

Магнитоиндуктивные системы передачи информации:

перспективы применения в телеметрии

В статье рассматриваются магнитоиндуктивные системы передачи цифровой информации (МСПИ) применительно к системам промышленной телеметрии и сбора данных. Акцент сделан на использование ферромагнитного канала, в качестве которого может быть использована любая поверхность, являющаяся проводником магнитного поля, — например, металлические конструкции зданий или трубы системы тепло- и водоснабжения. Приводятся результаты теоретических оценок и обоснование выбора технических характеристик МСПИ, а также результаты испытаний прототипа экспериментальной системы МСПИ по ферромагнитному каналу.

Валерий Жижин
jjinv@mail.ru

Введение

В настоящее время наблюдается бурное развитие таких технологий, как «Умный дом», «Интернет вещей», автоматизированные системы сбора данных со счетчиков ресурсов (АСКУЭ и другие), системы безопасности и пожароохранной сигнализации. В качестве физической среды передачи информации в них традиционно используются цифровые радиоканалы (Wi-Fi, GSM, ZigBee и т. д.), проводные (Ethernet, RS-485) и реже — PLC-каналы.

При выборе и проведении технико-экономического обоснования внедрения подобных систем на промышленных объектах и объектах ЖКХ нередко остро встает вопрос о выборе каналов передачи данных на физическом уровне с учетом факторов помехозащищенности, энергопотребления, стоимости инсталляции и абонентской платы. Магнитоиндуктивная система передачи информации с использованием уже существующей трубопроводной инфраструктуры может быть конкурентоспособным техническим

решением при построении низкоскоростных (до 32 кбит/с) систем телеметрии и сбора данных в случае, когда применение серийных проводных и беспроводных систем аналогичного назначения затруднительно или экономически нецелесообразно.

Передача сигналов в магнитоиндуктивной системе основана на законе электромагнитной индукции и использовании в качестве среды распространения поверхности, служащей проводником магнитного поля.

Таким образом, в среде реализуется ферромагнитный канал передачи информации.

Магнитоиндуктивная система передачи информации имеет следующие преимущества:

- при ее реализации не требуются трудоемкие работы по прокладке электропроводки;
- высокая помехозащищенность модулированного магнитного потока к промышленным электромагнитным помехам благодаря направленности и пространственной локализации магнитного поля в ферромагнитном канале;
- преобладание магнитной компоненты поля в сигнале несущей над электрической, что положительно отражается на электромагнитной совместимости аппаратуры канала с радиосредствами, находящимися в непосредственной близости к нему (0,3–0,5 м).

Принцип функционирования и теоретическое обоснование

Структурная схема магнитоиндуктивной системы передачи информации показана на рис. 1.

Она представляет собой систему, состоящую из приемно-передающих катушек (2), (4), расположенных на трубопроводе (3), к которым

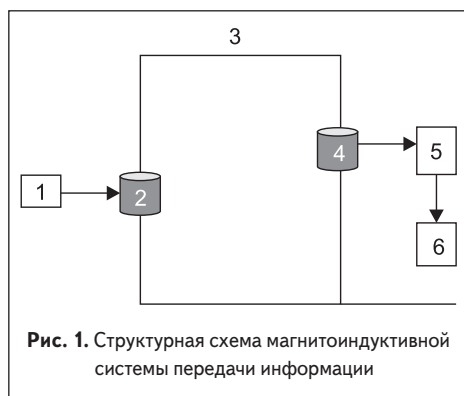


Рис. 1. Структурная схема магнитоиндуктивной системы передачи информации

подключены трансмиттеры абонента (1), и центрального узла (5), связанного с устройством регистрации (6).

В процессе проведения исследований МСПИ была создана теоретическая модель канала и определены основные электрофизические характеристики, влияющие на процесс распространения магнитного потока в магнитопроводе, образованном замкнутой металлической конструкцией.

К таким характеристикам относятся:

- характеристики потерь на токи Фуко и перемгничивание в магнитопроводе;
- коэффициент связи между передающей и приемной катушками;
- характеристики АЧХ.

Как показал качественный анализ процессов передачи сигналов по магнитоиндуктивному каналу, ее эффективность определяется в основном следующими факторами:

- производной огибающей или частотой токового сигнала несущей (следствие закона электромагнитной индукции);
- мощностью несущей;
- наличием или отсутствием в среде передачи объектов, экранирующих магнитные поля;
- минимальными потерями при вводе и выводе сигналов в магнитопровод.

