

# Элементная база фазовой автоподстройки: системный подход

Юрий Никитин (Санкт-Петербург)

**Качественные параметры синтезаторов частот можно реализовать в полной мере, когда разработчик радиоэлектронной аппаратуры хорошо разбирается не только в теории работы колец импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАП), но и в элементной базе.**

В статье [1] были приведены основы теории и расчёта синтезаторной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАП, PLL) и параметры элементов петли ФАП (операционных узлов). Рассмотрим более подробно предлагаемые на рынке микросхемы операционных узлов синтезаторных систем ФАП.

Первые ИС, содержащие петлю фазовой автоподстройки, были аналоговыми, т.е. и генератор, управляемый напряжением (ГУН, VCO), и фазовый детектор (ФД, phase discriminator), и «внешние» входные/выходные сигналы были аналоговыми. К таким ИС относятся NE560 – NE562, разработанные фирмой Signetix в начале 1970-х годов [2].

Микросхема NE560 предназначена для демодуляции сигналов с угловой модуляцией. Она содержит ГУН, ФД, усилитель, блок масштабирования и ограничитель. Микросхема NE561 дополнена квадратурным аналоговым перемножителем сигналов и может детектировать сигналы не только с угловой, но и с амплитудной модуляцией; её отечественный аналог – K174XA4. Микросхема NE562 имеет меньший уровень собственных шумов и обеспечивает выходные уровни сигнала, согласованные с уровнями сигнала TTL/КМОП цифровых микросхем. Управляемые генераторы этих микросхем нормально работали до частот

10...15 МГц при предельной частоте генерации 30 МГц. Между тем, стабильность генерируемой частоты была относительно низкой ( $\pm 0,06\%/^{\circ}\text{C}$ ), а диапазон перестройки ГУН не превышал  $\pm 15\%$  от установленной частоты. Микросхема LM565 компании National Semiconductor предназначена для демодуляции аналоговых сигналов на частотах до 500 кГц [3] и большого интереса не представляет.

При эксплуатации этих микросхем выявились и отдельные недостатки. Так, для сдвига уровней внутри микросхемы использовались стабилитроны, что вызывало существенное увеличение внутренних шумов петли ФАП и, соответственно, уменьшение чувствительности по сигнальному входу и снижение качества демодулированного сигнала.

Дальнейшим развитием серии NE56x стали аналоговые микросхемы NE/SE564 (см. рис. 1) и NE/SE567 (см. рис. 2) фирмы Philips. В настоящее время её производит под тем же обозначением компания NXP (бывшее отделение полупроводников компании Philips) [4]. Фирма ориентирует первую ИС на работу на частотах до 65 МГц при отсутствии времязадающего конденсатора и до 6,5 МГц при номинале времязадающего конденсатора 91 пФ, а вторую ИС – на диапазон частот до 1 МГц.

Микросхема NE/SE564 предназначена, прежде всего, для демодуляции

сигналов с угловой модуляцией (ЧМ-сигналов) на стандартной ПЧ 10,7 МГц приёмников УКМ/ЧМ (65...73 МГц) и FM (88...108 МГц) диапазонов, а также на звуковой ПЧ 5,5/6,5 МГц телевизионных приёмников [2]. Кроме того, ИС можно применять в декодерах сигналов телеметрии, для синхронизации данных и восстановления сигналов, в качестве следящих фильтров. Структурная схема NE/SE564 приведена на рисунке 3. Температурный диапазон варианта NExxx – от 0 до 70°C, а варианта SExxx (military) – от -55 до 125°C.

Микросхема NE/SE567 дополнена квадратурным фазовым детектором и в режиме синхронизма может демодулировать АМ-сигналы на стандартной ПЧ 455/465 кГц радиоприёмников ДВ-, СВ- и КВ-диапазонов (150 кГц – 23 МГц), а также на второй ПЧ 500 кГц любительских КВ-трансиверов и трансиверов СВ-диапазона (28 МГц). Обозначение выводов микросхемы NE/SE567 приведено на рисунке 2, а её структурная схема показана на рисунке 4.

