

Однокристалльные приемопередатчики

для систем «Интернета вещей»

Представлены характеристики выпускаемых компанией Analog Devices приемопередатчиков с малым энергопотреблением, предназначенных для систем IoT, беспроводных сенсорных сетей, систем промышленного контроля и систем автоматизации зданий. Приведена подробная информация о наиболее универсальном приемопередатчике ADF7024.

Владимир Макаренко, к. т. н.
v.makarenko@vdmairs.ua

Устройства, предназначенные для одно- или двусторонней радиосвязи, применяются для передачи сигналов датчиков, в системах тревожной сигнализации и дистанционного управления различными бытовыми приборами, для удаленного управления замками и включения двигателей автомобилей, для передачи речи, изображений и многого другого. Как правило, такие передатчики имеют небольшую выходную мощность и отправляют данные в нелицен-

зируемых диапазонах частот, чьи характеристики достаточно подробно описаны в [1]. Такие приемопередатчики необходимы для построения беспроводных сенсорных сетей, систем автоматизации зданий и контроля промышленных объектов — словом, для систем «Интернета вещей» (IoT).

Одно из основных требований, предъявляемых к подобным устройствам, — низкое энергопотребление. Именно такими свойствами обладают приемопередатчики Low Power RF

Т а б л и ц а . Основные характеристики приемопередатчиков с низким энергопотреблением

Тип	Поддерживаемые стандарты	Методы модуляции	Диапазон частот, МГц	$P_{\text{вых, макс}}$, дБм	Скорость передачи, кбит/с	Минимальная ширина канала связи, кГц	Стоимость, \$ (в партии от 1000 шт.)	Корпус
ADF7030-1	6loWPAN, 802,15,4g, Sigfox, WiSun, Wm-Bus Mode N/S/T/C, ZigBee	4FSK, FSK	169; 426-470; 863-960	17	400	3	\$1,99	40-LFCSP, 48-LQFP
ADF7030	WM-Bus Mode N	4FSK, FSK	169	17	6,4	12,5	-	40-LFCSP
ADF7024	6loWPAN, 802,15,4g, пользовательский, WiSun, Wm-Bus Mode S/T/C, ZigBee	FSK, GFSK	431-435, 862-928	13,5	300	100	\$0,99	32-LFCSP
ADF7023-J	802,15,4g, пользовательский, WiSun, ZigBee	FSK, GFSK	902-958	13,5	300	100	\$1,79	32-LFCSP
ADF7241	6loWPAN, 802,15,4, ZigBee	DSSS-OQPSK	2400	4,8	250	600	\$1,59	32-LFCSP
ADF7023	6loWPAN, 802,15,4g, пользовательский, WiSun, Wm-Bus Mode S/T/C, ZigBee	FSK, OOK	862-928	13,5	300	100	\$1,79	32-LFCSP
ADF7242	6loWPAN, 802,15,4, ZigBee	DSSS-OQPSK, FSK	2400	4,8	2000	600	\$1,99	32-LFCSP
ADF7021-V	Пользовательский формат	3FSK, 4FSK, FSK	169; 433; 450-470; 80-650; 80-960; 868; 902-928; 950	13	24	9	\$2,99	48-LFCSP
ADF7022	Пользовательский формат	FSK, GFSK	868	13,5	38,4	100	-	32-LFCSP
ADF7021-N	Пользовательский формат	3FSK, 4FSK, FSK	169; 433; 450-470; 80-650; 868; 902-928	13	24	9	\$2,05	48-LFCSP
ADF7021	Пользовательский формат	3FSK, 4FSK, FSK	169; 433; 450-470; 80-650; 868; 902-928; 950	13	32,8	12,5	\$2,39	48-LFCSP
ADF7902	-	FSK	369; 5-395; 9	-	2	-	-	24-TSSOP
ADF7020-1	Пользовательский формат	ASK, FSK, OOK	169; 433; 450-470; 80...650	13	200	100	\$2,05	48-LFCSP
ADF7025	Пользовательский формат	FSK	431-464; 862-870; 902-928	13	384	600	\$2,05	48-LFCSP
ADF7020	Пользовательский формат	ASK, FSK, OOK	433; 450-470; 868; 902-928; 950	13	200	100	\$2,05	48-LFCSP