При использовании в МСПИ несущей, представляющей собой гармоническое колебание, с повышением его частоты возрастает потребляемая мощность выходного каскада передатчика, снижается добротность передающей катушки. Поэтому возникла идея использовать в качестве несущей сверхширокополосный сигнал (СШП) [1] — короткоимпульсную последовательность высокой скважности, предположительно свободную от указанных недостатков.

Согласно документу «Рекомендация МСЭ-R SM.1755», сверхширокополосным сигналом является сигнал, имеющий относительную ширину полосы частот Ω по уровню -10 дБ более 0,2:

$$\Omega = (f_{\max} - f_{\min})/f_c, \quad (1)$$

где f_{\max} — наивысшая частота, на которой спектральная плотность мощности передачи СШП составляет -10 дБ относительно f_m ; f_{\min} — наименьшая частота, на которой спектральная плотность мощности передачи СШП составляет -10 дБ относительно f_m ; f_m — частота максимальной передачи СШП; $f_c = (f_H + f_L)/2$ — центральная частота спектра.

Сверхширокополосные сигналы данного типа находят применение в СШП-радиосистемах цифровой передачи информации [2] на короткие (до 10 м) расстояния и отличаются высокой помехозащищенностью, отсутствием многолучевого распространения, проникновением сквозь металлические элементы строительных конструкций с малым (4–6 дБ) затуханием.

Этот тип сигналов позволяет создавать передающие каскады с высоким пик-фактором — отношением пиковой мощности к средней — и тем самым получить требуемую дальность работы.

Элемент несущей последовательности — короткий радиоимпульс и его спектр показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

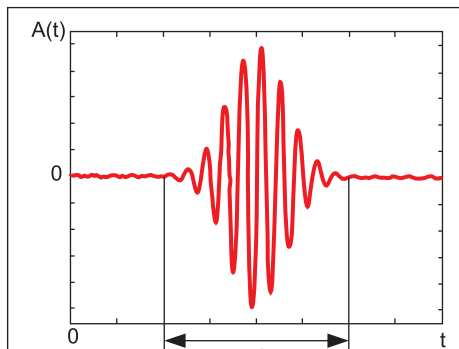


Рис. 2. Короткий радиоимпульс

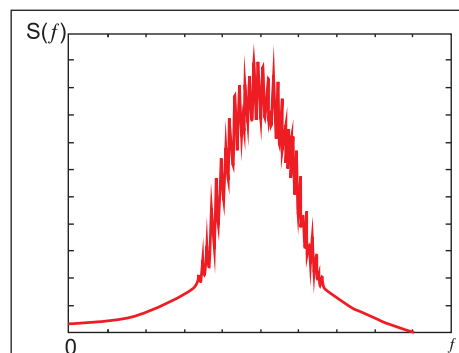


Рис. 3. Спектр короткого радиоимпульса

Теоретическая модель МСПИ может быть представлена в виде эквивалентного четырехполюсника — трансформатора с разнесенными первичной и вторичной обмотками. Эквивалентная схема представлена на рис. 4.

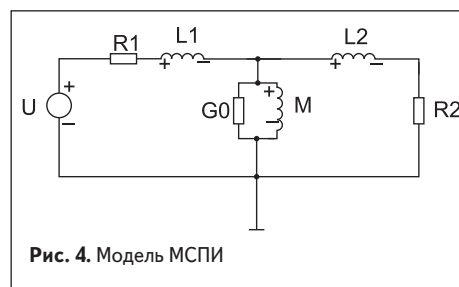


Рис. 4. Модель МСПИ

- На схеме обозначено:
- U — источник сигнала;
 - R1 — суммарное сопротивление потерь источника сигнала и передающей катушки;
 - L1 — входная индуктивность;
 - L2 — выходная индуктивность;
 - M — взаимная индуктивность;
 - G₀ — проводимость активных потерь в магнитопроводе;
 - R2 — сопротивление нагрузки приемника;

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

где k_0 — коэффициент связи между обмотками:

$$G_0 = P_n / U_m, \quad (3)$$

где P_n — суммарная мощность тепловых потерь в магнитопроводе на перемгничивание и токи Фуко; U_m — амплитуда сигнала передатчика.

Величина P_n может быть оценена как [3]:

$$P_n = P_s \times m \times (ff_1)^2 \times (B/B_1)^2, \quad (4)$$

где P_s — удельные массовые потери; m — масса фрагмента магнитопровода между передатчиком и приемником; f — рабочая частота; f_1 — базовая расчетная частота 1 кГц; B — величина магнитной индукции; B_1 — величина базовой магнитной индукции 1 Тл.