Микросхема LM567 компании National Semiconductor (см. рис. 2) предназначена для демодуляции аналоговых АМ/ЧМ-сигналов на частотах до 500 кГц [3] и является полным аналогом микросхемы NE/SE567. Такие ИС можно использовать не только в указанных выше схемах, но и при построении систем фазовой автоподстройки частоты в модемах, модуляторах, умножителях частоты, при разделении каналов в стереофоническом ЧМ-вещании и, конечно, в низкочастотных синтезаторах частоты.

Микросхема LMC568 компании National Semiconductor также пред-

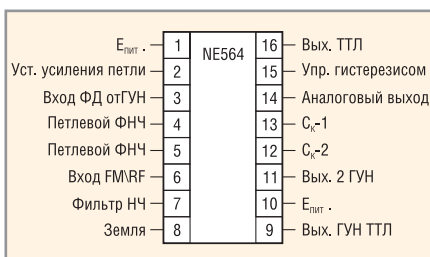


Рис. 1. Обозначение выводов микросхемы NE/SE564

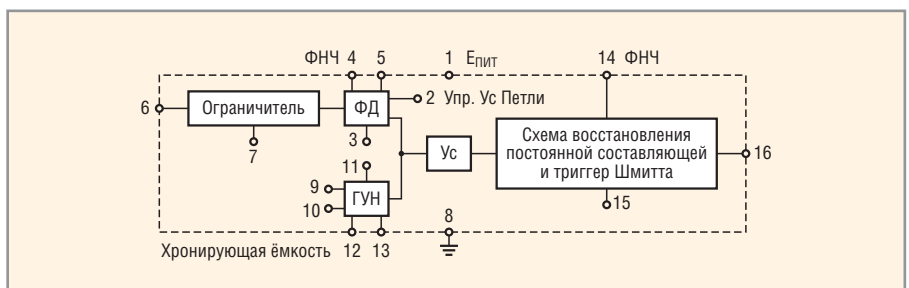


Рис. 2. Обозначение выводов микросхем NE/SE567 и LM567

назначена для демодуляции аналоговых АМ/ЧМ сигналов на частотах до 700 кГц; кроме того, её можно использовать для выделения несущей.

Петлевой фильтр нижних частот и раньше, и теперь традиционно находился (и находится) вне микросхемы ФАП, поскольку предусмотреть все возможные варианты применения ИС практически невозможно.

Исторически первой массовой цифровой микросхемой, в которой были реализованы принципы петли ИФАП, была микросхема CD4046, разработанная компанией RCA в 1970-х годах. Эта микросхема содержит все основные элементы кольца ИФАП: ГУН, импульсно-фазовые и частотно-фазовые детекторы (ИФД, ЧФД), формирователи импульсов по опорному (сигнальному, или, в обозначениях разработчиков микросхемы, SIGIN) и генераторному входу (входу тракта приведения ТП или COMPIN) (см. рис. 5).

В микросхеме CD4046 отсутствует лишь делитель частоты в тракте приведения. В то время степень интеграции была невысокой, а делители частоты на разные коэффициенты пересчёта (делители с переменным коэффициентом деления – ДПКД, integer-N divider) строились на основе распространённых счётчиков с устройствами опознавания и сброса (синхронных или дополненных схемой сквозного переноса) [5–7]. К тому же, ещё не был известен делитель частоты с прескалером [8].

Прескалер (русскоязычная «калька» от prescaler – предварительный делитель частоты, как правило, двухмодульный) появился для разрешения двух противоречий – технического и технологического. Техническое противоречие заключалось в обеспечении экономичности (по току потребления) цифрового делителя частоты при возрастающих требованиях к его быстродействию. Технологическое противоречие – в несовместимости двух процессов изготовления микросхем – высокочастотной биполярной и экономичной КМОП-технологии. Как только последнее противоречие удалось разрешить на одном кристалле и в одном технологическом цикле, рынок микросхем наполнился десятками типов PLL-синтезаторов, оснащённых полноценной интегрированной цифровой компонентой.

