

При экспериментальной проверке данного метода проводилось емкостное подключение передающего устройства к подводящей и отводящей трубе системы центрального

отопления, которые вместе с радиатором отопления образовывали передающую магнитную рамочную антенну.

Проводились измерения коэффициента передачи сигнала в открытом магнитном канале: излучающая рамочная антенна — приемная плоская катушка на различных дистанциях.

Результаты измерений представлены на графике (рис. 5).

На графике видно, что коэффициент передачи спадает обратно пропорционально кубу расстояния, что соответствует теории магнитоэластики [6].

Экспериментальная проверка подтвердила предположение об отсутствии значительных индустриальных помех в магнитном канале.

Данный метод может быть использован при реализации систем передачи информации и дистанционного управления устройствами, находящимися в помещении на расстоянии порядка 10 м от магнитной рамки или расположенными внутри нее.

Существенным преимуществом открытого магнитного канала является также возможность использования уже отработанной элементной базы и программного обеспечения для технологии магнитной индукции ближнего поля NFMI.

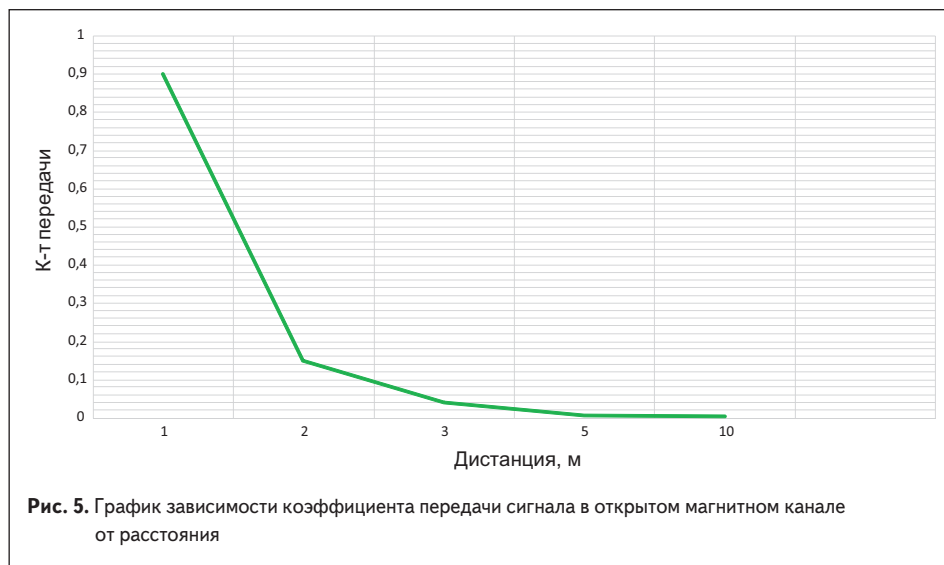


Рис. 5. График зависимости коэффициента передачи сигнала в открытом магнитном канале от расстояния

