

Микросхемы Analog Devices  
для СВЧ-диапазона

**ANALOG  
DEVICES**

### В номере:

- Высокопроизводительные преобразователи данных для медицинской аппаратуры с визуализацией информации
- Поразрядный АЦП с PGA-усилителем на входе обеспечивает динамический диапазон 125 дБ
- Преимущества использования дифференциального сигнала при проектировании систем телекоммуникаций
- Организация беспроводной связи в авиакосмических системах и системах обороны
- Широкополосные КМОП-ключи с малым потреблением
- Высоконадежные компоненты компании Gaïa Converter
- Микросхемы Analog Devices для СВЧ-диапазона

# Приєднуйтеся до головної події індустрії безпеки України!



# БЕЗПЕКА

XXIV міжнародна виставка

# 2019



**22•25** ЖОВТНЯ

**УВАГА! НОВА ЛОКАЦІЯ!**



Виставковий центр «КиївЕкспоПлаза»,  
Житомирська траса М-06,  
с. Березівка, вул. Амстердамська, 1.

## Тематика виставки:

- Технічні системи і засоби безпеки.
- Системи охоронного TV і відеоспостереження.
- Системи і засоби протипожежної безпеки.
- Системи і засоби охорони периметра.
- Автоматизація і безпека будівель.
- IT-технології: телекомунікації, інформаційна безпека, ЦОД.
- Активне мережеве обладнання.
- Пасивне мережеве обладнання.
- Безпечне електроживлення.

**3 питань участі звертайтеся: (44) 461-9301,**  
Юрій Ченський, [chenskiy@eindex.kiev.ua](mailto:chenskiy@eindex.kiev.ua);  
Володимир Шевчик, [shevchik@eindex.kiev.ua](mailto:shevchik@eindex.kiev.ua)

Замовляйте  
запрошення на сайті  
**[www.bezpeka.ua](http://www.bezpeka.ua)**

ОРГАНІЗАТОР



ВИСТАВКОВИЙ  
ЦЕНТР



ОФІЦІЙНА  
ПІДТРИМКА

- Міністерство оборони України
- Міністерство внутрішніх справ України
- Служба безпеки України
- Державна служба України з надзвичайних ситуацій

ІНФОРМАЦІЙНІ ПАРТНЕРИ



СЕТІ & БІЗНЕС

Бізнес



БЕЗОПАСНОСТЬ

ВСЕ ДЛЯ БАНКА

Служба безпеки

TECH MEDIA GROUP

ОХОРОНА ПРАЦІ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ  
КОМПОНЕНТЫ  
И СИСТЕМЫ**

 2019 апрель-июнь  
№ 2 (226)

 МАССОВЫЙ  
НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

**Учредитель и издатель:**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ  
ФИРМА VD MAIS

 Зарегистрирован  
Министерством информации  
Украины 24.07.96 г.  
Свидетельство о регистрации:  
серия КВ, № 2081Б  
Издается с мая 1996 г.  
Подписной индекс 40633

**Директор фирмы VD MAIS:**  
В.А. Давиденко

**Главный редактор:**  
В.А. Романов

**Редакционная коллегия:**  
В.А. Давиденко  
В.В. Макаренко  
В.Р. Охрименко  
Д-р Илья Брондз,  
факультет биологии  
Университета г. Осло, Норвегия

**Адрес редакции:**

 Украина, Киев,  
ул. М. Донца, 6  
Тел.: (0-44) 492-8852, 201-0202  
Факс: (0-44) 202-1110  
E-mail: ekis@vdmαιs.ua  
Интернет: www.vdmαιs.ua  
www.ekis.kiev.ua

**Адрес для переписки:**  
Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6

**В ПОМОЩЬ РАЗРАБОТЧИКУ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

 А. Патьюченко  
**Высокопроизводительные преобразователи данных для  
медицинской аппаратуры с визуализацией информации .....3**

 Ф. Форузан, Дж. Ву  
**Надежный алгоритм анализа изменчивости частоты  
сердечных сокращений по снимаемому с запястья  
фотоплетизмографическому сигналу .....8**

 К. Локере, Э. Квирко  
**Прецизионный малошумящий операционный усилитель  
для построения драйверов поразрядных АЦП с высоким  
разрешением ..... 13**

 Т. Чеч  
**Поразрядный АЦП с PGA-услителем на входе  
обеспечивает динамический диапазон 125 дБ ..... 15**

 К. Калво  
**Преимущества использования дифференциального сигнала при  
проектировании систем телекоммуникаций ..... 17**

 Дж. Ромбола, Ч. Тран  
**Чем отличается дискретный дифференциальный усилитель  
от интегрального аналога .....20**

 Д. Босворз  
**Организация беспроводной связи в авиакосмических  
системах и системах обороны .....24**

 Т. Корриган, Р. Гоггин  
**Широкополосные КМОП-ключи с малым потреблением .....28**
**ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ**

 Ф. Достал  
**Рекомендации по размещению дросселя на печатной  
плате импульсного источника питания .....32**
**КОМПОНЕНТЫ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

 В. Котигорошко  
**Высоконадежные компоненты компании Gaia Converter .....35**
**ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

 В. Котигорошко  
**Микросхемы компании Analog Devices для СВЧ-диапазона ....48**
**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**
**Новые ИМС высокочастотных интерфейсов смешанных  
сигналов .....64**

**ASK THE APPLICATIONS ENGINEER**

A. Patyuchenko  
**High Performance Data Converters for Medical Imaging Systems** ..... 3

F. Foroozan, J. Wu  
**Robust Beat-to-Beat Detection Algorithm for Pulse Rate Variability Analysis from Wrist Photoplethysmography Signals** ..... 8

K. Lokere, E. Qirko  
**Low Noise, Precision Op Amp Drives High Resolution SAR ADCs** ..... 13

T. Tzscheetzsch  
**SAR Converter with PGA Achieves Dynamic Range of 125 dB**..... 15

C. Calvo  
**The differential-signal advantage for communications system design** ..... 17

J. Rombola, Ch. Tran  
**Discrete Difference Amplifier vs. an Integrated Solution** ....20

D. Bosworth  
**Wirelessly Linking the Aerospace and Defense World** .....24

T. Corrigan, R. Goggin  
**CMOS Switches Offer High Performance in Low Power, Wideband Applications** .....28

**POWER SUPPLIES**

F. Dostal  
**Guidelines for Placing the Inductor on a Switch Mode Power Supply Printed Circuit Board**.....32

**DUAL-USE COMPONENTS**

V. Kotigoroshko  
**Hi-rel modules from Gaia Converter** .....35

**TELECOMMUNICATIONS**

V. Kotigoroshko  
**Analog Device's IC RF products**.....48

**BRIEF REPORTS**

**New ICs of high-frequency interfaces of mixed signals Front Ends (MxFE)** ..... 64



**ELECTRONIC COMPONENTS AND SYSTEMS**  
 April-June 2019  
 No. 2 (226)

Scientific and Technical Journal

**Founder and Publisher:**  
 Scientific-Production Firm  
**VD MAIS**

**Director**  
 V.A. Davidenko

**Head Editor**  
 V.A. Romanov

**Editorial Board**  
 V.A. Davidenko  
 V.V. Makarenko  
 V.R. Okhrimenko  
 Dr. Iliia Brondz,  
 Department of Biology,  
 University of Oslo,  
 Norway

**Address:**  
 M. Dontsia Str., 6,  
 03061 Kyiv, Ukraine  
**Tel.:**  
 (380-44) 201-0202,  
 492-8852 (multichannel)

**Fax:**  
 (380-44) 202-1110

**E-mail:**

ekis@vdmajs.ua

**Web address:**

www.vdmajs.ua

www.ekis.kiev.ua

Printed in Ukraine

## ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАННЫХ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЫ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ИНФОРМАЦИИ \*

### HIGH PERFORMANCE DATA CONVERTERS FOR MEDICAL IMAGING SYSTEMS

**В** настоящей публикации рассмотрены основные типы систем визуализации, применяемых в медицинской практике, которые, несмотря на разные принципы действия медицинской аппаратуры, имеют общие узлы сбора и обработки данных.

А. Патьюченко

**A**bstract – This article considers the main types of modern medical imaging systems that utilize fundamentally different physical principles and processing techniques but have one thing in common – analog data acquisition front end serving for signal conditioning and conversion of raw imaging data into a digital domain.

A. Patyuchenko

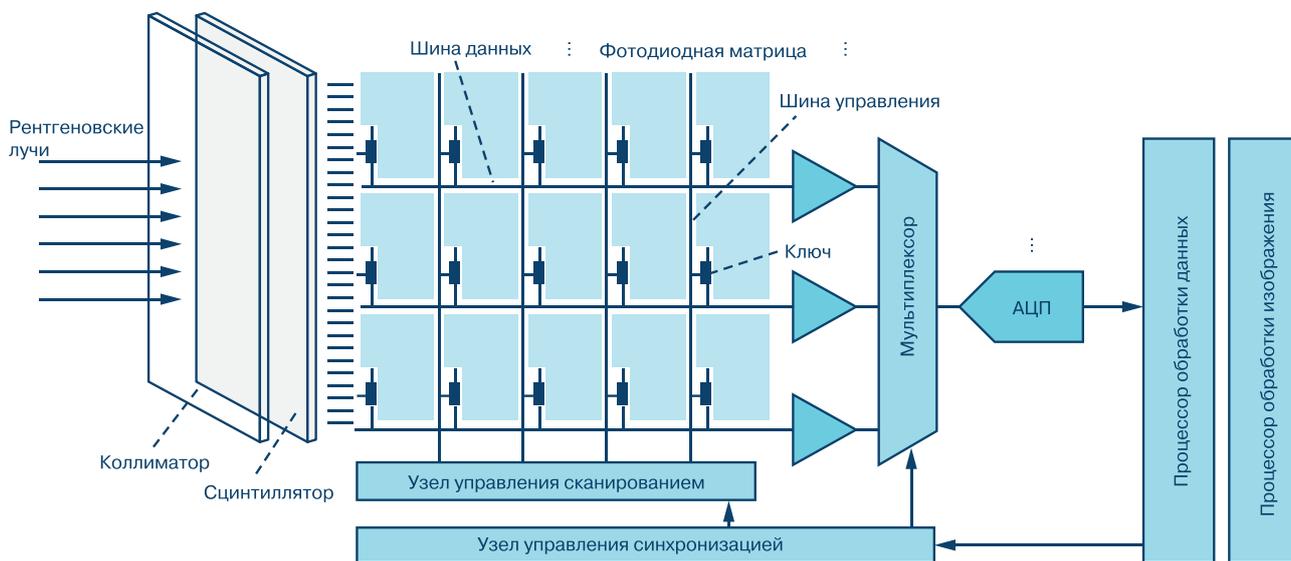
Появление первых систем визуализации в медицине связано с открытием выдающегося физика В. Рентгена, получившим название рентгеновских лучей. За это открытие В. Рентген получил первую в мире Нобелевскую премию в области физики. В настоящее время в современной медицине используется достаточно большое число разнотипных систем визуализации патологических изменений в организме человека, построенных на разных физических эффектах, однако общими компонентами таких систем являются устройства сбора и обработки данных и изображений. Они содержат чувствительные элементы, малошумящие усилители (low noise amplifiers – LNA), усилители с регулируемым усилением (variable-gain amplifiers – VGA), фильтры и АЦП. Об этих компонентах будет идти речь в настоящей статье. Именно параметрами этих компонентов определяется динамический диапазон, число разрядов, линейность, точность и уровень шумов медицинских систем визуализации информации.

Цифровая рентгенография (Digital radiography – DR) широко применяется в современной медицине. Она позволяет оцифровывать изображение, которое затем можно: увеличить в масштабе, улучшить контрастность, инвертировать цвет (такой метод нередко помогает обнаружить “следы”, плохо различимые на стандартном снимке), разместить несколько снимков на одном “листе”, распечатать изображение как на пленке, так и на бумаге, сохранить снимок на цифровой носитель и переслать пациенту или врачу. Структурная схема рентгеновско-

го детектора для оцифровки изображения методом цифровой рентгенографии приведена на рис. 1. Минимальная частота выборки АЦП в таком устройстве определяется размерами матрицы детектора в пикселях и частотой регенерации рентгеновского изображения. Плоская индикаторная панель на миллионы пикселей с типовой скоростью регенерации 25 – 30 кадров в секунду требует использования многоканального АЦП с частотой выборки не менее 100 МГц без потери точности преобразования. Другим не менее важным параметром АЦП является отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio – SNR), которым характеризуется точность (валидность) анатомического отображения тела человека или отдельного его участка. Типовое число разрядов АЦП в таких системах находится в пределах от 14 до 18, а отношение сигнал/шум составляет от 70 до 100 дБ.

Компьютерная томография (Computed tomography – CT) – метод неразрушающего послойного исследования внутреннего строения вещества, был предложен в 1972 году Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком, удостоенными за эту разработку Нобелевской премии. Метод основан на измерении и сложной компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями. В современной медицине рентгеновская компьютерная томография является основным томографическим методом исследования внутренних органов человека в трехмерном (3D) пространстве с использованием рентгеновского излучения. С помощью компьютерной томографии ис-

\* Patyuchenko A. High Performance Data Converters for Medical Imaging Systems. Analog Dialogue, 53-02, February, 2019. [www.analogdialogue.com](http://www.analogdialogue.com). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

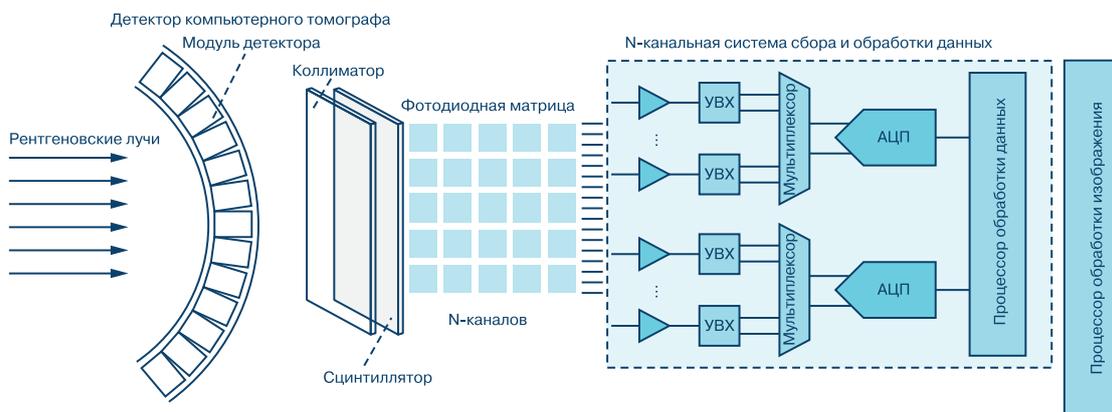


**Рис. 1. Типовая структура цифрового рентгеновского детектора**

следуют кровеносную систему человека, мягкие ткани и т.п. Центральным компонентом компьютерного томографа является детектор, рис. 2, который состоит из множества модулей и преобразует падающие пучки рентгеновских лучей в электрические сигналы. Эти сигналы подаются на вход многоканального АЦП. Каждый модуль содержит кристаллический сцинтиллятор, фотодиодную матрицу и АЦП с малым уровнем шумов для кодирования сверхмалых токов на выходе фотодиодной матрицы. Для исключения артефактов и обеспечения высокой контрастности изображения АЦП должен иметь высокую линейность и малое потребление, т.к. выделение избыточного тепла оказывает негативное влияние на чувствительность фотодетектора. Разрядность АЦП в таких системах достигает 24 бит, а время преобразования должно быть не более 100 мкс для

обеспечения высокой четкости изображения.

Позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ) или Positron emission tomography (PET), она же двухфотонная эмиссионная томография) – радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием. Аннигиляция позитрона в веществе (в частности, в ткани организма) с одним из электронов среды порождает два гамма-кванта с одинаковой энергией, разлетающихся в противоположные стороны по одной прямой. Большой набор детекторов, расположенных вокруг исследуемого



**Рис. 2. Структура детекторного узла компьютерного томографа для сбора и обработки данных и изображения**

объекта, и компьютерная обработка получаемых от них сигналов позволяет выполнить трехмерную реконструкцию распределения радионуклида в сканируемом объекте. Почти всегда ПЭТ-томограф комбинируется с КТ- или МРТ-сканером. Позитрон-эмиссионная томография – это активно развивающийся диагностический и исследовательский метод ядерной медицины. В основе этого метода лежит возможность при помощи специального оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими радиоизотопами. ПЭТ-сканирование широко используется в клинической онкологии. Структурная схема аналогового интерфейса ПЭТ-детектора приведена на рис. 3 и включает матрицу сцинтилляторов и фотумножителей (ФЭУ), преобразующих гамма-лучи в электрический ток, который затем преобразуется в напряжение. Напряжение усиливается с помощью VGA-усилителей. Результирующий сигнал разветвляется между АЦП и компараторами, как показано на рис. 3, чтобы в результате процессорной обработки получить трехмерное изображение (например, опухоли) из меченых атомов внутри исследуемого участка тела. Требования к АЦП в такой системе следующие: частота выборки должна быть не

менее 40 МГц, число разрядов 10...12, малый уровень шумов и малая рассеиваемая мощность для уменьшения влияния температуры на параметры ПЭТ-сканера.

Ядерный магнитный резонанс или ЯМР (Magnetic resonance imaging – MRI) – резонансное поглощение или излучение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, на частоте  $\nu$  (называемой частотой ЯМР), обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер. Явление ядерного магнитного резонанса было открыто в 1938 году Исидором Раби в молекулярных пучках, за что он был удостоен Нобелевской премии 1944 года. В 1946 году Феликс Блох и Эдвард Миллз Парселл получили ядерный магнитный резонанс в жидкостях и твердых телах (Нобелевская премия 1952 года). Томография позволяет визуализировать с высоким качеством головной, спинной мозг и другие внутренние органы. Современные технологии МРТ делают возможным неинвазивно (без вмешательства) исследовать работу органов живого организма – измерять скорость кровотока, тока спинномозговой жидкости, определять уровень диффузии в тканях, видеть активацию коры головного мозга при функционировании органов, за которые отвечает дан-

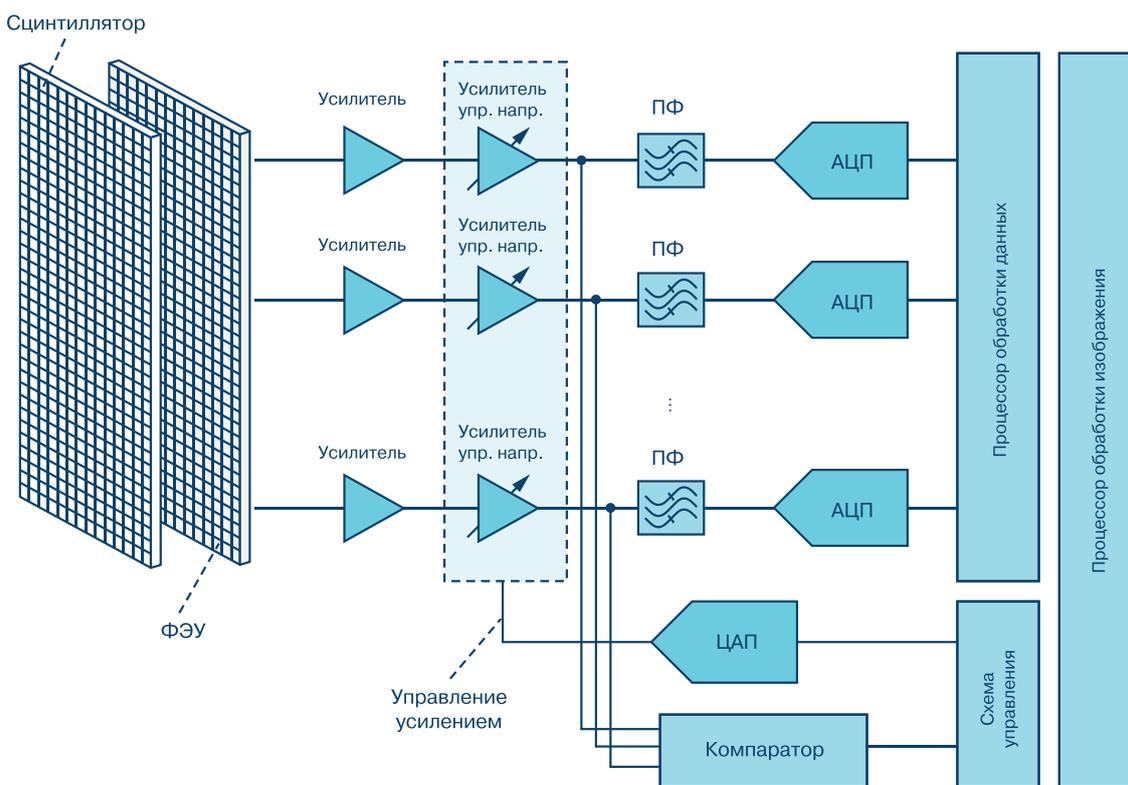


Рис. 3. Структура аналогового интерфейса ПЭТ-детектора

ный участок коры. В отличие от предыдущих методов, использующих ионизирующее излучение, метод ЯМР не содержит источников ионизирующего излучения. Несущие частоты сигналов ЯМР лежат в пределах от 12.8 до 298.2 МГц. Полоса полезного сигнала находится в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен кГц. Приемник в МРТ сканере может иметь архитектуру супергетеродина, как показано на рис. 4. В этом случае в составе приемника содержится поразрядный АЦП невысокого быстродействия. Если же вместо супергетеродинной архитектуры в МРТ сканере используется метод прямого цифрового преобразования, то в этом случае требования, предъявляемые к АЦП, намного жестче. Как правило, преобразователь имеет конвейерную (или pipeline-архитектуру) с числом разрядов 16 и частотой выборки не менее 100 МГц. Динамический диапазон АЦП должен быть не менее 100 дБ. Для уменьшения времени сканирования применяется режим сверхвыборки данных.

Ультразвуковая эхография (Ultrasonography) – это метод исследования, основанный на посылке в глубину обследуемого участка тела ультразвуковых импульсов, которые, последовательно отразившись от различных структур (органов, тканей), формируют изображение их плотности на экране монитора. Этот метод диагностики применяется, например, в кардиологии, акушерстве, офтальмологии,

гастроэнтерологии. Благодаря простоте выполнения, безвредности, высокой информативности метод получил широкое распространение в клинической практике. В ряде случаев ультразвукового исследования бывает достаточно для установления диагноза, в других – ультразвук используется наряду с прочими (рентгенологическими, радионуклидными) методами диагностики.

Как следует из краткого обзора, все медицинские приборы, предназначенные для визуализации патологических изменений в организме человека, основанные на разных физических эффектах и явлениях, содержат высокопроизводительные системы сбора и обработки данных практически с одинаковыми узлами и сходными характеристиками. Эти системы, как правило, выполнены в виде СБИС. Параметры некоторых таких СБИС, выпускаемых компанией Analog Devices, приведены ниже:

- ADAS1256 – это СБИС аналого-цифрового интерфейса, включающая мультиплексор на 256 каналов с малошумящими интеграторами, ФНЧ и 16-разрядный АЦП. Микросхема практически является законченным решением для построения системы сбора и обработки данных цифровой рентгенографической медицинской аппаратуры.
- кроме приведенной выше СБИС ADAS1256, в цифровой рентгенографии может успешно использоваться БИС AD7960, представляющая собой

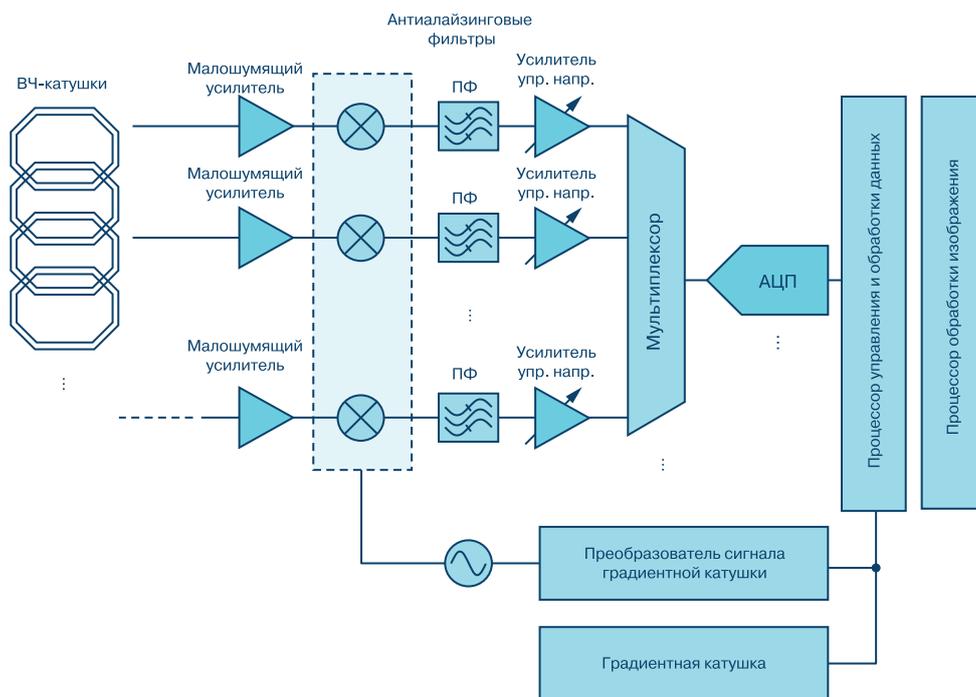


Рис. 4. Структурная схема измерительного узла МРТ томографа с супергетеродинной архитектурой

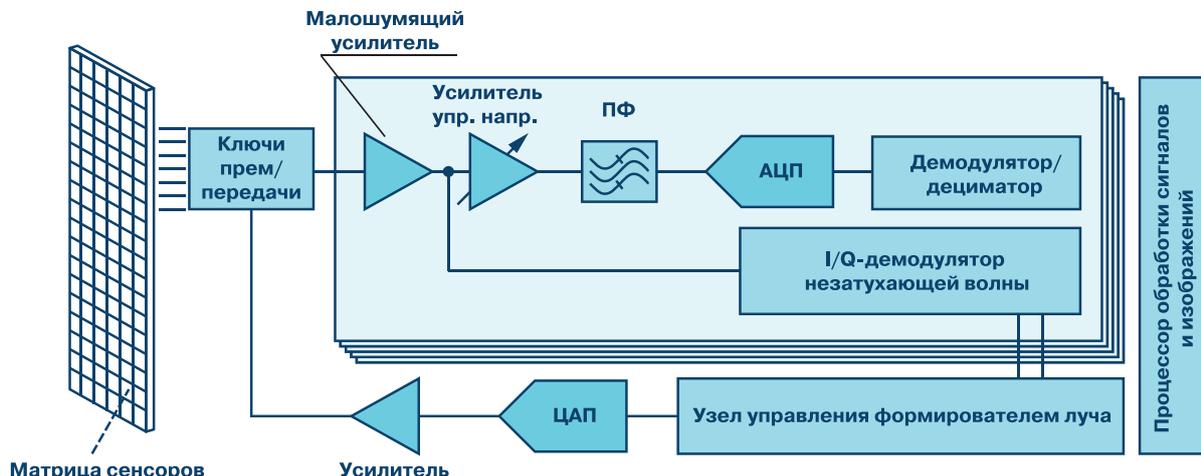


Рис. 5. Структурная схема аналогового интерфейса аппарата УЗИ

18-разрядный АЦП семейства PulSAR® с динамическим диапазоном 99 дБ и частотой выборки 5 МГц.

- БИС AD9269 и AD9249, представляющие собой конвейерный АЦП с числом разрядов 14 и 16 и частотой выборки 80 и 65 МГц соответственно, также предназначены для использования в цифровой рентгенографии.

- ADAS1135 и ADAS1134 – это многоканальные СБИС с числом каналов 256 и 128 соответственно, отличающиеся малым уровнем шумов и низким потреблением, обеспечивающие одновременную выборку сигналов по всем каналам и включающие два быстродействующих АЦП с перестраиваемой разрядностью в диапазоне до 24 бит. Их основное применение – аппаратура цифровой томографии.

- БИС AD9228, AD9637, AD9219, и AD9212 – 12- и 10-разрядные АЦП с частотой выборки от 40 до 80 МГц, предназначенные для построения аналоговых интерфейсов ПЭТ-томографов.

- БИС AD9656 – это 16-разрядный счетверенный конвейерный АЦП, разработанный для применения в МРТ томографах. Имеет частоту выборки до 125 МГц.

- БИС AD9671 – 8-канальный интерфейс для применения в недорогой ультразвуковой аппаратуре. Имеет в своем составе 14-разрядный АЦП с частотой выборки до 125 МГц. Потребляемая мощность микросхемы не более 62.5 мВт.

## ВЫВОДЫ

В современной медицине широко применяются различные физические эффекты и явления на основе ионизирующего излучения, энергии электромагнитного поля, ультразвуковой эхографии и т.п. Они позволяют визуализировать патологические изменения в человеческом организме и являются надежной основой диагностических исследований. Центральным ядром такой аппаратуры, построенной на основе перечисленных эффектов, являются высокопроизводительные системы сбора и обработки данных, большинство из которых может быть успешно реализовано на сверхбольших интегральных микросхемах компании Analog Devices.

## VD MAIS

Оборудование и материалы для монтажа/демонтажа электронных компонентов (ЭК)



- Паяльное и ремонтное оборудование
- Системы очистки воздуха
- Устройства трафаретной печати
- Системы установки компонентов
- Паяльные печи: конвекционной и селективной пайки, пайки волной
- Испытательное оборудование
- Системы визуального контроля
- Координатно-фрезерные станки
- Технологические материалы монтажа ЭК
- Средства антистатической защиты

Дистрибуция и прямые поставки:  
AIM, Bernstein, Charleswater, Electrolube, Essemtec, KIC, Kolver, LPKF, Magic Ray, Miele, Nordson, Optilia, PACE, PDT, Hanwha, Seho, TWS, Vision, Weiss

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
e-mail: info@vdmmais.ua, www.vdmmais.ua

## НАДЕЖНЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ ПО СНИМАЕМОМУ С ЗАПЯСТЬЯ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ \*

Настоящая статья посвящена алгоритму детектирования пульсовых сигналов, снимаемых с помощью носимого фотоплетизмографа. Рассмотрен метод, основанный на применении мультисенсорных часов компании Analog Devices, не уступающий методу ЭКГ.