Микросхема CD4046 фактически стала стандартом и производится многими фирмами до настоящего времени. Например, компания Motorola производила её под обозначением MC74HC4046A, но потом передала компании Freescale (бывшее отделение полупроводников компании Motorola) [9]; та, в свою очередь, – компании On Semiconductor, но уже под обозначением MC14046B [10]. Компании NXP [4], Intersil [11] и Texas Instrument [12] маркируют эту микросхему 74/54HC/HC4046A; Минское НПО «Интеграл» – IN74/54HC4046A. Отечественный аналог ИС выпускается в сериях 564/К561/К1561 и обозначается xxxПГ1 [2].

На рисунке 6 приведена логическая структура цифровой части микросхемы CD4046. Частота генерации достигает 38 МГц при  $C1 = 0$  пФ,  $R1 = 9,1$  кОм,  $R2 = \infty$  и 24 МГц при  $C1 = 50$  пФ,  $R1 = 3,5$  кОм,  $R2 = \infty$  при изменении напряжения питания от 3 до 6 В в температурном диапазоне от  $-55$  до  $125^\circ\text{C}$  для всех вариантов исполнения. Однако нестабильность генерируемой частоты превышает  $0,11\%/^\circ\text{C}$ . Типовые графики зависимостей генерируемой ИС типа CD4046 частоты от номиналов времязадающих компонентов приведены на рисунке 7.

Существует и низкочастотный вариант этой микросхемы, работающей с частотой генерации до  $1,6...2,7$  МГц и стабильностью до  $\pm 0,015\%/^\circ\text{C}$  при напряжении питания 15 В. Компания TI обозначает его CD4046B, NXP – HEF4046B, Fairchild Semiconductor –

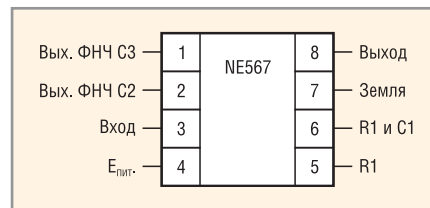


Рис. 3. Функциональная схема микросхемы NE/SE564

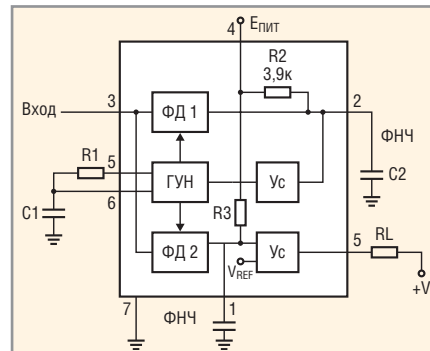


Рис. 4. Функциональная схема микросхемы NE567/LM567



Рис. 5. Нумерация выводов микросхемы CD4046

CD4046BC [13]. Необходимо учитывать, что вывод 15 этой ИС является выводом внутреннего стабилитрона с напряжением стабилизации около 7 В, а ФД3 на основе RS-триггера отсутствует.

