

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-

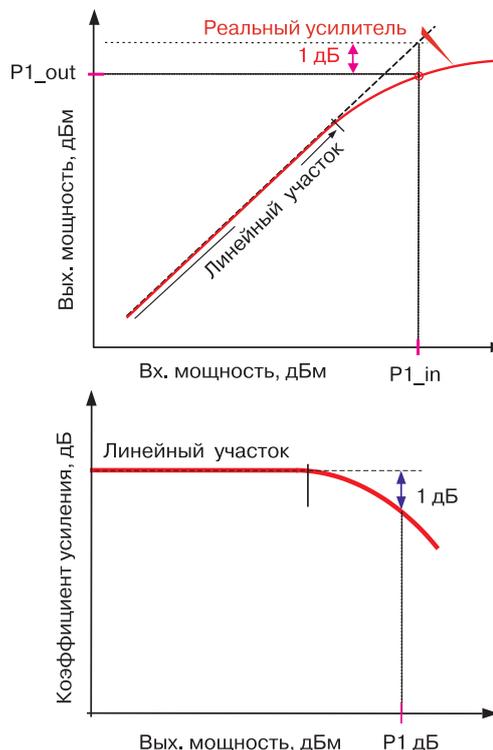


Рис. 1. Амплитудная характеристика усилителя

клонение амплитудной характеристики усилителя от линейной составляет 1 дБ, может быть охарактеризована соответствующим уровнем входного ($P_{1\text{in}}$, дБ) или выходного сигнала ($P_{1\text{out}}$, 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 attenuators 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,

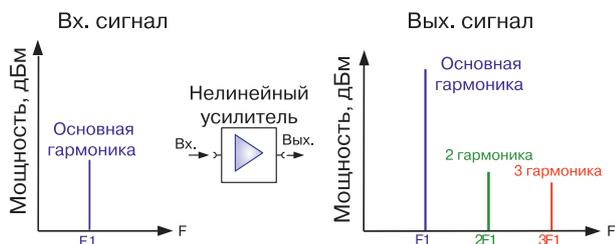


Рис. 2. Спектральные составляющие на входе и выходе нелинейного усилителя

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 (Δ дБ) второй гармоники в два раза выше, чем мощности выходного сигнала.

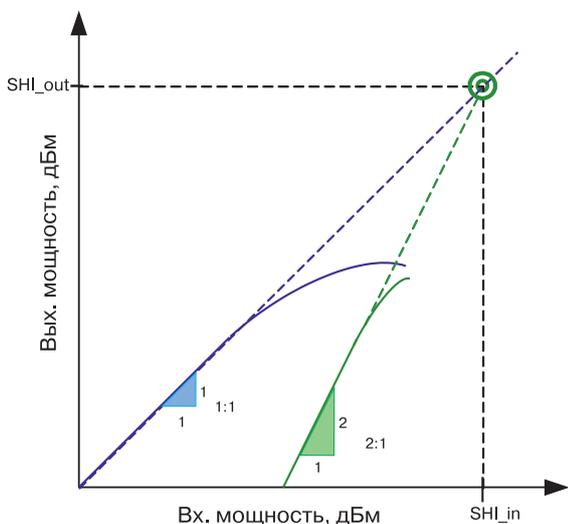


Рис. 3. Зависимости выходной мощности (кривая синего цвета) и мощности второй гармоники (зеленого цвета) от входной мощности

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,

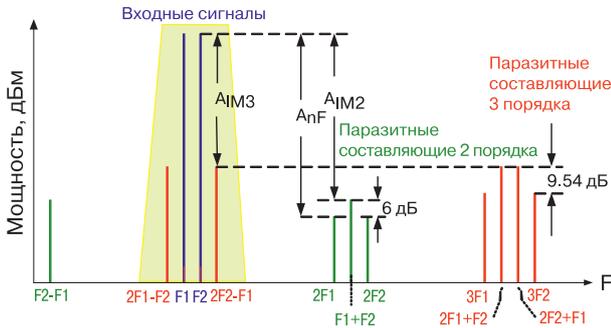


Рис. 4. Выходной спектр, ограниченный составляющими не выше третьего порядка, при наличии на входе нелинейного усилителя двух сигналов с близкими частотами

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.