Ф. Форозан, Дж. Ву

Неустойчивость сердечного ритма в настоящее время оценивается с помощью ЭКГ-сигналов. Однако в последнее время конкурентным для оценки таких патологий является фотоплетизмографический (ФПГ) метод. Следует отметить, что отсутствие до последнего времени надежных алгоритмов для анализа ФПГ-сигналов ограничивало его применение в медицинской практике. В статье рассмотрен алгоритм, разработанный сотрудниками компании Analog Devices и отличающийся, по мнению авторов, высокой надежностью. ФПГ-сигнал формируется с помощью светодиода, который облучает кожу пациента светом определенной длины волны, а изменение интенсивности отраженного светового сигнала, вызванное изменением параметров пульсовой волны, фиксируется фотодетектором. Кроме того, по параметрам ФПГ-сигнала можно оценить состояние сердечнососудистой системы человека в целом, т.е. измерить артериальное давление, длительность и скорость пульсовой волны, минутный сердечный выброс, общее периферическое сопротивление сосудов и др. Однако точность оценки в этом случае зависит от качества кровотока, влияния освещенности, движения пациента и т.п. Для снижения влияния этих факторов на результаты измерения могут быть использованы, например, трехосные акселерометры, расположенные в непосредственной близости от ФПГ сенсора. Важно выделить особые точки на кривой ФПГ-сигнала. Это

### ROBUST BEAT-TO-BEAT DETECTION ALGORITHM FOR PULSE RATE VARIABILITY ANALYSIS FROM WRIST PHOTOPLETHYSMOGRAPHY SIGNALS

Abstract -

This article provides a robust detection algorithm for beat-to-beat pulse interval analysis using PPG signals. It is demonstrated method through large data collection with the Analog Devices multisensory watch platform compared to the beat-to-beat results from ECG signals.

F. Foroozan, J. Wu

систолические пики (соответствуют максимальному артериальному давлению), начало колебаний, патологический (дикротический) пульс и т.д. Невысокая достоверность существующих алгоритмов распознавания, как было отмечено, сдерживает применение фотоплетизмографов для оценки перечисленных параметров. Авторы публикации предложили надежный алгоритм, в котором используется метод оценки артериального давления по форме пульсовой волны. Учитывая, что ФПГ-сигналы снимаются с носимых датчиков, на работу которых влияет положение пациента, состояние покоя или движения и другие внешние факторы, то эти сигналы подлежат предпроцессорной обработке, прежде чем они могут быть использованы для принятия решения. В процессе предобработки используется, как правило, производная сигнала. Авторы проанализировали множество сравнительных баз данных ФПГ и ЭКГ-сигналов. Благодаря этому разработанный алгоритм был проверен и предложен для носимой платформы (в виде часов) компании Analog Devices. Рассмотрим подробнее особенности предложенного алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Как уже отмечалось, на ФПГ-сигнал влияет сила кровотока в сосудах на запястье, а также состояние и положение пациента. Чтобы минимизировать влияние этих факторов, применяется предпроцессорная обработка ФПГ-сигналов, которая включает

\* **Foroozan F., Wu J. Robust Beat-to-Beat Detection Algorithm for Pulse Rate Variability Analysis from Wrist Photoplethysmography Signals. [www.analog.com/TechnicalArticle](http://www.analog.com/TechnicalArticle). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.**



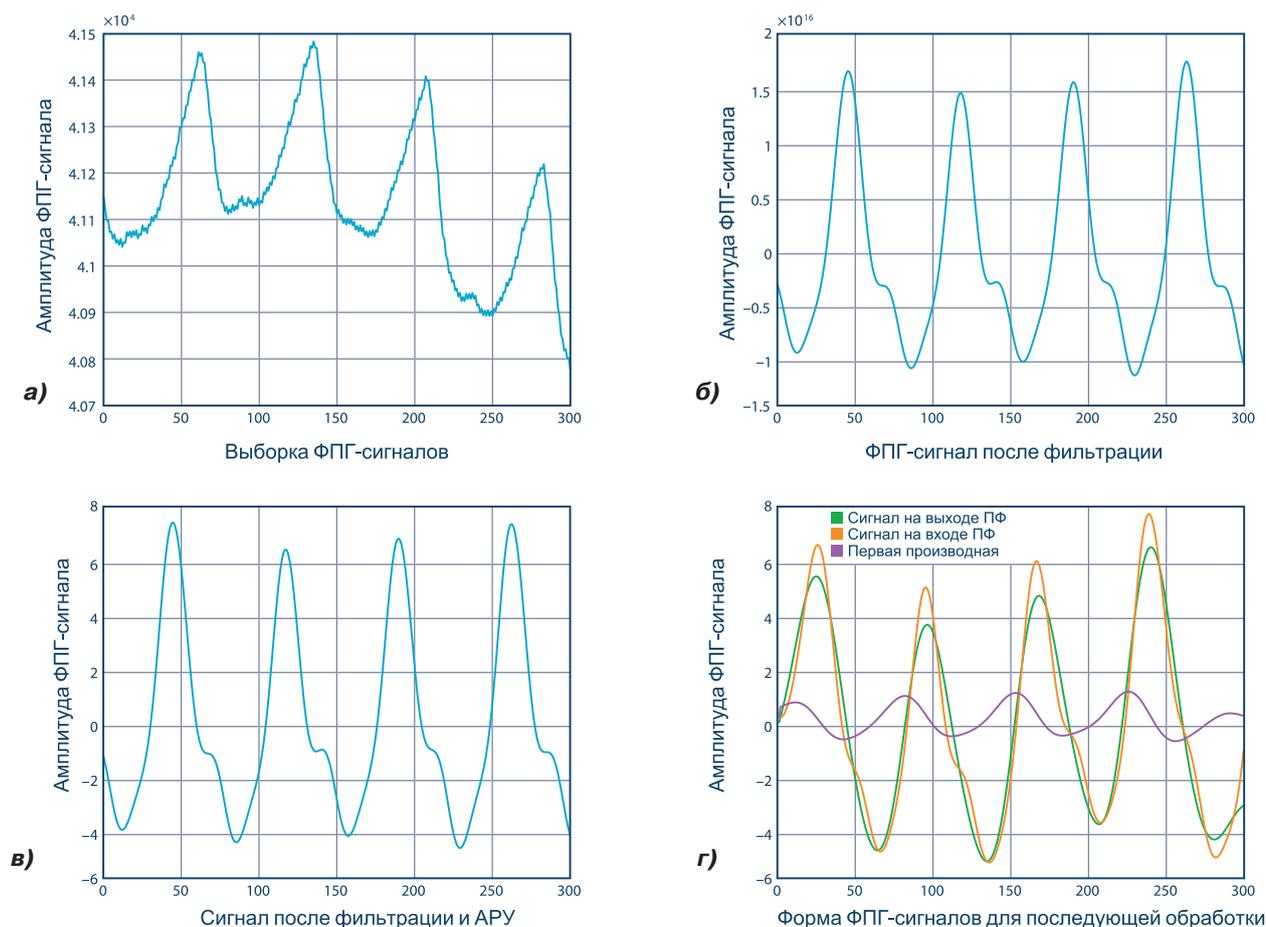
**Рис. 1. Блок схема алгоритма предпроцессорной обработки ФПГ сигнала**

следующие этапы: кадрирование и обработку методом окна; фильтрацию в полосе частот 0.4...4 Гц, АРУ для предотвращения ограничения сигнала, сглаживание и предотвращение дрейфа базовой линии. На входе источника ФПГ-сигнала используется окно длительностью  $T_0$  секунд, полосовой фильтр убирает высокочастотные и низкочастотные компоненты за пределами анализируемого диапазона частот. На рис. 2а и 2б показаны осциллограммы ФПГ-сигналов до и после фильтрации. Основная частота сердечного ритма находится в полосе от 0.4 до 3 Гц. Случайные выбросы в этой полосе ослаб-

ляются медианным фильтром.

Затем сигнал с помощью АРУ устанавливается в динамическом диапазоне  $\pm V$ . Для того, чтобы свести к минимуму дрейф базовой линии, используется сглаживающий фильтр с конечной импульсной характеристикой. Результат этой обработки представлен на рис. 2в. Форма ФПГ-сигналов для последующей обработки приведена на рис. 2г.

Экстрагирующий алгоритм для ФПГ-сигнала состоит из следующих блоков: блока интерполяции, блока выделения пригодной для дальнейшей обработки формы сигнала, блока экстракции ФПГ-сиг-



**Рис. 2. Осциллограммы предпроцессорной обработки ФПГ сигналов на разных ее этапах**

нала с высоким разрешением и блока оценки качества сигнала. С выхода блока предпроцессорной обработки ФПГ-сигнал поступает на вход интерполятора для повышения точности работы экстрагирующего алгоритма, т.е. к имеющимся цифровым отсчетам ФПГ-сигнала методом интерполяции добавляются дополнительные отсчеты для обеспечения большего разрешения. Следующий алгоритмический блок предназначен для оптимизации формы ФПГ-сигнала, в которой должны быть четко выделены пики, а также выпадения импульсов в пульсовых волнах (экстрасистолы).

Предложенный программный профилометр адаптирован к снятию ФПГ-сигнала с запястья. Его работа основана на анализе точек перегиба и пересечения нулевой линии в первой производной ФПГ-сигнала, которые показаны на осциллограмме, рис. 2г.

Автоматическая оценка качества обработанного ФПГ-сигнала обеспечивает подтверждение пригодности полученной формы сигнала для последующего принятия решения. Результаты обработки ФПГ-сигналов предложенным алгоритмом сравнивались с общепринятым алгоритмом обработки ЭКГ-сигналов. Для сбора и накопления необходимых данных использовалась платформа компании Analog Devices, выполненная в виде носимых на запястье часов типа ADI Vital Signs Monitoring – VSM (Wrist Watch Platform). Данные считывались через интерфейс типа Bluetooth® (рис. 3а).

ЭКГ-сигналы также формировались этой платформой, причем обеспечивался синхронный съем ЭКГ и ФПГ-сигналов. На рис. 3а и 3б показаны электроды для съема двух типов сигналов и представление этих сигналов на экране монитора.

Перед использованием показателей сердечного ритма в целях диагностики важно исключить недостоверные результаты, такие как дополнительные или пропущенные пики в кривой ФПГ-сигнала, наличие или отсутствие которых может привести к потере точности результата обработки в целом. Эта процедура выполняется в соответствии с Pan-Tompkins алгоритмом, исходя из которого любые изменения в длительности между пиками, превышающие 20%, отбрасываются как ложные. Пики в ФПГ-сигналах, которые снимаются синхронно с ЭКГ-сигналами, должны совпадать с пиками ЭКГ-сигнала. Те пики в ФПГ-сигналах, которые не совпадают с пиками ЭКГ, из дальнейшей обработки исключаются. Показатели ФПГ-сигналов вычисляются по предложенному авторами алгоритму, а показате-

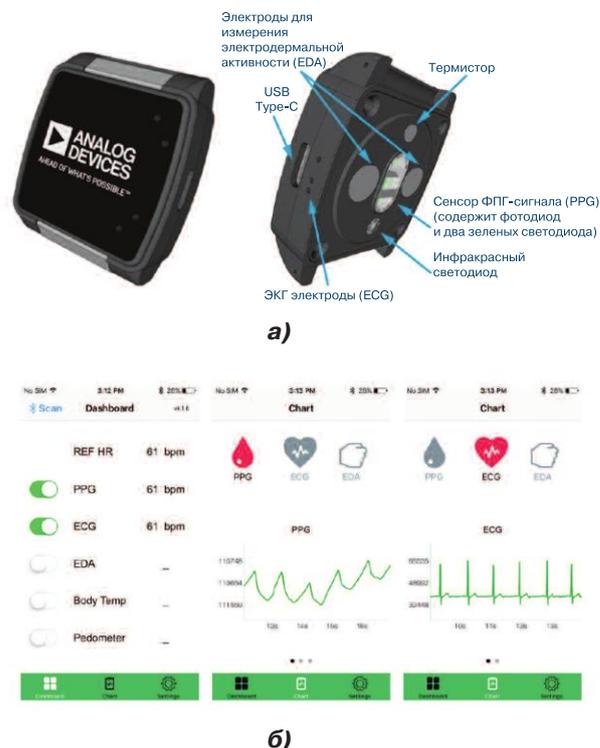


Рис. 3. Часы с электродами и сенсорами (а); панель управления и визуализации ЭКГ и ФПГ-сигналов (б)

ли ЭКГ-сигналов – по Pan-Tompkins алгоритму.

Ниже приведены выражения для оценки следующих показателей ФПГ-сигнала:

$$Coverage = \frac{\#Identified\ PPG\ Peaks}{\#Identified\ ECG\ Peaks} \quad (1)$$

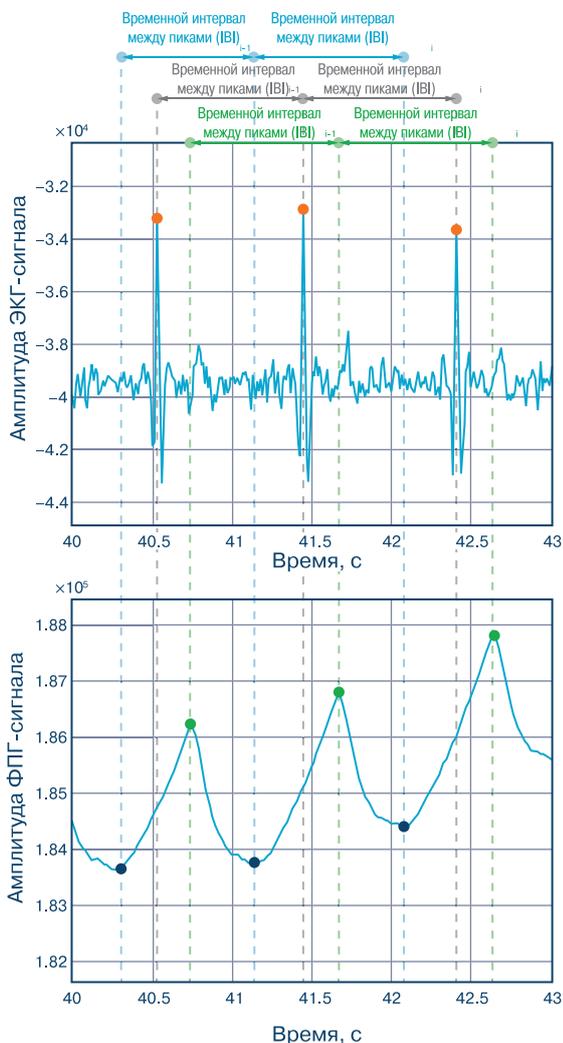
$$Se = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (2)$$

$$p^+ = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (3)$$

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|IBI_{i-1} - IBI_i|^2)} \quad (4)$$

- 1) Временной интервал покрытия (coverage).
- 2) Чувствительность (Se), где TP – число достоверных пиков, FN – число недостоверных провалов.
- 3) Степень позитивного прогноза (p+).
- 4) Среднеквадратичное значение (RMSSD) сравнений последовательных выборок (IBI), где IBI – временные интервалы между пиками ФПГ-сигналов, как показано на рис. 4.

В соответствии с предложенным алгоритмом ЭКГ- и ФПГ-сигналы собраны в репрезентативные базы данных. Для получения баз данных исследованы 27 пациентов: мужчины и женщины разного возраста, с разным цветом кожи и различной конститу-



**Рис. 4. Осциллограммы ЭКГ- и ФПГ-сигналов после алгоритмической обработки**

**Таблица. Показатели обработки ЭКГ и ФПГ сигналов сердечного ритма**

Показатель	Результат совпадения
Интервал покрытия	83%
Чувствительность	87%
Вероятность позитивного прогноза	98%
Среднее временное отклонение ЭКГ и ФПГ сигналов	12 мс

цией тела. Исследование каждого пациента проводилось в течение 30 секунд и 2 минут, в положении сидя и стоя.

В таблице представлены усредненные результаты показателей после обработки. Как следует из данных таблицы, длительность интервалов покрытия, чувствительность и степень позитивного прогноза по показателям ЭКГ и ФПГ сигналов совпадают не менее чем на 83%.

**ВЫВОДЫ**

Компанией Analog Devices разработаны и выпускаются мультисенсорные часы для съема медицинских параметров непосредственно с запястья пациента. Специалистами компании предложен алгоритм для обработки фотоплетизмографических сигналов, позволяющий оценить в реальном времени состояние пациента не хуже, чем это позволяет обеспечить электрокардиограмма.

**VD MAIS**  
**Контрактное производство электроники**  
 (по стандарту IPC-A-610)

- автоматизированный монтаж SMD-компонентов (до 2.5 млн в сутки)
- автоматизированная селективная пайка компонентов, монтируемых в отверстия
- монтаж прототипов печатных плат
- 100% автоматический оптический контроль качества монтажа
- изготовление опытных образцов изделий
- мелко- и крупносерийное производство
- 10-летний опыт контрактного производства
- гарантия качества

Сертификация на соответствие требованиям стандартов ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016  
**Цены – оптимальные.**

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
 тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
 e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua



**VD MAIS**  
**Разработка и серийное производство электроники**

- разработка электрических схем
- проектирование и изготовление печатных плат
- комплектация изделий электронными компонентами и конструктивами
- контрактное производство (по стандарту IPC-A-610G):
  - автоматизированный монтаж SMD-компонентов и автоматизированная селективная пайка компонентов, монтируемых в отверстия
  - изготовление опытных образцов изделий
  - мелко- и крупносерийное производство
- многолетний опыт разработки и производства
- гарантия качества

Сертификация на соответствие требованиям стандартов ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016  
**Цены – оптимальные.**

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
 тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
 e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua



# Интернет-магазин VD MAIS

The Professional Distributor

[catalog.vdmais.ua](http://catalog.vdmais.ua)

**ПОКУПАЙ КОМПОНЕНТЫ ОНЛАЙН**



- для разработчиков и предпринимателей
- быстрое получение счета без ожидания
- поставки со склада в Киеве
- заказы на зарубежных складах
- специальные условия для дилеров

1. Зарегистрируйтесь в один клик
2. Внесите данные плательщика
3. Выбирайте товары
4. Мгновенно получите счет
5. Оплатите онлайн или через банк
6. Ожидайте доставку заказа



- электронные компоненты
- светодиоды и блоки питания
- кабели, разъемы, клеммы, реле
- паяльное оборудование и материалы
- измерительные приборы



Центральный офис:

03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
Тел.: (+38-044) 201-0202  
Факс: (+38-044) 202-1110  
E-mail: [info@vdmais.ua](mailto:info@vdmais.ua)

Региональные представительства:

61070 Харьков  
ул. Академика Проскуры, 1  
тел./факс: (057) 719-6718, 716-4266

49006 Днепр  
пр. Пушкина, 55, оф. 504  
тел./факс: (0562) 319-128

65005 Одесса  
ул. Головоковская, 36, оф. 20  
тел./факс: (048) 734-1954

79056 Львов  
пр. В. Черновола, 67, оф. 319  
тел./факс: (032) 245-5478

69000 Запорожье  
бульвар Шевченко, 25, оф. 14  
тел. (095) 274 6897

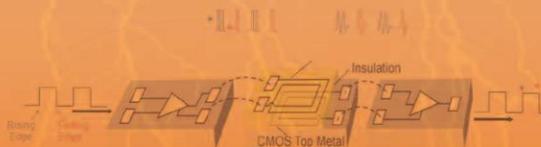


**iCoupler®**

**ЦИФРОВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ**  
для вашего устройства

**Области применения и основные параметры:**

- цифровые изоляторы для интерфейсов RS-485, CAN, LVDS, M-LVDS, RS-232, IO-Link, USB 2.0, I2C, SPI
- изолированные драйверы затвора, усилители, АЦП, контроллеры
- сигма-дельта модуляторы и др.
- количество каналов: 1-6
- напряжение изоляции: 1-7.5 кВ
- максимальная скорость передачи данных: 1...150 Мбит/с
- максимальная задержка распространения: 13...180 нс
- температурные диапазоны: -40...85 °C, -40...105 °C, -40...125 °C
- тип корпуса: SOIC-8, SOIC-16, SOIC-20, BGA-32, QSOP-16, SSOP-20



**VD MAIS – официальный дистрибьютор компании Analog Devices в Украине**  
тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (095) 283-8246,  
(048) 734-1954, (095) 274-6897, [info@vdmais.ua](mailto:info@vdmais.ua), [www.vdmais.ua](http://www.vdmais.ua)

# ПРЕЦИЗИОННЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДРАЙВЕРОВ ПОРАЗРЯДНЫХ АЦП С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ \*

LOW NOISE, PRECISION OP AMP DRIVES HIGH RESOLUTION SAR ADCS

В статье рассмотрен операционный усилитель LT6018 в качестве драйвера поразрядных АЦП с разрешением 18 и 20 разрядов.

Abstract - This Design Note presents circuits to achieve the best signal-to-noise ratio (SNR) and total harmonic distortion (THD) when using the LT6018 to drive high speed 18-bit and 20-bit successive approximation ADCs.

К. Локере, Э. Квирко

K. Lokere, E. Qirko

На рис. 1 представлена принципиальная схема демонстрационной платы, которая содержит операционный усилитель (ОУ) LT6018, используемый в качестве драйвера 20-разрядного АЦП поразрядного уравновешивания LTC2378-20. Линейность АЦП составляет 2 ppm. Для того, чтобы гарантированная линейность АЦП не была искажена в результате преобразования несимметричного сигнала в симметричный, на его входе использован формирователь, состоящий из согласованных прецизионных резисторов типа LT5400.

Для измерения линейности приведенной на рис. 1 схемы на ее вход подавался тестовый синусоидальный сигнал со сверхмалыми искажениями, а с помощью быстрого преобразования Фурье обрабатывались цифровые данные на выходе. В результате тестирования определялись параметры нелинейных искажений схемы драйвер-АЦП, причем частота тестового синусоидального сигнала на входе составляла 100 кГц, а частота выборки АЦП 800 кГц. Результаты тестирования приведены в табл. 1.

Еще один преобразователь этого семейства, 18-

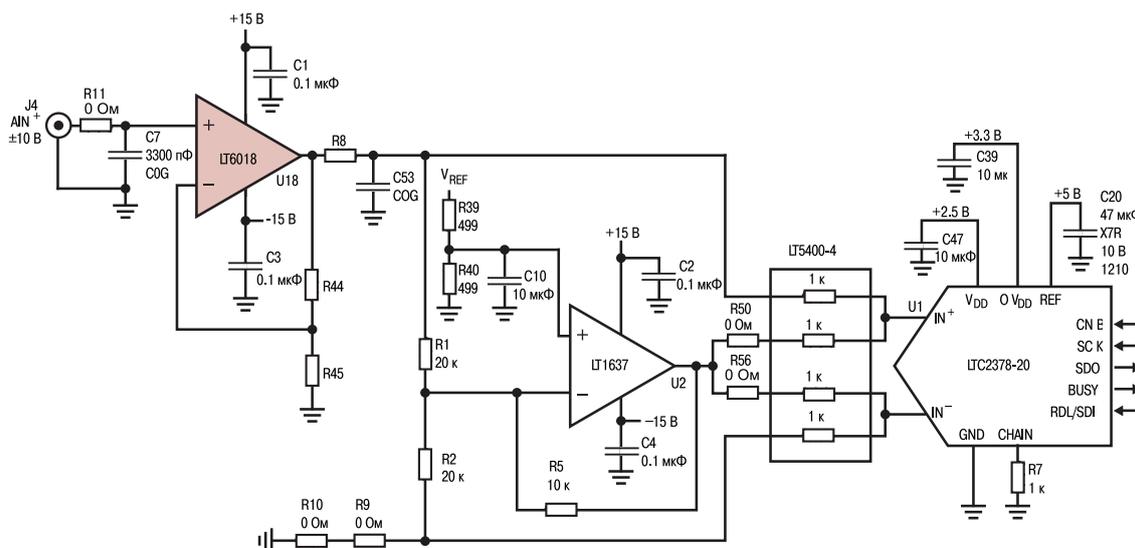


Рис. 1. Демонстрационная плата DC2135A, включающая АЦП LTC2378-20 и входной драйвер на основе операционного усилителя LT6018

\* Lokere K., Qirko E. Low Noise, Precision Op Amp Drives High Resolution SAR ADCs. [www.analog.com/DN139](http://www.analog.com/DN139). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

**Таблица 1. Результаты тестирования АЦП LTC2378-20 с входным драйвером на основе ОУ LT6018**

$K_y$	R8, Ом	C53, мкФ	R44, Ом	R45, Ом	SNR*, дБ	THD**, дБ
1	10	0.01	0	нет	103.1	-110.7
1	0	0	0	нет	102.5	-121.7
10	14.7	0.0068	900	100	99.6	-98.5
10	10	0.01	900	100	100.5	-99.8

\* SNR – отношение сигнал/шум,  
 \*\* THD – нелинейные искажения

**Таблица 2. Результаты тестирования АЦП LTC2378-18 с входным драйвером на основе двух ОУ LT6018**

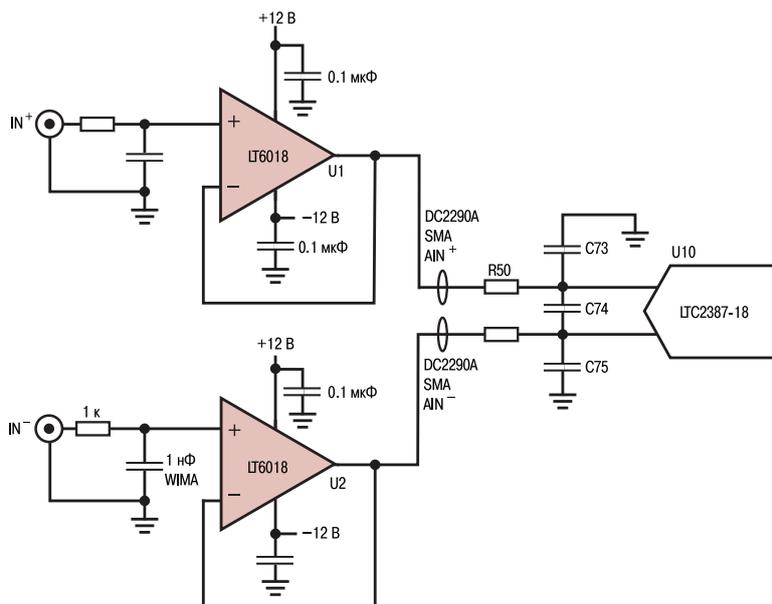
Тип усилит.	R49 = R50, Ом	C73 = C75	C74	SNR, дБ	THD, дБ
LT6200	10	82 пФ	нет	94.2	-120
LT6018	10	82 пФ	нет	90.3	-72.9
LT6018	25	1 нФ	нет	94.5	-93.7
LT6018	25	1 нФ	1 нФ	96.0	-96.1
LT6018	13.7	1.8 нФ	1.8 нФ	95.9	-101.1

### ВЫВОДЫ

разрядный АЦП поразрядного уравнивания LTC2387-18, имеет частоту выборки до 15 МГц. При такой частоте выборки время выборки (acquisition time) АЦП должно составлять не более 30 нс.

На рис. 2 приведена принципиальная схема демонстрационной платы, на которой усилитель-драйвер 18-разрядного АЦП собран на двух ОУ типа LT6018. Драйвер имеет единичное усиление. Параметры тестирования схемы включения, рис. 2, приведены в табл. 2.

В поразрядных АЦП с высокой линейностью и малым уровнем шумов в качестве усилителей-драйверов следует использовать малошумящие ОУ с широкой полосой пропускания. В качестве таких усилителей могут быть предложены ОУ типа LT6018 компании Analog Devices. Спектральная плотность шума такого ОУ составляет не более 1.2 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 кГц, уровень искажений не более -115 дБ на частоте 1 кГц, полоса пропускания не менее 15 МГц, максимальное напряжение смещения нуля 50 мкВ, температурный дрейф напряжения смещения нуля 0.5 мкВ/°С.



**Рис. 2. Демонстрационная плата DC2290A-A, включающая АЦП LTC2378-18 и входной драйвер на основе двух операционных усилителей LT6018**

## ПОРАЗРЯДНЫЙ АЦП С PGA-УСИЛИТЕЛЕМ НА ВХОДЕ ОБЕСПЕЧИВАЕТ ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН 125 ДБ \*

### SAR CONVERTER WITH PGA ACHIEVES DYNAMIC RANGE OF 125 DB

В статье приведены рекомендации по построению АЦП с динамическим диапазоном 125 дБ на базе 16-разрядного АЦП.

Т. Чеч

Abstract - The article provides recommendations for building an ADC with a dynamic range of 125 dB based on a 16-bit ADC..

T. Tzscheetzsch



**Вопрос:** Может ли 16-разрядный АЦП поразрядного уравнивания обеспечить динамический диапазон не менее 125 дБ при частоте выборки 600 кГц?

**Да:**

89 дБ (за счет 16-разрядного АЦП) + 18 дБ (за счет применения режима сверхвыборки) + 20 дБ (за счет использования на входе АЦП измерительного усилителя с программируемым коэффициентом усиления) = 127 дБ.

Если необходимо получить большой динамический диапазон, в измерительном канале используют, как правило, сигма-дельта АЦП. Такое решение характерно для применения преобразователей в химической промышленности, медицине, весоизмерительных приборах, где, как правило, не требуется большое быстродействие. Однако, когда требуется получить высокую скорость преобразования, такое решение не всегда приемлемо. На рис. 1 приведена функциональная схема АЦП, которая од-

новременно имеет большой динамический диапазон и высокую скорость преобразования.