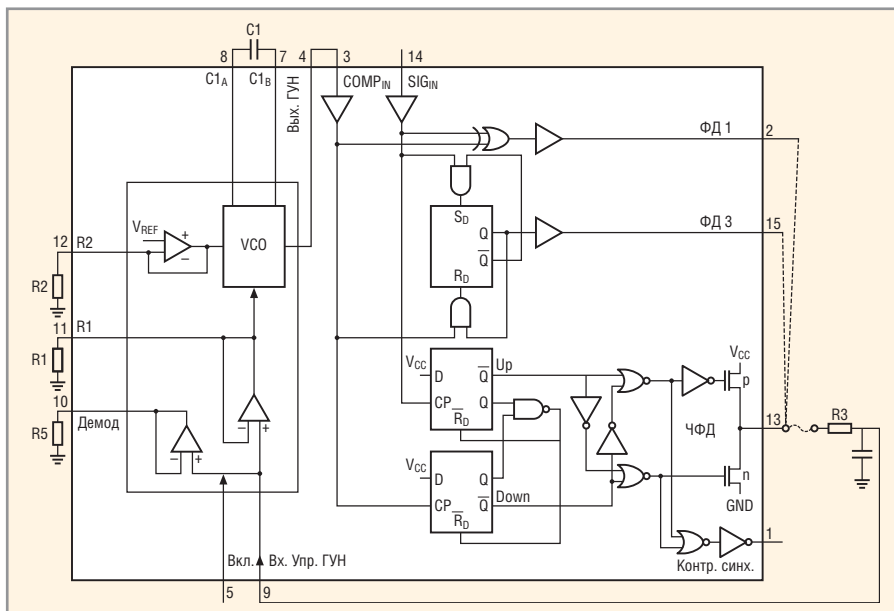


Рис. 6. Логическая структура цифровой части микросхемы CD4046

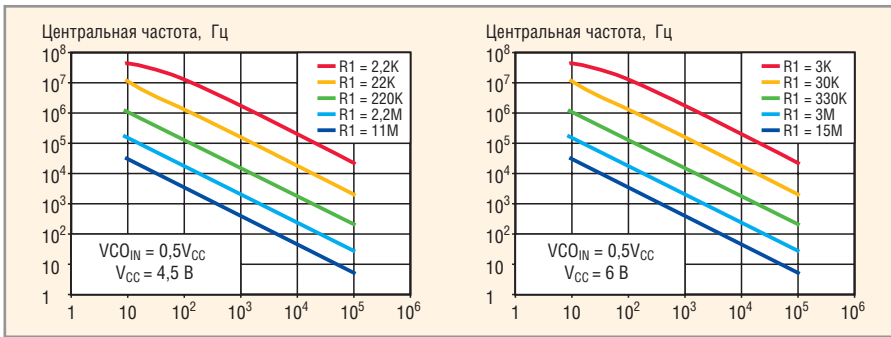


Рис. 7. Вариант зависимости перестройки ГУН микросхемы CD4046A по частоте от ёмкости C1 при  $E_{упр} (V_{CO_{IN}}) = 0,5E_{пит} (V_{CC})$ ;  $R2 = \infty$

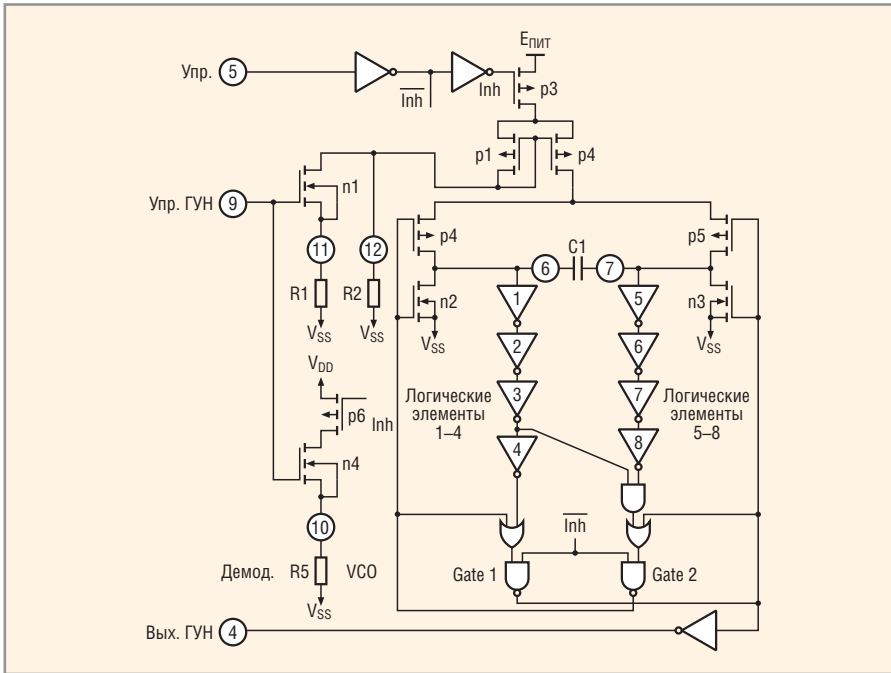


Рис. 8. Структурная схема ГУН микросхемы CD4046

На рисунке 8 приведена структурно-логическая схема секции ГУН микросхемы CD4046. Сигнал высокого уровня (лог. 1) на управляющем входе 5 разрешает работу ГУН. Времязадающий конденсатор C1 включен между выводами 6 и 7. Его перезаряжают ключи на полевых транзисторах n2-p5 или p4-n3, которые являются аналоговой частью мультивибратора. Скорость (и время) перезаряда

C1 определяет ток, генерируемый токовым зеркалом p1-p2, причём задающий резистор R2 определяет «дополнительный» постоянный ток и постоянное частотное смещение генерируемой частоты, а резистор R1 – вклад в перестройку ГУН управляющего напряжения на выводе 9.