Исходя из 1 и 2 законов Кирхгофа и учитывая, что ток в ветви L_2R_2 много меньше тока через M, получим приближенное решение для выходного сигнала:

$$U_2 = I_m \times M \times 2\pi f_c \times \exp(-(t-t_0/2)^2/2t_0^2) \times \cos(2\pi f_c t), \quad (5)$$

где I_m — амплитуда токового импульса в передающей обмотке; f_c — частота заполнения; t_0 — длительность импульса.

Из формулы (5) видно, что эффективность передачи сигнала определяется взаимной индукцией M, которая линейно зависит от коэффициента связи k_0 между катушками. Коэффициент связи k_0 определяет энергетические потери в МСПИ и, следовательно, при выбранном типе несущей ограничивает скорость передачи. Зависимости коэффициента связи для различных типов магнитопроводов приведены в работе [3].

Энергетическое уравнение ферромагнитного канала передачи информации имеет следующий вид:

$$P_{\text{пр}} (\text{дБ}) = 10 \times \text{Log}(P_0) - 10 \times \text{Log}(1/k_0) - 10 \times \text{Log}(P_n), \quad (6)$$

где P_0 — мощность передаваемого сигнала, Вт.

Выбор устройства ввода-вывода сигналов в ферромагнитный канал

Важнейший элемент МСПИ — устройство ввода/вывода модулированного магнитного потока в ферромагнитный канал. Как показали предварительные теоретические и экспериментальные исследования, оптимальным с точки зрения минимизации энергетических потерь и широкополосности является одновитковый соленоид [4], поскольку он обладает минимальной постоянной времени и его конструкция может обеспечить минимальный зазор между магнитопроводом (трубой) и обмоткой соленоида.

Величина зазора вносит существенный вклад в энергетические потери в МСПИ.

Одновитковый соленоид для систем МСПИ может быть реализован двумя способами:

- с использованием тонкой, порядка 0,2–0,5 мм, изолированной медной пластины, выполненной в форме одного витка и закрепленной на элементе металлической коммуникации;
- с использованием короткозамкнутого с двух сторон плоского шлейфа, например RC-20, закрепляемого на металлической коммуникации в форме витка и присоединяемого

к приемопередающему модулю с помощью разъемов на шлейф типа IDC.

Вариант конструкции одновиткового соленоида и его крепление на магнитопроводе (трубе) показаны на рис. 5.

На представленном чертеже показаны:

- металлоконструкция, являющаяся каналом передачи информации (цилиндр, обозначенный линией черного цвета);
- одновитковый соленоид в разрезе, закрепленный на металлоконструкции (полуцилиндр, обозначенный линией серого цвета);
- крепежные кронштейны (пластины П-образной формы);
- металлическая подложка для крепления клеммных узлов подсоединения к терминалам абонентского и центрального узлов.

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) [5].

Экспериментальное исследование МСПИ

Как показала практика, по технологическим ограничениям возможна реализация устройства ввода/вывода с постоянной времени не менее 30 нс. Исходя из этого для минимизации временных искажений в тракте в качестве несущей был использован импульс гауссовой формы длительностью 300 нс (по уровню 0,5) и частотой заполнения 10 МГц. Скорость передачи исходного тестового сигнала была выбрана 9600 бит/с.

Для проверки принципов передачи сигналов и определения основных технических характеристик в МСПИ с ферромагнитным каналом был создан прототип экспериментальной системы, функциональная схема которой представлена на рис. 6.

Алгоритм работы приемопередающего устройства (трансммитера) поясняется функциональной схемой и заключается в следующем.

Приемный и передающий модуль и микроконтроллер находятся в режиме микропотребления в ожидании команды запроса с диспетчерского центра, передатчик которого

подключен к ферромагнитному каналу. При поступлении и декодировании команды запроса микроконтроллер (2) активирует передающий модуль и формирует команду ответа в USART-формате с преобразованием ее в канальный сигнал. Команда ответа содержит информацию о величине сигналов, поступающих с источника (1) на вход микроконтроллера (2).

Формирование канального сигнала происходит в два этапа.

