

Заключение. Разработанная методика позволяет эффективно определять чувствительность ядерно-резонансного магнитометра с текущей жидкостью в различных условиях эксплуатации при измерении параметров магнитных полей (от слабых до сильных). Использование полученных соотношений для чувствительности $\sigma_{ЯМР}$ при конструировании данных магнитометров улучшит их метрологические характеристики.

Полученные на экспериментальной установке значения чувствительности $\sigma_{ЯМР}$ не достигают предельного уровня, ожидаемого от ядерно-резонансного магнитометра. Это обусловлено невысоким отношением сигнал—шум (в ЯМР-расходомерах на оптимальном расходе измерения проводят при $r > 200$). Повышение отношения сигнал—шум вследствие увеличения намагниченности жидкой среды ограничено многими конструктивными особенностями магнитометра, а при снижении уровня шума могут появиться новые источники, например шум намагниченности рабочей среды, как в квантовых магнитометрах с оптической накачкой [3].

Л и т е р а т у р а

1. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 605—637.

2. Давыдов В. В., Величко Е. Н., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Нутационный ядерно-магнитный тесламетр для измерения слабых магнитных полей // Метрология. 2014. № 5. С. 32—41.

3. Александров Е. Б., Балабас В. М., Вершовский А. К., Пазгаев А. С. Экспериментальная демонстрация разрешающей способности квантового магнитометра с оптической накачкой // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 6. С. 118—122.

4. Вершовский А. К., Дмитриев С. П., Пазгаев А. С. Квантовый магнитометр с оптической накачкой, комбинирующий достоинства M_x и M_z устройств // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 10. С. 90—97.

5. Звездинский С. С., Парфёнов И. В. Квантовые магнитометры с оптической накачкой для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 3. С. 18—28.

6. Prouty M. D., Johnson R., Hrvoic I., Vershovskiy A. K. Geophysical applications — in optical Magnetometry / Ed. O. Budker & D. F. Kimball. Cambridge University Press. 2013. P. 319—336.

7. Давыдов В. В. Управление временем продольной релаксации T_1 текущей жидкости в ЯМР-расходомерах // Известия высших учебных заведений. Физика. 1999. № 9. С. 50—53.

8. Бородин П. М., Вологдин М. И., Москалев В. В., Морозов А. А. Ядерный магнитный резонанс. Л.: Изд. Ленинградского ун-та, 1982.

Дата принятия 20.01.2015 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.396

Методика и аппаратно-программный комплекс для исследований беспроводных каналов связи в интеллектуальных устройствах измерения и передачи информации

Ю. И. ШТЕРН, В. А. ЕГОРОВ, И. С. КАРАВАЕВ, Я. С. КОЖЕВНИКОВ,
П. Е. МИРОНОВ, В. М. РЫКОВ, М. Ю. ШТЕРН

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Москва, Россия, e-mail: victor.egorov@rambler.ru

Разработаны методика, измерительный комплекс и аппаратно-программные средства для исследований достоверности приема информации и уровня сигнала в радиоканале. Методика позволяет тестировать беспроводные каналы связи, используемые в интеллектуальных устройствах измерения и передачи информации на стадии промышленного производства. Проведены исследования беспроводных каналов связи партии серийно выпускаемых интеллектуальных устройств. Определена зависимость вероятности потери пакета данных от уровня радиосигнала.

Ключевые слова: беспроводные каналы связи, радиотрансивер, аппаратно-программные средства, интеллектуальные устройства измерения и передачи информации.

A method, measuring system, and hardware and software for experimental investigation of reliability of estimation of receiving information and level of radio signal are developed. The method allows to undertake testing at the production stage of wireless communication channels used for smart measuring devices and data transmission. Wireless communication channels have been investigated for commercially produced batches of smart devices. The dependence of the probability of a data packet loss on the level of radio signal is determined.

Key words: wireless communication channels, transceiver, hardware and software facilities, smart measuring devices, data transmission.

В современных системах контроля и управления расходом энергоносителей применяют средства автоматизации с передачей информации по беспроводным каналам свя-

зи [1, 2]. Авторы статьи разработали интеллектуальную систему (далее система), в которой средства автоматизации, оснащенные беспроводным интерфейсом связи, используют

для измерения термодинамических параметров и контроля расхода энергоносителей [3]. Нижний уровень комплекса средств автоматизации состоит из интеллектуальных беспроводных оконечных устройств (ОУ) измерения и передачи информации, а верхний — из универсальных вычислительных средств (персональных компьютеров), объединенных в сеть и оснащенных специальным программным обеспечением (ПО). Передача данных между нижним и верхним уровнями происходит с помощью телеметрических средств связи — ретрансляторов локальных (РЛ), принимающих данные от беспроводных ОУ по радиоканалу и передающих их в вычислительную систему также по радиоканалу или через интерфейс RS-485.