Соотношение токов, определяемых резисторами R1 и R2, задаёт диапазон перестройки ГУН: при  $R2 = \infty$  диапа-

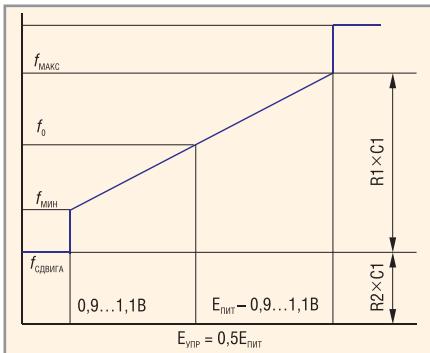


Рис. 9. Диапазон перестройки секции ГУН микросхемы CD4046

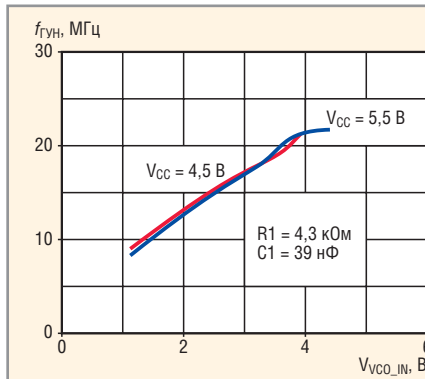


Рис. 10. Диапазон перестройки секции ГУН микросхемы 74HC9046

зон перестройки ГУН наибольший; при  $R1 = \infty$  перестройка отсутствует, а частота генерации полностью определяется номиналами резистора R2 и конденсатора C1 (см. рис. 9). Рекомендуемое производителем минимальное значение времязадающего конденсатора  $C1 \geq 40$  пФ, максимальное значение не ограничено. Выход 4 секции ГУН – чисто цифровой и полностью совместим с логическими схемами TTL/КМОП.

Дополнительный выход 10 (при наличии внешнего резистора R5) служит для отвода демодулированного напряжения низкой частоты с выхода фазового детектора, когда ИС используется в качестве демодулятора сигналов с угловой модуляцией.

Входной ток утечки по входу управления 9 не превышает 1 мкА; секция ГУН микросхемы CD4046 при питании от источника питания 6 В потребляет не более 80 мкА в диапазоне температур до 85°C, и не более 160 мкА – до 125°C.

Микросхема содержит в себе все основные элементы кольца ИФАП: набор импульсно-фазовых детекторов, формирователи импульсов по входу 3 (от ГУН) и по опорному входу 14 (сигнал). Набор из трёх ИФД в одной микросхеме, по современным понятиям, избыточен. Однако в 1970-х – 1980-х годах квазиастатические кольца ИФАП на основе ЧФД не были столь популярны, отсутствовало глубокое понимание механизма работы генератора подкачки тока заряда ЧФД и изодромного звена, а их теория только оформлялась [1].

Инженеры-разработчики активных цифровых синтезаторов повсеместно использовали спусковые ИФД на основе RS-триггеров, вследствие чего кольца ФАП были астатичны только по частоте и статичны по фазе, т.е. остаточная фазовая ошибка в

замкнутом кольце определялась, в том числе, и параметрами настройки «свободного» генератора. ИФД на основе схемы «исключающее ИЛИ» аналогичен ИФД на основе RS-триггера, работающему по фронтам (перепадам), но, в отличие от последнего, требует наличия меандра на входах. Напротив, ИФД на основе RS-триггеров запускаются короткими импульсами, формирование которых не составляет особого труда. Меандр на выходе счётчика импульсов можно легко получить, если на выходе счётчика находится счётный триггер (делитель на 2), что резко сужает область применения ИФД на основе схемы «исключающее ИЛИ».