В составе приведенной на рис. 1 схемы имеется 16-разрядный АЦП поразрядного уравнивания и программируемый по цепи обратной связи измерительный усилитель, который, благодаря этому, имеет регулируемый коэффициент усиления от 1 до 100. Применение режима сверхвыборки и цифровой обработки сигналов на выходе АЦП, которую выполняет процессор на ПЛИС FPGA, динамический диапазон этого устройства достигает не менее 125 дБ. Автоматическое переключение коэффициента усиления обеспечивается в программируемом измерительном усилителе AD8253. Использование режима сверхвыборки позволяет в результате обработки увеличить отношение сигнал/шум (на 3 дБ после каждого удвоения частоты выборки по сравнению с частотой Найквиста). Принцип увеличения отношения сигнал/шум показан на рис. 2. Для обеспечения динамического диапазона более 125 дБ в схеме, приведенной на рис. 1, измерительный усилитель на входе АЦП должен иметь максимальный коэффициент усиления, равный 100. В этом случае уровень шума всего измерительного канала должен составлять не более 1 мкВ (с.к.з.) при входном сигнале 3 В или 6 В от пика к пику. АЦП AD7985 представляет собой 16-разрядный преобразователь поразрядного уравнивания с максимальной частотой выборки 2.5 МГц. Если частота выборки этого АЦП составляет 600 кГц (энергосберегающий режим с потребляемой мощностью не более 11 мВт), то для случая, когда частота выборки сигнала по Найквисту может быть не более 8 кГц, частота сверхвыборки преобразователя в

\* Tzscheetzsch T. SAR Converter with PGA Achieves Dynamic Range of 125 dB. [www.analog.com/raq163](http://www.analog.com/raq163). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

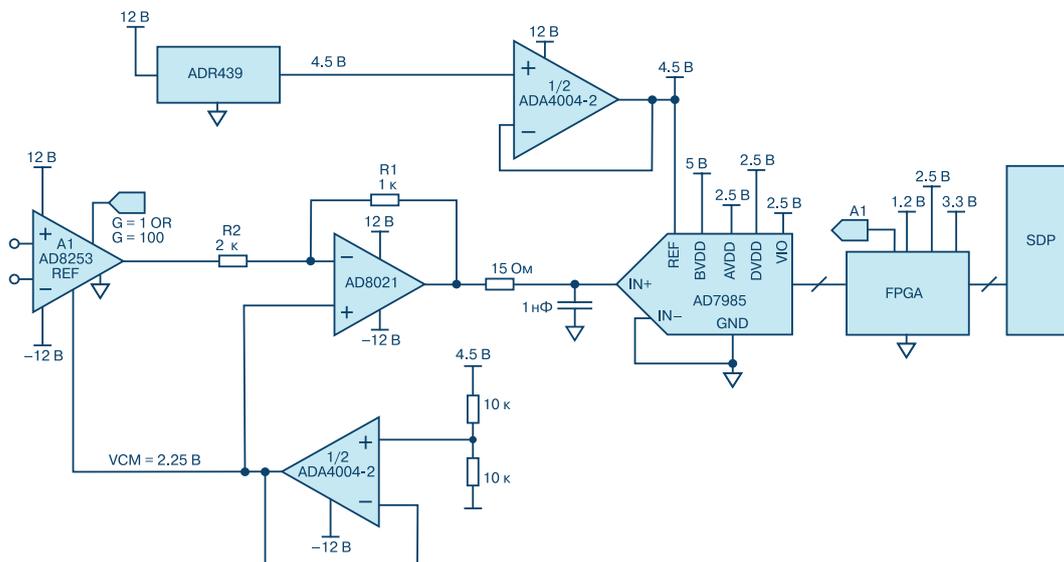


Рис. 1. Схема поразрядного АЦП с автоматической регулировкой входного диапазона

72 раза больше. В этом случае спектральная плотность шума АЦП составит  $15.8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Таким образом, если отношение сигнал/шум АЦП AD7985 составляет 89 дБ, а режим сверхвыборки добавляет еще 18 дБ, для заданного динамического диапазона 125 дБ необходимо еще добавить как минимум 19 дБ, что и обеспечивает включенный на входе АЦП программируемый измерительный усилитель. Отметим, что плотность шума измерительного усилителя AD8253 при коэффициенте усиления 100, составляет  $11 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , а плотность шума усилителя-драйвера АЦП AD8021 составляет не более  $2.1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

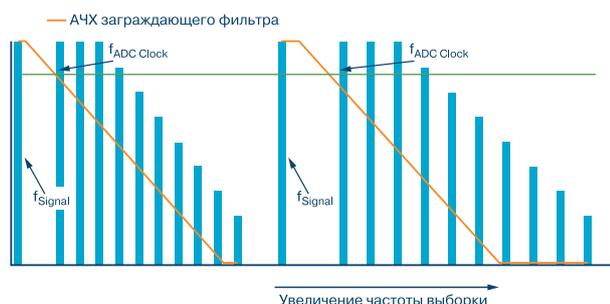


Рис. 2. Режим сверхвыборки сдвигает часть шума АЦП в область сверхвысоких частот, которые обрезаются фильтром

Измерительный канал, кроме того, содержит опорный источник ADR439 с усилителем ADA4004-2 для формирования опорного сигнала. Ключевой задачей процессора на основе ПЛИС FPGA является управление переключением диапазонов измерительного усилителя, причем необходимо делать это таким образом, чтобы АЦП не переходил в режим

насыщения. На рис. 3 показано, как должны быть согласованы входы программируемого измерительного усилителя, управляемого процессором, и АЦП при изменении амплитуды входного сигнала во времени.

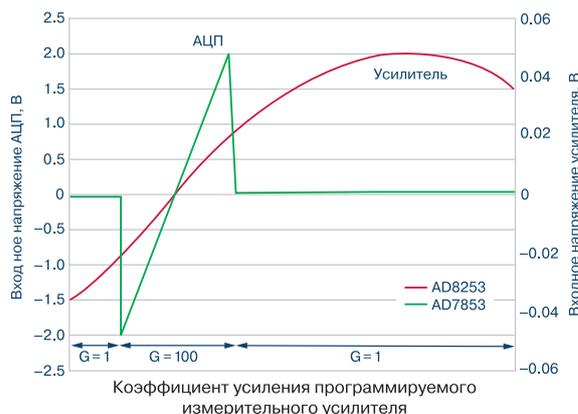


Рис. 3. Пример согласования входов усилителя и АЦП при изменении амплитуды входного сигнала, где  $G$  – коэффициент усиления программируемого измерительного усилителя

### ВЫВОДЫ

Для обеспечения большого динамического диапазона АЦП, превышающего 125 дБ, при высокой скорости изменения входного сигнала может быть использован быстродействующий поразрядный преобразователь с разрешением 16 бит и программируемым измерительным усилителем на входе. При этом применяется режим сверхвыборки АЦП, который позволяет увеличить отношение сигнал/шум.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СИГНАЛА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ \*

### THE DIFFERENTIAL-SIGNAL ADVANTAGE FOR COMMUNICATIONS SYSTEM DESIGN

Успехи микросхемных технологий при построении высокочастотных устройств с дифференциальными входами/выходами позволили использовать такую архитектуру при проектировании ВЧ приемников. В статье рассмотрены особенности применения таких решений в системах связи третьего (3G) и четвертого (4G) поколений.

Abstract - Recent advances in integrated RF circuit technology and high-performance differential RF building blocks now allow differential architectures to be applied to high-performance receiver designs. This article discusses the performance and merits of differential signal chains in the context of 3G and 4G wireless applications.

К. Калво

C. Calvo

Одним из важнейших свойств систем телекоммуникаций является высокая надежность передачи информации. Исходя из этого, следует свести к минимуму искажения сигнала, потерю чувствительности, его блокировку и деградацию в системах сотовой связи. Эти системы должны в максимальной мере соответствовать требованиям стандартов CDMA (Code Division Multiple Access – многостанционный доступ с кодовым разделением каналов) и W-CDMA (wideband CDMA – широкополосный многостанционный доступ с кодовым разделением каналов).

В недалеком прошлом отсутствие на рынке микросхемных компонентов с дифференциальными входами/выходами ограничивало возможности ВЧ приемников и передатчиков, однако в связи с появлением в настоящее время микросхем с дифференциальными каналами возможности систем радиосвязи существенно увеличились. На рис. 1 приведена функциональная схема супергетеродинного приемника с дифференциальным каналом прохождения сигнала, которая включает антенну, фильтры, усилитель с малым уровнем шумов, смеситель с гетеродином, усилитель-драйвер и АЦП.

Усилитель с малым уровнем шумов определяет уровень чувствительности приемника. От него зависит степень искажения входного сигнала приемника. Полосовые фильтры уменьшают искажения и шумы в канале связи. Смеситель преобразует ВЧ

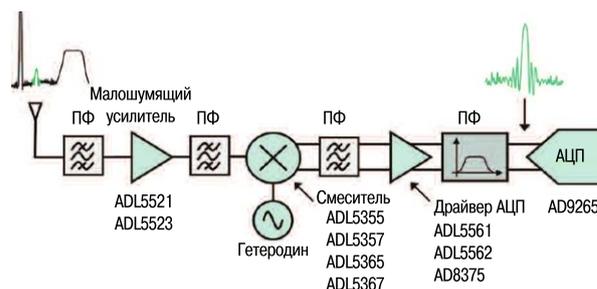


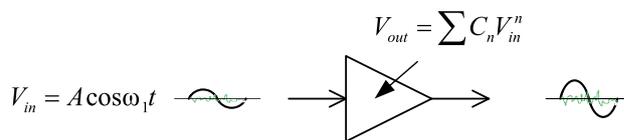
Рис. 1. Функциональная схема супергетеродинного приемника с дифференциальным каналом

сигнал в сигнал промежуточной частоты. Антиалиазинговый фильтр ослабляет сигналы вне первой зоны Найквиста. АЦП кодирует сигнал промежуточной частоты. В идеальном случае только код полезного сигнала (изображен на рис. 1 синим цветом) формируется на выходе АЦП. Как уже было отмечено, важнейшими особенностями такой схемы являются высокие чувствительность и линейность, малый уровень шумов и искажений. К другим не менее важным свойствам этой схемы относятся невысокая стоимость, малое потребление и небольшие размеры.

На рис. 2 показаны отличия симметричной (дифференциальной) от несимметричной схемы, которые сопровождаются пояснительными выражениями функции преобразования для каждой из схем.

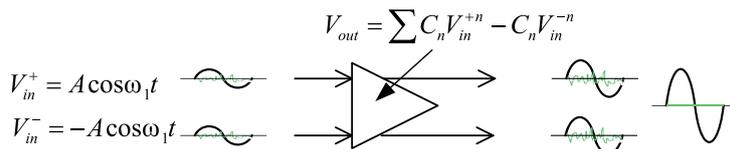
\* C. Calvo, *The differential-signal advantage for communications system design*. [www.analog.com/TechnicalArticle](http://www.analog.com/TechnicalArticle). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

Несимметричная схема



$$V_{out} = (C_0 + A^2 C_3 / 2) + (C_1 - A^3 C_4 / 4) \cos \omega_1 t + (A^2 C_3 / 2) \cos 2\omega_1 t + (A^3 C_4 / 4) \cos 3\omega_1 t + \dots$$

Симметричная схема



$$V_{out}^+ - V_{out}^- = (0) + (0 - A^3 C_4 / 2) \cos \omega_1 t + (0) \cos 2\omega_1 t - (A^3 C_4 / 2) \cos 3\omega_1 t + \dots$$

Рис. 2. Несимметричная и симметричная схемы преобразования сигналов

Несимметричные схемы усиления и преобразования сигналов менее устойчивы к внешним электромагнитным помехам и шумам чем симметричные. Последние обладают свойством ослабления синфазных помех и нестабильности питающих напряжений. Кроме того, при одинаковых уровнях напряжения питания и одинаковом потреблении размах полезного сигнала в симметричных схемах вдвое больше. Это значит, что при одинаковом уровне шумов симметричная схема имеет более высокое отношение сигнал/шум чем несимметричная. Дифференциальные схемы имеют свойство ослаблять четные гармоники. На рис.3 показаны графики ослабления нелинейных искажений в каждой из схем.

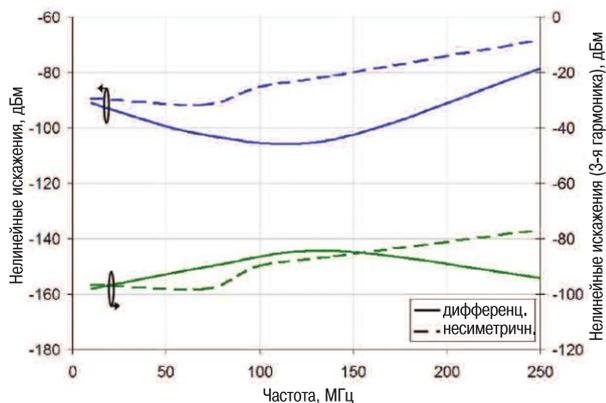
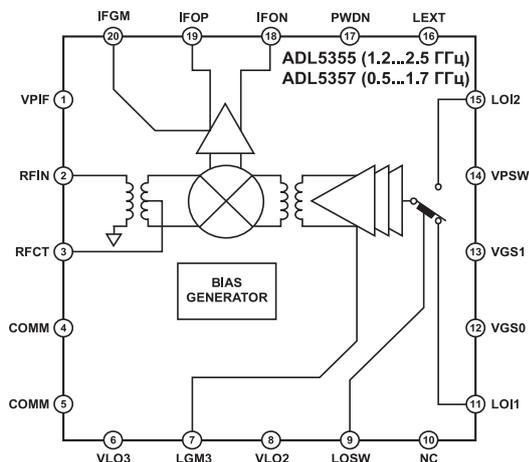


Рис. 3. Зависимости нелинейных искажений в симметричной и несимметричной схемах от частоты входного сигнала

Графики на рис. 3 демонстрируют уровень ослабления нелинейных искажений второго и третьего порядков дифференциальным усилителем-драйвером и несимметричным усилителем-драйвером для быстродействующих АЦП с разрешением от 8 до 16 бит. Из приведенных на рис. 3 графиков следует, что уровень ослабления нелинейных искажений для симметричной схемы может быть на 6 дБ больше по сравнению с несимметричной схемой.

Следует отметить, что развитие микросхемотехники для ВЧ сигналов с симметричными каналами начиналось с драйверов и АЦП, во время как другие устройства в цепи преобразования ВЧ сигналов оставались несимметричными. Так, например, в схеме на рис. 1 усилитель и смеситель выполнены по несимметричной схеме. Использование таких узлов как внешние ВЧ трансформаторы для преобразования несимметричных сигналов в симметричные было ограничено большими размерами последних. Новые радиочастотные компоненты, такие как семейство смесителей ADL535x (рис. 4), которые включают симметрирующие трансформаторы, позволило решить эту проблему.

Как следует из рис. 4, три порта смесителя являются симметричными. Для удобства применения входной порт гетеродина ИМС смесителя ADL535x и входные ВЧ порты подключаются к внешним устройствам (в том числе несимметричным) через встроенный в микросхему трансформатор. Выходные порты смесителя для сигналов промежуточной частоты включают усилитель-драйвер с выходным



**Рис. 4. Микросхемы семейства смесителей ADL535x с встроенным симметрирующим трансформатором**

сопротивлением 200 Ом, который подключается к внешнему ПАВ фильтру.

### ВЫВОДЫ

Новые высокочастотные микросхемы компании Analog Devices позволяют проектировать каналы связи для телекоммуникаций новых поколений на основе компонентов с дифференциальными входами/выходами. Это дает возможность повысить точность передаваемых сигналов, снизить влияние внешних электромагнитных помех и нестабильности питания, ослабить степень нелинейных искажений ВЧ приемников в системах связи новых поколений.

[ От ремесла к искусству ]

## ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

- проектирование

**Проектирование печатных плат в НПФ VD MAIS – это:**

- многолетний опыт конструирования и знание специфики:
  - разработки электронных устройств
  - технологии производства печатных плат
  - различных CAD-CAM систем проектирования (P-CAD, Mentor Graphics, CAM-350 и пр.)
- полная реализация возможностей изготовителя печатных плат и контрактного производства VD MAIS
- качество работы, соответствующее ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016.

**VD MAIS**  
PCB Professionally

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (095) 283-8246, (048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmals.ua, www.vdmals.ua

## ЧЕМ ОТЛИЧАЕТСЯ ДИСКРЕТНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ОТ ИНТЕГРАЛЬНОГО АНАЛОГА \*

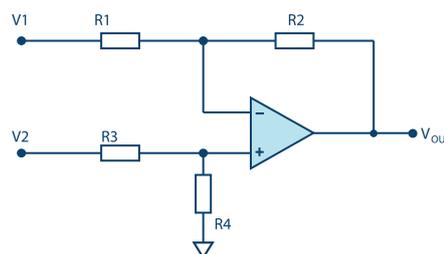
### DISCRETE DIFFERENCE AMPLIFIER VS. AN INTEGRATED SOLUTION

В статье показаны преимущества дифференциального усилителя, выполненного в виде интегральной схемы.

Abstract - The article shows the advantages of a differential amplifier, made in the form of an integrated circuit.

Дж. Ромбола, Ч. Тран

J. Rombola, Ch. Tran



**Рис. 1. Классическая схема дифференциального усилителя с дискретными резисторами**

#### Вопрос:

Зачем платить больше за меньшее?

#### Ответ:

Действительно, собранный по классической схеме дифференциальный усилитель достаточно прост. Всего четыре резистора и операционный усилитель.

Однако параметры такой схемы могут быть далеки от желания разработчика. В статье показан ряд недостатков классической схемы, построенной на основе дискретных резисторов и усилителя, рис. 1. Это большая погрешность коэффициента усиления, его значительный дрейф, низкий КОСС (Common-mode Rejection Ratio – CMRR) и большой дрейф напряжения смещения нуля.

Передаточная функция этой схемы может быть выражена следующими выражениями

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \cdot V_2 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_1.$$

Если  $R_1 = R_3$ , а  $R_2 = R_4$ , то выражение примет следующий вид

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot (V_2 - V_1).$$

Однако принятое нами равенство резисторов для дискретного исполнения практически невыполнимо, кроме того, дискретные резисторы имеют невысокую точность и высокий ТКС, что приводит к значительной погрешности преобразования входного сигнала. Так, например, погрешность стандартных резисторов, как правило, составляет 1%, ТКС равен 100 ppm/°C. Отсюда погрешность коэффициента усиления составит не менее 2%, а общий ТКС схемы будет не менее 200 ppm/°C.

Конечно, вместо дискретных резисторов можно использовать матрицы интегральных резисторов. Но это дорогое и громоздкое решение. Кроме того, дискретные усилители имеют низкий КОСС, а размах входного сигнала для таких усилителей существенно меньше разности питающих напряжений. Поэтому наиболее простым решением для такой за-

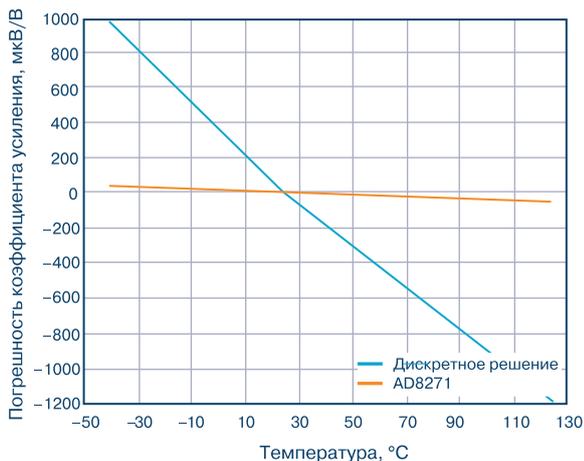
\* Rombola J., Tran Ch. Discrete Difference Amplifier vs. an Integrated Solution. Analog Dialog, 53-05, 2019. [www.analog.com](http://www.analog.com). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

дачи является использование интегрального дифференциального усилителя с внутренними резисторами, формирующими требуемый коэффициент усиления. Таким усилителем является ИМС AD8271.

Как правило, схема дифференциального усилителя на основе ИМС AD8271 содержит еще несколько подстроечных резисторов. Внутренние резисторы позволяют получить нужную конфигурацию проектируемой схемы, например, дифференциальный, инвертирующий или неинвертирующий усилитель.

Таким образом, встроенные в кристалл ИМС усилителя резисторы дают определенную свободу разработчику при проектировании необходимого устройства. Встроенные резисторы хорошо согласованы путем лазерной подгонки и протестированы в процессе изготовления ИМС, что гарантирует их высокую точность и малую погрешность коэффициента усиления для усилителя в целом.

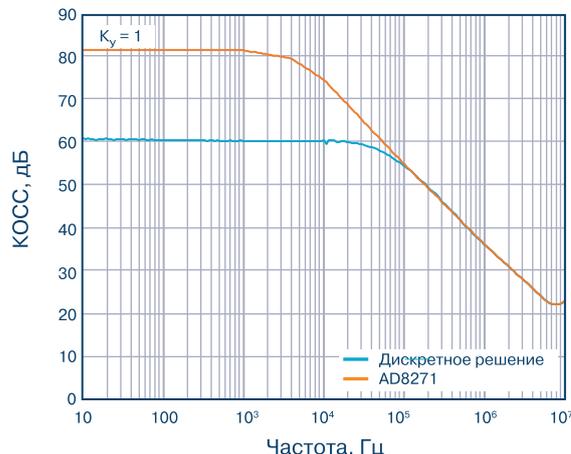
Схема, приведенная на рис. 1, при встроенных в кристалл ИМС резисторах обеспечивает погрешность коэффициента усиления не хуже 0.1%, температурный дрейф коэффициента усиления не более



**Рис. 2. Зависимости погрешности коэффициента усиления дифференциального усилителя от температуры для дискретных и встроенных в кристалл ИМС AD8271 резисторов**

10 ppm/°C, как показано на рис. 2.

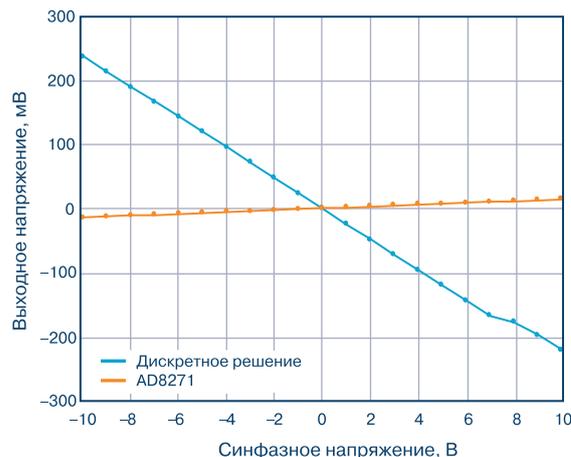
Отметим, что размеры ИМС значительно меньше дискретных аналогов, что позволяет уменьшить влияние внешних электромагнитных помех на работу усилителя в целом. Так, например, неинвертирующий и инвертирующий входы ИМС AD8271 могут быть не подключены к дорожкам, расположенным на печатной плате, что уменьшает входную емкость, увеличивает устойчивость схемы и повышает



**Рис. 3. Зависимость КОСС от частоты для усилителя AD8271 и его дискретного аналога**

уровень КОСС в полосе частот, как показано на рис. 3.

Как уже отмечалось, если резисторы в схеме, рис. 1, плохо согласованы, то часть синфазного сигнала усиливается усилителем и поступает на его выход. Это отражено на диаграмме, рис. 4, для уси-



**Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от величины синфазного сигнала для ИМС AD8271 и ее дискретного аналога**

лителя, выполненного на дискретных компонентах.

Величина КОСС может быть выражена следующим образом:

$$CMRR = (A_d + 1) / 4t$$

где  $A_d$  – коэффициент усиления дифференциального усилителя;  $t$  – разброс параметров резисторов.

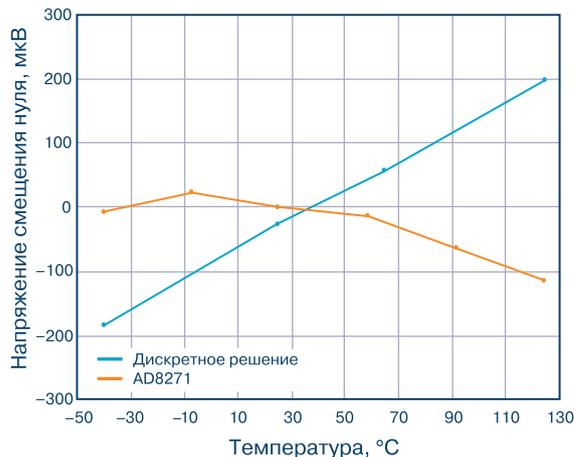
Если, например, при единичном усилении разброс резисторов составляет 1%, то КОСС будет ра-

вен примерно 34 дБ; если разброс уменьшить до 0,1%, то КОСС увеличится до 54 дБ. Таким образом, даже при выборе усилителя с высоким КОСС (не менее 70 дБ и выше) общий КОСС для всей схемы будет ограничен величиной разброса резисторов.

Следует отметить, что резисторы имеют достаточно большой ТКС. Для уменьшения его влияния на точность схемы в целом резисторы стараются расположить в непосредственной близости друг от друга, что возможно в рамках одной ИМС. В дискретном исполнении резисторы расположены на печатной плате на достаточном удалении друг от друга, что не позволяет минимизировать влияние их ТКС на точность схемы в целом, как показано на рис. 5.

### ВЫВОДЫ

При проектировании разных схем усилителей следует обращать внимание на используемые в них резисторы. В случае применения дискретных резисторов, как правило, невозможно получить высокие



**Рис. 5. Зависимость напряжения смещения нуля от температуры окружающей среды для ИМС AD8271 и ее дискретного аналога**

параметры по точности как на постоянном токе, так и в полосе частот. Только усилители со встроенными, хорошо согласованными по всем параметрам резисторами могут обеспечить высокую точность, большой КОСС и малый температурный дрейф уси-

## Бюджетный цифровой осциллограф R&S® RTB2000

- 4 канала для исследования аналоговых сигналов
- полоса пропускания 70, 100, 200 и 300 МГц для разных моделей
- частота дискретизации 1.25 ГГц/канал, 2.5 ГГц в поочередном режиме
- 10-разрядный АЦП
- объем памяти для 10 млн отсчетов на канал (20 млн в поочередном режиме)
- частота обновления 50 000 осциллограмм/с
- максимальная чувствительность 1 мВ
- 10,1" емкостной сенсорный экран, 1280×800 пикселей
- піддержка жестов для масштабирования и деталізації сигналов
- 16-канальный логический анализатор, частота дискретизации 1.25 ГГц
- анализ сигналов в шинах I2C, SPI, UART/RS-232/RS-422/RS-485, CAN, LIN
- 4-разрядный генератор тестовых последовательностей: синус, прямоугольные импульсы, меандр, треугольный, пилообразный, SinC, экспоненциальный, сигнал произвольной формы
- возможность настройки интерфейса пользователя
- выполнение основных математических операций над сигналами (+, -, \*, /), спектральный анализ сигналов (БПФ, 128 тыс. точек)
- работа в локальной сети.

**VD MAIS – официальный дистрибьютор компании ROHDE & SCHWARZ в Украине**

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (032) 245-5478, (095) 274-6897, (048) 734-1954, info@vdmαιs.ua, www.vdmαιs.ua

## GSM/GPRS модуль L206

### для промышленного применения



#### Области использования:

- мониторинг транспортных средств
- охранная и пожарная сигнализация
- "умные" счетчики, системы учета потребления электроэнергии, газа, воды и др.
- POS-терминалы в розничной торговле
- системы мониторинга и контроля доступа
- диспетчеризация систем освещения и управления движением
- системы сбора данных и телеметрии
- системы оповещения в чрезвычайных ситуациях
- компоненты систем "Умный дом"

<http://www.mobiletek.cn>

- поддержка LBS, WIFI locate (SW interface), TTS
- малое энергопотребление
- интегрированная технология Bluetooth™ 3.0/4.0
- поддержка OpenCPU (возможность записи кода пользователя в основной МК)

Тип	L206(H\D\CD)	L206(L\C)
Чипсет	MT6261D	MT6261M
Процессор	ARM7EJ-S 260 МГц	ARM7EJ-S 260 МГц
Память	32 Мб (ROM)+32 Мб (RAM)	24 Мб (ROM)+32 Мб (RAM)
Диапазоны	GSM/GPRS 850/900/1800/1900 МГц	
GPRS	Class 12 (85.6 кбит/с UL/DL)	
Передача голоса	поддерживается	
Диапазон рабочих температур	-40...85 °C	
Габаритные размеры	15.8×17.6×2.3 мм	
Корпус	LCC-45	
Сертификация	TA/CCC/CE/FCC/ROHS	

L206 pin-to-pin аналоги модулей SIM800C, SIM800H, SIM800L



**VD MAIS – официальный дистрибьютор компании MobileTek в Украине**

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (032) 245-5478,  
(095) 274-6897, (048) 734-1954, info@vdmias.ua, www.vdmias.ua

## ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И СИСТЕМАХ ОБОРОНЫ \*

### WIRELESSLY LINKING THE AEROSPACE AND DEFENSE WORLD

Беспроводные технологии с недавнего времени получили широкое развитие в авиакосмических и военных системах, системах поддержки индивидуальных средств защиты военнослужащих, системах управления необслуживаемыми объектами, системах медицинского мониторинга. Особенности базовых компонентов для таких систем рассмотрены в настоящей публикации.

Д. Босворз

Abstract - **W**ireless systems are being deployed in a wide range of applications across the aerospace and defense industries to support applications ranging from soldier systems, the control of unmanned systems, system level health, and vital sign monitoring. The basic electronic component features for such systems are considered in the article.

D. Bosworth

Беспроводные системы связи в последнее время получили широкое развитие в обороне и авиакосмической отрасли. Они поддерживают индивидуальные средства защиты современных солдат, применяются в управлении необслуживаемыми объектами, в системах медицинского мониторинга. Средства защиты военнослужащего во время выполнения боевой задачи должны обрабатывать все более растущие потоки данных, практически без участия человека. Это обусловлено тем, что новая технология Интернета вещей выходит на рынки авиакосмической и военной промышленности. Отметим, что по оценкам компании Ericsson к 2021 году ожидается, что из приблизительно 28 млрд. сетевых устройств в мире, около 16 миллиардов будут отвечать требованиям технологии Интернета вещей, а в течение ближайших 10 лет существенно расширится частотный диапазон в военных системах связи. Технология Интернета вещей основывается на новой элементной базе в области телекоммуникаций. Так, например, новая ИМС компании Analog Devices типа AD9361 представляет собой программно определяемый приемопередатчик (Software Defined Radio – SDR), который позволяет программно устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры, включая диапазон частот, тип модуляции или выходную мощность, причем такая архитектура адаптирована к разным протоколам и стандартам связи. Использование новой

ИМС расширяет частотный диапазон и, соответственно, количество данных, которыми обмениваются, например, военнослужащие во время выполнения боевой задачи: данные о состоянии военнослужащего, его положении в пространстве, телевизионные сигналы и др. На рис. 1 показаны типовые системы и устройства, используемые в униформе современного солдата. Причем с увеличением уровня интеграции уменьшаются размеры и вес



Рис. 1. Встроенная в униформу система жизнеобеспечения современного бойца

\* Bosworth D. *Wirelessly Linking the Aerospace and Defense World*. [www.analog.com/TechnicalArticle](http://www.analog.com/TechnicalArticle).  
Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

носимого оборудования, расширяется количество разнотипных сенсоров, что повышает живучесть военнослужащего в целом.

Рост числа встраиваемых в униформу сенсоров, увеличение объема снимаемых с них данных выдвигают дополнительные требования к беспроводным системам связи. Должна быть расширена полоса частот приема-передачи данных.

Данные от множества источников должны быть агрегированы и обработаны перед передачей в командный центр связи для повышения качества мониторинга состояния военнослужащего и повышения надежности управления боевыми подразделениями. Расширение использования необслуживаемых автоматических транспортных средств и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) тоже ужесточает требования к скорости передачи и приема данных. В сфере обороны в настоящее время находят применение такие платформы как Northrop Grumman Global Hawk и AeroVironment Raven UAV. Современные беспроводные сети и спутниковые системы связи в наибольшей степени отвечают требованиям, предъявляемым к управлению автоматическими транспортными и беспилотными системами. Однако, наряду с военными изделиями, эта область техники быстро пополняется коммерческими аналогами, что еще более ужесточает требования, предъявляемые, прежде всего, к приемопередатчикам.