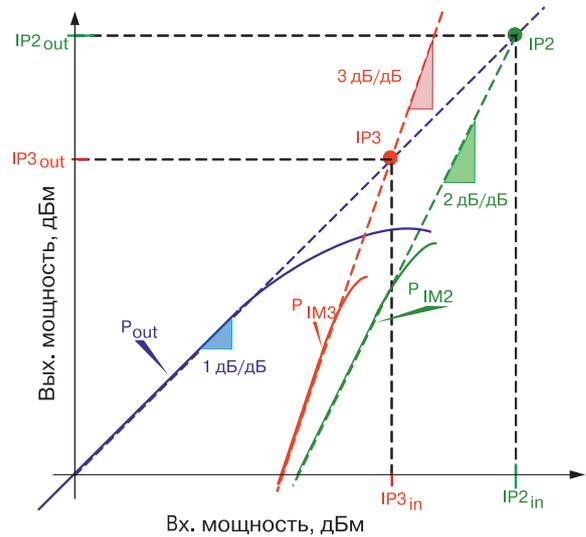


Рис. 5. Графики зависимости мощности интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка от уровня входной мощности

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 (± 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 S₂₁ 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

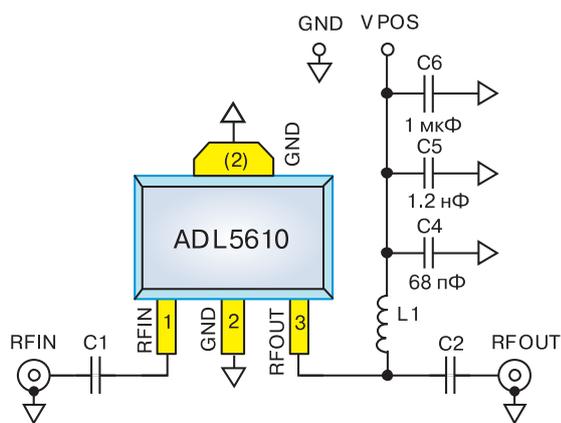
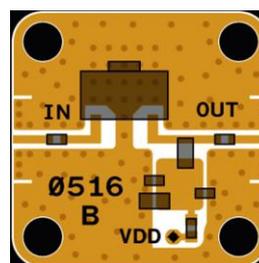


Рис. 6. Вариант схемы подключения микросхемы ADL5610

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

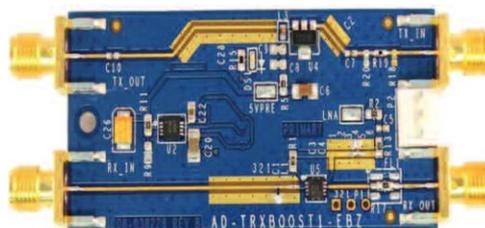


Рис. 7. Оценочная плата XM-A5E7-0404D (X-Microwave) и AD-TRXBOOST1-EBZ (Analog Devices)

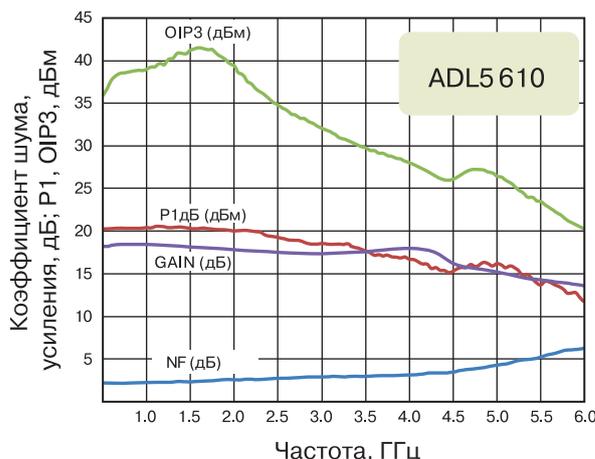


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления (GAIN), коэффициента шума (NF), выходной мощности на уровне P1 и OIP3 для усилителя ADL5610