Локальные измерительные алгоритмы параметров энергоносителей реализованы на нижнем уровне системы. На верхнем уровне выполняются алгоритмы обработки результатов измерений для учета индивидуального потребления энергоносителей [3]. Программное обеспечение, разработанное авторами, позволяет накапливать, обрабатывать, отображать, архивировать и документировать информацию, поступающую с нижнего уровня. Оно создано с применением специализированных программных средств, позволяющих структурировать и обрабатывать большие объемы информации — базы данных. Таким образом, построена масштабируемая сеть практически неограниченного размера. Количество устройств в сети зависит только от адресного пространства протокола обмена, применяемого интеллектуальными устройствами. В данном случае используют двухсторонний протокол обмена данными SimpliciTI.

Система является распределенной сетью из необслуживаемых и не требующих специальной установки автономных ОУ. Каждый узел сети — это беспроводный измеритель определенного параметра или же устройство управления исполнительными механизмами с микроконтроллером и радиотрансивером, что позволяет каждому модулю самостоятельно измерять, проводить начальную обработку данных и поддерживать связь с внешней информационной системой посредством беспроводных каналов связи.

В процессе эксплуатации системы к приемо-передающей части (радиотрансиверу) беспроводных интеллектуальных устройств предъявляют следующие требования:

надежность приема и передачи данных между интеллектуальными устройствами необходимо обеспечить с минимально возможной излучаемой мощностью и, соответственно, при минимальном потреблении тока от встроенного источника питания;

алгоритмы сжатия и кодировки должны максимально уменьшать объем передаваемой информации;

прием и передачу информации между интеллектуальными устройствами необходимо осуществлять с максимальной возможной скоростью;

спектр излучаемой мощности должен иметь минимально возможную ширину.

Последние два требования обусловлены необходимостью обеспечения совместной работы множества устройств системы, без существенного взаимного влияния. Основным

регламентирующим документом для обеспечения нормальных условий эксплуатации радиотрансиверов является стандарт [4], разработанный на основе европейского стандарта EN 301 489-3.

В созданной системе радиотрансиверы беспроводных интеллектуальных устройств работают в диапазоне не лицензируемых частот 433,075–434,750 МГц с максимальной допустимой мощностью не более 10 мВт. В этой полосе размещено до 10 каналов приема-передачи данных со скоростью 38,4 кБод при GFSK-модуляции. Для исследования параметров радиоканала беспроводных интеллектуальных устройств разработаны методика и измерительный комплекс. Методика является совокупностью следующих методов исследования беспроводных каналов связи:

измерения уровня сигнала в соседнем канале, реализованного на базе векторного анализатора сигналов NI 5660 и разработанного авторами ПО отображения и обработки результатов;

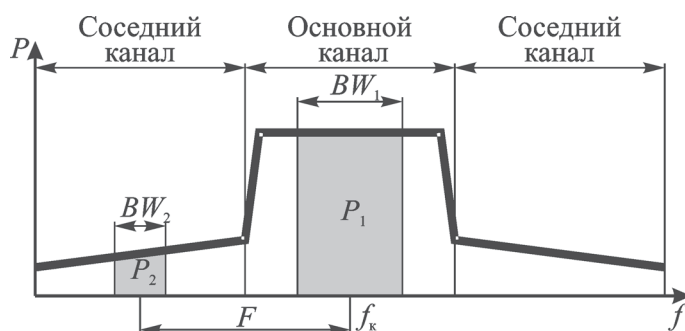


Рис. 1. Распределение мощности в основном и соседних каналах

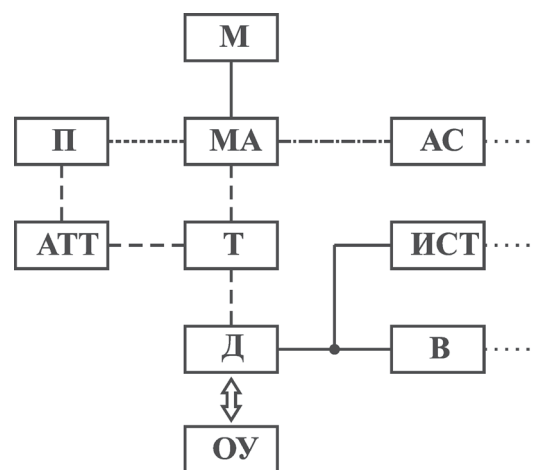


Рис. 2. Структурная схема измерительного комплекса для проведения экспериментальных исследований беспроводных каналов связи передачи информации:

М — монитор; П — плата; АТТ — аттенюатор; МА — модульная аппаратура; Т — разветвитель; Д — адаптер; ОУ — оконечное устройство; АС — асинхронный сервер; ИСТ — источник питания; В — мультиметр; — — — — коаксиальный кабель 50 Ом; — — — — Ethernet интерфейс; ... — RS-232 интерфейс; — — — — USB интерфейс



Рис. 3. Структурная схема программы двухстороннего контроля параметров радиоканала

двухстороннего контроля уровня сигнала, основанного на использовании платы Smart RF04eb и ПО двухстороннего теста;

оценки достоверности передаваемых данных.

Все известные методы и программы позволяют контролировать уровень сигнала только при одностороннем обмене данными, в то время как в современных интеллектуальных системах используют двухсторонние протоколы. Для устранения указанного недостатка авторы предложили метод и разработали в среде LabView ПО, позволяющее проводить двухсторонний контроль параметров радиоканала. При этом беспроводные устройства работают как в режиме приемника, так и в режиме передатчика.

Кроме того, разработанный метод не только исследован в лаборатории, но и утвержден на объекте в реальных условиях эксплуатации. Он позволяет непрерывно диагностировать радиоканалы в интеллектуальных устройствах измерения и передачи информации в течение всего времени рабо-

ты, даже при существовании шумов, помех и ослаблении сигнала, которое вызвано строительными конструкциями зданий. Метод двухстороннего контроля радиоканала используют также при конфигурировании ОУ и РЛ во время монтажа и инициализации интеллектуальной системы.

Для обеспечения совместной работы большого количества беспроводных интеллектуальных устройств в условиях, например, многоэтажного жилого дома, в котором установлена система, или плотной застройки современных микрорайонов, необходимо минимизировать рабочую полосу частот основных каналов и уровень их излучения в соседние [1, 2]. Влияние паразитного попадания сигнала в соседние каналы оценивают с помощью коэффициента мощности ACPR, который используют для определения степени искажений, вызванных нелинейностью усилителей и трактов передачи радиочастотных параметров блоков [5]. Таким образом, коэффициент ACPR характеризует их предрасположенность к созданию помех устройствам, использующим соседний канал системы радиосвязи. В общем виде этот коэффициент определяется как отношение мощности P_1 в определенной полосе частот BW_1 на центральной частоте основного канала к мощности P_2 , сосредоточенной в полосе BW_2 , например, соседних каналов при заданной расстройке F от несущей частоты основного канала f_k . Общий вид распределения мощности по каналам для измерения коэффициента ACPR представлен на рис. 1. Значения внеполосных излучений для различных стандартов и технологий указаны в соответствующих нормативных документах.

Структурная схема измерительного комплекса для исследования параметров радиоканала беспроводных интеллектуальных устройств представлена на рис. 2. В качестве базового инструмента для проведения исследований радиотрансиверов использована модульная аппаратура National Instruments в составе векторных анализаторов сигналов NI 5660 и NI 5610, объединенных в шасси NI PXI — 1042 вместе с контроллером и блоком питания. Выбор оборудования обусловлен возможностью гибкого программирования алгоритмов измерений, удобством формирования пользовательского интерфейса и разнообразными способами документирования результатов. Исследуемое беспроводное ОУ подключено к адаптеру D (см. рис. 2) Напряжение с источника питания ИСТ (Instek-3203) через адаптер подается на ОУ, в котором запускается указанная выше тестирующая программа. От ОУ по разветвителю T радиосигнал поступает на модульную аппаратуру МА (NI PXI-1042) и через аттенуатор АТТ на плату Π (Smart RF04eb с модулем радиотрансивера CC1101EM 433 МГц). Затухание радиосигналов Π и ОУ регулируется программируемым аттенуатором АТТ (Agilent 8496). В процессе исследований тестирующая программа автоматически измеряет ток и напряжение питания ОУ мультиметром B (Instek GDM-8245). Для этого источник питания и мультиметр подключены к NI PXI-1042 через асинхронный сервер интерфейсов АС (RS 232/Ethernet N-port 5450i). Результаты тестирования отображены на мониторе M (NEC LCD1704M).