Transceivers, выпускаемые компанией Analog Devices. Основные характеристики некоторых приемопередатчиков с низким энергопотреблением приведены в таблице [2]. Эти решения могут функционировать как в лицензируемых, так и в нелицензируемых диапазонах на частотах до 1 ГГц и поддерживают работу в системах с высокой скоростью передачи данных.

Структурная схема одного из наиболее универсальных приемопередатчиков ADF7024 [3] приведена на рис. 1. Кроме того, ADF7024 имеет и самую низкую стоимость. Приемопередатчик обеспечивает формирование сигналов с частотной или Гауссовой частотной манипуляцией FSK/GFSK (Frequency Shift Keying/Gaussian Frequency Shift Keying), поддерживает работу в беспроводных сетях стандартов 6LoWPAN, 802.15.4g, WiSun, Wm-Bus Mode S/T/C, ZigBee, а также может быть запрограммирован пользователем под свои задачи.

Приемопередатчик ADF7024 предназначен для работы в нелицензируемых диапазонах частот (431–435 и 862–928 МГц) и требует минимума внешних навесных компонентов, что способствует снижению стоимости и повышению надежности готовой продукции. ИМС обеспечивает скорость передачи данных до 300 кбит/с, предоставляя возможность осуществлять передачу не только данных от сенсоров, но и звуковых и видеосигналов в малокадровом режиме (несколько кадров в секунду).

Приемопередатчик построен по схеме с цифровой обработкой сигналов в тракте промежуточной частоты. Входной сигнал через малошумящий усилитель (LNA) и приемник с низкой промежуточной частотой (Low IF Receiver) поступает в блок цифровой обработки сигналов (Digital Baseband, Packet Handler, And Memory).

Выходной сигнал передатчика формируется в блоке цифровой обработки и через модуль

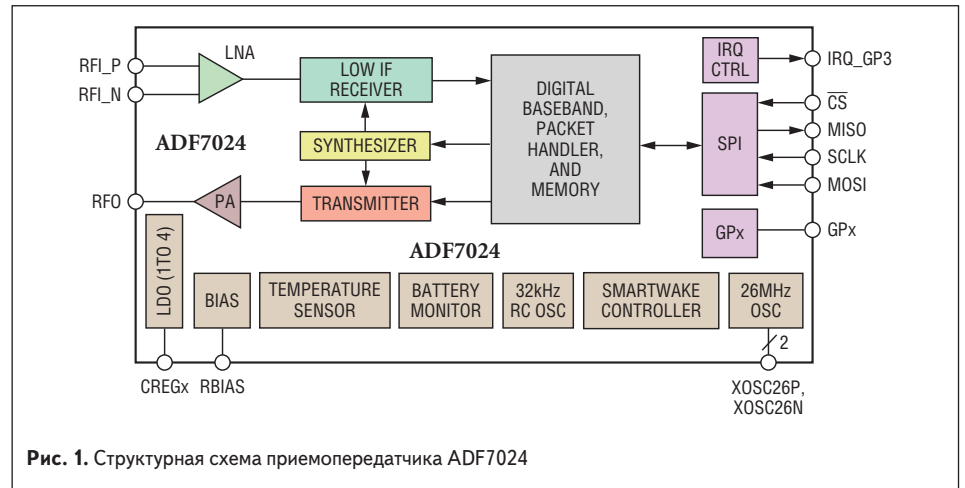


Рис. 1. Структурная схема приемопередатчика ADF7024

передатчика (Transmitter) и усилитель мощности (PA) передается на вывод RFO.