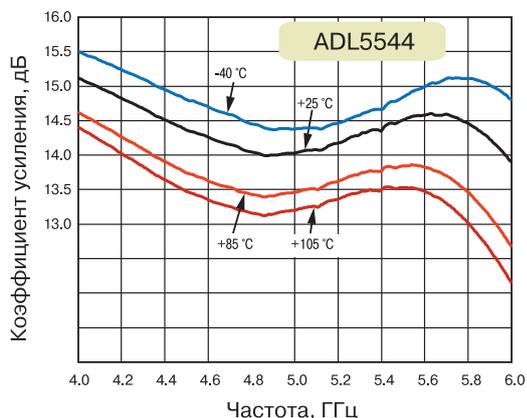


Рис. 9. Графики зависимости коэффициента усиления от частоты и температуры для усилителя типа ADL5544

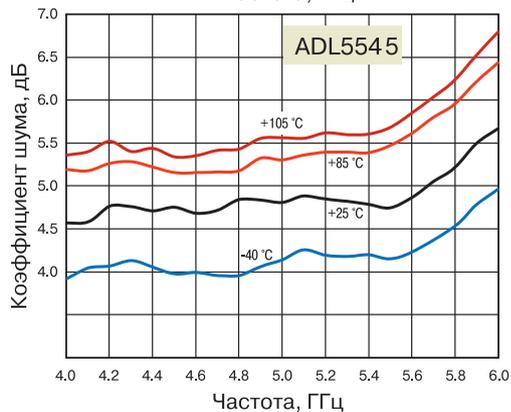
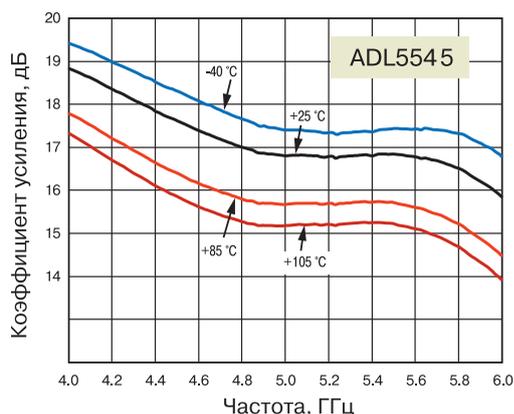


Рис. 10. Зависимости коэффициентов усиления и шума от частоты и температуры для усилителя типа ADL5545



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 монолитные 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-

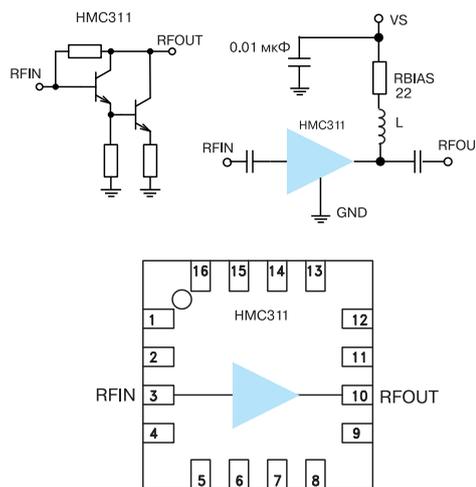


Рис. 12. Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC311 и оценочная плата XM-A662-0404D