Существенным недостатком ЧФД микросхемы CD4046 является большой разброс значений тока подкачки заряда (Charge Pump), который находится в пределах от 0,5 до 10 мкА при номинальном значении 5 мкА. Это существенно затрудняет расчёт параметров кольца ФАП и зачастую требует индивидуальной подстройки каждого узла, реализованного на этой ИС.

Развитием микросхемы серии 4046 стали ИС типа 74НС7046 компаний Philips, Intersil и TI – технологически улучшенный аналог ИС 74НС4046, но с детектором контроля синхронизма (Lock detect) вместо ИФД3 на основе RS-триггера (вывод 1). Необходимость такого контроля очевидна, и была предложена простая в реализации схема, которая работала лишь с одним внешним конденсатором фильтра. К сожалению, и в этой микросхеме, также широко распространённой на рынке, ток подкачки заряда находится в пределах от 0,5 до 10 мкА при номинальном значении 5 мкА. Такие технологические разбросы типичны для цифровой ИС и слабо влияют на качество её работы. Кроме того, в микросхеме 7046 к выводу 15 подключается внешний конденсатор схемы детектора контроля синхронизма; соответственно, внутренний стабилитрон отсутствует.

В микросхеме компаний Philips и TI типа 74НС9046 разработчиками реализована если не калибровка, то хотя бы установка внешним резистором значения тока подкачки заряда. В этой ИС ток подкачки заряда частотно-фазового детектора PC2\_OUT изменяется в более узких пределах. Так, при  $R_b = 40 \text{ кОм}$   $PC2\_OUT = 1,06 \text{ мА}$  с разбросом значений от 0,53 до 2,12 мА.