Отметим, что в последние годы беспроводная связь становится преобладающей в пассажирской авиации, в которой до последнего времени использовались в основном проводные сенсоры и исполнительные механизмы.

Это привело к тому, что в современном самолете кабели связи включали до 100 000 линий протяженностью более 400 м и весом свыше 5000 кг. В связи с этим Институт авиакосмических систем (Aerospace Vehicle Systems Institute – AVSI), США, совместно с другими правительственными и коммерческими организациями занялся альтернативными разработками в области бортовой связи самолетов. Специальная группа в составе этого института – Wireless Avionics Intracommunications (WAIC) – приступила к разработке беспроводных бортовых систем связи. В первую очередь, с точки зрения этой группы, подлежат переходу на беспроводные технологии следующие группы сенсоров:

- индикатор дыма
- индикатор количества топлива
- индикатор приближения

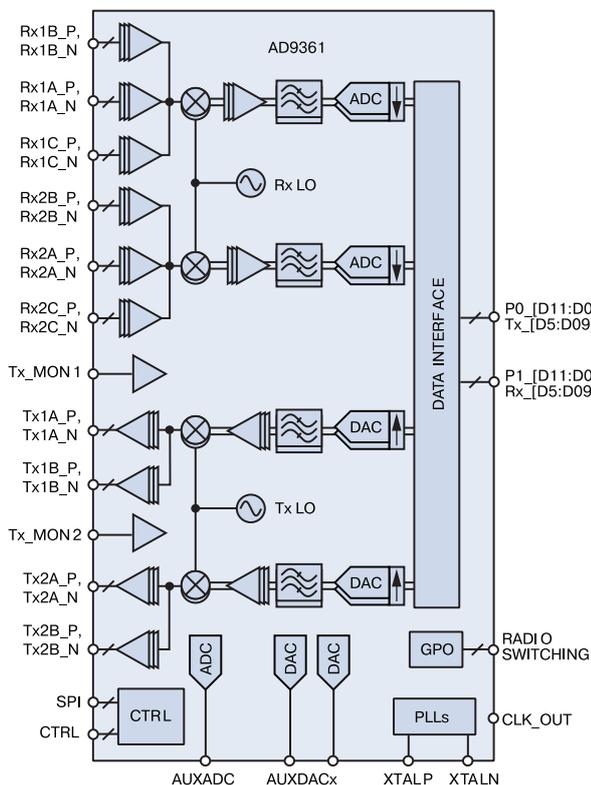
- сенсор температуры
- детектор электромагнитных помех
- детектор влажности/коррозии
- детектор давления в кабине
- детектор аварийного освещения
- детектор обледенения
- индикатор положения и состояния шасси
- индикатор наличия наземного управления полетом
- сенсор открывания двери
- сенсоры работы двигателя
- индикатор работы интерфейса электронно-цифровой системы управления двигателем
- индикатор аэродинамических данных
- прогноз работы двигателя
- видеоизображение кабины экипажа
- индикатор состояния локальной сети
- сенсоры мониторинга медицинских параметров
- индикатор вибраций.

Преимущества беспроводных сенсоров обоснованы их применением в других мобильных транспортных средствах. Для эффективности такого решения, уменьшения массогабаритных показателей беспроводные сенсоры должны иметь автономное (батарейное) питание. Таким образом, начиная от персональных сенсорных сетей для повышения живучести военнослужащих и заканчивая беспроводными сенсорными сетями в пассажирских авиалайнерах, новые технологии постепенно вытесняют проводные сети.

Ключевыми факторами развития таких технологий явилось создание новых микроэлектронных приемопередатчиков, миниатюрных сенсоров, а также существенное снижение потребляемой этими устройствами мощности. К приемопередатчикам для беспроводных каналов относятся такие новые ИМС компании Analog Devices, как AD9361 (рис. 2), а для ISM диапазона ИМС ADF7023 и ADF7024 (рис. 3).

Приемопередатчики AD9361, AD9364 предназначены для поддержания связи в полосе от 200 кГц до 56 МГц с частотной модуляцией в диапазоне от 70 МГц до 6 ГГц.

Используя архитектуру прямого цифрового преобразования с применением усилителя с низким уровнем шумов, смесителя, быстродействующих АЦП и процессора, можно обеспечить высокую надежность связи в широкой полосе частот. Отметим, что указанные приемопередатчики являются программно реконфигурируемыми устройствами, что



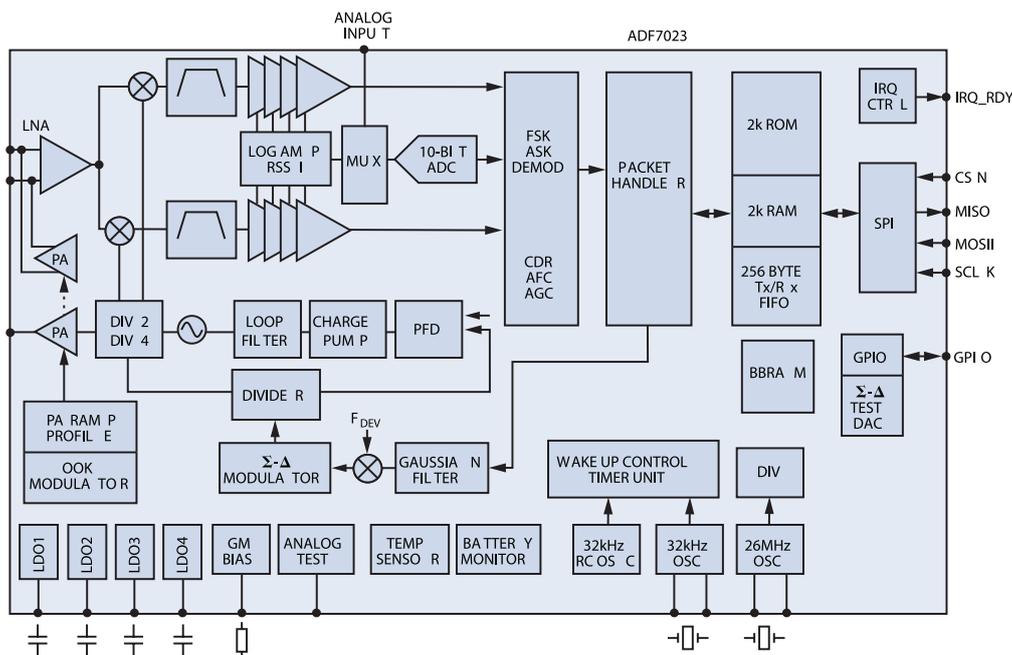
**Рис. 2. Функциональная схема ИМС приемопередатчика AD9361**

дает возможность использовать их в различных устройствах военного назначения, причем потребляемая мощность данных ИМС не превышает 1 Вт.

Приемопередатчики ADF7023, ADF7024,

ADF7242 отличаются малым потреблением и предназначены для работы в ISM диапазоне частот, а именно: 433, 868 и 915 МГц, а также 2.4 ГГц. Отметим, что эти приемопередатчики не обладают функциональной гибкостью, присущей ИМС AD9361, но они поддерживают связь в той же полосе частот, что и последняя ИМС, и, в то же время, имеют более низкое потребление и, соответственно, более длительное время эксплуатации без подзарядки аккумуляторных батарей.

Сенсорные узлы в системах Интернета вещей должны быть максимально приближены к приемопередатчикам и, желательно, выполнены по микроэлектронной технологии с использованием малощумящих усилителей и АЦП для измерения, например, температуры, тока, напряжения и т.п. По такой же технологии могут быть изготовлены сенсоры положения, навигаторы, сенсоры медико-физиологических параметров, которые встраиваются в униформу военнослужащего. Так, например, ADIS16488A iSensor® – это полностью микроэлектронный инерциальный сенсор, включающий трехосный гироскоп и трехосный магнитометр, который может быть использован как сенсор вибраций и как трекер (схема отслеживания движения). На рис. 4 приведена функциональная схема построения мультисенсорного узла беспроводной сенсорной сети, включающая каналы связи.



**Рис. 3. Функциональная схема ИМС приемопередатчика ADF7023 для ISM диапазона частот**

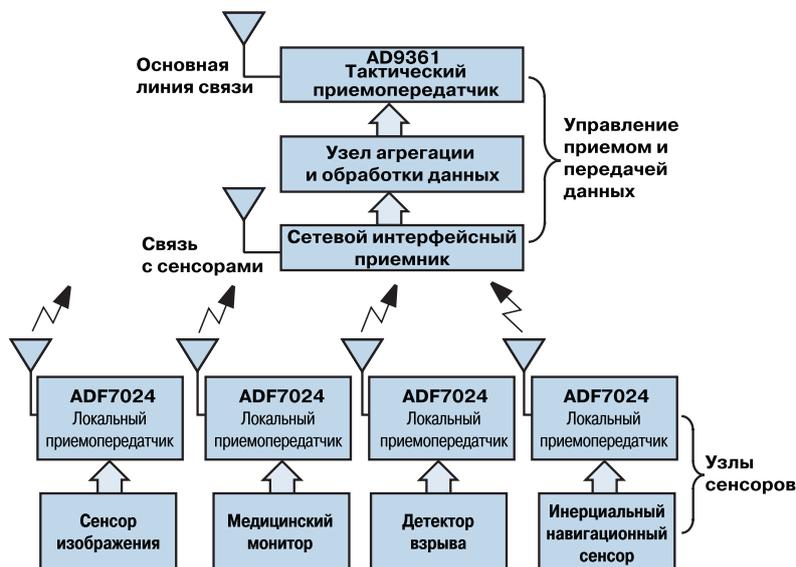


Рис. 4. Функциональная схема построения мультисенсорного узла беспроводной сенсорной сети

### ВЫВОДЫ

Технология Интернета вещей начинает активно применяться в авиакосмической и оборонной промышленности. Об этом свидетельствуют и новые примеры униформы для военнослужащих, и замена проводных сетевых технологий беспроводными аналогами в авиакосмической промышленности. Все это требует создания новой элементной базы, которая должна сохранять высокие параметры, ха-

рактерные для военных и авиакосмических изделий, и, в то же время, обладать новыми возможностями по реконфигурации, потребляемой мощности, массогабаритным показателям и т.п. Этим требованиям в полной мере отвечают новые разработки компании Analog Devices, которые уже сейчас находят применение в современных изделиях военного и космического назначения.

## ОФИСНЫЙ ЦЕНТР VD MAIS

**Если Вам необходимо провести семинар, тренинг или презентацию, добро пожаловать в офисный центр НПФ VD MAIS!**

К Вашим услугам современный конференц-зал площадью 300 кв.м, рассчитанный на 250 мест, который идеально подходит для проведения тренингов, семинаров и конференций. Для ведения деловых встреч имеются комнаты для переговоров. Офисный центр расположен в живописном парке "Отрадный". Зал оборудован мультимедийным проектором, микрофоном, LCD-монитором, компьютером, удобной мебелью, системой кондиционирования и гардеробной. Возможна организация "кофе-паузы", а также обедов в ресторане "VD Restaurant Park".



Обращаться по адресу: г. Киев, ул. М. Донца 6  
 info@vdmajs.ua  
 тел.: (044) 201-0202 (внутр. 1329, 1328)  
 факс: 202-1110  
 Контактное лицо: Пацев Андрей Викторович



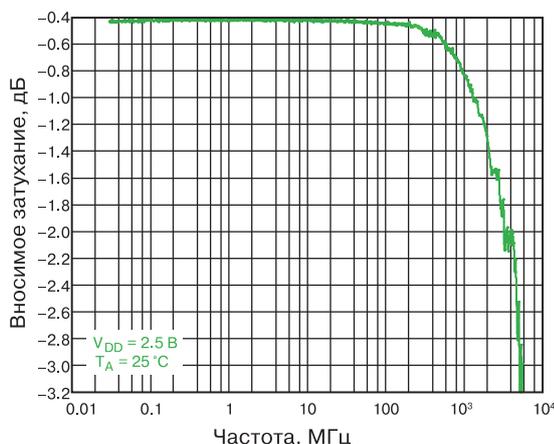
# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ КМОП-КЛЮЧИ С МАЛЫМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ \*

В настоящей публикации рассмотрены особенности широкополосных КМОП-ключей и их преимущества по сравнению с аналогами, выполненными по другим технологиям. Кроме того, показано, что КМОП-ключи по основным параметрам в ряде применений могут превосходить сверхскоростные арсенид-галлиевые ключи.

Т. Корриган, Р. Гоггин

T. Corrigan, R. Goggin

Современные широкополосные ключи могут работать в полосе частот до 1 ГГц и выше. Для выбора параметров ключа следует рассмотреть его параметры в замкнутом и разомкнутом состояниях. Вносимые потери (Insertion loss) характеризуют ключ в замкнутом состоянии и определяются уровнем ослабления входного сигнала на выходе ключа. Этот параметр особенно важен для систем с высоким коэффициентом шума (noise figure), определяемым как частное отношений сигнал/шум на входе/выходе ключа (в дБ). Это связано с тем, что ключ, как правило, является первым компонентом в измерительном канале системы сбора данных. На рис. 1 показана типовая диаграмма вносимых потерь ключа ADG919 в широкой полосе частот.

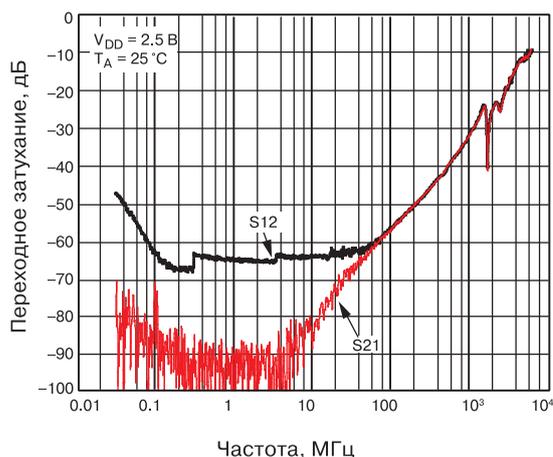


**Рис. 1. Зависимость уровня ослабления сигнала в ключе ADG919 в замкнутом состоянии от частоты**

## CMOS SWITCHES OFFER HIGH PERFORMANCE IN LOW POWER, WIDEBAND APPLICATIONS

**Abstract** – This article explains the key specifications associated with wideband switches, traditional methods used for wideband switching, and the benefits of CMOS switch technology. It also shows how new CMOS switches can outperform GaAs switches in low power, high frequency applications.

Из этой диаграммы следует, что потери в ключе составляют 0.5 дБ на частоте 100 МГц, 0.8 дБ на частоте 1 ГГц и 1.5 дБ на частоте 2 ГГц. На рис. 2 показан уровень изоляции ключа ADG919 в разомкнутом состоянии в зависимости от частоты входного сигнала.



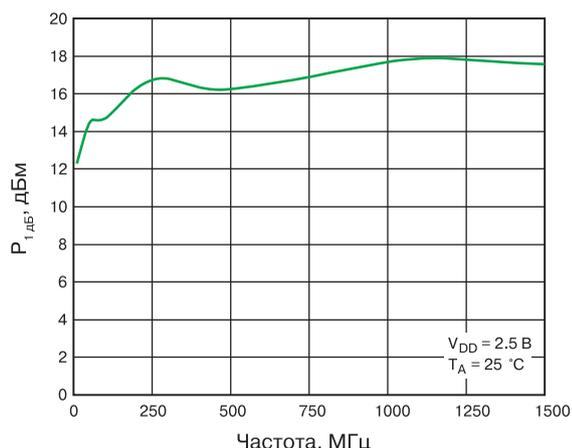
**Рис. 2. Зависимость уровня изоляции ключа ADG919 в разомкнутом состоянии от частоты входного сигнала**

Из этой диаграммы следует, что уровень изоляции ключа в разомкнутом состоянии выше 70 дБ на частоте 80 МГц, выше 37 дБ на частоте 1 ГГц и равен примерно 20 дБ на частоте 2 ГГц. По этим параметрам КМОП-ключи превосходят большинство арсенид-галлиевых ключей примерно на 10 дБ на декаду. Типовое ослабление сигнала в арсенид-галлиевом ключе на частоте 1 ГГц находится в пределах от

\* Corrigan T., Goggin R. CMOS Switches Offer High Performance in Low Power, Wideband Applications. [www.analog.com/technicalarticle](http://www.analog.com/technicalarticle). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

25 до 40 дБ. Отметим, что изоляция между каналами многоканального КМОП-ключа составляет не менее 30 дБ на частоте 1 ГГц. Кроме того, важной характеристикой ключа является нагрузочная способность (handling capability), которая определяется мощностью, отдаваемой в нагрузку, при которой ослабление сигнала составляет не более 1 дБ.

Нелинейность ключа в широкой полосе приводит к возникновению ложных тонов, которые характеризуются точкой пересечения третьего порядка (third order intercept point IIP3). Для рассматриваемого КМОП-ключа точка IIP3 на частоте 900 МГц составляет 33 дБм, что позволяет применять его в широкой полосе частот в системах спутниковой связи, глобальных системах навигации и определения положения или GPS. На рис. 3 показана зависимость мощности компрессии (ослабления)  $P_{1дБ}$  входного сигнала от его частоты. На частоте 1 ГГц  $P_{1дБ}$  составляет 17 дБм.

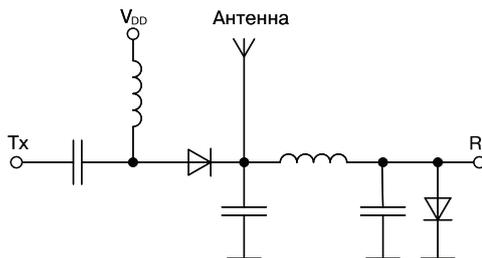


**Рис. 3. Зависимость мощности компрессии  $P_{1дБ}$  от частоты для ключа ADG901**

Рассмотрим более подробно некоторые технологии, используемые в высокочастотных ключах. Прежде всего, это рpn-диоды или диоды с двумя сильно легированными областями n+ и p+, между которыми находится активная базовая i-область с высоким удельным сопротивлением. Типовая зависимость сопротивления рpn-диода от величины тока составляет от 0.1 Ом при токе 1 А и примерно 10 кОм при токе 1 мкА. Таким образом, для обеспечения минимальных потерь входного сигнала необходимо поддерживать большой ток потребления ключа на основе рpn-диода, что неприемлемо для портативных устройств с автономным питанием. Для обеспечения высокого уровня изоляции в таких ключах необходимо использовать последователь-

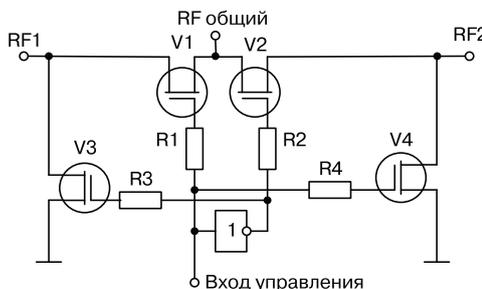
ное включение нескольких рpn-диодов, что тоже приводит к существенным потерям полезного сигнала в замкнутом состоянии такого ключа.

Типовая схема ключа на основе рpn-диода приведена на рис. 4. Еще один недостаток такого ключа заключается в необходимости использования внешнего драйвера для его управления.



**Рис. 4. Типовая схема ключа на основе рpn-диода**

Основным конкурентом КМОП-ключа в настоящее время является ключ на основе арсенида-галлия (GaAs). Такие ключи представляют собой матрицы транзисторов, которые работают как управляемые напряжением сопротивления, т.е. напряжение на затворе арсенид-галлиевого транзистора управляет сопротивлением между двумя другими электродами. Для обеспечения высокого уровня изоляции такого ключа в разомкнутом состоянии рекомендуется использовать последовательное включение транзисторов. Типовая схема арсенид-галлиевого ключа приведена на рис. 5. Комплементарное включение двух арсенид-галлиевых транзисторов требует одновременной подачи на их затворы разных логических уровней (нуля и единицы), что приводит к усложнению схемы управления ключом в целом.



**Рис. 5. Типовая схема ключа на основе арсенида-галлия**

Современные КМОП-ключи имеют малое сопротивление в замкнутом состоянии, малую проходную емкость в разомкнутом состоянии и высокую линей-

ность передаточной характеристики в полосе частот вплоть до 1 ГГц и выше. Эти ключи лучше всего подходят для использования в устройствах с малым потреблением. N-МОП-структура такого ключа приведена на рис. 6.

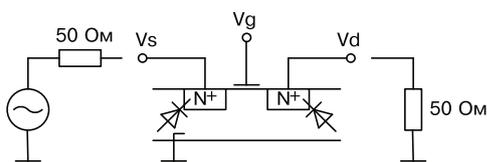


Рис. 6. N-МОП-структура ключа

К основным преимуществам КМОП-ключей можно отнести следующее: недорогой технологический процесс, в качестве управляющего используется сигнал положительной полярности, не требуется разделительный конденсатор, простота в использовании. Отметим, что управление КМОП-ключами может быть обеспечено как на основе КМОП-логики, так и ТТЛ-логики, что позволяет сопрягать эти ключи с микроконтроллерами, выполненными на основе разных технологий. Корпуса для КМОП-ключей имеют минимальные размеры по сравнению с корпусами ключей, выполненными на основе других технологических процессов. Напряжение питания КМОП-ключей лежит в диапазоне от 1.65 до 2.75 В. Ток потребления не более 1 мкА.

На рис. 7 приведена зависимость обратных потерь или потерь на затухание КМОП-ключа от частоты.

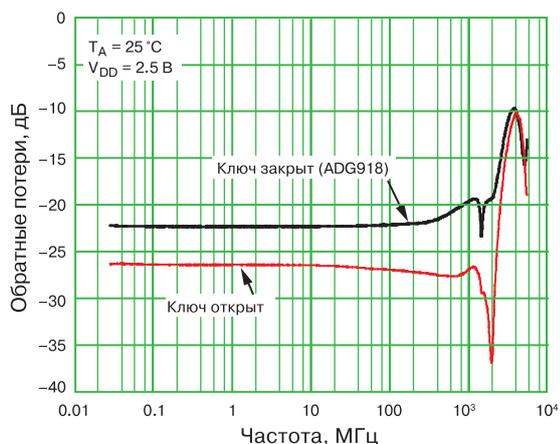


Рис. 7 Зависимость обратных потерь КМОП-ключа от частоты

КМОП-ключи имеют отличное время переключения – не более 5 нс, как показано на осциллограмме, рис. 8, причем это время несущественно зависит от изменения температуры, в то время как пара-

метры ключей на основе арсенида-галлия достаточно сильно подвержены влиянию температуры.

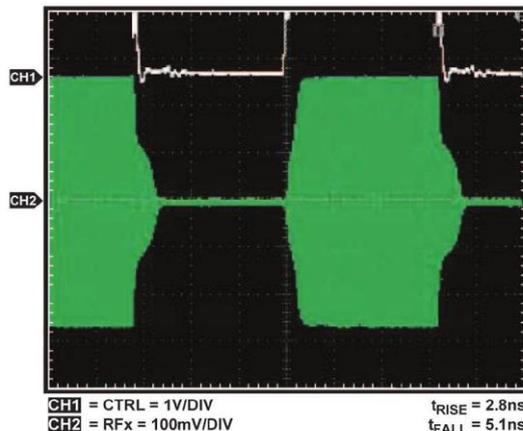


Рис. 8. Осциллограмма переключения КМОП-ключа ADG901

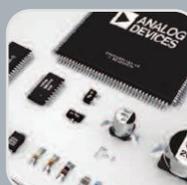
## ВЫВОДЫ

Современные КМОП-ключи имеют ряд преимуществ по сравнению с ключами, выполненными по другим технологиям, в том числе по технологии арсенида-галлия. Ключи семейства ADG9xx компании Analog Devices предназначены для работы в полосе частот до 3 ГГц, имеют низкий уровень потерь – не более 0.8 дБ на частоте 1 ГГц, уровень изоляции этих ключей не хуже 37 дБ на частоте 1 ГГц. Это позволяет применять такие ключи в приборах и устройствах различного назначения, включая портативные приборы с автономным питанием. Однако, следует отметить, что, если необходимая полоса частот ключа должна превосходить несколько гигагерц, а в некоторых случаях она выше десятков гигагерц, то основной технологией для таких ключей является арсенид-галлиевая технология. Это ключи семейства HMC784/HMC574/HMC545 и других семейств компании Analog Devices.

## VD MAIS

### Электронные компоненты и системы

- Микросхемы • Датчики • Оптоэлектроника
- Источники питания • Драйверы светодиодов
- Резонаторы и генераторы
- Дискретные полупроводники
- Пассивные компоненты
- СВЧ-компоненты
- Системы беспроводной связи



Дистрибуция и прямые поставки:  
Analog Devices, Bluetech, Cree, DDC, Dynex, Fordata, Foryard, Gaia, Geyer, IXYS, Kendell, Kingbright, Ledil, Littelfuse, Mean Well, Microsemi, Omron, Recom, Siti, Sonitron, Suntan, Telit, Vacuumschmelze, Xilinx, Yitran

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

We make it *possible*

- диапазон рабочих температур от  $-90^{\circ}$  до  $+400^{\circ}$  C
- срок службы 30 лет



Цельнометаллические демпферы



Резиновые виброизоляторы



Силиконовые виброизоляторы



Цельнометаллические подушки



Тросовые амортизаторы



Малогабаритные  
цельнометаллические  
амортизаторы



Шнуры изоляции  
электромагнитных волн



Пружинные изоляторы

Основным направлением работы фирмы Hutchinson является производство широкого ряда цельнометаллических демпферов (амортизаторов, виброизоляторов, виброопор), как малогабаритных – для различного вида электронного и навигационного оборудования, так и крупногабаритных – для различных областей применения.

Все изделия имеют широкий диапазон статической нагрузки и устойчивы к воздействию агрессивной среды, сохраняют свои характеристики в диапазоне температур от  $-90^{\circ}$  до  $+400^{\circ}$  C. Срок службы не менее 30 лет.

Рабочим телом демпферов является металлическая подушка, изготовленная из нержавеющей CrNi стальной арматурной проволоки.



VD MAIS – авторизованный торговый представитель фирмы Hutchinson Stop-Choc GmbH & Co. KG (Германия) в Украине  
тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (095) 283-8246,  
(048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ДРОССЕЛЯ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ \*

### GUIDELINES FOR PLACING THE INDUCTOR ON A SWITCH MODE POWER SUPPLY PRINTED CIRCUIT BOARD

В статье приведены рекомендации по размещению дросселя импульсного источника питания для минимизации уровня электромагнитных помех, создаваемых при работе преобразователя.

Ф. Достал

Abstract – The article provides recommendations for the placement of a choke of a pulsed power source to minimize the level of electromagnetic interference generated by the converter.

F. Dostal



**Вопрос:** Где на печатной плате импульсного источника питания следует размещать дроссель?

**Ответ:** В импульсных стабилизаторах дроссели используются для накопления и временного хранения энергии. Они часто имеют большие габариты и занимают значительную площадь на печатной плате импульсного источника питания. Отметим, что через дроссель протекает изменяющийся ток, однако его изменение происходит относительно медленно, а ток через ключи коммутации протекает с высокой частотой как в прямом, так и обратном направлениях по разным проводящим дорожкам. Таким образом, коммутация токов в импульсном источнике осуществляется достаточно быстро, при этом на печатной плате образуются две изолированные друг от друга токовые цепи с разными направлениями высокочастотных коммутируемых токов, которые соответствуют разным состояниям ключа. Отметим, что эти цепи должны быть как можно ко-

роче для минимизации паразитных индуктивностей. Наличие большой паразитной индуктивности может привести к формированию нежелательного напряжения смещения и увеличить уровень излучаемых источником электромагнитных помех выше допустимого. На рис. 1 приведена упрощенная принципиальная схема понижающего импульсного стабилизатора с выделенной пунктиром высокочастотной токовой цепью, через которую протекает коммутируемый ток.

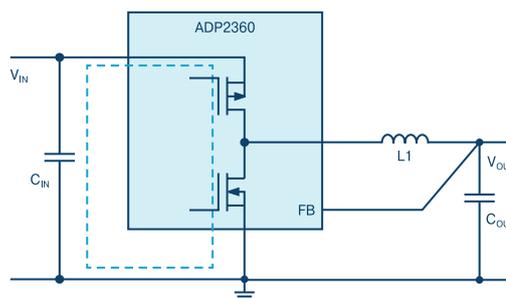


Рис. 1. Упрощенная схема импульсного стабилизатора

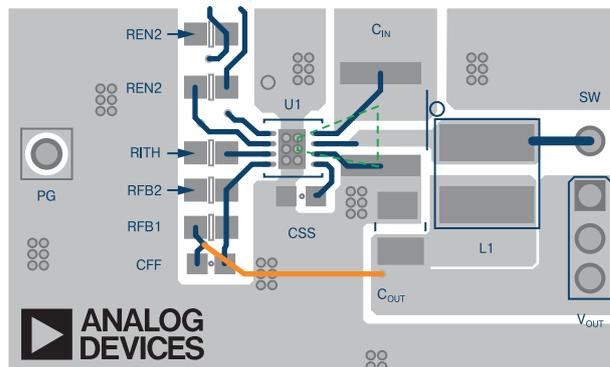
Как следует из рис.1, дроссель L1 не включен в цепь высокочастотного коммутируемого тока, из чего следует, что его расположение на печатной плате не является критическим. Однако, при этом желательно учесть следующие полезные правила, относящиеся к размещению дросселя на печатной плате: не следует размещать чувствительные к помехам проводящие дорожки под дросселем, например, на внутреннем слое или обратной стороне печатной платы, из-за того, что изменяющийся в дросселе ток формирует магнитное поле, которое может внести искажения в расположенные рядом с

\* Dostal F. Guidelines for Placing the Inductor on a Switch Mode Power Supply Printed Circuit Board. Analog Dialogue, 53-04, April, 2019. [www.analog.com](http://www.analog.com). Сокращенный перевод с английского и комментарии В. Романова.

ним проводящие дорожки; кроме того, дроссель обладает некоторой паразитной межвитковой емкостью, что может привести (за счет эффекта взаимосвязи) к возникновению наводок в других проводниках импульсного стабилизатора. Поэтому все проводники на печатной плате, которые необходимо защитить от помех и наводок, следует удалить на максимально возможное расстояние от расположенного на плате дросселя.

Пример корректной разводки печатной платы для импульсного понижающего стабилизатора на основе ИМС ADP2360 приведен на рис. 2. Критические высокочастотные токовые цепи на этом рисунке отмечены зеленым цветом. Цепь обратного тока, расположенная на внутреннем слое печатной платы и находящаяся на достаточном расстоянии от дросселя L1, выделена желтым цветом.