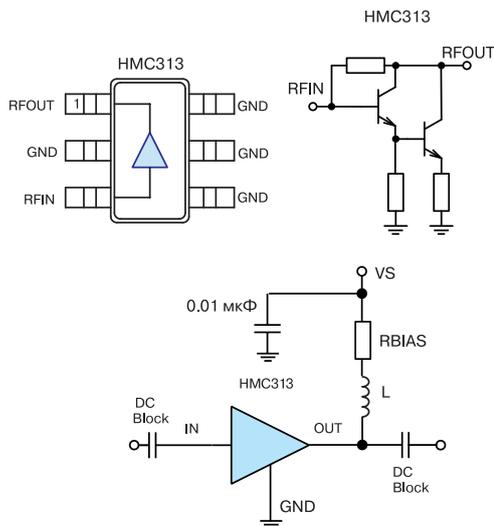


Рис. 13 Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC313

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

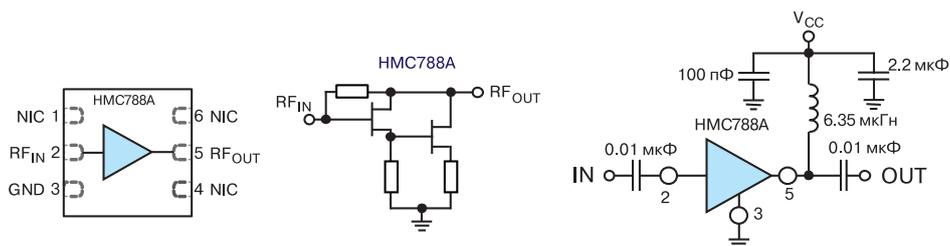


Рис. 14. Структура СВЧ-усилителя с использованием микросхем HMC788A

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).

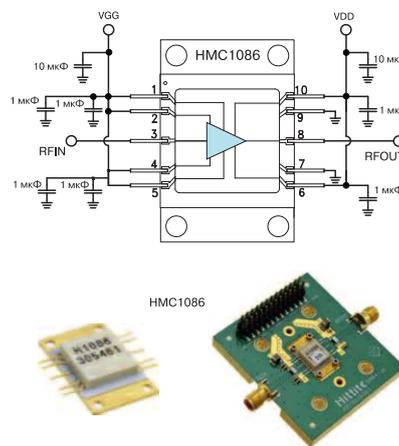


Рис. 15. Структура усилителя на базе микросхемы HMC1086F10

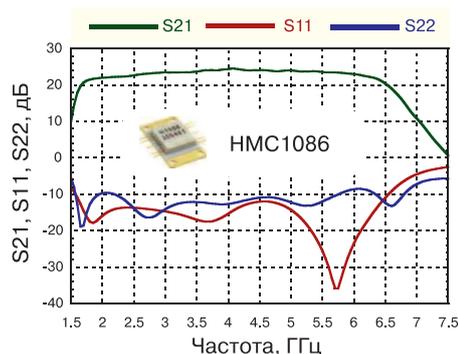


Рис. 16. Зависимость S-параметров HMC1086F10 от частоты

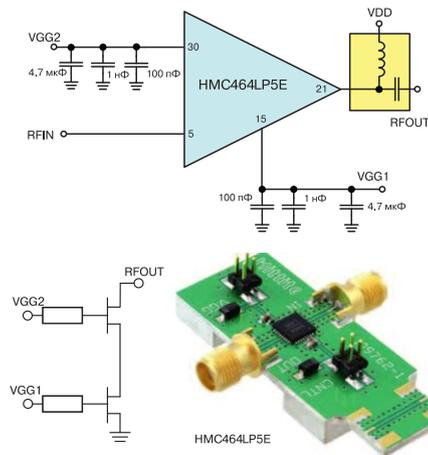


Рис. 17. Структура СВЧ-усилителя на базе микросхемы HMC464LP5E

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	± 0.5	± 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	—	± 1	—	—	± 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-