Встроенный синтезатор с дробными коэффициентами деления (Fractional-N) на основе системы ФАПЧ обладает малым уровнем шумов и высокой разрешающей способностью. Быстрая перестройка частоты позволяет использовать синтезатор для построения систем с расширением спектра путем скачкообразного изменения частоты (FHSS).

Приемопередатчик имеет встроенные интерфейсы SPI и GPIO. Кроме того, ИМС содержит встроенный температурный сенсор, устройство контроля напряжения источника питания (Battery Monitor), LDO-стабилизатор, генератор 32 768 Гц для часов реального времени (32 кГц RC OSC), генератор опорной частоты для синтезатора (26 МГц OSC) и интеллектуальный таймер пробуждения (Smart Wake Controller).

Режим интеллектуального пробуждения (SWM) позволяет ADF7024 автономно выходить

из спящего режима с помощью внутреннего таймера пробуждения без вмешательства хост-процессора. При обнаружении несущей это помогает осуществлять анализ и прием пакетов, когда процессор хоста находится в режиме ожидания, тем самым уменьшая общий ток потребления.

Более подробно состав ИМС ADF7024 [4] показан на функциональной схеме (рис. 2). ИМС ADF7024 и ADF7023 очень близки по параметрам. Различие заключается в наличии двух усилителей мощности в приемопередатчике ADF7023. На рис. 2 второй усилитель мощности исключен.

Приемник построен по супергетеродинной схеме с разделением принимаемого сигнала на квадратурные составляющие. На входы гетеродина смесителей CM1 и CM2 с выходов делителя поступают сигналы, сдвинутые по фазе на 90°. Полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2 выделяют сигналы промежуточной частоты, которые через управляемые усилители по-