На первом этапе программа микроконтроллера преобразует исходный передаваемый USART-сигнал в последовательность однополярных импульсов по следующему алгоритму: логическому «0» соответствуют два импульса длительностью 5 мкс каждый, с интервалом между ними 10 мкс, логической «1» соответствует пауза. При передаче логического «0» временное положение импульсов центрировано относительно середины тактового интервала передаваемой посылки, при этом защитные интервалы в начале и конце посылки составляют не менее 5 мкс. Длительности логического «0» и логической «1» определяются величиной скорости передачи USART-сигнала. На втором этапе каждый импульс с выхода микроконтроллера (2) поступает в передающий модуль (3), где преобразуется в знакопеременный импульс длительностью 300 нс, с частотой заполнения 10 МГц и амплитудой 400 В, который поступает на передающую катушку (4). Формирование канального импульса основано на использовании колебательного контура ударного возбуждения в передающем модуле (3). Передающая катушка создает модулированный знакопеременный магнитный поток, распространяющийся по ферромагнитному каналу (9).

Прием и декодирование канального сигнала на приемном конце осуществляются следующим образом.

Приемный соленоид (6) преобразует модулированный магнитный поток в последовательность электрических импульсов, поступающих в приемный модуль (5) с усилением примерно 10 дБ, где происходит фильтрация и амплитудная дискриминация принимаемой импульсной последовательности, выход которого подключен к входу микроконтроллера (2). Преобразование входного импульсного сигнала в USART-формат и его декодирование осуществляются программой, находящейся в памяти микроконтроллера. При регистрации микроконтроллером первого импульса по его