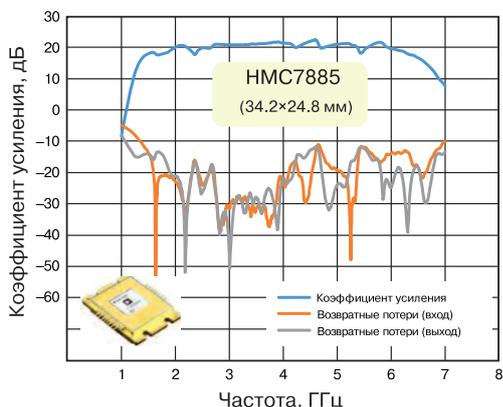


Рис. 18. Зависимость параметров усилителя HMC7885FH18 от частоты

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-

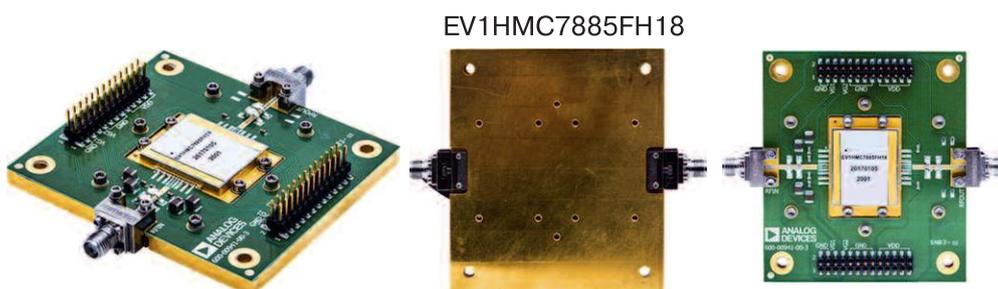


Рис. 19. Оценочная плата EV1HMC7885FH18

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 _{SAT}), 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 _{SAT}), 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-