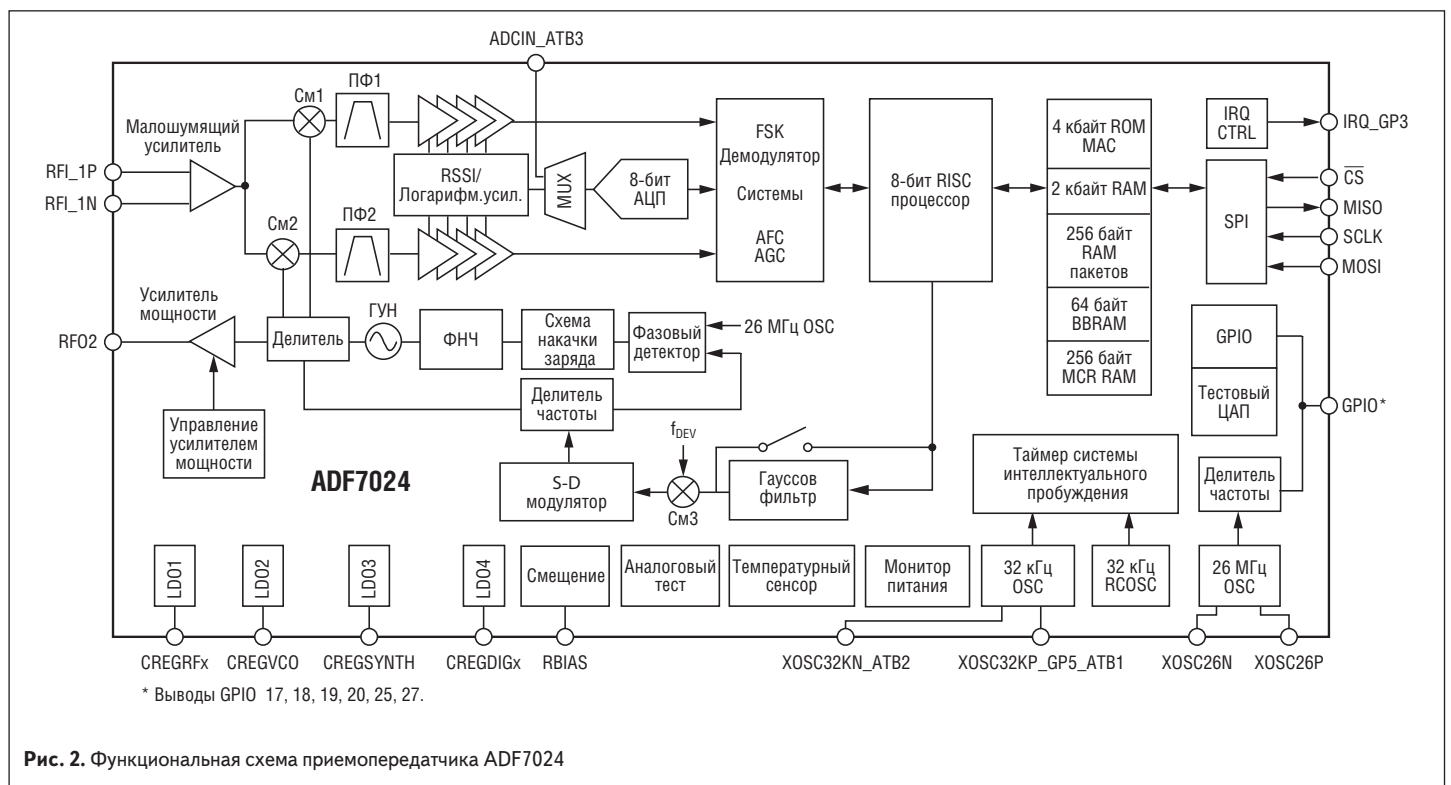


Рис. 2. Функциональная схема приемопередатчика ADF7024

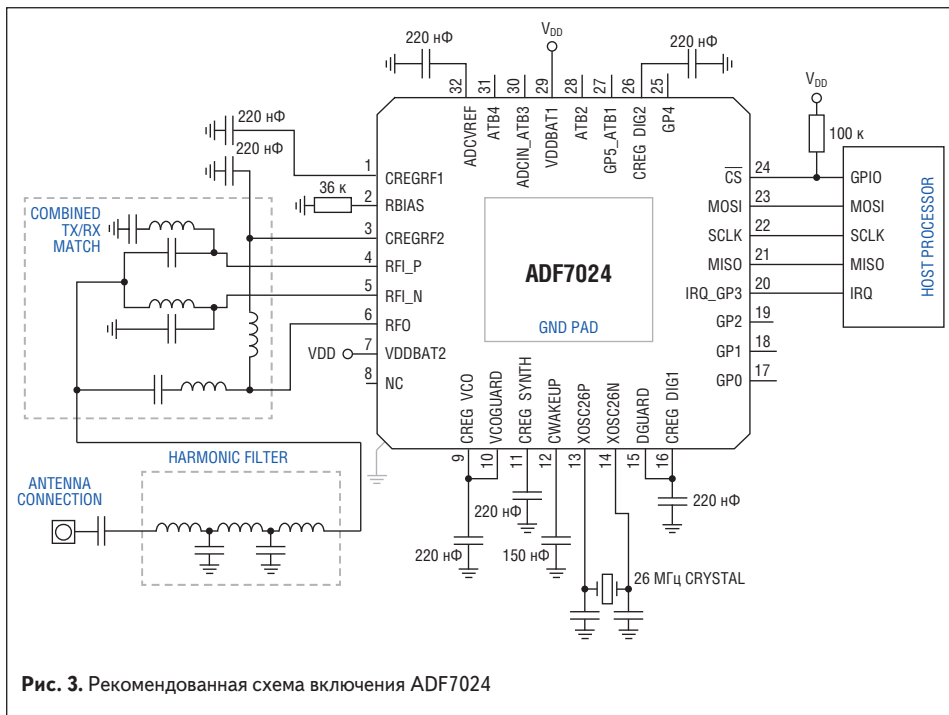


Рис. 3. Рекомендованная схема включения ADF7024

ступают на входы блока обработки сигналов, содержащего демодулятор сигналов FSK и системы управления автоподстройкой частоты и коэффициентом усиления.