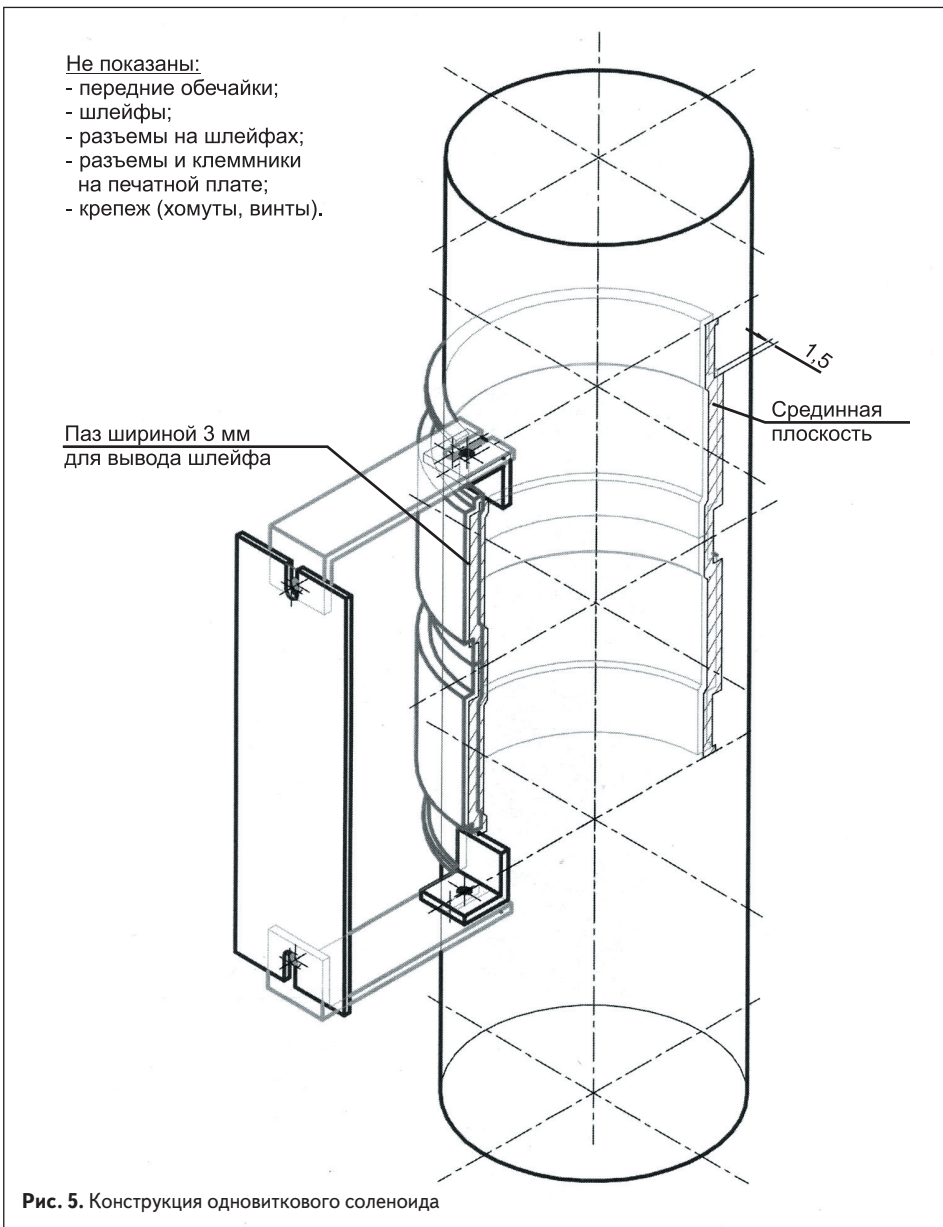


Рис. 5. Конструкция одновиткового соленоида

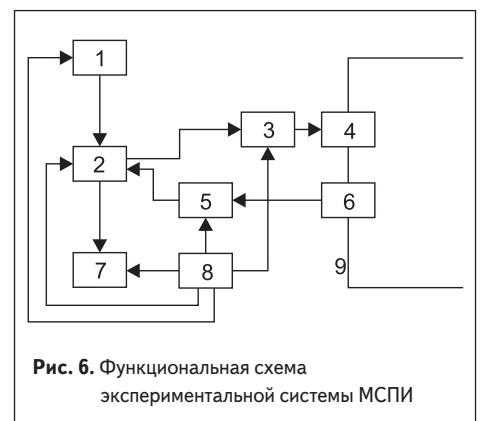


Рис. 6. Функциональная схема экспериментальной системы МСПИ

заднему фронту программно формируется задержка 8 мкс и во временном интервале 8–10 мкс ожидается появление второго импульса. В случае его обнаружения принимается решение о приеме логического «0», в случае его необнаружения первый импульс считается помехой и принимается решение о приеме логической «1». Декодированный поток преобразуется в последовательность символов, которая отображается на ЖКИ (7).

На макете прототипа МСПИ были проведены измерения по распространению передаваемого сигнала в ферромагнитном канале, образованном участком трубопровода системы водоснабжения здания. Трубопровод выполнен из материала сталь СТ-3.

График зависимости отношений ЭДС на приемной и передающей катушке от расстояния между ними представлен на рис. 7.

Тонкой линией показана интерполяция измеренной характеристики распространения магнитного сигнала, математическое выражение которой представлено в правом верхнем углу графика.

При испытаниях была достигнута дальность (без ретрансляторов) порядка 80 м при отношении сигнал/шум на входе приемного тракта 18 дБ.

По результатам экспериментальной проверки прототипа МСПИ можно сделать следующие выводы:

- предложенный принцип передачи сигналов телеметрии по ферромагнитному каналу подтвердил свою работоспособность;
- цикл испытаний показал правильность в целом выбранных функциональных и схемотехнических решений для устройств приемопередатчика абонента и центрального узла;
- испытания подтвердили корректность выбранного технического решения для устройств ввода/вывода сигнала в ферромагнитный канал;
- при экспериментальной проверке МСПИ специальных исследований на ЭМС не проводилось, но следует отметить отсутствие каких-либо сбоев в работе персональных компьютеров, радиотелевизионной приемной аппаратуры, размещенных в непосредственной близости (порядка 1 м) от передающего узла.

Перспективы применения МСПИ в системах телеметрии

В настоящее время все более широкое распространение получают автоматизированные системы сбора и передачи данных со счетчиков ресурсов (электро- и газосчетчики, приборы учета воды) в жилых и производственных зданиях.

Это обусловлено в основном двумя причинами: во-первых, на основании 209-ФЗ ст. 6 ч. 1 п. 23 все приборы общедомового учета должны быть диспетчеризированы и показания должны передаваться в информационную систему ГИС ЖКХ, и, во-вторых, — это достоверность показаний. Для контроля необходимо периодически проводить контрольное снятие показаний счетчиков ресурсов.