Под дросселем L1, как следует из рис. 2, проводники, включая земляной слой, отсутствуют, что защищает, в том числе, и земляной слой печатной платы от паразитных вихревых токов. В то же время наличие земляного слоя в конструкции печатной платы источника питания дает возможность использовать его в качестве экрана и способствует отводу дополнительного тепла, поэтому его защита от паразитных токов является важным условием корректного проектирования печатной платы импульс-



**Рис. 2. Разводка печатной платы для импульсного стабилизатора на основе ИМС ADP2360**

ного источника питания.

### ВЫВОДЫ

В заключение отметим, что, не смотря на то, что дроссель импульсного источника питания не используется в цепях коммутируемых высокочастотных токов, его размещению следует уделять особое внимание при проектировании таких источников. Пример корректного проектирования печатной платы для импульсного источника питания содержится в настоящей публикации.

# ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

■ производство

На поставляемые фирмой VD MAIS печатные платы предоставляется документация по выходному контролю:

- сертификат фирмы VD MAIS
- сертификат качества печатной платы от изготовителя
- протокол контроля основных параметров печатной платы
- протокол контроля внутренней структуры печатной платы с микрошлифом

CUSTOMER PIN: NPD-0400-0155    FACTORY PIN: T5727-103A    DATA CODE: 0017

Фото микрошлифа переходного отверстия

- протокол контроля паяемости
- протокол электрического тестирования

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (095) 283-8246,  
(048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmals.ua, www.vdmals.ua

VD MAIS

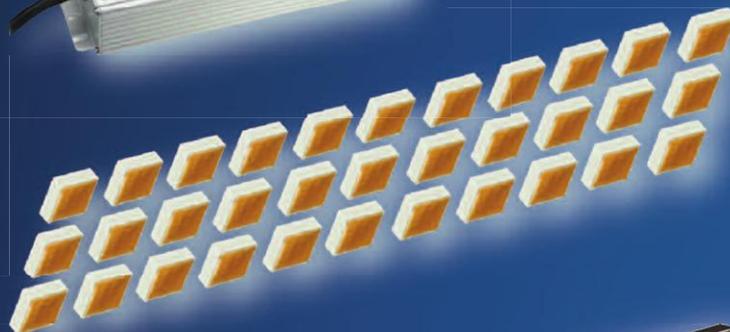
PCB Professionally

# Недорогие светильники для промышленного освещения

на базе светодиодов XLamp MHB-B



HLG-120H-C500  
HV output



XLamp MHB-B  
33 шт.



FLORENCE-3R



Основные преимущества XLamp® MHB-B:

- самая низкая удельная стоимость на единицу светового потока [лм/\$] из всех светодиодов, выпускаемых компанией Cree
- керамический корпус
- температура кристалла до 105 °C
- время, за которое деградация светового потока составляет 10%, не менее 21 400 часов.

Применение светодиодов серии MHB-B вместо светодиодов средней и малой мощности позволяет уменьшить стоимость светодиодов, несмотря на более высокую стоимость одного экземпляра (при той же интенсивности света потребуются меньшее число светодиодов), уменьшить габариты и массу светильника.

**VD MAIS** – официальный дистрибьютор компаний MEAN WELL, CREE и LEDIL в Украине

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (032) 245-5478,  
(048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua



## ВЫСОКОНАДЕЖНЫЕ КОМПОНЕНТЫ КОМПАНИИ GAÏA CONVERTER

### HI-REL MODULES FROM GAÏA CONVERTER

**В** статье рассматриваются фильтры помех и DC/DC-преобразователи компании Gaïa Converter.

*V. Котигорошко*

**Abstract -** The article discusses the features of EMI filter modules and DC/DC converter from Gaïa Converter.

*V. Kotigoroshko*

### ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматриваются основные технические характеристики и конструктивные особенности высоконадежных (Hi-rel) фильтров помех, модулей ограничения выбросов напряжения и DC/DC-преобразователей, выпускаемых компанией Gaïa Converter (Франция). Эти компоненты рекомендуются производителем для применения в самых разных приложениях [1-12]. Это аппаратура для гражданской и военной авиации, наземной и морской военной техники, а также разнообразное промышленное оборудование, медицинская техника, средства связи, железнодорожное оборудование и др., ориентированные на эксплуатацию в жестких условиях окружающей среды.

Источники питания для этих приложений должны соответствовать специфическим требованиям международных и национальных отраслевых стандартов, определяющих уровень излучаемых электромагнитных помех, наличие дополнительных функций, перечень и порядок проведения испытаний на воздействие жестких условий окружающей среды и пр. В стандартах оговариваются также уровни входных напряжений в разных режимах работы, параметры переходных процессов, в том числе и амплитуда помех на входе, продолжительность интервалов, в течение которых происходит снижение до нуля входного напряжения, и пр.

В реальных условиях в электрических цепях электротехнического оборудования могут возникать различные виды перегрузок. Наиболее часто в процессе эксплуатации сталкиваются с перенапряжениями, вызванными электромагнитными импульсами естественного (мощные грозовые разряды) и искусственного происхождения (излучения радиопередающих антенн, высоковольтных линий передачи электроэнергии, сетей электрифицированных железных дорог и т.п.). Кроме того, перенапряже-

ния могут возникать вследствие переходных процессов при работе оборудования, например, при коммутации индуктивных нагрузок или в результате воздействия электростатических разрядов.

Кратковременные электрические помехи возникают в результате внезапного выброса предварительно запасенной электромагнитной энергии в различных физических объектах. В частности, в результате проявления природных явлений, например, грозовых разрядов (молний). Кратковременные электрические помехи могут возникать в процессе работы разных электронных и электромеханических устройств (электродвигателей, генераторов, и т.п.), а также могут быть вызваны внешними электромагнитными импульсами или электростатическими разрядами.

Воздействие электромагнитных импульсов любого происхождения на электронные компоненты приводит к изменению их параметров, как за счет непосредственного поглощения энергии, так и вследствие воздействия на них индуцированных в электрических цепях оборудования импульсов напряжения и тока.

Устройства защиты от перенапряжений предотвращают протекание импульсов тока через защищаемое устройство вследствие замыкания его на общий провод. Они также ограничивают напряжение до значений, совместимых с характеристиками подсоединенных устройств.

В результате многочисленных исследований и измерений были определены ориентировочные параметры тестовых импульсов, соответствующие характеристикам импульсов перенапряжения, возникающих в результате переходных процессов в реальных условиях эксплуатации разного рода электротехнического оборудования. В соответствующих международных и национальных стандартах (например, EN50155, EN61000-4-5, HN-46-R01, EN60255 и др.), а также в стандартах для оборудо-

вания военного назначения (MIL-STD-1245, MIL-STD-704, DO-160D/E и др.) приводятся значения параметров тестовых импульсов и характеристики энергопитающей сети, используемые при испытаниях электротехнического оборудования на устойчивость к воздействию кратковременных импульсов напряжения. Продукция компании Gaia Converter соответствует рекомендациям ряда международных и европейских стандартов, используемых в оборонной индустрии, а также в авиационной промышленности и на железнодорожном транспорте.

Далеко не полный перечень основных применяемых в настоящее время стандартов, на которые можно найти ссылки в технической документации компании Gaia Converter, приведен ниже.

- MIL-STD-883 ("Методы, средства управления и процедуры для тестирования микросэлектронных устройств, пригодных для использования в военных и аэрокосмических электронных системах")
- DO-160 ("Условия окружающей среды и методика испытаний авиационного оборудования")
- MIL-STD 704 ("Параметры источников питания летательных аппаратов")
- EN2282 ("Параметры источников питания воздушных судов")
- MIL-STD-810 и MIL-STD-202 ("Методики климатических испытаний оборудования")
- MILSTD-1275 ("Характеристики используемых на военном транспорте систем энергоснабжения постоянного тока номинальным напряжением 28 В")
- DEF-STAN-61-5-6-6 ("Низковольтная система электропитания. Часть 6. Электрические системы постоянного тока напряжением 28 В в военных транспортных средствах")
- EN61000-4-5 ("Электромагнитная совместимость. Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения")
- HN-46-R01 ("Общие руководящие указания по проектированию и изготовлению контрольного, защитного и телекоммуникационного оборудования для электрических сетей")
- EN50155 ("Электронное оборудование, применяемое на железных дорогах для подвижного состава")

ва").

Некоторые из действующих стандартов в Украине приведены ниже.

- ДСТУ EN 50082-1 ("Электромагнітна сумісність. Загальний стандарт на несприйнятливність. Частина 1. Побут, торгівля та легка промисловість")
- ДСТУ EN 50121-4 ("Залізничний транспорт. Электромагнітна сумісність. Частина 4. Емісія та несприйнятливність сигнальної та телекомунікаційної апаратури")
- ДСТУ EN 50121-5 ("Залізничний транспорт. Электромагнітна сумісність. Частина 5. Емісія завод та несприйнятливність стаціонарних установок електроживлення та апаратури")

Вариант типовой принципиальной электрической схемы, использование которой позволяет защитить DC/DC-преобразователи от нежелательного воздействия выбросов напряжения, приведен на рис. 1. В зависимости от величины напряжения питания компания Gaia Converter рекомендует использовать компоненты фильтра с разными параметрами (табл. 1).

В этой схеме для ограничения импульсов напряжения используются TVS-диоды (Transient Voltage Suppression). При воздействии импульса перенапряжения TVS-диод ограничивает выброс напряжения до безопасного уровня, при этом ток протекает через диод на общий провод, минуя защищаемое устройство. В идеальном случае TVS-диод представляет собой разомкнутую цепь с током утечки. Если импульсное напряжение превышает пороговое напряжение, ток переходного процесса протекает через TVS-диод, при этом рассеиваемая мощность ограничивается максимально допустимой температурой кристалла. TVS-диоды разработаны и предназначены для защиты от мощных кратковременных импульсов перенапряжения, на что и указывает их название (transient voltage suppression diode).

#### Фильтр помех FGDS-12A-100V

Устанавливаемые, как правило, на входе DC/DC-преобразователей фильтры электромагнитных

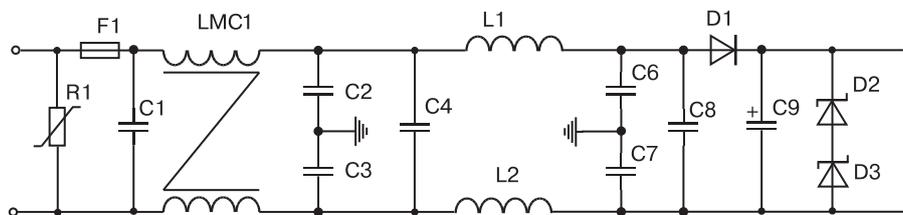


Рис. 1. Вариант структуры фильтра помех

**Таблица 1. Ориентировочные параметры элементов фильтра помех для разных напряжений**

Обозначение	Описание	
	Напряжение 72/96/110/125 В	Напряжение 24/37.5 В
R1	Варистор типа V150ZA8 (Little fuse)	Варистор типа V56ZA8 (Little fuse)
LMC1	Синфазный дроссель 470 мкГн/14 А (например, типа Pulse P0502 или аналогичный)	
C1, C4	Керамический конденсатор 2x220 нФ/200 В	Керамический конденсатор 2x1 мкФ/100 В
L1, L2	Катушка индуктивности типа Pulse PE53700 (4.7 мкГн, 15.4 А) или с аналогичными параметрами	
C8	Керамический конденсатор 2x220 нФ/200 В	Керамический конденсатор 2x1 мкФ/100 В
C2, C3, C6, C7	Керамический конденсатор 10 нФ	
C9	Алюминиевый конденсатор 10 мкФ/200 В	Алюминиевый конденсатор 10 мкФ/100 В
D2, D3	TVS-диод типа 5KP64A (Little fuse)	TVS-диод типа 5KP33A (Little fuse)

помех (Electro Magnetic Interference – EMI) типа FGDS-12A-100V рассчитаны на выходной ток до 12 А и входное напряжение до 100 В [2, 3]. К основным параметрам EMI-фильтров можно отнести соответствие их характеристик рекомендациям стандартов для аппаратуры военного назначения:

- MIL-STD-461D/E/F
- DO-160-C/D/E/F и других.

Минимальная рабочая температура – -40 °С, максимальная температура корпуса – 105 °С. По отдельному заказу поставляются фильтры (с суффиксом "Т" в обозначении) с минимальной рабочей температурой -55 °С. Типовая схема включения фильтра на входе DC/DC-преобразователя приведена на рис. 2. Основные параметры EMI-фильтра FGDS-12A-100V даны в табл. 2. При определении температуры корпуса необходимо учитывать, что тепловое сопротивление корпус-окружающая среда

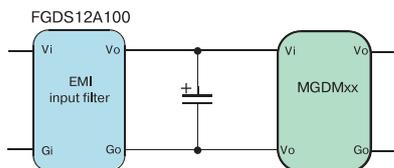
при естественной конвекции составляет 17 °С/Вт, а рассеиваемая мощность вычисляется из простого выражения  $P = RI^2$ , где, R – максимальное эквивалентное последовательное сопротивление фильтра.

Благодаря высокому рабочему входному напряжению (100 В) фильтр FGDS-12A-100V соответствует рекомендациям стандарта MIL-STD-704A/D/E/F (выбросы напряжения до 80 В/100 мс) и MIL-STD-1275 (100 В/50 мс). Фильтры изготавливаются в герметичном металлическом корпусе размерами 32.7×26.2×8.2 мм и массой 25 г.

Фильтр FGDS-12A-100V содержит устройство ограничения пускового тока. Хотя фильтрация помех осуществляется с использованием только пассивных компонентов, для ограничения тока применяется МОП-транзистор, поэтому при изменении полярности подключения фильтра не будет осуществляться ограничение амплитуды тока, несмотр-

**Таблица 2. Основные параметры EMI-фильтра FGDS-12A-100V**

Наименование	Значение
Вх. напряжение, В	4.5...100
Номинальное вх. напряжение, В	28
Макс. вых. ток, А	12
Макс. мощность в нагрузке, Вт	300
Макс. рассеиваемая мощность, Вт (при температуре 85 °С и токе 12 А)	6.5
Макс. эквивалентное последовательное сопротивление, Ом (при температуре 85 °С)	0.045
Тепловое сопротивление корпус-окружающая среда при естественной конвекции, °С/Вт	17
Электрическая прочность изоляции (вывод-корпус), В	500
Макс. температура корпуса, °С	105
Габаритные размеры, мм	32.7×26.2×8.2
Масса, г	25

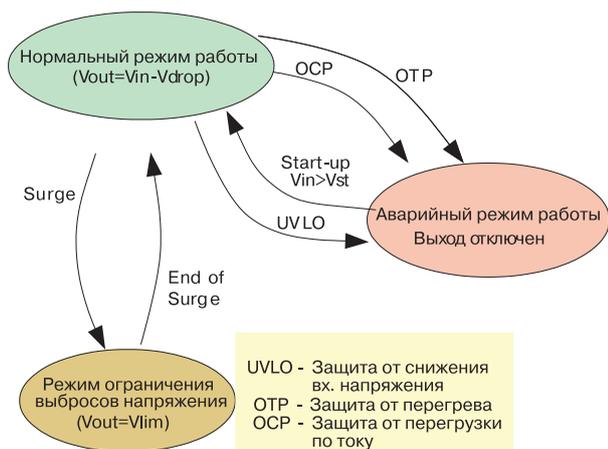


**Рис. 2. Типовая схема включения фильтра на входе DC/DC-преобразователя**

ря на то, что фильтр остается работоспособным.

**Модули ограничения выбросов напряжения LGDS-100/300**

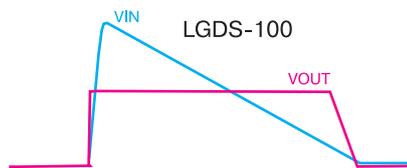
Чтобы соответствовать рекомендациям международных и региональных стандартов, компания Gaia Converter предлагает применять DC/DC-преобразователи совместно со своими модулями подавления перенапряжений, возникающих при переходных процессах. Входные модули типа LGDS-100/300 устанавливаются непосредственно перед DC/DC-преобразователями и обеспечивают защиту от кратковременных выбросов напряжения и фильтрацию электромагнитных помех. Основные параметры модулей LGDS-100/300 даны в табл. 3. Алгоритм работы приведен на рис. 3.



**Рис. 3. Алгоритм работы модулей ограничения выбросов напряжения**

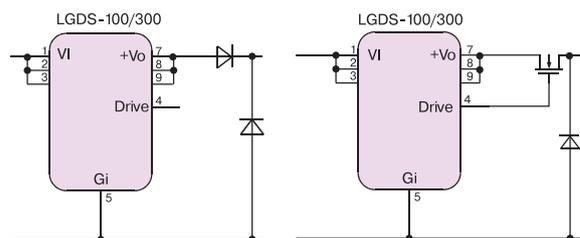
Для защиты цепей электронных устройств от воздействия перенапряжений могут использоваться различные методы защиты. Одним из эффективных схемотехнических способов защиты электрооборудования от воздействия выбросов напряжения является применение TVS-диодов. Временная диаграмма, иллюстрирующая ограничение выброса напряжения с использованием TVS-диода, приведена на рис. 4 [2].

Для защиты от неправильной полярности под-

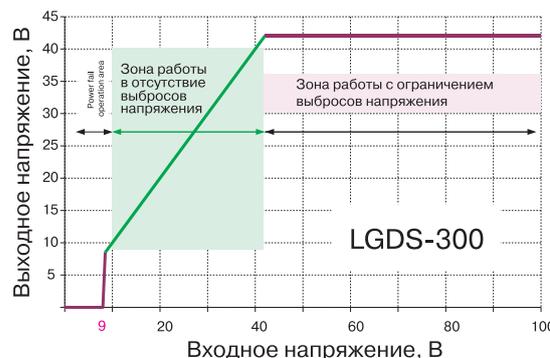
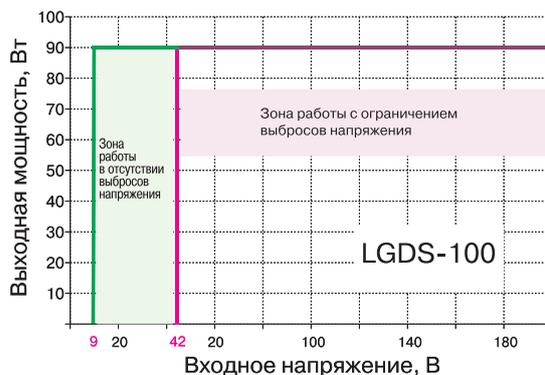


**Рис. 4. Временная диаграмма, иллюстрирующая ограничение выброса напряжения с использованием TVS-диода**

ключения можно использовать или стандартную схему с последовательно включенным полупроводниковым диодом, или вариант с МОП-транзистором в качестве "диода" (рис. 5). Режимы работы и передаточные характеристики модулей LGDS-100/300 приведены на рис. 6.



**Рис. 5. Варианты защиты от неправильной полярности подключения**



**Рис. 6. Режимы работы и передаточные характеристики модулей LGDS-100/300**

Таблица 3. Основные параметры модулей LGDS-100/300

Наименование	LGDS-300	LGDS-100
Вх. напряжение, В	9...42	9...42
Макс. вых. ток, А	20	10
Макс. вых. напряжение в режиме ограничения, В	44	44
Мин. вых. напряжение в режиме ограничения, В	40	40
Макс. мощность в нагрузке, Вт	300	100
Макс. рассеиваемая мощность, Вт (при токе, А)	3 (20)	1.5 (10)
Тепловое сопротивление корпус-окружающая среда при естественной конвекции, °С/Вт	12	12
Макс. температура корпуса, °С	105	105
Ток потребления в отсутствие нагрузки, мА	10	10
Время старта, мс	6	6
Скорость нарастания вых. напряжения, В/мс	5	5
Электрическая прочность изоляции (вывод-корпус), В	500	500
Габаритные размеры, мм	40.3×26.3×12.8	36.4×26.3×12.8
Масса, г	35	35

Модули ограничения выбросов напряжения LGDS-100 выдерживают импульсы напряжения с амплитудой до 202 В и длительностью до 350 мс или 101 В/400 мс [3], модули LGDS-300 – выбросы напряжения с параметрами 100 В/50 мс или 80 В/100 мс [4]. Такие характеристики соответствуют рекомендациям ряда международных стандартов. Для защиты от высоковольтных импульсов с длительностью до 70 мкс в документации, предоставляемой компанией, предлагается применять дополнительные фильтры типа FGDS или фильтр помех, реализованный с использованием пассивных электронных компонентов.

Для соответствия рекомендациям стандартов DEF-STAN 59-411 и DEF-STAN 61-5 (Великобрита-

ния) на входе модуля LGDS-100 компания Gaïa Converter предлагает устанавливать фильтр помех, схема которого приведена на рис. 7 [3]. Параметры элементов этого фильтра даны в табл. 4. Перечень стандартов, рекомендациям которых соответствуют модули LGDS-100/300, приведен в табл. 5.

В стандартах регламентируются предельные значения рабочего напряжения и параметры импульсов перенапряжения на входных силовых клеммах оборудования, подключенного к системе электроснабжения. На рис. 8 приведены рекомендованные в стандарте DO-160E структурная схема формирования тестового импульса перенапряжения и его параметры ( $E = 600 \text{ В}$ ,  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ) [12].

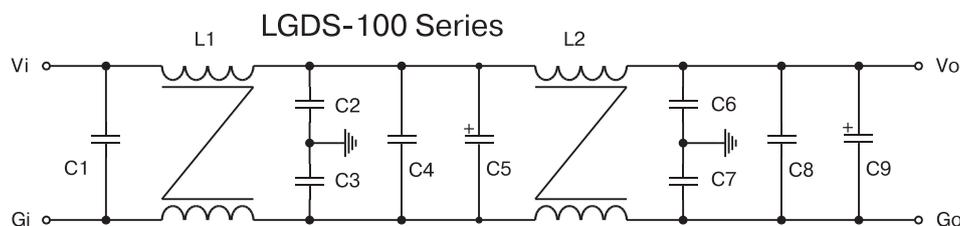


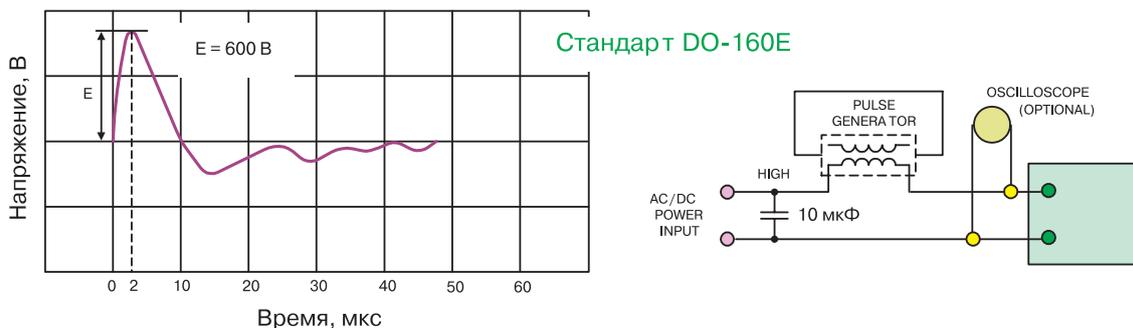
Рис. 7. Структура фильтра помех для защиты от перенапряжений с параметрами, приведенными в стандарте DEF-STAN 61-5

**Таблица 4. Ориентировочные параметры элементов фильтра помех, обеспечивающие выполнение рекомендаций стандарта DEF-STAN 59-411 и DEF-STAN 61-5**

Обозначение	Описание
L1, L2	Синфазный дроссель 590 мкГн/5.6 А (например, типа Pulse PO353 или другой синфазный дроссель с индуктивностью более чем 250 мкГн и соответствующим значением максимально допустимого тока)
C1	Керамический конденсатор 2x2.2 мкФ/100 В 1210 (например, GRM32ER71H475KA88 компании Murata) или аналогичные
C2, C3, C6, C7	Пленочный конденсатор 10 нФ/500 В (например, AVX: 1206 7 C 103 M)
C4, C8	Керамический конденсатор 10 x 2.2 мкФ/100 В 1210 (например, GRM32ER71H475KA88 компании Murata) или аналогичные
C5, C9	Танталовый или алюминиевый конденсатор емкостью 47...100 мкФ/250 В с низким значением ESR

**Таблица 5. Перечень стандартов, рекомендациям которых соответствуют модули LGDS-100/300**

LGDS-100		LGDS-300		Примечание
Стандарт	Параметры импульса	Стандарт	Параметры импульса	
DEF-STAN-61-5-6-6	202 В/350 мс	—	—	—
DEF-STAN-61-5-6-6	101 В/400 мс	—	—	—
MIL-STD-1275A/D	100 В/50 мс	MIL-STD-704A/F	80 В/75 мс	—
MIL-STD-704A/F	80 В/75 мс	AECMA EN2282	60 В/50 мс	—
AECMA EN2282	60 В/50 мс	AIR2021E	60 В/100 мс	—
AIR2021E	60 В/100 мс	DO-160E cat A/Z	80 В/100 мс	—
DO160E cat A/Z	80 В/100 мс	MIL-STD-1275A/D	100 В/50 мс	—
DEF-STAN-61-5-6-6	228 В/0.2 мкс	—	—	При наличии фильтра (см. рис. 7)
MIL-STD-1275A/D	250 В/70 мкс	MIL-STD-704A/F	600 В/10 мкс	При наличии фильтра типа FGDS
MIL-STD-704A/F	600 В/10 мкс	AECMA EN2282	400 В/100 мкс	
AECMA EN2282	400 В/100 мкс	AIR2021E	600 В/10 мкс	
AIR2021E	600 В/10 мкс	DO-160E cat A/Z	600 В 10 мкс	
DO160E cat A/Z	600 В/10 мкс	MIL-STD-1275A/D	250 В/70 мкс	


**Рис. 8. Структурная схема формирования тестового импульса перенапряжения и его параметры (DO-160E)**

### DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Компания Gaia Converter выпускает также многочисленные модификации DC/DC-преобразователей, отличающиеся уровнем выходной мощности, диапазоном входных напряжений и другими параметрами. Далее рассматриваются характеристики (табл. 6) высоконадежных (Hi-rel) DC/DC-преобразователей, ориентированных на эксплуатацию в жестких условиях окружающей среды. Это аппаратура для гражданской и военной авиации, наземной и морской военной техники, а также промышленного оборудования, системы связи и пр. [5-9]. Изделия для высоконадежных приложений подвергаются отбору в соответствии со стандартом MIL-STD-883C и отличаются, главным образом, параметрами надежности и подтвержденными протоколами испытаний.

Применение DC/DC-преобразователей с расширенным диапазоном входных напряжений существенно упрощает разработку входных цепей защиты от неблагоприятных воздействий переходных процессов и позволяет отказаться от использования дополнительных мер по защите от выбросов напряжения. Изолированные DC/DC-преобразователи компании Gaia Converter обеспечивают КПД более 90%, выпускаются в металлических герметизированных корпусах и могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур (-55...105 °C). Отсутствие в DC/DC-преобразователях оптической развязки значительно повышает их надежность. Преобразователи содержат специализированные устройства защиты и синхронизации, стабилизируют выходное напряжение во всем диапазоне нагрузок от нуля до полной мощности, имеют возможность подстройки выходного напряжения, а также дистанционного включения и выключения. Кроме

того, предусмотрено устройство плавного запуска, защиты от пониженного входного напряжения, повышенного выходного тока и перегрева, имеется также встроенный фильтр электромагнитных помех.

**MGDS-155.** Высоконадежные (Hi-rel) изолированные DC/DC-преобразователи MGDS-155 номинальной мощностью 150 Вт изготавливаются в алюминиевом корпусе и ориентированы на применение в системах с распределенной архитектурой электропитания, в которых входное напряжение изменяется в широком диапазоне значений (от 16 до 80 В). Преобразователи MGDS-155 выдерживают выбросы напряжения амплитудой до 100 В и длительностью до 0.1 с. Основные характеристики модификаций преобразователей MGDS-155 даны в табл. 7, 8. Структура DC/DC-преобразователя MGDS-155 приведена на рис. 9. Его отличительные особенности – повышенный уровень входного напряжения и возможность синхронизации импульсного преобразователя от внешнего сигнала. Кроме того, предусмотрена возможность дистанционного вкл./выкл. Для увеличения выходного напряжения допускается последовательное соединение выходов преобразователей.

