

УДК 004.738.5: 621.391

# Аналіз роботи однокристальних прийомопередавачів ISM-діапазону для систем IoT

Титаренко<sup>f</sup> О. О.e-mail [olg.titarengo@gmail.com](mailto:olg.titarengo@gmail.com)Макаренко<sup>s</sup> В. В., к.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0003-1232-5198](https://orcid.org/0000-0003-1232-5198)e-mail [v\\_mak@ukr.net](mailto:v_mak@ukr.net)Факультет електроніки [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—В статті розглянуто особливості прийомопередавачів для систем IoT. Шляхом моделювання в програмному середовищі ADIsimSRD Design Studio проведений аналіз роботи однокристального прийомопередавача ADF7023. На основі проведеного аналізу характеристик прийомопередавача ADF7023 для забезпечення хорошої дальності зв'язку та високої вірогідності передавання інформації доцільно використовувати найбільш завадостійкий метод модуляції GFSK, що забезпечує найбільш енергоефективний вузький спектр сигналу.

**Ключові слова** — IoT; ISM-діапазон; ADIsimSRD Design Studio; однокристальний прийомопередавач; спектр.

## I. ВСТУП

Концепція Інтернету речей (IoT – Internet Of Things) передбачає використання глобальної мережі Інтернет для вирішення задач моніторингу, вимірювання, управління та об'єднання пристроїв для обміну інформацією. Істотне зростання числа об'єднаних в мережу приладів стало можливим завдяки розвитку безпроводних технологій [1]. Для реалізації бездротового зв'язку у мережі сенсорів необхідно використовувати прийомопередавачі, що з одного боку мають дуже низьке енергоспоживання, а з іншого – забезпечують достатню потужність для здійснення зв'язку на великій відстані.

## II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогоднішній день "Інтернет речей" має попит в таких областях, як медицина, безпека, промислова автоматизація, інтелектуальні мережі, віддалене управління об'єктами, інженерні та охоронні системи будівель [2]. Всі ці області застосування вимагають наявності високоінтегрованих компонентів передачі та прийому, що здатні забезпечити низьке енергоспоживання для збільшення терміну роботи, передачу даних з високою вірогідністю, здатність працювати в неліцензованому діапазоні частот, простоту і надійність експлуатації, можливість масштабування без значних додаткових витрат та відповідність міжнародним стандартам. Рішення всіх перерахованих задач є обов'язковою умовою для конкурентоспроможності виробу на ринку Інтернет речей [3].

## III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою і завданням статті є обґрунтований вибір прийомопередавача для систем IoT з бездротовим зв'язком, шляхом дослідження його характеристик за допомогою імітаційного моделювання при різних методах модуляції сигналу та швидкості передавання даних.

Оскільки на світовому ринку існує багато виробників мікросхем прийомопередавачів: Texas Instruments, Analog Devices, Nordic Semiconductor, Microchip, Intel та ін., то виконати фізичні експерименти по обґрунтованому вибору прийомопередавача практично неможливо і доцільно застосовувати імітаційне моделювання для якісної оцінки характеристик пристроїв.

Компанія Analog Devices створила пакет інструментів ADIsimSRD Design Studio, що є доступним для завантаження на офіційному сайті [4]. Дана програма призначена для проектування та оптимізації типових бездротових систем малого радіусу дій (SRD – Short-range device) з передавачами і трансиверами серії ADF70xx для систем IoT. Тому, для аналізу було обрано мікросхему ADF7023 компанії Analog Devices.

## IV. ТРАНСИВЕРИ ANALOG DEVICES ISM-ДІАПАЗОНУ

В першу чергу для IoT систем потрібні надійні засоби прийому і передачі інформації. Серія ADF70xx прийомопередавачів Analog Devices, що працюють в субгігагерцовому ISM (Industrial,



Scientific, Medical) діапазоні 315...434, 868...915 МГц та 2.4 ГГц, відрізняються низькою вартістю, високою швидкістю передавання даних, забезпечують надійний зв'язок при малому споживанні енергії та здатні працювати у вузькій смузі частот. Перераховані особливості дозволяють використовувати інтегральні мікросхеми цієї серії в системах автоматики, охоронних системах, автоматичних вимірювачах, наприклад, лічильниках енергії [5]. Детально ознайомитись з характеристиками різних однокристальних прийомопередавачів серії ADF70xx можна в [6].

Попередній аналіз параметрів мікросхем [6] дозволив обрати для дослідження прийомопередавач з найбільшими функціональними можливостями – ADF7023.