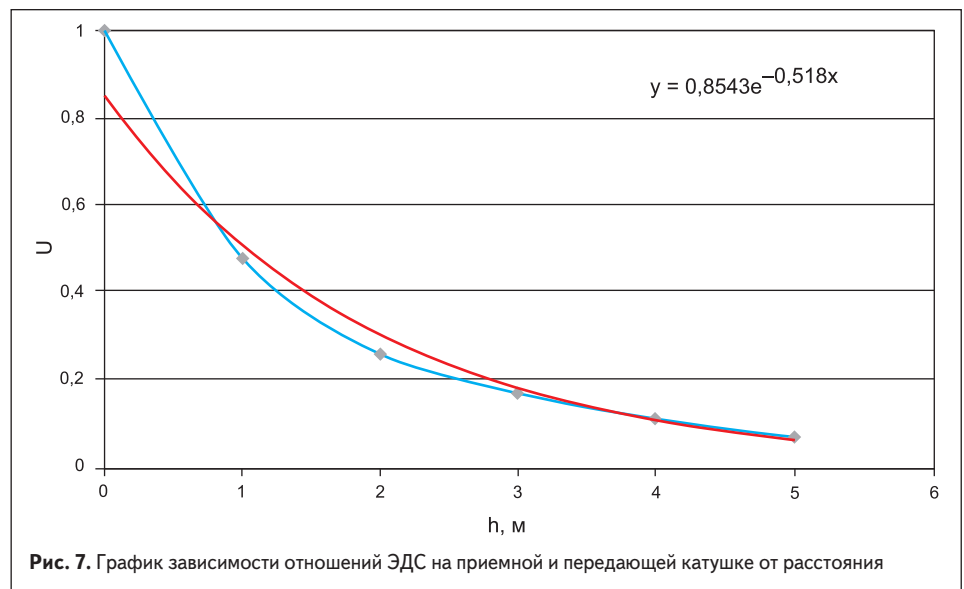


Рис. 7. График зависимости отношений ЭДС на приемной и передающей катушке от расстояния

На данный момент существует два типа автоматизированных систем сбора данных: проводные и беспроводные.

В проводных системах шлейф от квартирных датчиков идет к этажному концентратору и далее на общедомовой концентратор. Подобные слаботочные системы просто монтируются в новом строительстве, но тяжело применяются в уже существующем — существует проблема прокладки проводки. Кроме того, вследствие неправильного монтажа могут быть перепутаны провода от разных абонентов.

Другой класс систем — радиосистемы. Наиболее распространены телематические системы на основе протоколов ZigBee, Z-Wave и GSM-системы. Системы на основе ZigBee, Z-Wave отличаются низким потреблением, высокой надежностью и функциональностью — почасовое накопление и архивирование показаний, передача данных по запросу с общедомового концентратора, но требуют значительного количества ретрансляторов и вследствие этого имеют высокую стоимость первоначальной установки (порядка нескольких тысяч рублей для одного абонента). GSM-системы требуют абонентской оплаты у оператора сети.

Альтернативным решением может стать МСПИ с использованием в качестве канала передачи сигналов элементов структуры водокommunikаций здания.

МСПИ-система также может быть востребована при реализации систем телеметрии и управления в буровых установках. В настоящее время наиболее распространенным техническим решением этой задачи является гидравлический канал связи, в котором используются колебания давления в столбе бурового раствора, создаваемые специальными электромагнитными клапанами, и гидромеханические приемные датчики. Скорость передачи данных при этом не превышает 1 бит/с, что явно недостаточно для передачи на поверхность информации о параметрах бурения и контроля положения низа бурильной колонны.

Магнитоиндуктивная телеметрическая система сможет решить эту проблему, если удастся разработать метод ввода и съема магнитного сигнала микросекундной длительности во вра-

щающуюся буровую колонну, а также способ концентрации магнитного потока в ней.

Выводы

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

- Существует принципиальная возможность создания низкоскоростных, до 32 кбит/с, цифровых систем передачи информации по ферромагнитному каналу, в частности по трубопроводам систем тепло- и водоснабжения зданий.
- Ферромагнитный канал обладает высокой помехозащищенностью благодаря направленности магнитного потока в среде распространения и слабой чувствительности к внешним электромагнитным помехам.
- Ферромагнитный канал обладает естественной электромагнитной совместимостью с иными электронными устройствами благодаря его физическим особенностям: пространственной локализации магнитного потока в ближней зоне и доминированию магнитной компоненты в передаваемом сигнале.
- Ферромагнитный канал может быть конкурентоспособным техническим решением при построении систем телеметрии и сбора данных в случае, когда использование серийных проводных и беспроводных систем аналогичного назначения затруднительно или экономически нецелесообразно. ■

Литература

1. Дмитриев В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB) // Компоненты и технологии. 2003. № 9.
2. Шахнович И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2001. № 4.
3. Варламов В. Краткий справочник конструктора РЭА. М.: Советское радио, 1972.
4. Одновитковые соленоиды. www.ru.wikipedia.org
5. Сысоева С. Датчики магнитного поля. Ключевые технологии и новые перспективы. Часть 3. XMP — конкуренты датчиков Холла // Компоненты и технологии. 2014. № 8.