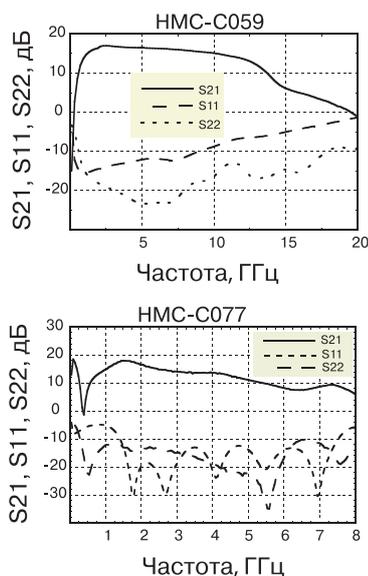


Рис. 21. Зависимость S-параметров усилителей HMC-C059 и HMC-C077 от частоты

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

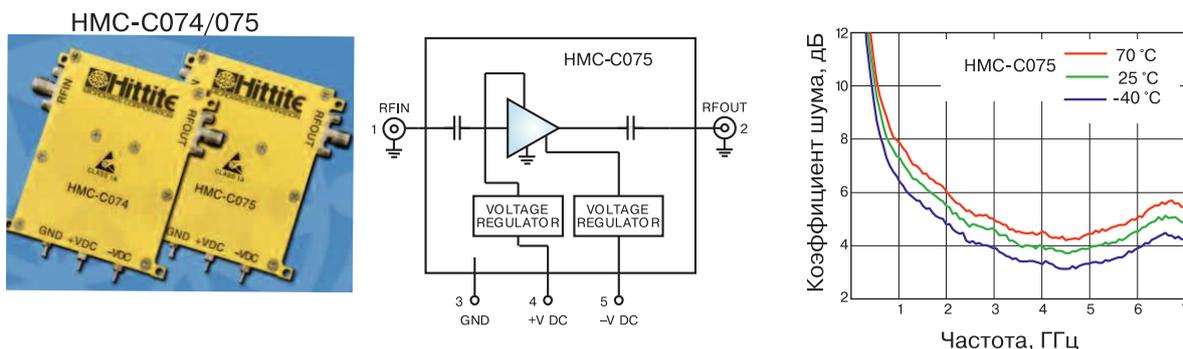


Рис. 22. Модули HMC-C074/075

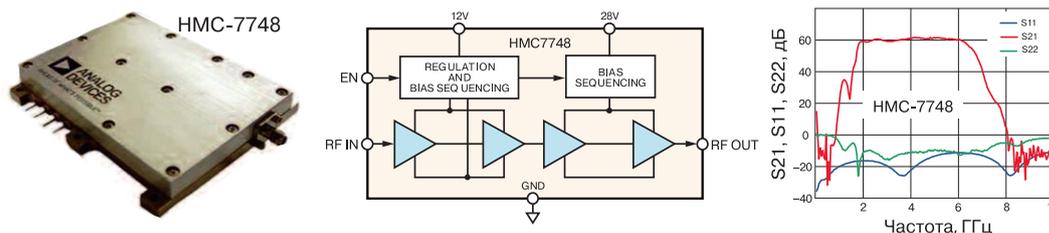


Рис. 23. Модуль HMC7748

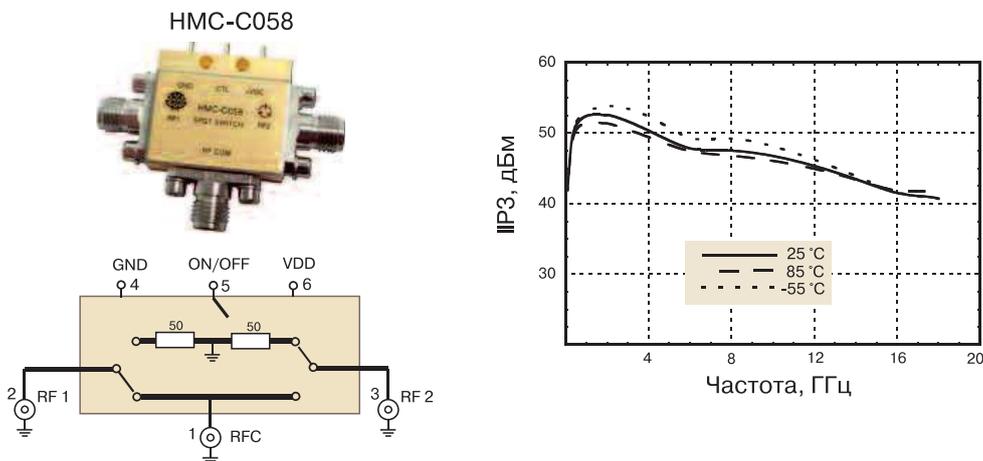


Рис. 24. Модуль HMC-058

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.

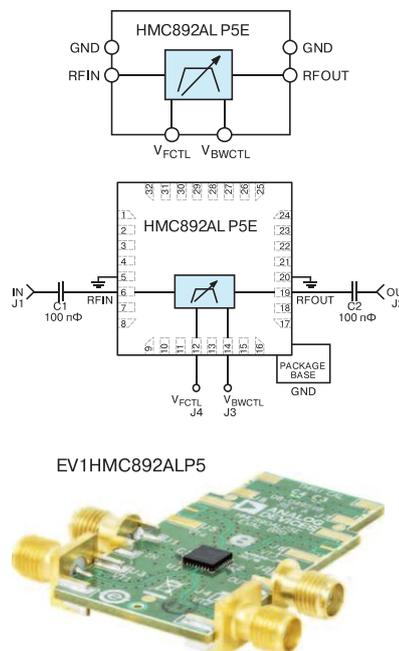


Рис. 25. Перестраиваемый полосовой фильтр HMC892A

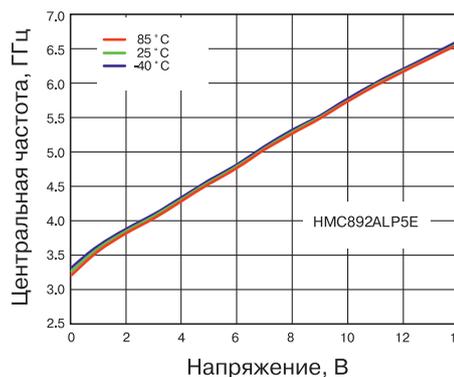


Рис. 26. Зависимость центральной частоты F_0 от управляющего напряжения

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.