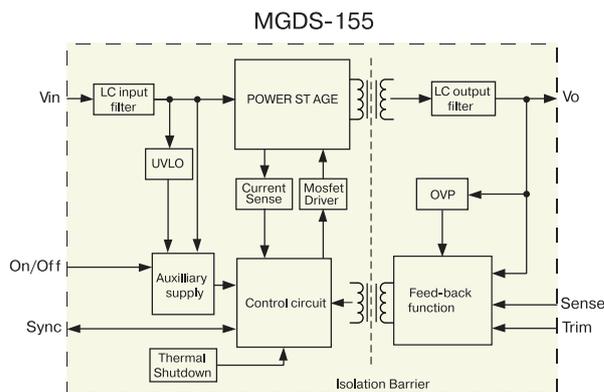


Рис. 9. Структура DC/DC-преобразователя MGDS-155

Таблица 6. Параметры некоторых изолированных DC/DC-преобразователей компании Gaia Converter

Тип	Габаритные размеры, мм	Мощность, Вт	Исполнение	Напряжение, В		Число выходов
				Входное	Выходное	
MGDD-80	48.5×40.7	80	Hi-rel	9-60	5-24	2
MGDSx-100	82.5×48.5	100		10.7-100	3.3-26	1
MGDSx-150	60.95×57.91	150		9-45, 16-80	3.3-28	
MGDS-155	57.91×36.83	155		9-45, 16-80	3.3-26	
MGDS-200	73.6×48.5	200		9-45, 16-80	3.3-24	

**Таблица 7. Основные параметры DC/DC-преобразователей MGDS-155 (Hi-rel)**

Параметр		MGDS-155
Вх. напряжение, В		16...80
Число выходов		1
Суммарная вых. мощность, Вт		150
КПД, %		90
Частота импульсного преобразователя, кГц		330
Время старта, мс		30
UVLO, напряжение включения, В		15.5
Погрешность установки вых. напряжения, % Уном		±2
Диапазон регулировки вых. напряжения, % Уном		±10
Максимальное отклонение вых. напряжения, В при изменении вх. напряжения от мин. до макс., тока нагрузки от 0 до макс.		±2.0
Уровень вых. шумов и пульсаций, п-п, мВ при Uвх.ном, в полосе 20 МГц	5 В	100
	12 В	240
	15 В	300
	24 В	520
Электрическая прочность изоляции, В		1500 (между вх. вых., 1 мин)
		300 (между вых., 1 мин)
Макс. допустимая величина емкостной нагрузки, мкФ (при вых. напряжении, В)		20 000 (5)
		3500 (12)
		1000 (15, 24, 28)
Сопротивление изоляции, МОм		100
Тепловое сопротивление (корпус-окружающая среда), °С/Вт.		11
Габаритные размеры, мм		57.91×36.83×12.9
Масса, г		85

**Таблица 8. Модификации DC/DC-преобразователей MGDS (Hi-rel) мощностью 155 Вт**

Тип	Напряжение, В		Ток, А
	Вх.	Вых.	
MGDS-155-O-C	16...80	5	30
MGDS-155-O-E	16...80	12	12.5
MGDS-155-O-F	16...80	15	10
MGDS-155-O-I	16...80	24	6.25
MGDS-155-O-J	16...80	28	5.35

В DC/DC-преобразователе MGDS-155 предусмотрена защита от уменьшения входного напря-

жения ниже (Undervoltage Lock-Out – UVLO) и увеличения выходного выше (Output Overvoltage Protection – OVP) допустимого уровня, защита от перегрузки по току (Output Current Limitation Protection – OCP) и перегрева (Over Temperature Protection – OTP). Значения тепловых сопротивлений DC/DC-преобразователя MGDS-155 при разных условиях отвода тепла приведены в табл. 9. Для ограничений выходного тока в случае короткого замыкания на выходе преобразователь переключается в "пульсирующий" режим работы hiccup, в котором осуществляется периодическая проверка наличия перегрузки. Преобразователь автоматически переключается в нормальный режим работы при отсутствии перегрузки по току. В режиме hiccup средний ток потребления составляет 25% от номинального тока. Устройство защиты от перегрева срабатывает и преобразователь выключается при достижении

**Таблица 9. Значения тепловых сопротивлений DC/DC-преобразователя MGDS-155 (Hi-rel) при разных условиях теплоотвода**

Механизм теплопередачи	Тепловое сопротивление, °C/Вт				
	Условия	Rth (h-a)	Условия	Rth (b-h)	Rth(b-a)
Естественная конвекция	Без теплоотвода	11	Без теплоотвода	—	11
	Радиатор 241404B91200G	7	Термопрокладка	0.14	7.14
	Радиатор 241404B92200G	4.5	Термопрокладка	0.14	4.64

Rth (h-a) – тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда  
Rth (b-h) – тепловое сопротивление корпус-радиатор  
Rth (b-a) – тепловое сопротивление корпус-окружающая среда

температуры корпуса  $120 \pm 5$  °C, гистерезис – 10 °C.

В преобразователях MGDS-155 предусмотрена возможность регулировки выходного напряжения с использованием внешнего резистора, который подключается к выводу (Vtrim).

Продукция класса Hi-Rel компании Gaia Converter подвергается отбору в соответствии со стандартами MIL-STD-810/202 и др. [1-9]. Перечень и условия проведения некоторых климатических испытаний DC/DC-преобразователей типа MGDS-155 при-

ведены в табл. 10 [5]. Изменение параметров окружающей среды при тестировании в соответствии со стандартом MIL-STD-810E (метод 507.3) приведены в табл. 11. Зависимости относительной влажности и температуры от времени испытаний иллюстрированы на рис. 10 [11].

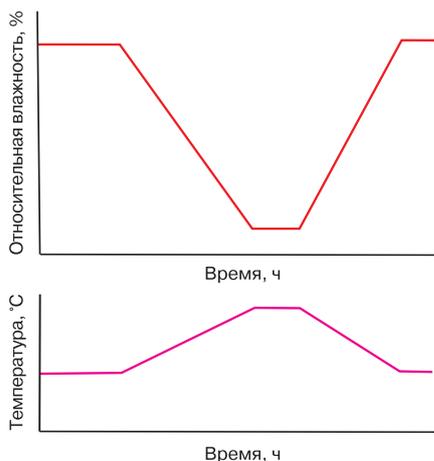
Термоудар. Эти испытания проводятся с целью определения устойчивости изделий к воздействию экстремальных температур, как высоких, так и низких, а также при скачкообразном изменении темпе-

**Таблица 10. Перечень и условия проведения некоторых климатических испытаний DC/DC-преобразователей типа MGDS-155**

Описание	Условия проведения испытаний		Стандарт
Повышенная температура	Продолжительность испытаний, ч	1000	MIL-STD-202G (метод 108A)
	Температура корпуса, °C	105	
	Рабочее состояние		
Влагостойкость (периодические изменения относительной влажности)	Кол. циклов	10	MIL-STD-810E (метод 507.3)
	Номер цикла испытаний	1	
	Длительность цикла, ч	24	
	Относительная влажность, %	60...88	
	Диапазон температур, °C	31...41	
Влагостойкость (установившийся уровень относительной влажности)	Относительная влажность, %	93	MIL-STD-202G (метод 103B)
	Температура, °C	40	
	Продолжительность испытаний, суток	56	
	Нерабочее состояние		
Термоциклирование	Кол. циклов	200	MIL-STD-202G (метод 102A)
	Диапазон температур, °C	-40...85	
	Время переноса, мин	40	
	Время выдержки, мин	20	
	Рабочее состояние		
Термоудар	Кол. циклов	100	MIL-STD-202G (метод 107G)
	Диапазон температур, °C	-55...105	
	Время переноса, с	10	
	Время выдержки, мин	20	
	Нерабочее состояние		

**Таблица 11. Изменение параметров окружающей среды при испытаниях в соответствии со стандартом MIL-STD-810E (метод 507.3)**

Продолжительность, ч	Температура, °C	Относительная влажность, %
6	31	88
1	32	85
1	34	80
1	36	76
1	37	73
1	38	69
1	39	65
1	40	62
4	41	59
1	39	65
1	37	69
1	36	73
1	34	79
1	33	85
1	32	85
1	32	88



**Рис. 10. Зависимости относительной влажности и температуры от продолжительности испытаний**

ратуры (при т.н. тепловом ударе), например, в процессе перемещения оборудования или деталей.

Изменения рабочих характеристик и физические повреждения изделия, вызванные тепловым ударом, являются результатом, главным образом, трансформации размеров или других физических

свойств. Последствия теплового удара – это растрескивание и расслоение наружного покрытия, растрескивание и разрушение герметизирующих компаундов, термостойких уплотнителей и пр., а также изменение электрических характеристик вследствие механического смещения или разрыва проводников или изолирующих материалов.

В стандарте MIL-STD-202G (метод 107G) предусмотрено проведение испытаний на воздействие теплового удара как в воздушной, так и в жидкой среде. Последний метод – более жесткий и в процессе его проведения могут повредиться некоторые компоненты, которые не могут быть разрушены при проведении испытаний в воздушной среде. Кроме того, этот метод предназначен для использования только с герметизированными изделиями.

**MPGS-14A.** Неизолированный DC/DC-преобразователь MPGS-14A с максимальным выходным током 14 А ориентирован на применение в качестве локализованных к нагрузке (Point of Load – PoL) понижающих импульсных стабилизаторов напряжения в системах с распределенной архитектурой электропитания. В таких системах, как правило, используется один преобразователь с гальванической развязкой и несколько малогабаритных неизолированных POL-модулей. Входное напряжение DC/DC-преобразователя MPGS-14A – 4.75...33 В (допускаются выбросы напряжения амплитудой до 42 В и длительностью до 0.1 с). Выходное напряжение регулируется в диапазоне от 1.2 до 24 В. Габаритные размеры 27.4×19.2×15.3 мм.

Основные характеристики преобразователя MPGS-14A даны в табл. 12 [7]. В преобразователе предусмотрена защита от уменьшения входного напряжения ниже допустимого уровня (UVLO), защита от перегрузки по току (OCP) и перегрева (OTP).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При проектировании систем электропитания высоконадежной аппаратуры приходится решать разные технические задачи, среди которых обеспечение электромагнитной совместимости, устойчивости к перенапряжениям, вибрациям и воздействию экстремальных температур. Продукция компании Gaïa Converter, характеризуется широкими функциональными возможностями, изготавливается с учетом жестких требований к параметрам и качеству изделий, что позволяет создавать надежные системы электропитания.

Hi-Rel-компоненты компании Gaïa Converter со-

**Таблица 12. Основные параметры модификаций неизолированных преобразователей MPGS-14A (Hi-rel)**

Параметр	Значение	
Вх. напряжение, В	4.75...33	
Число выходов	1	
Макс. вых. мощность, Вт	260	
КПД, % (тип.)	97	
Частота импульсного преобразователя, кГц	330	
Время старта, мс	2	
UVLO, напряжение включения, В	4.75	
Погрешность установки вых. напряжения, % Уном	±2	
Максимальное отклонение вых. напряжения, В при изменении вх. напряжения от мин. до макс., тока нагрузки от 0 до макс.	±2.0	
Уровень вых. шумов и пульсаций, п-п, мВ при Uвх.ном, в полосе 20 МГц	3.3 В	66
	>5 В	100
Макс. вых. ток, А	14	
Вых. напряжение, В (макс. вых. мощность, Вт)	1.2 (16.6)	
	1.5 (21)	
	1.8 (25.2)	
	2.5 (35)	
	3.3 (46.2)	
	5 (70)	
	12 (168)	
	15 (210)	
	20 (260)	
Макс. допустимая величина емкостной нагрузки, мкФ (при вых. напряжении, В)	50 000 (<15)	
	3000 (24)	
Габаритные размеры, мм	27.4×19.2×15.3	
Масса, г	12	

ответствуют рекомендациям стандартов DO-160, MIL-STD-704/810 и др. Благодаря высокой надежности они применяются в военной и гражданской авиации, военной технике (беспилотных летатель-

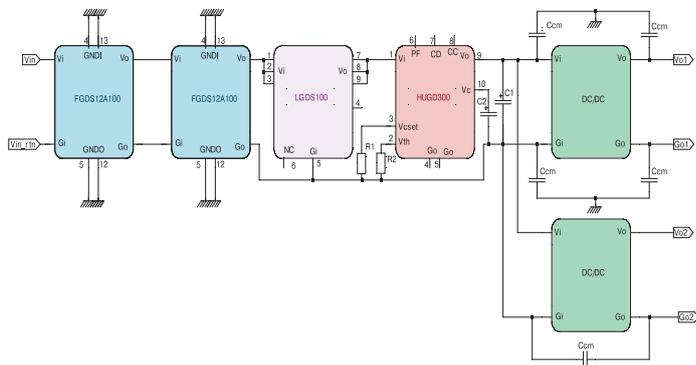
ных аппаратах, оборудовании кораблей военно-морского флота и пр.), на транспорте, в промышленном оборудовании (приборах гидролокации, нефтегазодобывающем оборудовании и пр.). В заключение на рис. 11 приведен вариант структуры источника питания постоянного тока, созданного на базе компонентов компании Gaia Converter. Источник содержит входной фильтр помех FGDS-12A-100V, модуль ограничения выбросов напряжения LGDS-100, модуль защиты от провалов входного напряжения HUGD-300 и изолированный DC/DC-преобразователь. Хотя в большинстве случаев использование одного фильтра помех FGDS-12A-100V вполне достаточно для соответствия рекомендациям стандартов MIL-STD-461 и DO-160, можно подключить второй фильтр для достижения большего подавления помех [2].

Пример расшифровки обозначения преобразователей серии MGDS-155 приведен на рис. 12. Компания Gaia Converter выпускает также DC/DC-преобразователи серии MGDS-155-S с увеличенным входным напряжением до 155...480 В.

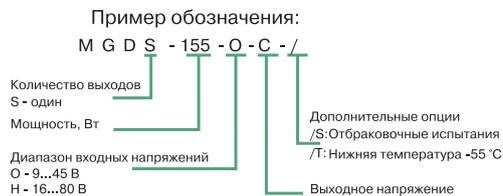
Более полную информацию о продукции компании Gaia Converter можно найти в [1-9] или получить в фирме VD MAIS – официальном дистрибьюторе компании Gaia Converter в Украине.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Surge & EMI filter recommendations for 4W up to 200W Modules.
2. MIL-STD-461 EMI input filter FGDS-12A-100V: up to 12A current.
3. Hi-Rel limiter module LGDS-100: up to 100W power.
4. Hi-Rel limiter module LGDS-300: up to 300W power.
5. Hi-Rel DC/DC converter MGDM-155: 150W power.
6. Hi-Rel DC/DC converter MGDM-200: 200W power.
7. Hi-Rel Non isolated DC converter MPGS-14A: 14A Power.
8. DC/DC Converters for high reliability and industrial applications.
9. DC/DC Converter. Avionics/Military Application.
10. MIL-STD-202G. Department of defense. Test method standard. Electronic and electrical component parts.
11. MIL-STD-810E. Military standard. Environments test methods and engineering guidelines.

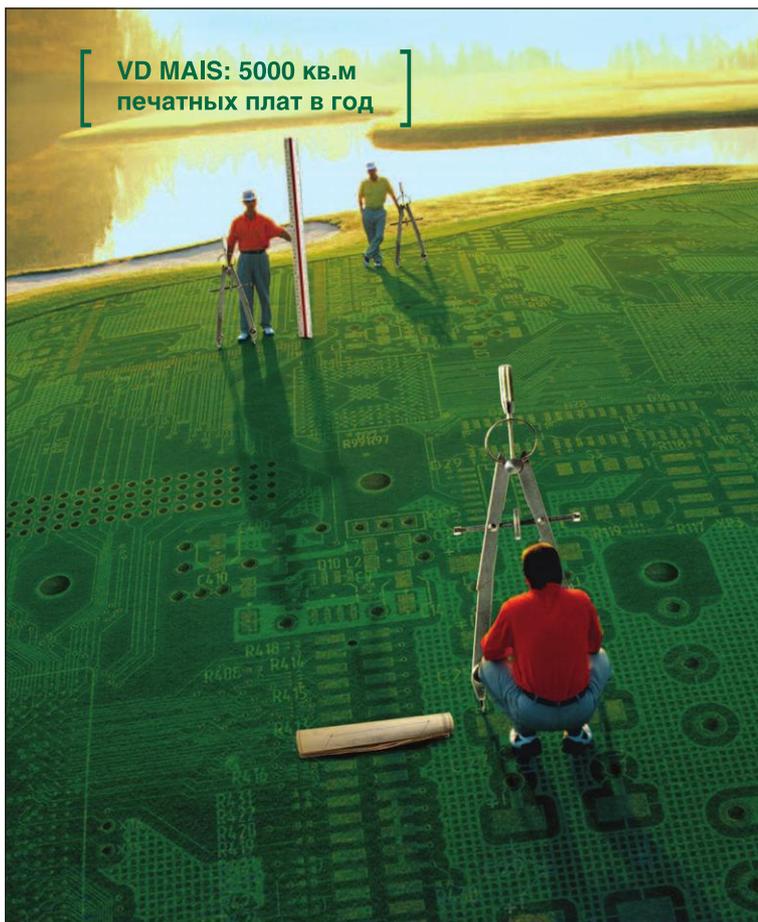


**Рис. 11. Вариант структуры источника питания постоянного тока, созданного на базе компонентов компании Gaia Converter**



**Рис. 12. Пример расшифровки обозначения преобразователей серии MGDS-155**

12. DO-160E. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment.



**VD MAIS: 5000 кв.м печатных плат в год**

# ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

## ■ ПРОИЗВОДСТВО

**VD MAIS – крупнейший поставщик печатных плат на рынке Украины**

**7 аргументов в пользу печатных плат, поставляемых VD MAIS:**

- принцип "все из одних рук"
- стабильное положение фирмы на рынке печатных плат
- высокая квалификация специалистов
- выбор проверенных фирм-изготовителей в зависимости от специфики заказа
- техническое сопровождение проекта при SMD-монтаже
- минимизация цен за счет объединения заказов
- сертификация систем экологического менеджмента и менеджмента качества фирмы согласно требованиям стандартов ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016.
- предоставление документации по выходному контролю печатных плат



тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (095) 283-8246, (048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

**VD MAIS**  
 PCB Professionally



# Источники питания

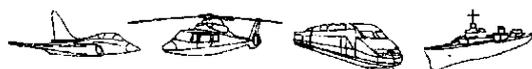
## для экстремальных условий применения серии MGDS-200

### Параметры:

- выходная мощность 200 Вт
- ультраширокий диапазон входных напряжений: 12-45, 16-80, 36-140 В
- один выход: 3.3, 5, 12, 15 или 26 В
- широкий диапазон регулировки выходного напряжения: 0...110%  $U_{ном}$
- КПД 91%
- габаритные размеры 73.6x48.5x12.8 мм
- диапазон рабочих температур -40...105 °С (корпус), -55...105 °С ("Т")
- уникальный теплоотвод со всех сторон корпуса

### Применение:

- аэрокосмическая и оборонная техника
- промышленное оборудование высшего класса
- транспорт



REDEFINING THE SOURCE OF POWER



**Gaia**  
CONVERTER  
AUTHORIZED DISTRIBUTOR

[www.gaia-converter.com](http://www.gaia-converter.com)



**VD MAIS** — официальный дистрибьютор компании Gaia Converter в Украине

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (032) 245-5478,  
(048) 734-1954, (095) 274-6897, [info@vdmairs.ua](mailto:info@vdmairs.ua), [www.vdmairs.ua](http://www.vdmairs.ua)

## МИКРОСХЕМЫ КОМПАНИИ ANALOG DEVICES ДЛЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА

### ANALOG DEVICE'S IC RF PRODUCTS

**В** статье рассматриваются компоненты компании Analog Devices, ориентированные на применение в СВЧ-оборудовании.

*В. Котигорошко*

*Abstract – This article introduces Analog Device's RF products.*

*V. Kotigoroshko*

### Введение

Расширение диапазона частот беспроводных сетей связи связано с возрастающей потребностью в более высокой пропускной способности телекоммуникационных систем.

Компания Analog Devices выпускает широкий спектр высококачественных интегральных СВЧ-компонентов. В статье рассматриваются микросхемы компании Analog Devices (усилители мощности, маломощные усилители, усилители в модульном исполнении и пр.), ориентированные на применение в оборудовании СВЧ-диапазона [1-15]. В 2014 г. компания Analog Devices приобрела пакет акций компании Hittite Microwave Corporation, которая специализировалась на выпуске высококачественных твердотельных СВЧ-усилителей, а также средств измерения для диапазона ВЧ/СВЧ.

Прогресс в развитии полупроводниковой технологии привел к появлению новых возможностей, и, не в последнюю очередь, благодаря освоению ведущими компаниями нитрид-галлиевой технологии. Такая тенденция – не случайна. Т.к., невзирая на ряд сложностей, с которыми приходится сталкиваться при работе с нитрид-галлиевыми компонентами, их преимущества очевидны. Это высокое пробивное напряжение сток-исток, высокая удельная мощность в сравнении с транзисторами, созданными на базе других технологий, а также высокая надежность работы в условиях повышенной температуры и воздействия радиации.

Частотный диапазон нитрид-галлиевых (GaN) и арсенид-галлиевых (GaAs) монокристаллических интегральных микросхем СВЧ-усилителей компании Analog Devices перекрывает спектр частот от сотен МГц до 100 ГГц. Помимо микросхем компания предлагает также разнообразные СВЧ-модули, отличающиеся высокой линейностью при большой выходной мощности. В модулях обеспечивается эффективный теплоотвод, они отличаются высокой надежностью

при повышенных температурах и ориентированы на применение в разнообразных проводных и беспроводных системах.

В настоящее время в устройствах систем беспроводной связи осуществляется обработка как аналоговых, так и цифровых сигналов. Однако, несмотря на то, что цифровая радиосвязь получает широкое распространение и популярность, передача сигналов осуществляется аналоговыми методами. При приеме/передаче радиосигналов необходимо обеспечить высокую стабильность параметров аналоговых приемопередающих трактов, а также высокую избирательность и чувствительность радиоприемных устройств.

Усилители являются одними из основных компонентов СВЧ-систем, а их технические характеристики зачастую во многом определяют архитектуру и возможности всей радиосистемы.

Традиционно СВЧ-усилители разделяют на маломощные усилители (Low Noise Amplifier – LNA) и усилители мощности (Power Amplifier – PA). Усилители LNA, как правило, работают строго на линейном участке передаточной характеристики, а их шумовые параметры определяются коэффициентом шума (Noise Figure – NF), который, по сути, устанавливает степень ухудшения отношения сигнал/шум, вносимое усилителем.

Характеристики усилителя мощности являются одними из наиболее важных критериев, т.к. усилители мощности зачастую являются наиболее дорогостоящими компонентами в составе систем и устройств, а их технические характеристики влияют на параметры всей системы.

Выходная мощность, коэффициент усиления, рабочая полоса частот, линейность амплитудной характеристики и стоимость – это основные параметры, включаемые в самое краткое описание технических характеристик усилителя.

Для усилителей большой мощности крайне важно обеспечить эффективный отвод тепла. В оборудовании

довании для авиакосмической техники важны высокий КПД, портативность, небольшая масса и высокая надежность.

В общем случае при прохождении любого сигнала через усилитель возникают линейные и нелинейные искажения. Различают показатели качества для работы в линейном режиме и характеристики, описывающие нелинейные свойства усилителя.

Линейность амплитудной характеристики (передаточной характеристики) имеет важное значение для всех без исключения радиотехнических систем, т.к. при высокой линейности снижаются амплитуды интермодуляционных составляющих в полезном спектре и, соответственно, уменьшаются ошибки при приеме данных. Усилитель искажает амплитуду и фазу входного сигнала, и эти искажения становятся ключевыми параметрами его технической спецификации.

При проектировании мощных усилителей их параметры линейности определяются, главным образом, характеристиками транзистора и импедансом.

### Нелинейные искажения

Существует ряд факторов, которые вызывают искажения при прохождении сигнала через усилитель. Эта проблема неизбежно возникает при разработке современного радиотехнического оборудования, т.к. для повышения эффективности каналов связи используются все более сложные виды модуляции (как амплитудной, так и фазовой). Усилитель должен воспроизводить амплитуду и фазу сигнала с минимальными искажениями. При этом очень часто для упрощения рассматривается только линейность амплитуды, а линейностью фазы пренебрегают.

Для удобства представления данных, используемых при сравнении разнотипных усилителей, акцентируется внимание именно на тех характеристиках, которые однозначно определяют их негативное воздействие на радиосигнал, например, возникновение паразитных спектральных составляющих.

При малых уровнях сигнала выходная мощность усилителя, как правило, имеет линейную зависимость от входной мощности (рис. 1), т.е. коэффициент усиления (отношение выходной к входной мощности) остается постоянным. При повышении мощности гармонического входного сигнала реальная амплитудная характеристика будет отклоняться от идеальной прямой из-за проявляющейся нелинейности устройства. Точка на графике, в которой от-

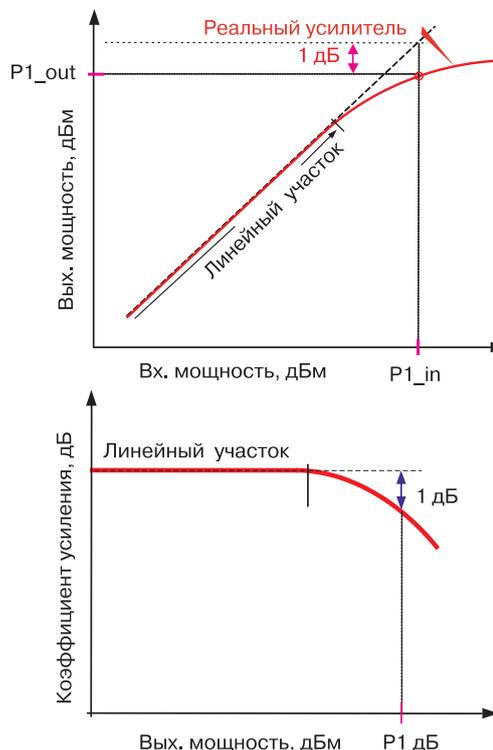
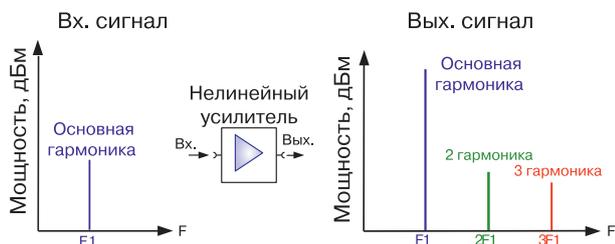


Рис. 1. Амплитудная характеристика усилителя

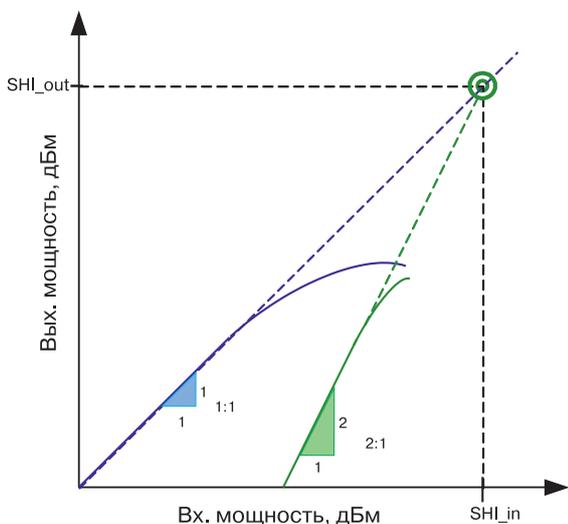
клонение амплитудной характеристики усилителя от линейной составляет 1 дБ, может быть охарактеризована соответствующим уровнем входного ( $P_{1\text{dB}}$ , дБ) или выходного сигнала ( $P_{1\text{dB}}$ , дБ). Чем больше значение сигнала в точке  $P_{1\text{dB}}$ , тем выше линейность усилителя. На практике только пассивные компоненты имеют идеальную линейную передаточную характеристику (например, резистивные attenuаторы считаются идеальными в широком диапазоне значений уровня мощности). Полупроводниковые компоненты, такие как усилители, отличаются нелинейностью. Нелинейная передаточная функция может быть аппроксимирована степенным рядом (рядом Тейлора). Во многих случаях при рассмотрении ограничиваются квадратичной и кубической составляющими степенного ряда, т.е. используется полином третьего порядка.

При возбуждении простого неидеального усилителя синусоидальным сигналом ( $F_1$ ) в выходном спектре возникают паразитные гармоники высоких порядков с частотой кратной основной гармонике (рис. 2). В рассматриваемом примере это 2 и 3 гармоники ( $2F_1$  и  $3F_1$ ). Уровни этих гармоник зависят от значений коэффициентов аппроксимирующей функции, но, кроме того, они также зависят от порядка ( $n$ ) гармоники и входного уровня. Причем,



**Рис. 2. Спектральные составляющие на входе и выходе нелинейного усилителя**

прирост уровня гармоник при повышении входного сигнала увеличивается пропорционально их порядку ( $n\Delta$ , дБ). На рис. 3 в логарифмическом масштабе приведены зависимости выходной мощности (кривая синего цвета) и мощности второй гармоники (зеленого цвета) от входной. Прирост уровня мощности ( $\Delta$  дБ) второй гармоники в два раза выше, чем мощности выходного сигнала.



**Рис. 3. Зависимости выходной мощности (кривая синего цвета) и мощности второй гармоники (зеленого цвета) от входной мощности**

В разного рода технических спецификациях, как правило, ограничиваются только сведениями об уровнях 2-й и 3-й гармоник. При этом указывается не их абсолютная величина, а относительная, т.е. разница между уровнем основной гармоники и уровнем гармонических составляющих на выходе ( $AnF$ ). Такие характеристики усилителей применимы лишь для вполне определенной входной или выходной мощности, значения которых также должны быть обязательно указаны, что в определенной мере является недостатком этих характеристик.

Вследствие этого широкое распространение по-

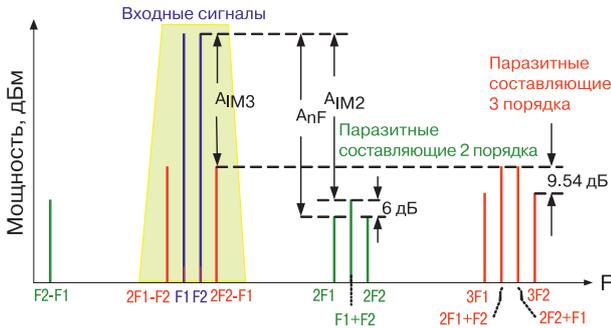
лучила другая независимая от входного уровня характеристика нелинейности устройств, причем намного более удобная для сравнений. Это входная или выходная мощность в точке пересечения продолжений линейных участков амплитудных характеристик выходного сигнала и гармоник более высоких порядков, к примеру, второй (см. рис. 3), обозначенные как SHI\_in (Second Harmonic Intercept) или SHI\_out. В реальных устройствах этого уровня мощности нельзя достичь, т.к. область насыщения амплитудной характеристики наблюдается уже при гораздо меньших уровнях входной мощности.

Для количественной оценки нелинейности устройств, как правило, проводятся испытания с применением двухчастотных сигналов. В этом случае измеряются наиболее важные нежелательные проявления нелинейности – интермодуляционные искажения (Intermodulation Distortion – IMD). В процессе интермодуляции происходит паразитная модуляция несущих и возникают нежелательные комбинационные составляющие второго (AIM2) и третьего (AIM3) порядков с частотами, являющимися суммой и разностью частот входных сигналов. Эффект искажения амплитуд для двухчастотного сигнала можно рассчитать для всех его спектральных составляющих, если предположить, что мгновенные напряжения на входе и выходе связаны следующей полиномиальной зависимостью [1]

$$V_{OUT}(t) = a_0 + a_1 \cdot V_{IN}(t) + a_2 \cdot V_{2IN}(t) + a_3 \cdot V_{3IN}(t),$$

где,  $V_{IN}(t) = A \sin(2\pi F_1 \cdot t) + B \sin(2\pi F_2 \cdot t)$ .