ИМС имеет встроенный 8-разрядный АЦП, что делает возможным преобразование в цифровой код сигналов встроенного температурного датчика, внешних аналоговых сигналов, подаваемых на вход ADCIN, напряжения батареи или сигнала, формируемого на выходе компрессора (блок RSSI/логарифмический усилитель). Температурный датчик обеспечивает измерение температуры с погрешностью не более ± 4 °C во всем диапазоне рабочих температур $-40 \dots +85$ °C. Точность измерения может быть повышена, для чего необходима калибровка датчика при комнатной температуре и сохранение полученного результата

в памяти. Переключение преобразуемых сигналов выполняется с помощью аналогового мультиплексора MUX.

Синтезатор частоты построен по классической схеме и содержит делитель частоты с дробным коэффициентом деления, управляемый S-D-модулятором. Фазовый детектор работает на высокой частоте, что значительно сокращает время переключения частоты выходного сигнала. Синтезатор обеспечивает дискретность перестройки частоты 396,7 Гц.

Основные характеристики ADF7024:

- поддерживаемые скорости передачи данных: 9,6; 38,4; 50; 100; 200 и 300 кбит/с;
- модуляция FSK и GFSK;
- интерфейс управления SPI;
- быстрое переключение из режима передачи в режим приема и наоборот (не более 300 мкс);

- система автоматического контроля частоты (AFC);
- система автоматической регулировки усиления (AGC);
- цифровая индикация принимаемого сигнала (RSSI);
- поддержка интегрированного управления пакетами (вставка/обнаружение преамбулы/слово синхронизации/циклическая проверка избыточности);
- кодирование и декодирование данных 8/10 бит (манчестерский код);
- буфер пакетов данных 240 байт в режимах передачи и приема (Tx/Rx);
- встроенный 8-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- напряжение питания: 2,2–3,6 В;
- чувствительность: -111 дБм при скорости передачи данных 9,6 кбит/с (-105 дБм при скорости передачи данных 100 кбит/с);
- выходная мощность программируется в диапазоне $-20 \dots +13,5$ дБм с шагом 0,5 дБм;
- сверхмалый ток потребления в спящем режиме;
- в режиме PHY_SLEEP (режим глубокого сна 1): 0,33 мкА;
- в режиме PHY_SLEEP (работает генератор RC 32 кГц): 0,75 мкА;
- в режиме SWM при скорости принимаемых данных 300 кбит/с: 11,75 мкА;
- ток потребления в режиме приема: не более 12,5 мА;
- ток потребления в режиме передачи при выходной мощности 10 дБм: не более 23,3 мА;
- габаритные размеры: 5×5 мм, 32-выводный корпус LFCSP.

Программирование частоты приема/передачи и способа модуляции осуществляется через четырехпроводной последовательный интерфейс SPI. Использование в приемнике низкой промежуточной частоты (200 кГц) снижает энергопотребление устройства [3]. Возможность программирования параметров, таких как линейность приемника, его чувствительность и полоса пропускания фильтра