Рис. 11. Нумерация выводов микросхемы TLC2932

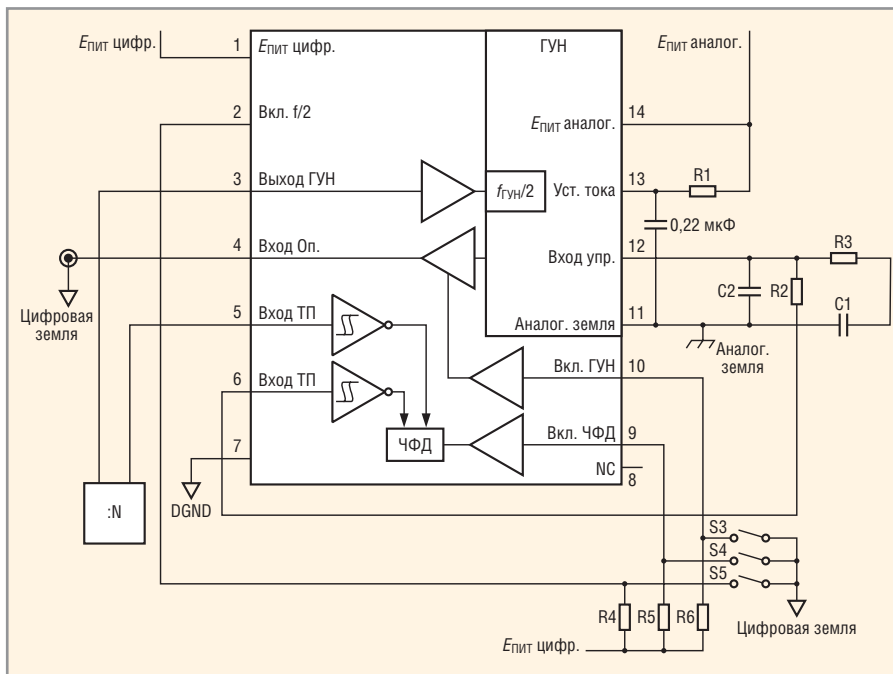


Рис. 12. Внутренняя структура микросхемы TLC2932

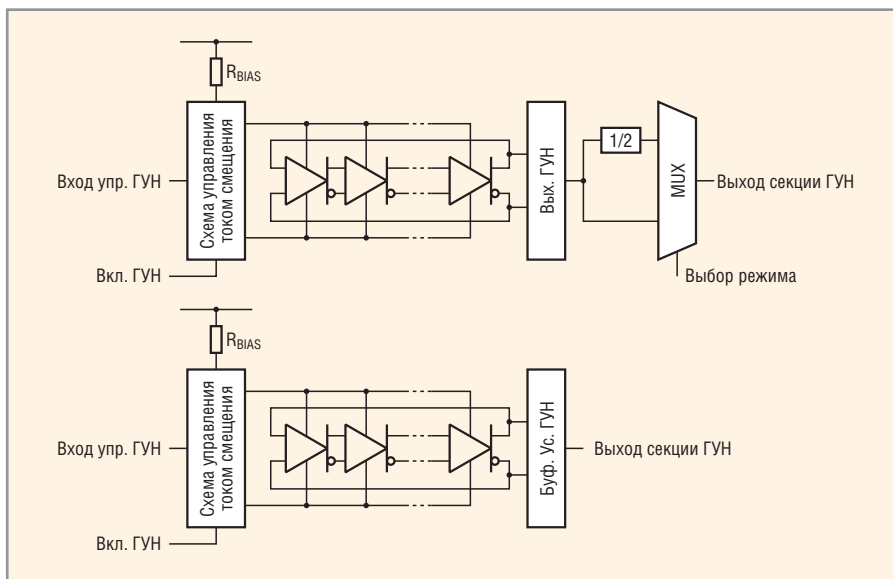


Рис. 13. Секция ГУН микросхем TLC2932/42 (вверху) и TLC2933/43 (внизу)

Температурная нестабильность ГУН менее 0,06%/°C (см. рис. 10).

Все остальные параметры микросхемы 9046 близки или совпадают с параметрами «младших» микросхем семейства 4046/7046. Кроме того, вывод 1 микросхемы соединён с землей (выводом 8), а токозадающий резистор  $R_b$ , предназначенный для уста-

новки тока подкачки заряда ЧФД, подключается к выводу 15.

Компания TI выпустила на рынок высокочастотный «клон» ИС типа CD4046 – микросхему TLC2932 (см. рис. 11) с максимальной частотой генерации 55 МГц при напряжении питания 5 В и до 23 МГц при 3 В. Структура микросхемы приведена на ри-

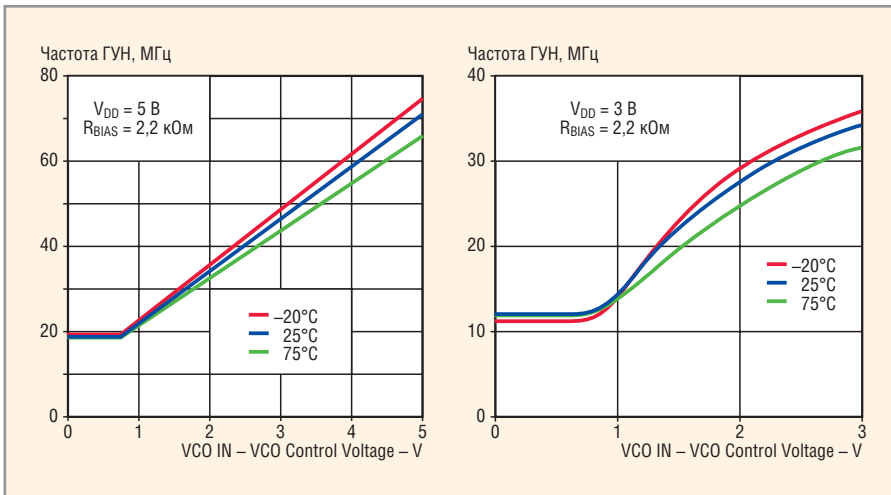


Рис. 14. Параметры ГУН микросхемы TLC2932 при  $E_{пит} = 5 В$  (слева) и  $E_{пит} = 3 В$  (справа)