Трансивер забезпечує формування сигналів з класичною частотною маніпуляцією (ЧМн) – 2FSK (Frequency Shift Keying), ЧМн з фільтром Гауса для обмеження відхилення частоти при зміні значення інформаційного символу – GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying), амплітудною маніпуляцією ввімкнено/вимкнено – OOK (On-Off Keying), ЧМн з мінімальним зсувом частоти або гаусівською двохпозиційною MSK/GMSK (Minimal Shift Keying/Gaussian Minimum Shift Keying). Пристрій призначений для роботи в ISM-діапазонах частот 862...928 та 431...464 МГц.

ISM-діапазон є частиною радіочастотного спектру загального призначення, яка може бути використана без ліцензування [7]. Єдина вимога для пристроїв налаштованих на ISM-діапазон – це відповідність нормам, що встановлюються регулюючими органами для обраної частини частотного спектру. Ці правила є індивідуальними для різних країн. У США норми встановлює Федеральна комісія із зв'язку FCC (Federal Communication Commission), а в Європі – Європейський інститут стандартів з телекомунікацій ETSI (European Telecommunication Standards Institute) [8].

Основні характеристики ADF7023 [9]:

- швидкість передавання даних 1...300 кбіт/с;
- напруга живлення від 2,2 до 3,6 В;
- програмована вихідна потужність від -20 до 13,5 дБм;
- чутливість приймача при швидкості передавання даних:
  - 116 дБм – 1 кбіт/с для 2FSK, GFSK;
  - 107.5 дБм – 38.4 кбіт/с для 2FSK, GFSK;
  - 102.5 дБм – 150 кбіт/с для GFSK, GMSK;
  - 100 дБм – 300 кбіт/с для GFSK, GMSK;
  - 104 дБм – 19.2 кбіт/с для OOK;
- програмована ширина смуги тракту проміжної частоти 100 кГц, 150 кГц, 200 кГц, 300 кГц;
- енергоспоживання:

- в режимі прийому 12,8 мА;
- в режимі передачі при вихідній потужності 10 дБм – 24,1 мА;
- в режимі сну не більше 1 мкА.

ІМС ADF7023 має вбудований 8-розрядний процесор зі зменшеним набором команд (RISC – Reduced instruction set computer), що виконує функції радіоуправління, управління пакетами даних, інтелектуального режиму пробудження (SWM – Smart wake mode). RISC процесор також дозволяє завантажувати і виконувати набір програмно-апаратних модулів, що включають шифрування/дешифрування AES (Advanced Encryption Standard) і кодування Ріда Соломона.

Вбудований в ІМС 8-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), забезпечує зчитування даних з зовнішнього аналогового входу сигналу компресора або датчика температури. Датчик живлення відповідає за переривання роботи, повідомляючи головному процесору, коли напруга живлення падає нижче зазначеного рівня.

Поєднання в високочастотному синтезаторі прийомопередавача генератора керованого напругою (ГКН) і малошумної схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з дробовим коефіцієнтом вихідного каналу з кроком перебудови 400 Гц. Діапазон перебудови частоти синтезаторів приймача і передавача автоматично та незалежно конфігурується для досягнення оптимальних показників фазового шуму, якості модуляції та часу встановлення сигналу. ADF7023 має два підсилювача потужності, несиметричний і диференціальний, та підтримує роботу з рознесеними в просторі передавальними антенами. До складу приймача входить швидкодіючий контур автоматичного регулювання частоти (АРЧ), що дозволяє схемі ФАПЧ знаходити і виправляти будь-які високочастотні помилки у відновленому пакеті. В режимі сну, з низьким енергоспоживанням, налаштування робочої конфігурації зберігаються в пам'яті батареї (BBRAM – Battery backup random access memory) для резервного копіювання оперативної пам'яті.

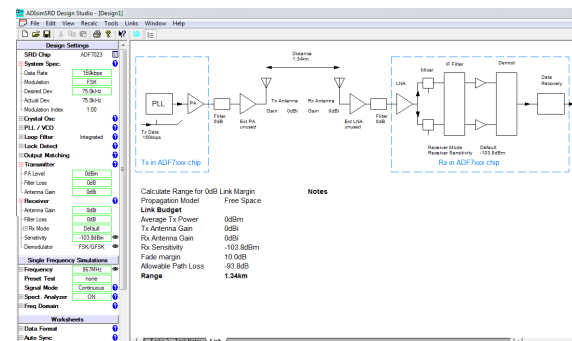


Рис. 1 Структурна схема і основні параметри прийомопередавача ADF7023



Перераховані характеристики надають можливість використовувати ІМС ADF7023 в системах Інтернету речей при побудові інтелектуальних лічильників, домашньої автоматизації, бездротових сенсорних мереж (WSN – Wireless sensor networks), протоколі Wireless M-Bus для систем комерційного обліку витрат енергоресурсів, пакетному режимі роботи IEEE 802.15.4g, а також при управлінні технологічними процесами в промисловості та будівництві [10].