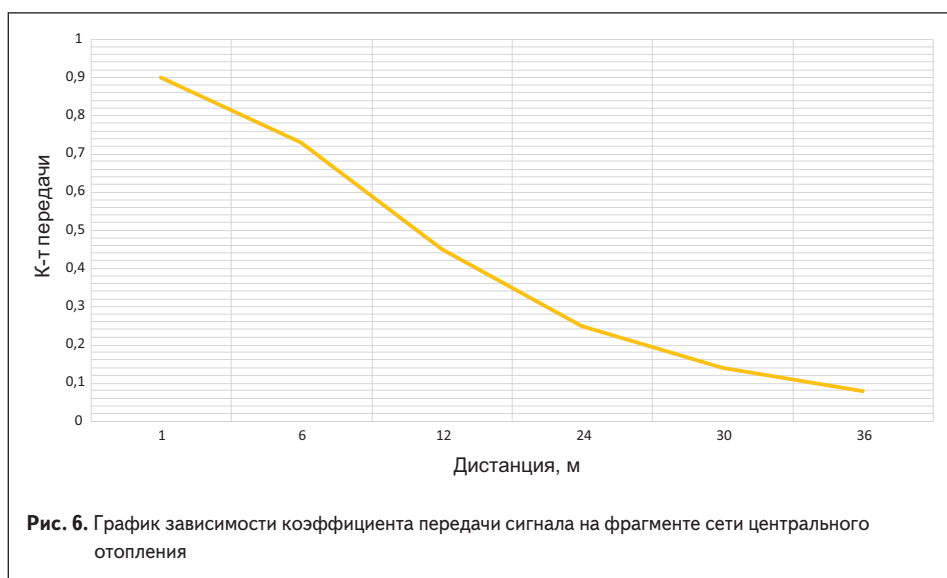


Рис. 6. График зависимости коэффициента передачи сигнала на фрагменте сети центрального отопления

По металлоконструкции как элементу двухпроводной симметричной открытой длинной линии

Экспериментальная проверка данной модели передачи информации проводилась на фрагменте системы центрального отопления жилого здания и на фрагменте сети водоснабжения коттеджного поселка, причем в последнем случае трубная коммуникация была частично погружена в канаву с дождевой водой.

Как и в предыдущих экспериментах, выполнялись измерения зависимости коэффициентов передачи сигнала от расстояния.

Результаты измерений на фрагменте системы центрального отопления представлены на рис. 6, на фрагменте сети водоснабжения — на рис. 7.

При проведении экспериментов сигнальный выход передатчика подключался через согласующее устройство к трубе, а общий провод — к шине «нейтраль» силовой электросети при измерениях на системе центрального отопления здания и к металлической пластине заземления, помещенной непосредственно в грунт, при измерениях на водопроводной сети.

Регистрация магнитного сигнала производилась на плоскую катушку диаметром 120 мм и содержащую 50 витков провода

сечением 0,12 мм², настроенную в резонанс с несущей частотой. Катушка размещалась перпендикулярно плоскости поперечного сечения трубы на расстоянии 10 мм.

Трубопроводы центрального отопления и водопроводной сети имели штатное защитное заземление. Материал труб — сталь СТЗ.

В качестве тест-сигнала использовалась импульсная последовательность с частотой следования 1 кГц и внутрипериодным заполнением 100 кГц.

При проведении измерений на системе центрального отопления здания регистрация сигнала производилась с шагом 3,5 м (высота межэтажного лестничного пролета), а на водопроводной сети — с шагом 10 м. В точках регистрации отношение сигнал/шум по напряжению составляло не менее 10 дБ при пиковой мощности передаваемого сигнала 50 Вт.

Проведенные циклы измерений показали следующее:

- высокую помехозащищенность канала передачи информации по металлоконструкциям;
- отсутствие побочных излучений, которые могут создать электромагнитные помехи иному радиоэлектронному оборудованию;
- практическое отсутствие влияния металлических предметов, подсоединенных

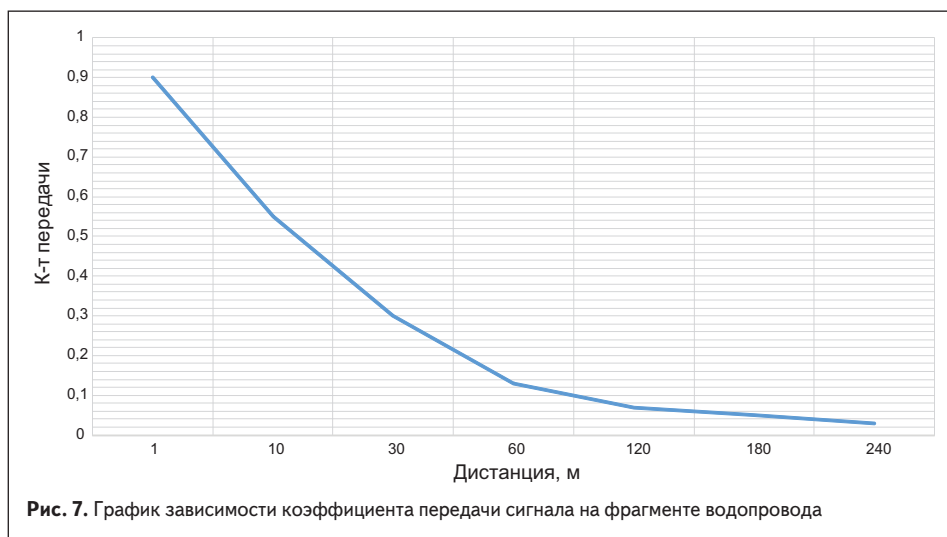


Рис. 7. График зависимости коэффициента передачи сигнала на фрагменте водопровода