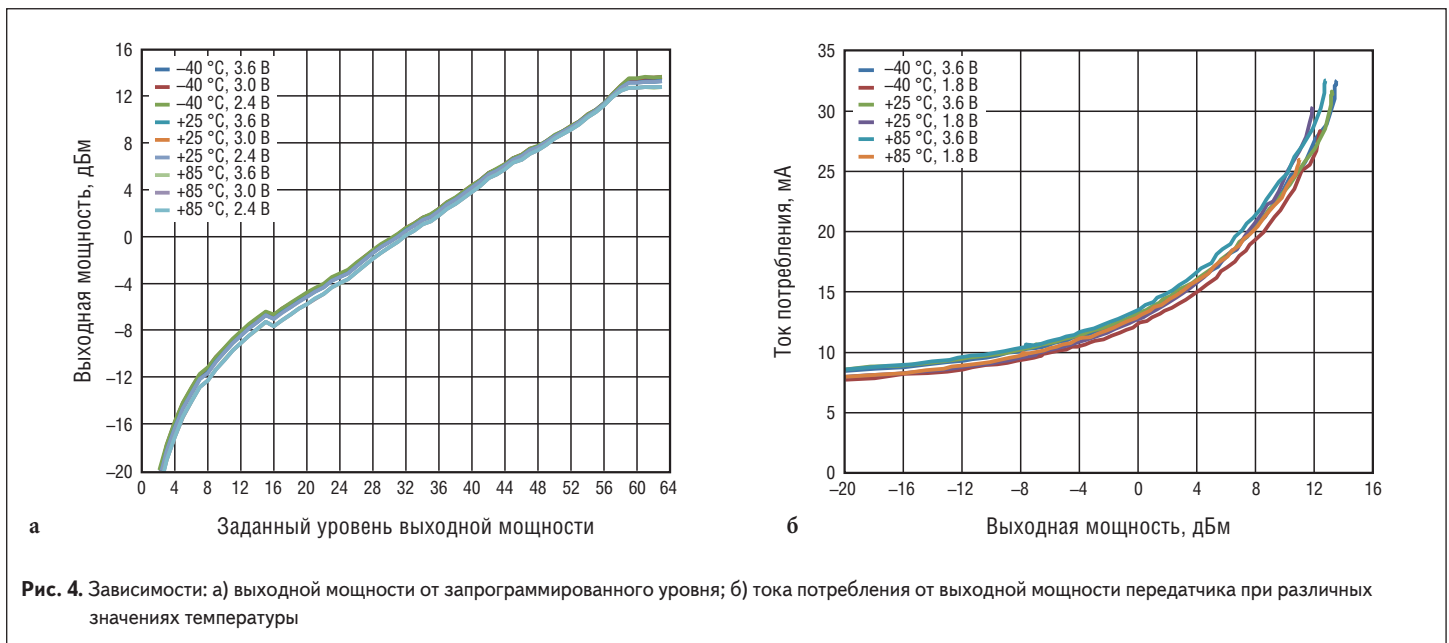
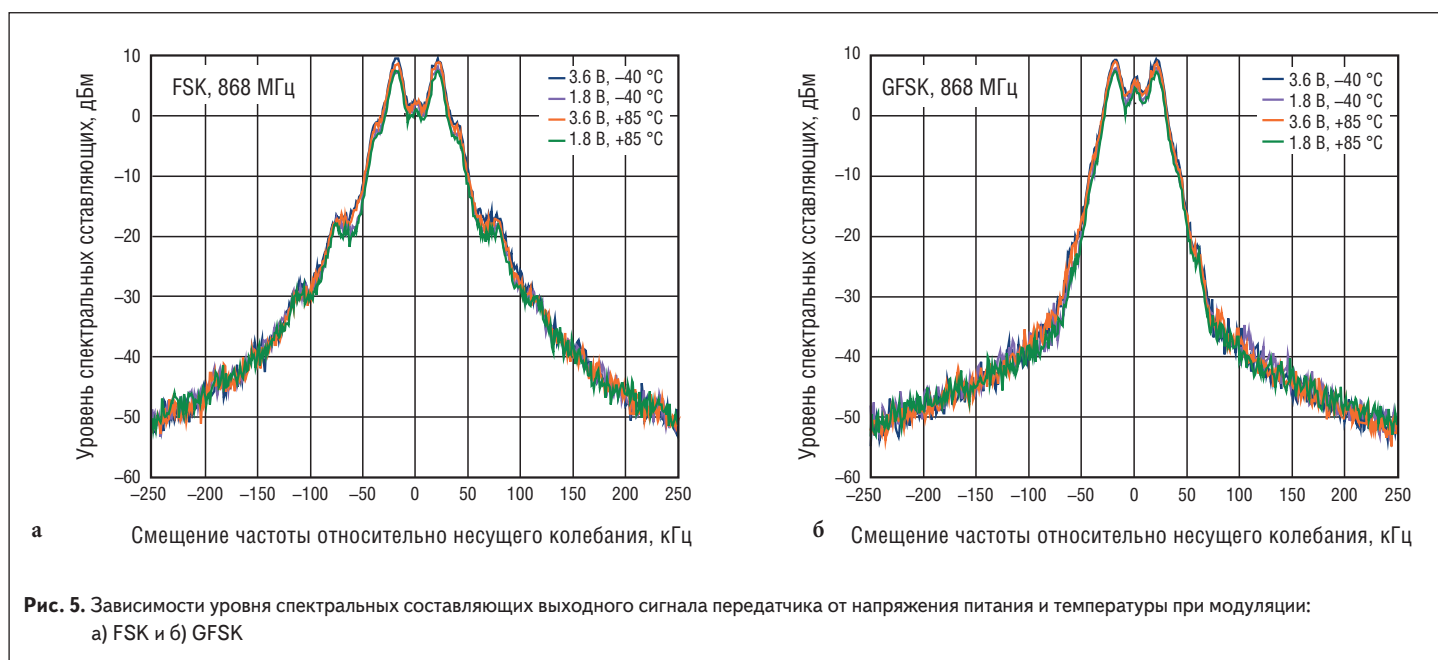