#### V. АНАЛІЗ РОБОТИ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧА ADF7023

Основними питаннями, які необхідно вирішувати в процесі проектування, є вибір типу модуляції і методів демодуляції, швидкість передавання даних, фільтрація/узгодження радіосигналів, середнє споживання потужності та налаштування синтезатора. ADIsimSRD Design Studio суттєво спрощує розробку систем, надаючи інтерактивний інтерфейс з додатковими рекомендаціями по проектуванню та розбиваючи процес на декілька окремих поставлених завдань.

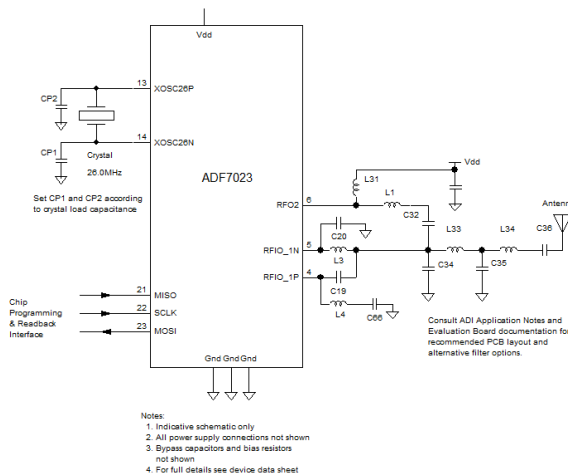


Рис. 2 Схема включення прийомопередавача ADF7023

Дослідження роботи прийомопередавача ADF7023 були проведені в програмі ADIsimSRD Design Studio за різних типів модуляції: FSK, GFSK та OOK та при режимі передачі та прийому, смузі частот 866...868 МГц, швидкості передачі даних 150 кбіт/с.

У вкладці програми Link (рис. 1) наведена структурна схема та параметри прийомопередавача ADF7023: потужність випромінювання, коефіцієнт підсилення антени, чутливість приймача та дальність зв'язку.

Схема включення ADF7023 (рис. 2) наведена на вкладці Schematics.

З графіка (рис. 3) видно, що ширина спектру сигналу передавача при FSK-модуляції не перевищує 600 кГц на рівні -30 дБм.

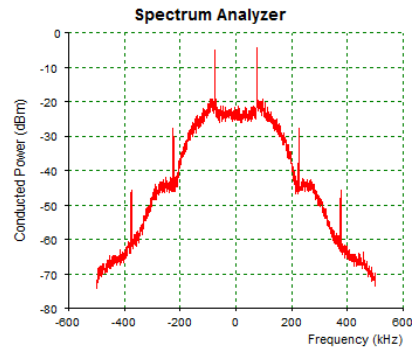


Рис. 3 Графік спектру сигналу на виході прийомопередавача ADF7023 при FSK-модуляції і швидкості передавання даних 150 кбіт/с

Для порівняння характеристик сигналу з різними типами модуляції було виміряно спектр сигналу при GFSK-модуляції, залишивши незмінними початкові параметри схеми. Ширина спектру на рівні -30 дБм складає не більше 400 кГц (рис. 4).

При OOK-маніпуляції, ширина спектру вихідного сигналу передавача на рівні -30 дБм складає приблизно 2 МГц (рис. 5).