Если на входе неидеального усилителя присутствуют два гармонических сигнала ( $F_1$  и  $F_2$ ), то в выходном спектре возникают не только паразитные гармонические составляющие высоких порядков ( $nF$ ), но и интермодуляционные составляющие с разностными частотами (рис. 4). В зависимости от назначения устройства, составляющие как четных, так и нечетных порядков могут создавать существенные помехи. Некоторые из них можно отфильтровать. Однако составляющие спектра третьего порядка с частотами  $2F_1 - F_2$  и  $2F_2 - F_1$  зачастую находятся в рабочей полосе частот. Их нельзя отфильтровать даже очень узкополосным фильтром. Кроме того, в результате полиномиального разложения с учетом кубических составляющих аппроксимирующего полинома появляются две составляющие, частоты которых точно совпадают с частотами полезных входных сигналов ( $F_1$  и  $F_2$ ). Как и в случае с одночастотным входным сигналом,



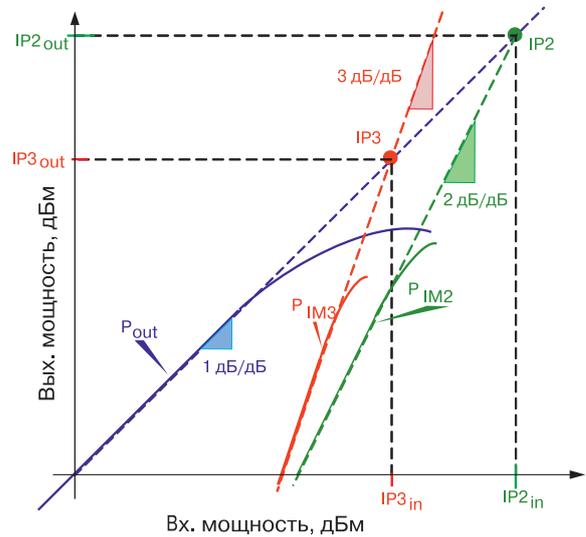
**Рис. 4. Выходной спектр, ограниченный составляющими не выше третьего порядка, при наличии на входе нелинейного усилителя двух сигналов с близкими частотами**

прирост уровня интермодуляционных составляющих увеличивается пропорционально их порядку (т.е.  $\Delta_{\text{вых}} = n\Delta_{\text{вх}}$ , дБ).

Если в технической документации приводятся сведения об амплитудах интермодуляционных составляющих по отношению к амплитуде основной гармоники, то в таком случае следует обязательно указывать величину входной или выходной мощности, при которой получены эти данные, что не всегда удобно при сравнении параметров разнотипных усилителей.

На рис. 5 в логарифмическом масштабе приведен график зависимости уровня мощности выходного сигнала (кривая синего цвета) от мощности входного сигнала. Кроме того, приведены зависимости интермодуляционных составляющих второго порядка с частотами  $F_2 \pm F_1$  (кривая зеленого цвета) и третьего порядка с частотами  $2F_2 - F_1$  и  $2F_1 - F_2$  (красного цвета). Наклон кривой зависимости прироста выходной мощности сигнала от входной, т.е. отношение изменения выходной мощности к изменению входной – 1:1 ( $\Delta_{\text{вых}}/\Delta_{\text{вх}} = 1$  дБ/дБ). Наклон графика зависимости интермодуляционных продуктов второго порядка – 2:1 (2 дБ/дБ), третьего – 3:1 (3 дБ/дБ). Это означает, что наклон графиков изменения мощности интермодуляционных составляющих  $n$ -порядка равен  $n \cdot \text{дБ/дБ}$ . Необходимо учитывать, что указанные зависимости справедливы лишь для малых сигналов, т.е. на линейном участке передаточной характеристики (как правило, ниже точки  $P_1$  дБ примерно на 6...10 дБ).

Таким образом, уменьшая с помощью аттенюатора мощность на входе приемника, например, на 1 дБ, полезный сигнал на выходе уменьшается также на 1 дБ, но при этом интермодуляционные продукты второго порядка уменьшаются на 2 дБ, а третьего порядка – на 3 дБ.



**Рис. 5. Графики зависимости мощности интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка от уровня входной мощности**

Входная и выходная мощность в точке пересечения продолжений линейных участков амплитудных характеристик выходного сигнала и интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка обозначаются, соответственно, как  $IP2_{in}$  (Intercept Point),  $IP3_{in}$ ,  $IP2_{out}$ ,  $IP3_{out}$  (см. рис. 5). Как правило, именно эти характеристики СВЧ-усилителей приводятся в технической документации. При описании параметров СВЧ-усилителей также часто используется такой термин, как точка пересечения интермодуляции, например, третьего порядка по выходу – OIP3 (Output IP3), или по входу – IIP3 (Input IP3), а также по аналогии – OIP2 (Output IP2) или IIP2 (Input IP2). Соответственно, под точкой пересечения, к примеру, интермодуляции третьего порядка по выходу OIP3 для двухтонового сигнала с частотами  $F_1$  и  $F_2$  и одинаковыми уровнями подразумевается такая аппроксимированная мощность тона выходного сигнала, при которой она равна мощности продукта нелинейности третьего порядка на частоте  $2F_2 - F_1$  (или  $2F_1 - F_2$ ).

Прежде для описания интермодуляционных показателей, как правило, использовался коэффициент интермодуляции или динамический диапазон по интермодуляции, однако впоследствии повсеместно перешли к использованию такой характеристики, как точка пересечения интермодуляции. Этот параметр весьма удобный вследствие своей универсальности, поскольку он однозначно характеризует как линейность, так и динамический диапазон усилителя или любой другой нелинейной цепи.

Мощность в точке пересечения является достаточно постоянной величиной для данного устройства, в отличие от других параметров, значения которых зависят от уровня входной мощности.

Еще одна из важных характеристик усилителей мощности – это коэффициент PAE (Power-Added Efficiency), который, по сути, отражает энергоэффективность усилителя. Этот параметр, в отличие от традиционного КПД ( $\eta = P_{RFOUT}/P_{DC}$ ), вычисляется из следующего простого выражения

$$PAE = (P_{RFOUT} - P_{RFIN})/P_{DC} = (P_{RFOUT} - P_{RFIN})/V_{DC} \times I_{DC}$$

### Универсальные маломощные СВЧ-усилители

ADL5610, ADL5611, ADL5542, ADL5544, ADL5545 – СВЧ-усилители (gain block) компании Analog Devices. В табл. 1 даны их основные типовые параметры. Т.к. их характеристики зависят от многих факторов (в первую очередь, от рабочей полосы частот), это необходимо учитывать при выборе оптимального усилителя для конкретного приложения. СВЧ-усилители ADL5610/1, ADL5542/4/5 – сравнительно недорогие микросхемы (1.5...2 \$ в партии 1000 шт.),

ориентированные на широкий спектр применений, в том числе, в качестве широкополосных усилителей высокой и промежуточной частоты.

В табл. 2 приведены типовые параметры СВЧ-усилителя типа ADL5610 для узкой полосы частот ( $\pm 50$  МГц), в табл. 3 – типовые зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты для микросхем типа ADL5610/11 и ADL5544.

На рис. 6 приведен вариант схемы подключения микросхемы ADL5610. На рис. 7 показаны оценочная плата XM-A5E7-0404D (ADL5610), предлагаемая компанией X-Microwave, и AD-TRXBOOST1-EBZ (ADL5610) – компанией Analog Devices. Зависимость коэффициента усиления (GAIN), коэффициента шума (NF), выходной мощности на уровне P1 и OIP3 для усилителя типа ADL5610 приведены на рис. 8.

На рис. 9 приведены графики зависимости коэффициента усиления от частоты и температуры для усилителя типа ADL5544, на рис. 10 – графики зависимости коэффициента усиления и коэффициента шума от частоты и температуры для усилителя типа ADL5545.

Оценочная плата ADL5544-EVALZ (ADL5544) по-

**Таблица 1. Ориентировочные типовые параметры СВЧ-усилителей ADL5610/1, ADL5542/4/5**

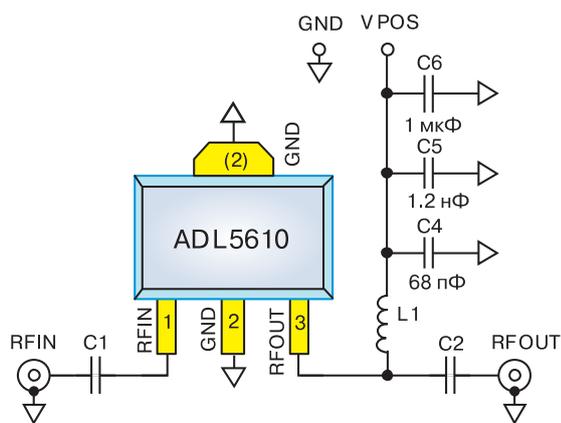
Параметр	ADL5610	ADL5611	ADL5542	ADL5544	ADL5545
Диапазон частот, ГГц	0.03...6	0.03...6	0.02...6	0.03...6	0.03...6
Коэффициент усиления (GAIN), дБ	18.4	22.2	18.7	17.4	24.1
Коэффициент шума на частоте 900 МГц (тип.), дБ	2.2	2.1	3.0	2.9	2.9
Максимальная входная мощность, дБм	20	20	10	18	18
Мощность на уровне P1 (тип.), дБм	20.4	21	18	17.6	18.1
Мощность на уровне OIP3 (тип.), дБм	38.4	40	39	34.9	36.4
Входное и выходное сопротивление, Ом	50	50	50	50	50
Напряжение питания, В	5	5	5	5	5
Ток потребления ( $I_{DD}$ ), мА	92	94	93	55	56
Максимальная рассеиваемая мощность ( $P_{DISS}$ ), Вт	0.8	0.8	0.65	0.4	0.4
Тепловое сопротивление, °C/Вт	52	52	28.5	53	53
Диапазон рабочих температур, °C	-40...105	-40...105	-40...85	-40...105	-40...105
Кол. выводов, тип корпуса и габаритные размеры (мм)	SOT-89 (4.6×4.25)	SOT-89 (4.6×4.25)	8-LFCSP (3×3)	SOT-89 (4.6×4.25)	SOT-89 (4.6×4.25)
Цена (в партии 1000 шт.), \$	1.99	1.99	1.55	1.35	1.35

**Таблица 2. Типовые параметры СВЧ-усилителя ADL5610**

Частота, МГц		3500	4000	5000
Коэффициент усиления, дБ		17.6	17.9	15.3
Погрешность коэффициента усиления, дБ	В полосе частот ±50 МГц	±0.04	±0.04	±0.11
	В диапазоне температур -40...105 °С	±0.45	±0.84	±1.27
	При напряжении питания 5.0±0.25 В	±0.19	±0.24	±0.33
Мощность на уровне P1, дБм		17.4	16.4	15.7
Мощность на уровне OIP3, дБм		29.4	27.6	26.1
Коэффициент шума, дБ		3.0	3.2	4.4

**Таблица 3. Типовые зависимости параметра S<sub>21</sub> от частоты**

Частота, МГц	S21		
	ADL5610	ADL5611	ADL5544
4300	17.448	18.987	15.58441
4440	16.876	18.248	15.44684
4500	16.212	17.627	15.38641
4600	15.849	17.415	15.2557
4700	15.707	17.300	15.18857
4800	15.581	17.180	15.08704
4900	15.413	16.938	14.98061
5000	15.210	16.723	14.92996

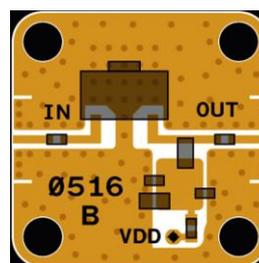


**Рис. 6. Вариант схемы подключения микросхемы ADL5610**

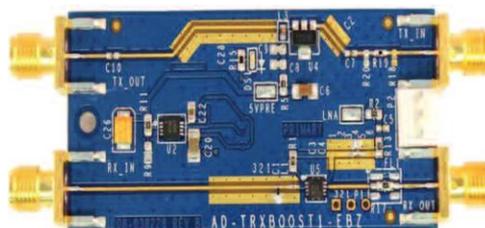
казана на рис. 11. Микросхемы ADL5610/1 и ADL5542/4/5 очень близкие по параметрам и конструктивному исполнению высокочастотные усилители с низким уровнем собственных шумов, изготавливаемые в миниатюрных корпусах.

В табл. 4, 5 приведены основные типовые пара-

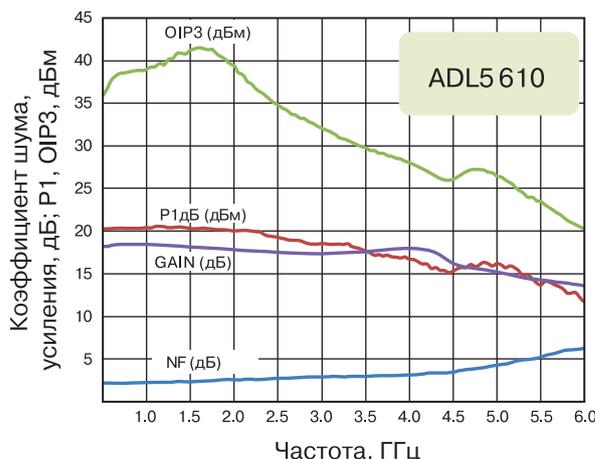
XM-A5E7-0404D



AD-TRXBOOST1-EBZ



**Рис. 7. Оценочная плата XM-A5E7-0404D (X-Microwave) и AD-TRXBOOST1-EBZ (Analog Devices)**



**Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления (GAIN), коэффициента шума (NF), выходной мощности на уровне P1 и OIP3 для усилителя ADL5610**

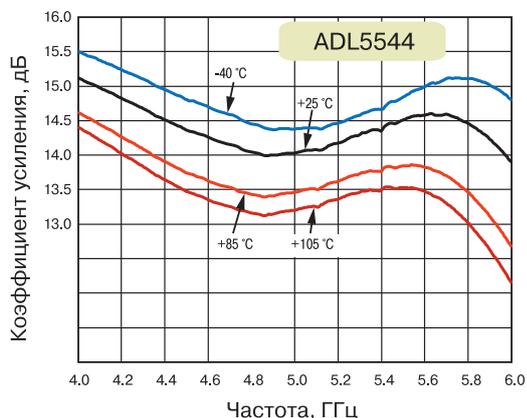


Рис. 9. Графики зависимости коэффициента усиления от частоты и температуры для усилителя типа ADL5544

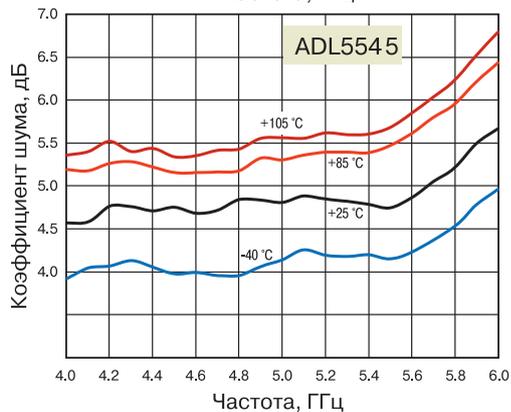
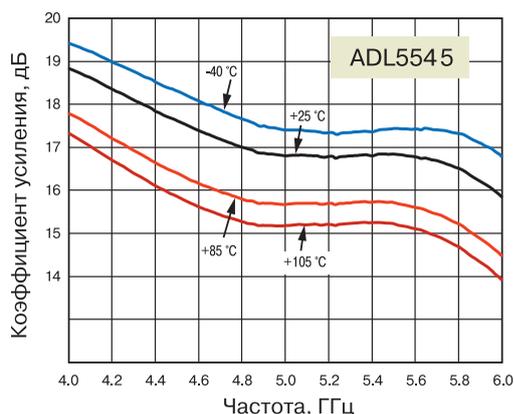


Рис. 10. Зависимости коэффициентов усиления и шума от частоты и температуры для усилителя типа ADL5545



Рис. 11. Оценочная плата ADL5544-EVALZ

метры СВЧ-усилителей (gain block) HMC311LP3, HMC313, HMC788A и HMC3587.

HMC311LP3, HMC313 – сверхвысокочастотные интегральные микросхемы (Monolithic Microwave Integrated Circuit – MMIC). Эти монокристаллические СВЧ-усилители построены на базе биполярных транзисторов с гетеропереходом (Heterojunction Bipolar Transistor – HBT), созданных с использованием технологии GaAs InGaP.

Структура СВЧ-усилителя на базе микросхем HMC311, а также оценочная плата типа XM-A662-0404D (HMC311) компании X-Microwave приведены на рис. 12. Структура СВЧ-усилителей с использованием микросхем HMC313 и HMC788A – соответственно, на рис. 13, 14.

HMC788A – сверхвысокочастотные интеграль-

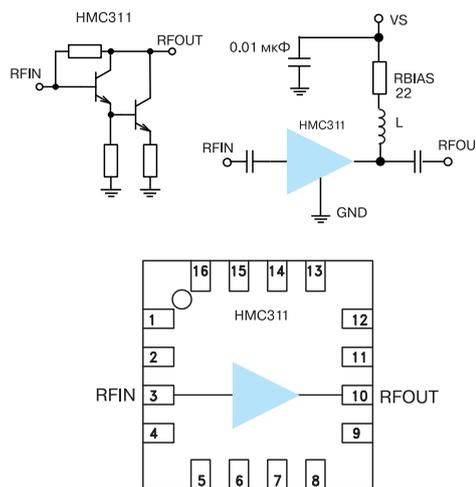


Рис. 12. Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC311 и оценочная плата XM-A662-0404D

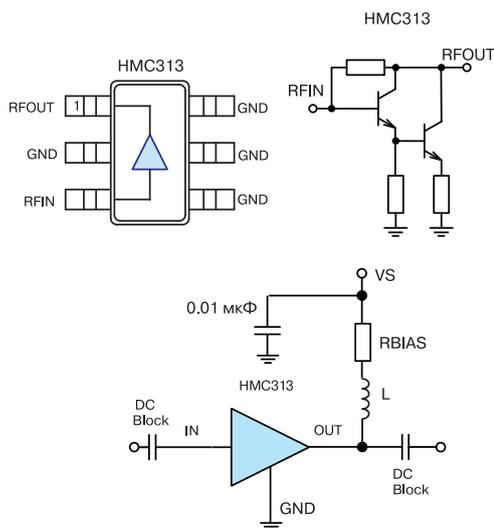


Рис. 13 Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC313

Таблица 4. Типовые параметры СВЧ-усилителей HMC311LP3, HMC313, HMC788A и HMC3587

Параметр	HMC311LP3	HMC313	HMC788A	HMC3587
Диапазон частот, ГГц	0...6	0...6	0.01...10	4...10
Коэффициент усиления (GAIN), дБ	14.5	17	14	14.5
Коэффициент шума (тип.), дБ	4.5	6.5	6.0	3.5
Максимальная входная мощность, дБм	10	20	10	12
Мощность на уровне P1 (тип.), дБм	15.5	14	20	13
Мощность на уровне OIP3 (тип.), дБм	32	27	33	25
Входное и выходное сопротивление, Ом	50	50	50	50
Напряжение питания, В	5	5	5	5
Ток потребления ( $I_{DD}$ ), мА	55	50	76	44
Максимальная рассеиваемая мощность ( $P_{DISS}$ ), Вт	0.339	0.259	0.76	0.512
Тепловое сопротивление, °C/Вт	192	251	118	127
Диапазон рабочих температур, °C	-40...85	-40...85	-40...85/ -40...105	-40...85
Кол. выводов, тип корпуса и габаритные размеры (мм)	16-QFN (3×3)	SOT-23 (3×3)	6-LFCSP (2×2)	12-LFCSP (3×3)
Цена (в партии 100...499 шт.), \$	5.2	1.76	11.3/22.04	13.98

Таблица 5. Параметры СВЧ-усилителей HMC311LP3, HMC788A и HMC3587

Параметр	HMC311LP3	HMC788A	HMC3587
Диапазон частот, ГГц	4...6	0.01...6	4...5
Коэффициент усиления (GAIN), дБ	14	14	14.5
Коэффициент шума (тип.), дБ	4.5	6.0	4.5
Нестабильность коэффициента усиления (тип.), дБ/°C	0.012	0.0014	0.009
Возвратные потери по входу, дБ	15	16	14
Возвратные потери по выходу, дБ	15	9	12
Мощность на уровне P1 (тип.), дБм	13	20	11
Мощность на уровне OIP3 (тип.), дБм	24	33	23

ные микросхемы (MMIC) размерами всего 2×2 мм (6-LFCSP). Эти арсенид-галлиевые (GaAs) усилители созданы на базе полупроводниковых структур с использованием псевдоморфных транзисторов с

высокой подвижностью электронов (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor – pHEMT).

HMC3587 – MMIC HBT СВЧ-усилители с гарантированными параметрами в полосе частот от 4 до 10

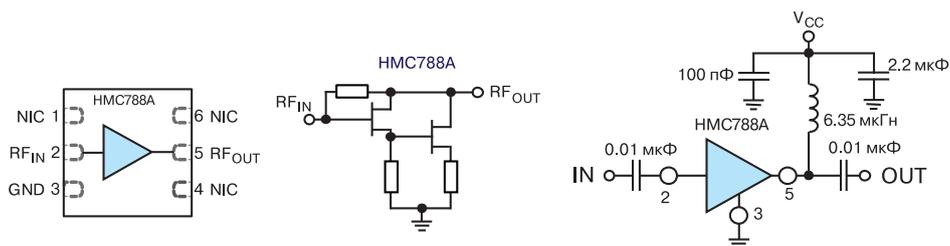


Рис. 14. Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC788A

ГГц размерами всего 3×3 мм, изготавливаемые в корпусе типа 12-LFCSFP. В отличие от микросхем HMC311/313/788 этот усилитель содержит встроенные конденсаторы на входе и выходе для развязки по постоянному току.

**Усилители мощности СВЧ-диапазона**

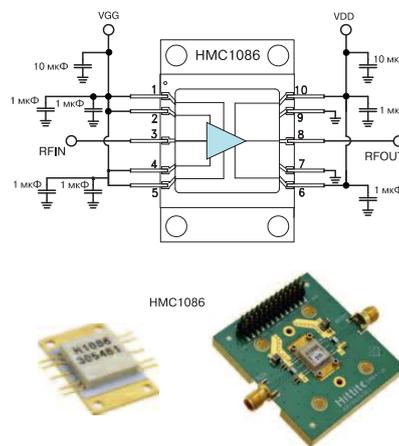
HMC1086F10, HMC464LP5E, HMC7885FH18 – сверхвысокочастотные интегральные микросхемы (MMIC). Эти монокристаллические СВЧ-усилители мощности, соответственно, с максимальной выходной мощностью 28, 0.4 и 32 Вт, ориентированы на применение в военных и коммерческих радарх, приборах авиационного, космического и военного назначения, инфраструктуре беспроводных сетей, станциях радиоэлектронного подавления и пр., работающих в диапазоне частот до 20 ГГц.

В табл. 6, 7 даны основные параметры усилителей мощности HMC1086F10, HMC464LP5E и HMC7885FH18.

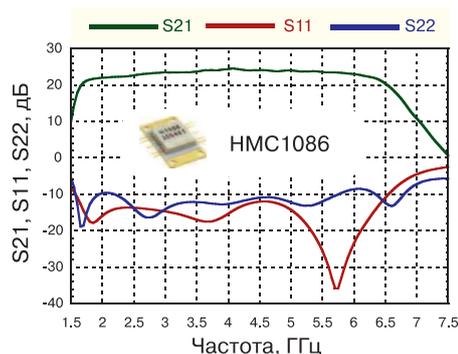
HMC1086F10 – сверхвысокочастотная интегральная микросхема выходной мощностью 28 Вт, изготавливается с использованием нитрид-галлиевой технологии (GaN). Микросхемы выпускаются в корпусе типа 10-LDCC (с тепловым сопротивлением 2.31 °C/Вт, размерами 17.32×11.43 мм) и предназначены для эксплуатации в диапазоне температур -40...85 °C. Стоимость в партии 100...499 шт. составляет 434.5\$. На рис. 15 приведены оценочная плата и структура усилителя на базе микросхемы HMC1086F10, на рис. 16 – зависимость S-параметров от частоты [10]. Усилитель HMC1086F10 содержит встроенные разделительные конденсаторы, подключенные ко входу и выходу усилителя (RFIN и RFOUT). Ориентировочная стоимость микросхемы HMC1086F10 – 213...513 \$ [14].

HMC464LP5E – арсенид-галлиевый (GaAs) усилитель мощности (0.4 Вт), созданный с использованием pHEMT-транзисторов. На рис. 17 приведена оценочная плата и структура СВЧ-усилителя на базе микросхемы HMC464LP5E.

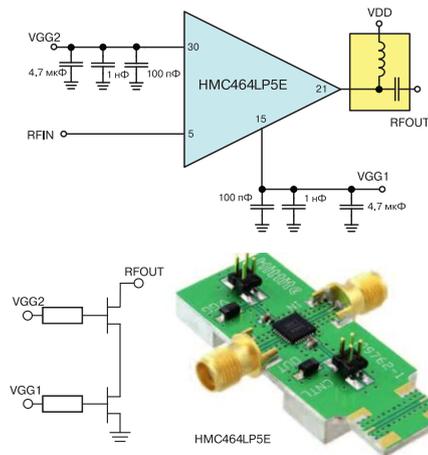
HMC7885FH18 (GaN) – усилитель мощности, изготавливаемый в металлокерамическом корпусе (Ceramic/Metal – CM) размерами 34.2×24.8 мм. Ориентировочная цена при поставке единичных экземпляров – 1879...3200 долларов США [14]. На рис. 18 приведена зависимость параметров усилителя HMC7885FH18 от частоты. На базе микросхемы HMC7885FH18 компания Analog Devices предлагает оценочную плату EV1HMC7885FH18 (рис. 19).



**Рис. 15. Структура усилителя на базе микросхемы HMC1086F10**



**Рис. 16. Зависимость S-параметров HMC1086F10 от частоты**



**Рис. 17. Структура СВЧ-усилителя на базе микросхемы HMC464LP5E**

При включении рассматриваемых усилителей мощности необходимо строго соблюдать рекомендованную последовательность подачи напряжений питания и смещения.

**СВЧ-модули**

**Таблица 6. Основные параметры усилителей мощности HMC464LP5E и HMC7885FH18**

Параметр	HMC464LP5E	HMC7885FH18
Технология	GaAs	GaN
Диапазон частот, ГГц	2.0 ...20.0	2.0...6.0
Мощность насыщения ( $P_{SAT}$ ), дБм	26	45
Мощность на уровне OIP3, дБм	30	53
Мощность на уровне P1, дБм	26	39
PAE, %	—	25
Максимальная входная мощность, дБм	20	36
Малосигнальный коэффициент усиления (Gain), дБ	14	21
Неравномерность коэффициент усиления, дБ	$\pm 0.5$	$\pm 2$
Нестабильность коэффициента усиления, дБ/°C	0.03	—
Напряжение питания, В	7.5...8.5	24...32
Ток потребления, мА	290	2200
Напряжение смещения, В	-2...0/-8...VDD	-8...0
Входное и выходное сопротивления, Ом	50	50
Диапазон рабочих температур, °C	-40...85	-30...60
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт 85 °C	13.3	—
Тепловое сопротивление, °C/Вт	19.4	—
Кол. выводов, тип корпуса и габаритные размеры (мм)	32-LFCSP (5x5)	18-Package Module (34.2x24.8)
Ориентировочная стоимость, \$	110...274	1900

**Таблица 7. Параметры усилителя мощности HMC1086F10 при напряжении питания 28 В**

Усилитель мощности HMC1086F10						
Параметр	Мин.	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Макс.
Полоса частот, ГГц	2...4			4...6		
Малосигнальный коэффициент усиления (Gain), дБ	20	23	—	21	24	—
Неравномерность коэффициент усиления, дБ	—	$\pm 1$	—	—	$\pm 0.5$	—
Нестабильность коэффициента усиления, дБ/°C	—	0.03	—	—	0.03	—
Возвратные потери по входу, дБ	—	15	—	—	17	—
Возвратные потери по выходу, дБ	—	12	—	—	12	—
Мощность насыщения ( $P_{SAT}$ ), дБм	—	44.5	—	—	44.5	—
Мощность на уровне OIP3, дБм	—	46	—	—	46	—
PAE, %	—	35	—	—	32	—
Суммарный ток потребления, мА	—	1100	—	—	1100	—

Компания Analog Devices предлагает также разнообразные СВЧ-модули для применения в радиотехнической аппаратуре. Модули выпускаются в конструктивном исполнении, обеспечивающем возможность простого подключения к внешним устройствам. Нельзя не отметить, что СВЧ-модули отличаются

не только высокими характеристиками, но также и увеличенной стоимостью в сравнении с интегральными микросхемами.

СВЧ-модули – простые в применении, полностью интегрированные решения, которые позволяют существенно сократить продолжительность этапа проектирования, связанного с проверкой кон-

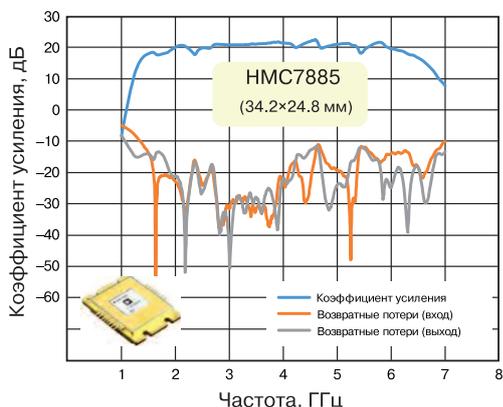


Рис. 18. Зависимость параметров усилителя HMC7885FH18 от частоты

цепции и определением основных технических требований к радиотехническому оборудованию в целом, и, кроме того, способствуют быстрому освоению технологических процессов на этапах сборки, а также тестирования и верификации проекта. Модули, как правило, изготавливаются в металлическом герметичном корпусе с миниатюрными радиочастотными разъемами типа SMA и зачастую предназначены для эксплуатации в расширенном температурном диапазоне.

Основные типовые параметры СВЧ-модулей компании Analog Devices даны в табл. 8, 9.