Программу двухстороннего контроля предварительно загружают во Flash память платы Smart RF04eb и в каж-

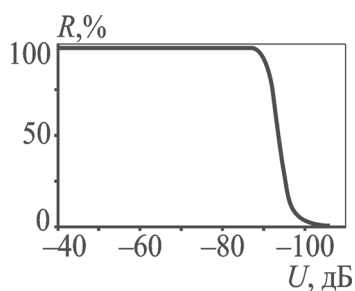


Рис. 4. Экспериментальная зависимость достоверности передачи данных от уровня радиосигнала

дое ОУ. Плата содержит модуль радиотрансивера на микросхеме CC1101EM, такая же микросхема применяется в разработанных ОУ. Кроме того, эти микросхемы имеют встроенный механизм оценки уровня принимаемого сигнала RSSI, используемый в программе двухстороннего контроля. Программа позволяет записывать рабочие параметры радиотрансивера по шине SPI, формировать тестовые пакеты радиосигналов для оценки достоверности радиоканала, выдавать 100 тестовых пакетов радиосигналов в радиотрансивер, принимать ответные сообщения от контрольного блока, оценивать достоверность приема пакетов радиосигналов при контролируемом уровне принимаемого сигнала.

Структурная схема программы двухстороннего контроля параметров радиоканала представлена на рис. 3. Работа программы начинается с инициализации анализатора спектра NI-5660 и его конфигурирования на заданную центральную частоту, полосу частот наблюдения, частоту дискретизации исходного сигнала и расположение боковых полос. Далее измеряют мощность радиосигнала от ОУ в рабочей полосе частот и соседних каналах, а также полосы сигнала. После сравнивают эти значения с установленными, заданными программой, и соответствующими критерию отбора приемников—передатчиков [4]. Полученный результат отображается графически и выводится в основное окно программы под индикацией «Годен» или «Брак». Значения мощностей сохраняются в таблице.

На разработанном измерительном комплексе были исследованы беспроводные каналы связи различных ОУ. Достоверность передаваемых данных определяли из соотношения количества принятых N_p и общего количества переданных пакетов сигналов N_o : $R = N_p/N_o \cdot 100\%$. В результате проведенных исследований получили зависимость достоверности передачи данных от уровня радиосигнала на приеме, представленную на рис. 4. Из графика следует, что для достоверности передачи данных интеллектуальными устройствами измерения и передачи информации, близкой к 100 %, необходимо, чтобы уровень радиосигнала составлял не ниже –90 дБ. Это полностью соответствует требованиям к беспроводным каналам связи, определенным в технических условиях и используемым в интеллектуальных устройствах измерения и передачи информации.

Заключение. Предложенная методика и разработанный измерительный комплекс позволяют проводить весь спектр

измерений параметров радиотрансиверов малого радиуса действия, предусмотренных нормативными документами. Разработанные программы позволяют оценить надежность радиосвязи между беспроводными интеллектуальными устройствами в терминах плотности ошибок приема информационных пакетов при заданном уровне принимаемого сигнала, в том числе непосредственно на объектах установки интеллектуальной системы контроля параметров и расхода энергоносителей.

При разработке измерительного комплекса и ПО предусмотрена возможность изменения частотных диапазонов, параметров модуляции, девиации и других характеристик радиотрансиверов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках прикладных научных исследований по Соглашению № 14.575.21.0032 (уникальный идентификатор RFMEFI57514X0032).

Л и т е р а т у р а

1. **Shnayder D. A.** A WSN-based system for heat allocating in multiflat buildings // 36th Int. Conf. on Telecommunications and Signal Proc. (TSP). 2013. Rome, Italy. С. 181—185.
2. **Wang X., Ma R., Zhang E.** Design and tests of wireless network for heat metering system // Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 182—183. P. 614—618.
3. **Штерн Ю. И., Кожевников Я. С., Медведев В. А., Мионов Р. Е., Караваев И. С.** Методы определения индивидуального потребления тепловой энергии, реализованные на базе интеллектуальной системы контроля энергоресурсов // Измерительная техника. 2013. № 2. С. 46—50.
4. **ГОСТ Р 52459.3—2009.** Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства радиосвязи. Ч. 3. Частные требования к устройствам малого радиуса действия, работающим на частотах от 9 кГц до 40 ГГц.
5. **Du T., Yu C., Gao, J. Liu, Y. Li, S., Wu Y.** An accurate physical knowledge-based model for behavioral modeling and digital predistortion of power amplifiers // Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2013. N. 23 (6). P. 682—689.

Дата принятия 31.03.2015 г.