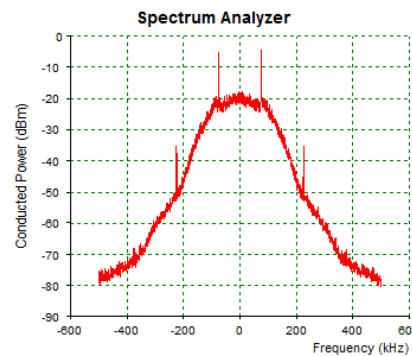


Рис. 4 Графік спектру сигналу на виході прийомопередавача ADF7023 при GFSK-модуляції і швидкості передавання даних 150 кбіт/с

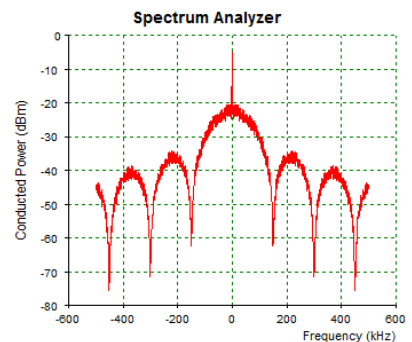


Рис. 5 Графік спектру сигналу на виході прийомопередавача ADF7023 при OOK-модуляції і швидкості передавання даних 150 кбіт/с

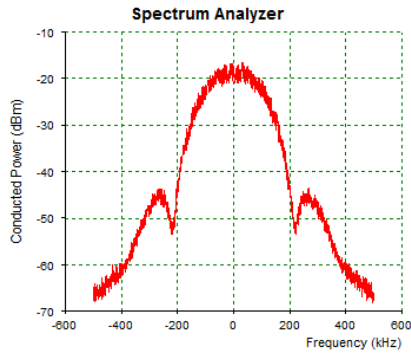


Рис. 6 Графік аналізатора спектру при GFSK-модуляції і швидкості передачі інформації 300 кбіт/с прийомопередавача ADF7023

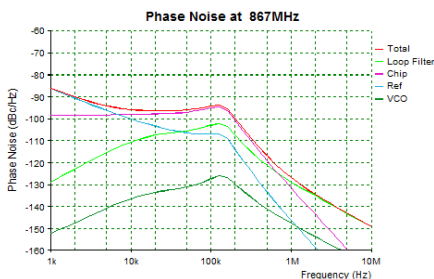


Рис. 7 Графік спектрального шуму синтезатора частоти прийомопередавача ADF7023

Порівнюючи вимірні спектри можна зробити висновок про те, що найвужчу смугу частот займає сигнал при GFSK-модуляції (400 кГц при швидкості передавання даних 150 кбіт/с). Було перевірено як зміниться ширина спектру сигналу при збільшенні швидкості передавання даних до 300 кбіт/с. Графік на рис. 6 показує, що зі збільшенням швидкості передавання даних у два рази, ширина спектру зростає приблизно у 1,3 рази – до 520 кГц за рахунок бічних пелюсток у спектрі на рівні -25 дБм.

Аналіз спектрального шуму вихідного сигналу синтезатора, вбудованого у прийомопередавач ADF7023 (рис. 7), показує дуже хороший результат. Рівень спектральної щільності шуму у смузі частот 100 кГц відносно центральної частоти не перевищує -95 дБн/Гц, що надає можливість передавання даних з високою точністю у часі.

## ВИСНОВКИ

Завдяки малому споживанню енергії, високому ступеню інтеграції, здатності працювати в неліцензованому ISM-діапазоні частот, можливості передавання даних з високою вірогідністю та швидкістю, можливості програмування модулів, відповідність міжнародним стандартам, прийомопередавачі компанії Analog Devices можуть бути використані в бездротових системах зв'язку Інтернету речей.

На основі проведеного аналізу характеристик прийомопередавача ADF7023 для забезпечення хорошої дальності зв'язку та високої вірогідності передавання інформації доцільно використовувати найбільш завадостійкий метод модуляції GFSK, що забезпечує найбільш енергоефективний вузький спектр сигналу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Siu C., Iniewski K.. IoT and low-power wireless: circuits, architectures, and techniques. Canada: Taylor & Francis Group, 2018. pp. 2-3. ISBN 9780815369714, 9781351251662.
- [2] Internet of Things. 2016. URL: <https://www.tutorialspoint.com/internet-of-things/internet-of-things-tutorial.pdf>; accessed: 25-02-2019.
- [3] Soldatos J.. Building Blocks for IoT Analytics. 2017. URL: <https://www.riverpublishers.com/pdf/ebook/RP9788793519046.pdf>; accessed: 25-02-2019.
- [4] ADIsimSRD Design Studio. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/adisimsrd-design-studio.html>; accessed: 27-02-2019.
- [5] Khodadadi F., Dastjerdi A.V., Buyya R.. Internet of Things. 2016. URL: <http://www.buyya.com/papers/IoT-Book2016-C1.pdf>; accessed: 26-02-2019.
- [6] Low Power RF Transceivers. URL: <https://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/low-power-rf-transceivers.html>; accessed: 25-02-2019.
- [7] Bauer M., Bui N., Carrez F.. Introduction to the Architectural Reference Model for the Internet of Things. 2014. URL: <https://iot-forum.org/wp-content/uploads/2014/09/120613-IoT-A-ARM-Book-Introduction-v7.pdf>; accessed: 25-02-2019.
- [8] Hung M.. Leading the IoT. 2017. URL: [https://www.gartner.com/imagesrv/books/iot/iotEbook\\_digital.pdf](https://www.gartner.com/imagesrv/books/iot/iotEbook_digital.pdf); accessed: 26-02-2019.
- [9] Data Sheet ADF7023. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7023.pdf>; accessed: 26-02-2019.
- [9] Faludi R.. Building Wireless Sensor Networks. 2011. p. 142. ISBN: 9780596807733.