Рис. 4. Зависимости: а) выходной мощности от запрограммированного уровня; б) тока потребления от выходной мощности передатчика при различных значениях температуры



промежуточной частоты (ФПЧ), позволяет оптимизировать характеристики приемника для каждого конкретного приложения. Применение запатентованной технологии автоматического контроля частоты принимаемого сигнала обеспечивает компенсацию ошибки определения частоты при приеме.

Для анализа характеристик однокристалльных приемопередатчиков компания Analog Devices предлагает программу ADI SRD Design Studio, которую можно бесплатно загрузить с сайта компании [5].

Рекомендуемая схема включения ADF7024 приведена на рис. 3.

На рис. 4а показаны зависимости выходной мощности от запрограммированного уровня [4], а на рис. 4б — зависимость тока потребления от выходной мощности передатчика при различных значениях температуры и работе

приемопередатчика в диапазоне 868 МГц. При работе в других диапазонах эти значения значительно отличаются.

Зависимость ширины спектра на выходе передатчика от метода модуляции иллюстрирует рис. 5.

Как следует из рис. 5, выходная мощность практически не зависит от напряжения питания и температуры. Производитель рекомендует использовать ИМС ADF7024 при напряжении питания не менее 2,2 В, хотя ИМС функционирует и при напряжении питания 1,8 В.

Подробно с характеристиками ADF7024 можно ознакомиться в [3], с особенностями программирования и работой интерфейса — в [4].

Для отладки приемопередатчиков компания Analog Devices предоставляет оценочные платы, программное обеспечение, облегчающее разработку (ADIismLINK), и руководство

по конструированию антенн. Это позволяет создать систему связи или коммуникационную сеть с наименьшими временными затратами. ■

Литература

1. Макаренко В. Приемопередатчики для ближней радиосвязи в нелицензируемом диапазоне радиочастот // Электронные компоненты и системы. Киев. 2006. № 6.
2. Low Power RF Transceivers. www.analog.com/en/parametricsearch/10623
3. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7024.pdf
4. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7023-J.pdf
5. www.analog.com/media/en/engineering-tools/design-tools/ADIsimSRD_Design_Studio_V2_0_5_setup.zip