HMC-C059 – высококачественный арсенид-

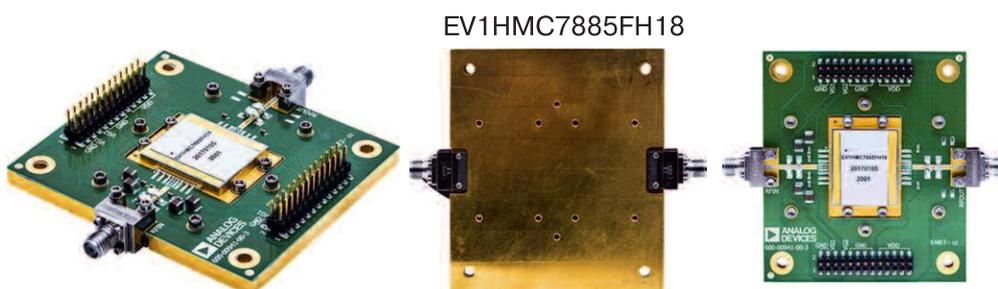


Рис. 19. Оценочная плата EV1HMC7885FH18

Таблица 8. Основные типовые параметры СВЧ-модулей HMC-C059 и HMC-C077/079

Малозумящие усилители					
Параметр	HMC-C059		HMC-C077		HMC-C079
Диапазон частот, ГГц	1...8	8...12	1.5...5	2...4	3...8
Коэффициент усиления (Gain), дБ	16	14	14	14	11
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	±1	±1.25	±3.5	±1.5	—
Нестабильность коэффициента усиления, дБ/°С	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01
Коэффициент шума (тип.), дБ	1.75	2.5	4.5	4	6
Максимальная входная мощность, дБм	10	10	15	15	15
Возвратные потери (вход), дБ	12	7	19	19	16
Возвратные потери (выход), дБ	17	15	15	15	20
Мощность на уровне P1 (тип.), дБм	17	14	17	17	14
Мощность насыщения (P <sub>SAT</sub> ), дБм	19	17	—	—	21
Мощность на уровне OIP3 (тип.), дБм	31	29	27	27	25
Напряжение питания, В (ток потребления, мА)	6 (60)/-5 (1.5)		7 (170)		7 (110)
Диапазон рабочих температур, °С	-55...85		-55...85		-55...85
Ориентировочная стоимость, \$	933		1030		1121

**Таблица 9. Основные типовые параметры СВЧ-модулей HMC-C074/075, HMC7748**

Усилители мощности			
Параметр	HMC-C074	HMC-C075	HMC7748
Диапазон частот, ГГц	0.01...6.0	0.01...6.0	2.0...6.0
Малосигнальный коэффициент усиления (Gain), дБ	13	23	58
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	±0.75	±3	—
Нестабильность коэффициента усиления, дБ/°С	0.02	0.03	—
Коэффициент шума, дБ	5	5	5
Мощность на уровне P1 (в полосе частот 3...6 ГГц), дБм	26	29	38
Мощность на уровне OIP3 (3...6 ГГц), дБм	40	41	48
Мощность насыщения (P <sub>SAT</sub> ), дБм	29	30	43
Возвратные потери (вход), дБ	15	12	—
Возвратные потери (выход), дБ	17	14	—
Максимальная входная мощность, дБм	25	10	-8
Напряжение питания, В (ток потребления, мА)	15 (475)/-5 (4)	15 (740)/-5 (5)	28 (1700)/12 (700)
Диапазон рабочих температур, °С	-40...70	-40...70	-40...70
Габаритные размеры (мм)	69.22×66.0	69.22×66.0	96.25×80.0
Ориентировочная стоимость, \$	1050	1167	3643

галлиевый pHEM MMIC СВЧ-усилитель, отличающийся низким уровнем коэффициента шума (типичное значение всего 1.75 дБ). Параметры усилителя HMC-C059 (рис. 20) гарантируются в диапазоне рабочих частот от 1 до 12 ГГц. Габаритные размеры модуля – всего 46.6×20.3 мм.

HMC-C077 – GaAs HBT малошумящий усилитель (см. рис. 20) для диапазона частот от 1.5 до 5 ГГц, изготавливаемый в герметичном металлическом корпусе габаритными размерами 48.2×29 мм.

HMC-C079 – GaAs HBT малошумящий усилитель (см. рис. 20) для диапазона частот от 3 до 8 ГГц, изготавливаемый в герметичном металлическом корпусе габаритными размерами 48.2×29 мм.

Кроме того, усилительные модули HMC-



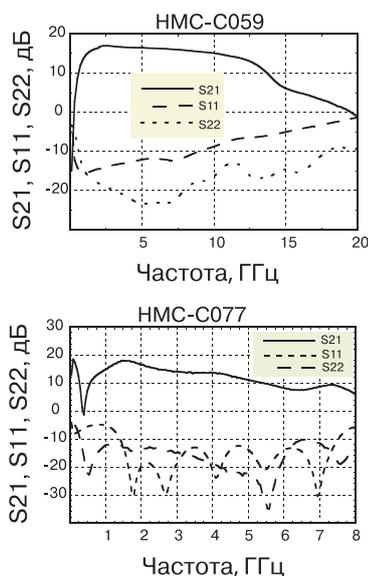
**Рис. 20. Модули HMC-C059 и HMC-C077/079**

C077/079 отличаются низкими фазовыми шумами. Всего -175 дБн/Гц при смещении по частоте 100 кГц (HMC-C077) и -168 дБн/Гц при смещении – 10 кГц

(HMC-C079).

Зависимости S-параметров усилителей HMC-C059 и HMC-C077 от частоты приведены на рис. 21.

HMC-C074/075 – соответственно, однокаскадный и двухкаскадный усилитель мощности для диапазона частот 0.01...6 ГГц. Коэффициент усиления – соответственно, 13 дБ (HMC-C074) и 23 дБ (HMC-



**Рис. 21. Зависимость S-параметров усилителей HMC-C059 и HMC-C077 от частоты**

C075). Выходная мощность – 40 и 42 дБм. Стоимость – 2878 и 3199 долларов США (Digikey). Структура усилителя мощности HMC-C075 и зависимость коэффициента шума от частоты приведены на рис. 22.

HMC7748 – многокаскадный усилитель мощности (25 Вт) для диапазона частот 2...6 ГГц (рис. 23). Для малых сигналов коэффициент стоячей волны по напряжению (Voltage Standing Wave Ratio – VSWR) – не хуже 2:1 (вход). По выходу – 2:1 (тип.). Максимальный ток потребления в режиме насыщения – 4 А. Габаритные размеры – 95.25×80.0 мм.

HMC-C058 (рис. 24) – широкополосный (0...18 ГГц)

GaAs MESFET переключатель на два направления (Single-Pole, Double-Throw – SPDT). Модуль HMC-C058 изготавливается в миниатюрном металлическом герметичном корпусе габаритными размерами 41.9×29.8 мм. Подключение к внешним устройствам осуществляется с использованием миниатюрных высокочастотных разъемов типа SMA. Максимальная мощность входного сигнала – 30 дБм. Напряжение питания – 5 В, диапазон рабочих температур -55...85 °С. Ориентировочная цена – 955 долларов США [14].

**Перестраиваемые полосовые фильтры**

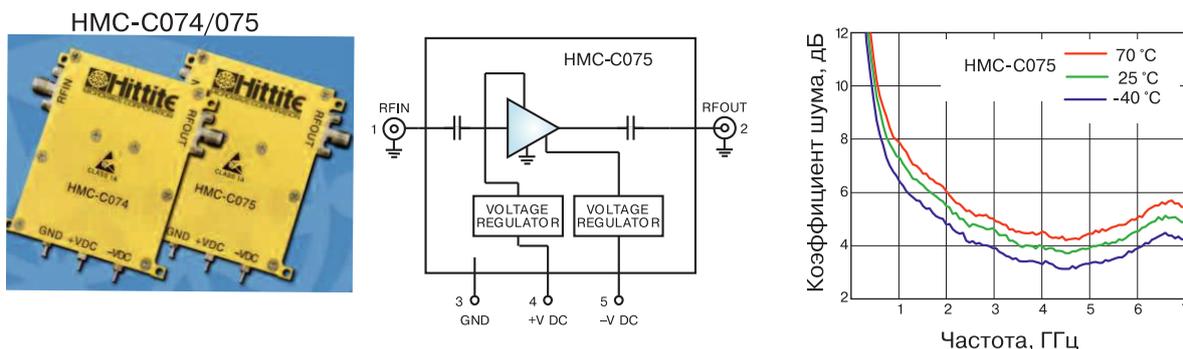


Рис. 22. Модули HMC-C074/075

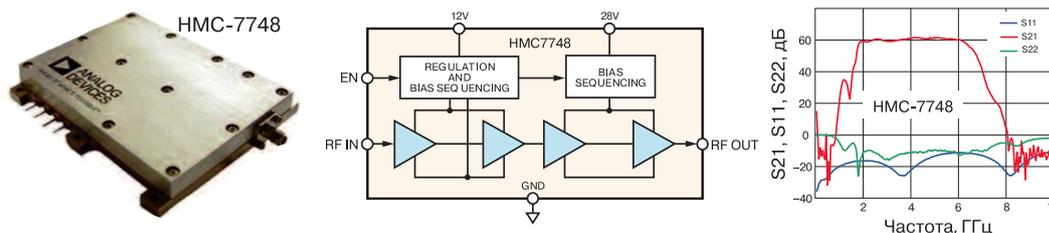


Рис. 23. Модуль HMC7748

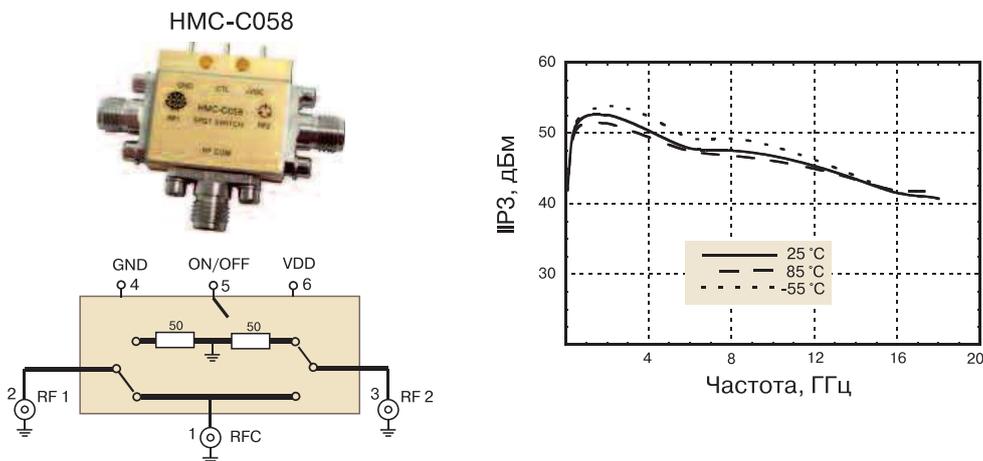


Рис. 24. Модуль HMC-058

Разного рода фильтры электрических сигналов – неотъемлемая часть ВЧ- и СВЧ-аппаратуры. От их параметров зависит не только селективность, помехозащищенность, электромагнитная совместимость, но также надежность оборудования.

В интегральных перестраиваемых полосовых фильтрах HMC890A/891A/892A (рис. 25) реализована возможность регулирования центральной частоты ( $F_0$ ) за счет изменения величины управляющего напряжения. Эти СВЧ-фильтры можно использовать в качестве альтернативы громоздким фильтрам на базе сосредоточенных элементов, а также резонаторным, волноводным и другим типам фильтров. Эти интегральные СВЧ-фильтры предназначены для работы в определенном частотном диапазоне:

- HMC890A: 1...1.9 ГГц (L – диапазон)
- HMC891A: 1.95...3.4 ГГц (S – диапазон)
- HMC892A: 3.45...6.25 ГГц (C – диапазон).

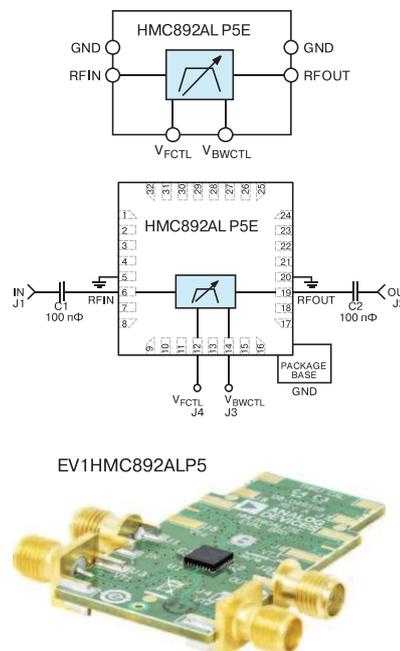
Ширина полосы фильтра HMC892A по уровню -3 дБ составляет  $0.087F_0$  (типичное значение). Затухание за пределами полосы пропускания на частотах  $0.89F_0$  и  $1.13F_0$  – не менее 20 дБ. Зависимость центральной частоты  $F_0$  от управляющего напряжения приведена на рис. 26.

Основные параметры фильтра HMC892A:

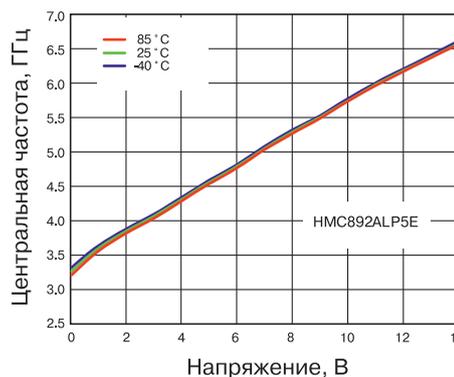
- максимальная мощность входного сигнала при работе в линейном режиме – 10 дБм
- максимально допустимая мощность входного сигнала – 27 дБм
- мощность по уровню IIP3 – 32 дБм (тип.)
- температурный дрейф  $F_0$  – 0.5 МГц/°C
- вносимые потери – 9.5 дБ
- время установления сигнала – 200 нс
- напряжение управления – 0...14 В
- диапазон рабочих температур -40 ...85 °C
- корпус 32-LFCSP (5x5x0.75 мм).

**Заключение**

Успешная разработка СВЧ-оборудования вряд ли возможна без применения профессиональных систем автоматизированного проектирования (САПР). Среди них – Advanced Design System (ADS) и Genesys известной американской компании Keysight Technologies, которые включают средства схемотехнического моделирования нелинейных схем и переходных процессов, анализа гармонического баланса, большую библиотеку стандартных СВЧ-компонентов ведущих производителей и пр.



**Рис. 25. Перестраиваемый полосовой фильтр HMC892A**



**Рис. 26. Зависимость центральной частоты  $F_0$  от управляющего напряжения**

Кроме того, ПО содержит модули синтеза радио-электронных блоков.

ADS и Genesys – специализированные мощные САПР для разработчиков высокочастотных и сверхвысокочастотных компонентов, блоков, устройств и систем, предоставляющие пользователям широкие возможности по синтезу и анализу с помощью различных методик моделирования. Среди них – линейное, нелинейное, электромагнитное, а также другие виды моделирования. В случае использования этого ПО разработчики СВЧ-оборудования и систем могут создавать проекты как на функциональном уровне, когда структура включает готовые узлы и блоки и задаются лишь их параметры, так и с использованием конкретной элементной базы разных производителей.

Компания Analog Devices для многих выпускаемых ВЧ/СВЧ-микросхем предоставляет программные модели, созданные на основе S- и Sys-параметров, которые могут быть полезны в случае работы с соответствующим специализированным программным обеспечением (например, ADS или Genesys).

В качестве примеров, на рис. 27 приведен вид

рабочего окна программы ADS2019 и результаты спектрального анализа выходного сигнала СВЧ-усилителя при его возбуждении двумя тональными сигналами с близкими частотами, а на рис. 28 – рабочее окно программы Genesys2018 при моделировании работы усилителя с использованием микросхемы HMC313E.

Дополнительную информацию о СВЧ-компонен-

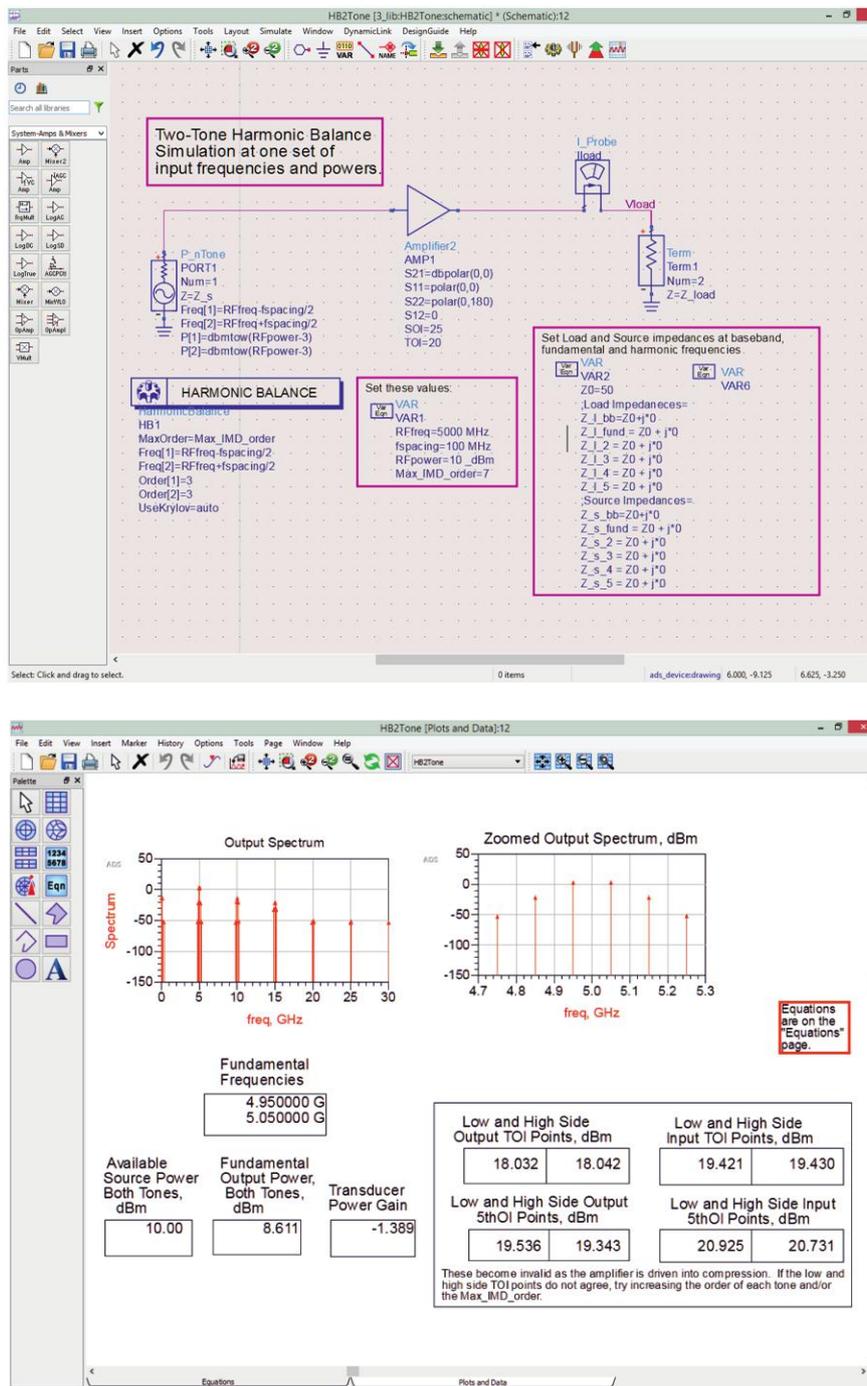
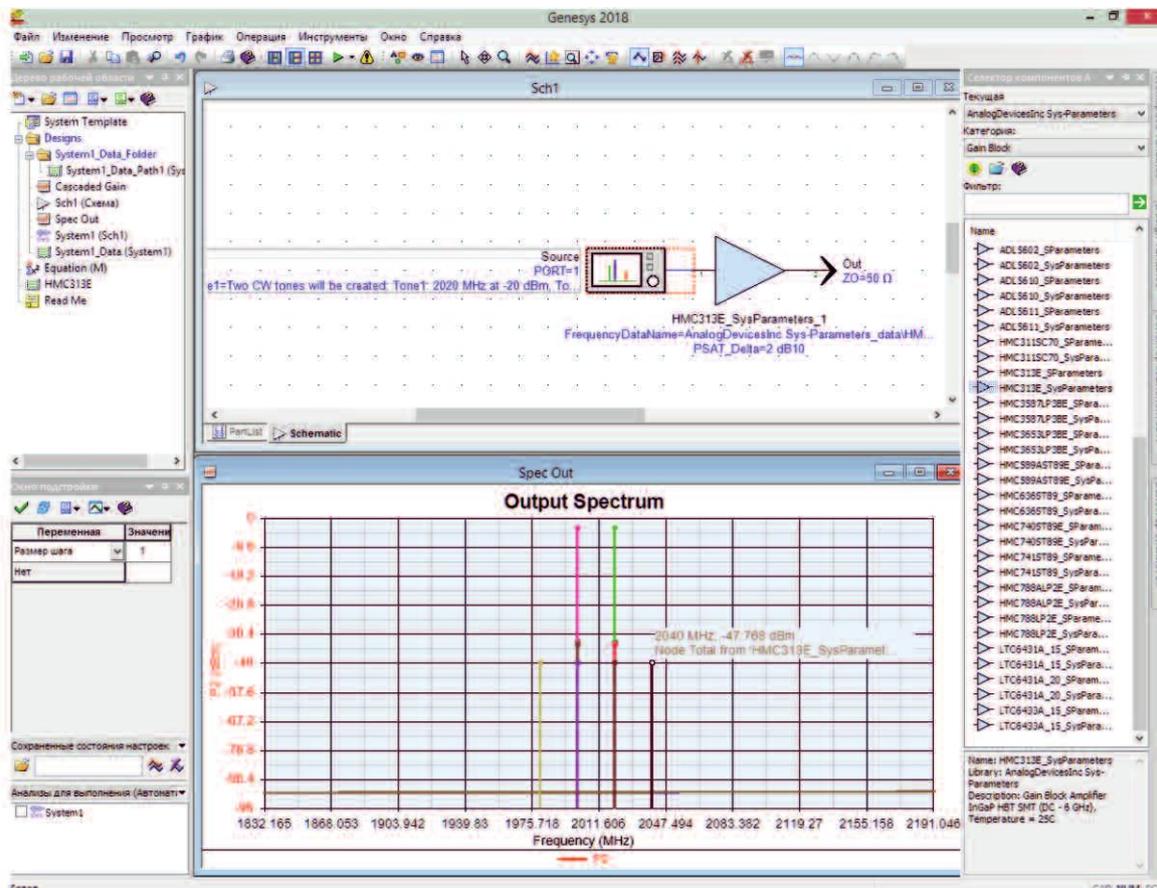


Рис. 27. Рабочее окно программы ADS2019 и результаты спектрального анализа выходного сигнала СВЧ-усилителя при его возбуждении двумя тональными сигналами с близкими частотами



**Рис. 28. Рабочее окно программы Genesys2018 при моделировании работы усилителя с использованием микросхемы HMC313E**

тах, выпускаемых компанией Analog Devices, можно найти в сети Интернет по адресу [www.analog.com](http://www.analog.com) или в фирме VD MAIS – официальном дистрибьюторе Analog Devices в Украине.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Solid-state microwave high-power amplifiers. Franco Sechi, Marina Bujatti.
2. Ф. Сечи, М. Буджатти. Мощные твердотельные СВЧ-усилители.
3. Measuring the nonlinearities of RF-amplifiers using signal generators and a spectrum analyzer. – Rohde&Schwarz.
4. Measuring with modern spectrum analyzers. Educational note. – Rohde&Schwarz.
5. Отчет МСЭ-R SM.2125-1 (06/2011). Параметры и процедуры измерения приемников и станций радиоконтроля диапазонов ВЧ/ОВЧ/УВЧ. Серия SM. Управление использованием спектра.
6. RF, microwave, and millimeter wave products. Selection Guide 2018.
7. 30 MHz to 6 GHz RF/IF gain block. Data Sheet ADL5610.
8. HMC311LP3/311LP3E InGaP HBT gain block MMIC amplifier, DC - 6 GHz.
9. HMC3587LP3BE HBT gain block MMIC amplifier, 4 - 10 GHz
10. HMC1086F10 25 Watt flange mount GaN MMIC power amplifier, 2 - 6 GHz.
11. 2 GHz to 6 GHz, 45 dBm power amplifier HMC1086F10.
12. 2 GHz to 6 GHz, 25 W power amplifier module HMC7748.
13. Two-stage power amplifier module, 10 MHz to 6 GHz HMC-C075.
14. <https://www.components-mart.com>.
15. HMC892ALP5E. 3.45 GHz to 6.25 GHz, tunable band-pass filter.

## НОВЫЕ ИМС ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ СМЕШАННЫХ СИГНАЛОВ

### NEW ICs OF HIGH-FREQUENCY INTERFACES OF MIXED SIGNALS FRONT ENDS (MxFE)



ИМС с интерфейсами смешанных сигналов (MxFE®) предназначены для построения широкополосных беспроводных сетей. Эти ИМС содержат элементы аналогового интерфейса (AFE) и обеспечивают высокоинтегрированное решение для различных приложений, включая инфраструктуру систем связи, широкополосную беспроводную связь, домашние сети, кабельные модемы и телевизионные приставки.

Компоненты аналогового интерфейса (AFE) оптимизированы путем интеграции усилителей, фильтров, АЦП и ЦАП. В некоторых случаях они также включают в себя вспомогательные преобразователи данных и другие функциональные узлы.

Компания Analog Devices расширяет функциональные возможности таких ИМС путем увеличения числа одновременно обрабатываемых сигналов и расширения их частотного диапазона. Analog Devices представила новые ИМС платформы MxFE®, предназначенные для систем связи 4G LTE и 5G – AD9081 и AD9082.

Перенос операций преобразования частоты и фильтрации из аналоговой области в цифровую предоставляет разработчикам возможность программной перестройки приемопередатчиков радиостанций под требования заказчика. Новые многоканальные ИМС MxFE-платформы удовлетворяют требованиям других широкополосных приложений

таких, как контрольно-измерительное оборудование для сетей 5G, оборудование для широкополосных кабельных сетей, радары с фазированной решеткой и низкоорбитальные спутниковые сети.

Микросхемы AD9081/2 позволяют создавать широкополосные приемопередатчики базовых станций с увеличенной в три раза пропускной способностью, по сравнению с существующими базовыми станциями 4G LTE при тех же габаритных размерах.

ИМС AD9081 и AD9082 имеют в своем составе четыре 16-разрядных ЦАП с частотой отсчетов до 12 ГГц и четыре 12-разрядных АЦП с частотой дискретизации до 6 ГГц (в ИМС AD9082 содержится два АЦП). Встроенный синтезатор на основе ФАПЧ обеспечивает перестройку частоты в диапазоне от 6 до 12 ГГц.

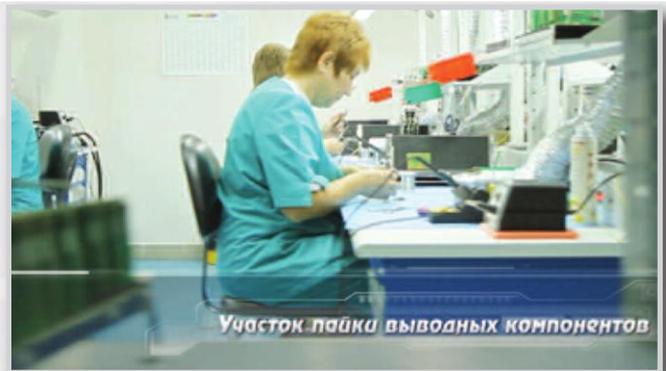
ИМС поддерживают скорость передачи IQ-данных со скоростью до 1.5 Гбит/с и прием IQ-данных со скоростью до 2 Гбит/с. Высокочастотные ЦАП и АЦП (RF DAC/RF ADC) по уровню -3 дБ обеспечивают полосу пропускания сигнала 5.2 и 7.5 ГГц, соответственно.

AD9081/2 оснащены 16-канальным интерфейсом приемопередатчика данных JESD204C со скоростью обмена данными 24.75 Гбит/с или JESD204B со скоростью обмена данными 15.5 Гбит/с, встроенным умножителем частоты тактовых импульсов и блоками цифровой обработки сигналов, предназначенными для одно- и двухдиапазонных устройств.

ИМС MxFE-платформы позволяют обрабатывать сигналы в широком диапазоне частот и имеют встроенные узлы цифровой обработки сигналов, что позволяет пользователю настраивать программируемые фильтры и цифровые блоки повышающих/понижающих преобразователей частоты. Благодаря этому энергопотребление снижается в 10 раз по сравнению с устройствами, в которых преобразование радиосигналов и фильтрация осуществляются с использованием FPGA.

1. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9081.pdf>.

2. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9082.pdf>.



## КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

Полный цикл контрактного производства электроники:

- проектирование и изготовление печатных плат и трафаретов по стандарту IPC-A-600J
- комплексная поставка комплектующих элементов
- автоматизированный монтаж компонентов по технологии SMT и THT, включая монтаж в азотной среде, в соответствии со стандартом IPC-A-610G (до 2 500 000 SMD-компонентов в сутки)
- монтаж печатных плат любой сложности при серийном и мелкосерийном производстве
- нанесение лазерной маркировки на печатные платы
- 100% автоматический оптический контроль качества монтажа
- внутрисхемный контроль готовых изделий
- проведение климатических испытаний (по заказу)

Система менеджмента качества фирмы сертифицирована на соответствие требованиям стандартов ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016.

Автоматизированная пайка выводных компонентов выполняется на установке селективной пайки PowerSelective производства компании SEHO. Пайка выполняется мини-волной в азотной среде. Скорость пайки 1...5 секунд на точку. Скорость пайки разъемов 3 мм в секунду.

Работы выполняются на оборудовании фирм Samsung, Hanwha Precision Machiners, ESSEMTEC, TWS, PACE, SEHO, Phoenix Digital Tech с применением расходных материалов фирм AIM и Electrolube.

Научно-технический журнал.  
Предназначен для разработчиков  
и производителей электронной  
и электротехнической аппаратуры,  
средств телекоммуникаций, компьютерных  
и управляющих систем, промышленной  
и транспортной электроники.  
Издается с 1996 года.  
Учредитель и издатель журнала –  
НПФ VD MAIS.

## НПФ VD MAIS

### Центральный офис:

**03061 Киев**  
ул. М. Донца, 6  
Тел.: (+38-044) 201-0202, 492-8852  
Факс: (+38-044) 202-1110  
E-mail: [info@vdmajs.ua](mailto:info@vdmajs.ua)  
[http:// www.vdmajs.ua](http://www.vdmajs.ua)

**Ukraine**  
03061 Kyiv, M. Dontsia St. 6  
tel.: (+38-044) 201-0202, 492-8852  
fax: (+38-044) 202-1110

### Региональные представительства:

**61070 Харьков**  
ул. Академика Проскуры, 1  
тел./факс: (057) 719-6718, 716-4266  
[s.momot@vdmajs.ua](mailto:s.momot@vdmajs.ua)

**49006 Днепр**  
пр. Пушкина, 55, оф. 504  
тел./факс: (0562) 319-128  
[g.boreyko@vdmajs.ua](mailto:g.boreyko@vdmajs.ua)

**65005 Одесса**  
ул. Головкинская, 36, оф. 20  
тел./факс: (048)734-1954  
[a.bilous@vdmajs.ua](mailto:a.bilous@vdmajs.ua)

**79058 Львов**  
пр. В. Чорновола, 67, оф. 319  
тел./факс: (095) 283-8246  
[s.luschak@vdmajs.ua](mailto:s.luschak@vdmajs.ua)

**69000 Запорожье**  
бульвар Шевченко, 25, оф. 14  
Руслан Моисеенко  
[r.moiseienko@vdmajs.ua](mailto:r.moiseienko@vdmajs.ua)  
тел. (095) 274-6897