к трубопроводам, например крепежной арматуры, на энергетические характеристики канала.

Эксперименты подтвердили возможность реализации канала передачи телеметрической информации по имеющимся металлоконструкциям на расстояния до 300 м без ретрансляторов.

В рамках проведенной НИОКР была разработана эскизная конструкторская документация на аппаратуру канала телеметрии по металлоконструкциям зданий.

В развитие этого направления продолжаются исследовательские работы по реализации каналов «забой-устье» по насосно-компрессорным трубам для глубинной скважинной телеметрии.

Совместно с представителями компании ООО «Зетскан» Г. В. Васильевым, В. Л. Одивановым и сотрудником компании ООО «Софойл» Р. Р. Галаяудиновым 30 июня 2021 года на НКТ объекта Татнефть (Альметьевск) были проведены оценочные испытания с целью определения возможностей организации канала телеметрии по НКТ.

Испытания проводились на участке насосно-компрессорных труб длиной 833 м и диаметром 110 мм, с использованием модели «НКТ как псевдокоаксиальная линия».

По результатам проведенных испытаний был составлен совместный протокол, в основных выводах которого отмечено следующее:

- подтверждена перспективность использования схемы «НКТ как псевдокоаксиальная линия» с регистрацией магнитной моды электромагнитной волны для создания канала телеметрии для скважин, оборудованных ШПН;
- указана необходимость доработки приемопередающих модулей аппаратуры канала телеметрии и программного обеспечения к нему.

В настоящее время заканчивается разработка опытного образца аппаратуры для канала телеметрии «забой-устье» по НКТ.

Выводы

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

Существует принципиальная возможность создания низкоскоростных одноканальных систем передачи данных с помощью имеющихся стальных металлоконструкций зданий или промышленных установок. Инновационность разработанной технологии заключается в использовании в качестве физической среды передачи данных уже имеющихся на объекте металлических коммуникаций и магнитной компоненты в передаваемом сигнале. Совокупность этих факторов приводит к значительному сокращению финансовых затрат на монтаж и установку системы и устраняет большинство проблем электромагнитной совместимости с другим оборудованием.

Канал передачи данных по металлоконструкциям может быть сконфигурирован следующими способами:

- как ферромагнитный канал;
- как магнитная рамочная антенна;
- как симметричная открытая двухпроводная линия.

При реализации каналов данного типа в качестве протоколов передачи могут быть использованы стандартные промышленные протоколы Modbus TCP и Modbus RTU.

Канал передачи данных по металлоконструкциям может быть конкурентоспособным техническим решением при построении систем телеметрии и сбора данных в случае, когда применение серийных проводных и беспроводных систем аналогичного назначения затруднительно или экономически нецелесообразно. ■

Автор статьи выражает признательность представителям компании ООО «Зетскан» Г. В. Васильеву и В. Л. Одиванову и представителю компании ООО «Софойл» Р. Р. Галяутдинову за оказанную помощь и техническую поддержку при проведении испытаний.

Литература

1. Жижин В. Магнитные системы передачи информации. Новые решения // Беспроводные технологии. 2016. № 3.
2. www.mokosmart.com/ru/electronic-shelf-label-tags/
3. Панфилов И. И., Дырда В. Е. Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1991.
4. Сысоева С. Датчики магнитного поля. Ключевые технологии и новые перспективы. Часть 3. ХМР — конкуренты датчиков Холла // Компоненты и технологии. 2014. № 8.
5. Семенов Ю. Силовая электроника. М.: Солон-Пресс, 2008.
6. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1990.