УДК 004.738.5: 621.391

# Анализ работы однокристалльных приемопередатчиков ISM диапазона для систем IoT

Титаренко<sup>f</sup> О. А.,e-mail [olg.titarenko@gmail.com](mailto:olg.titarenko@gmail.com)Макаренко<sup>o</sup> В. В., к.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0003-1232-5198](https://orcid.org/0000-0003-1232-5198)e-mail [v\\_mak@ukr.net](mailto:v_mak@ukr.net)Факультет электроники [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Киев, Украина

*Реферат*—В статье рассмотрены особенности приемопередатчиков для систем IoT. Путем моделирования в программной среде ADIsimSRD Design Studio проведен анализ работы однокристалльного приемопередатчика ADF7023. На основе проведенного анализа характеристик приемопередатчика ADF7023 для обеспечения хорошей дальности связи и высокой вероятности передачи информации целесообразно использовать наиболее помехоустойчивый метод модуляции GFSK, что обеспечивает наиболее энергоэффективный узкий спектр сигнала.

*Ключевые слова* — IoT; ISM-диапазон; ADIsimSRD Design Studio; однокристалльный приемопередатчик; спектр.

UDC 004.738.5: 621.391

# The Analysis of the Single-Crystal Transceivers Work in the Range of Ism for Iot Systems

O.A. Tytarenko<sup>f</sup>,e-mail [olg.titarenko@gmail.com](mailto:olg.titarenko@gmail.com)V.V. Makarenko<sup>s</sup>, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0003-1232-5198](https://orcid.org/0000-0003-1232-5198)e-mail [v\\_mak@ukr.net](mailto:v_mak@ukr.net)Faculty of electronics [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

*Abstract*—The article discusses the features of transceivers for IoT systems. IoT systems are used in areas such as medicine, security, industrial automation, intelligent networks, remote control facilities, engineering and security systems of buildings. These applications require highly integrated transmission and reception components that can provide low power consumption for longer life, high probability data transfer, ability to operate in the unlicensed frequency range, simplicity and reliability of operation, scalability without significant additional costs and compliance with international standards. Analog Devices ADIsimSRD Design Studio is a very powerful tool allowing real-time simulation and optimization of many of the parameters in a typical wireless system using the ADF7xxx family of transceivers and transmitters. By modeling in the ADIsimSRD Design Studio software, the operation of the single-chip transceiver ADF7023 was analyzed. The ADF7023 is a very low power, high performance, highly integrated transceiver designed for operation in the 862 MHz to 928 MHz and 431 MHz to 464 MHz frequency bands, which cover the worldwide license-free ISM bands at 433 MHz, 868 MHz, and 915 MHz. It is suitable for circuit applications that operate under the European ETSI EN300-220, the North American FCC, the Chinese short-range wireless regulatory standards, or other similar regional standards. Data rates from 1 kbps to 300 kbps are supported. The range of subsystems to be considered in the development process include RF filtering/matching, modulation type and demodulation process, packet data formatting, and average power consumption. Until now, system designers relied on a combination of spreadsheet-based tools and iterative lab work to help with the optimization of these parameters. Based on the analysis, recommendations were made on the choice of transmitter parameters for the implementation of IoT systems using Analog Devices chips. Due to low energy consumption, high integration, ability to operate in the unlicensed ISM frequency range, high probability and speed data transfer capabilities, module programming capabilities, compliance with international standards, Analog Devices transceivers can be used in wireless IoT communications systems. To ensure a good communication range and a high probability of information transfer, it is advisable to use the most noise-resistant GFSK modulation method, which provides the most energy-efficient narrow signal spectrum.

*Keywords* — IoT; ISM; ADIsimSRD Design Studio; single-crystal transceivers; spectrum.