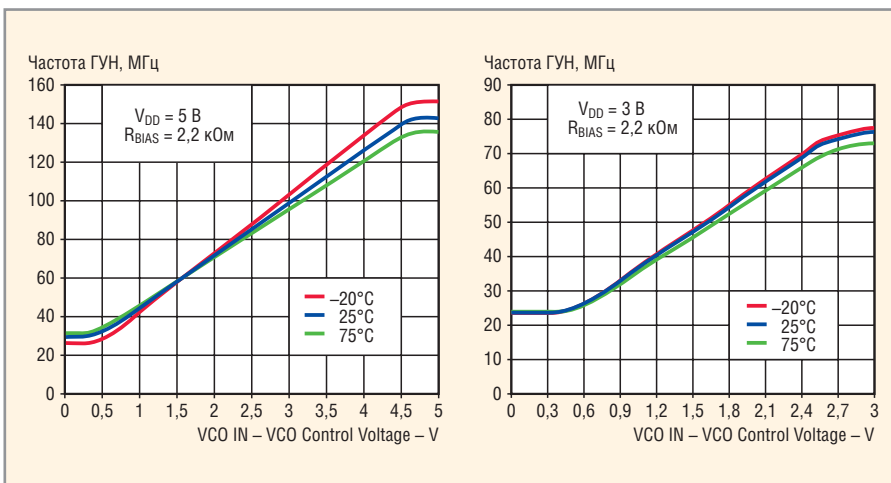


Рис. 15. Параметры ГУН микросхемы TLC2933 при  $E_{пит} = 5 В$  (слева) и  $E_{пит} = 3 В$  (справа)

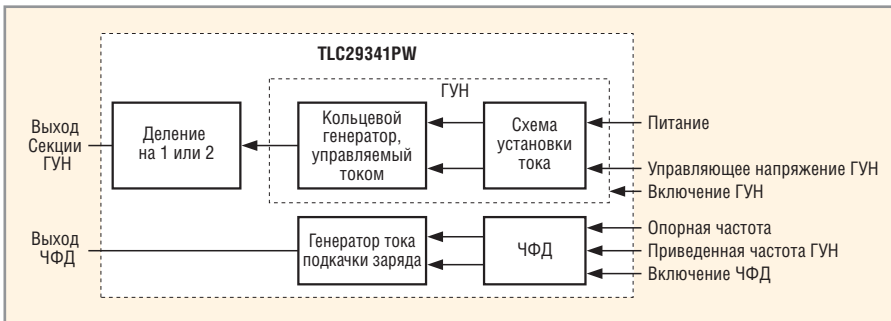


Рис. 16. Структурная схема TLC2934A

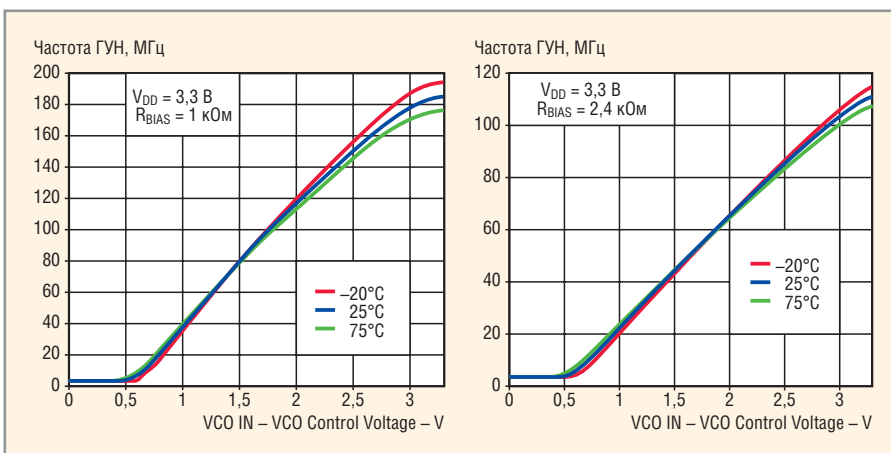


Рис. 17. Параметры ГУН микросхемы TLC2934 при различных значениях  $R_{BIAS}$

сунке 12. По выходу ГУН в ИС имеется встроенный делитель частоты на 2, управляемый извне (см. верхнюю часть рисунка 13); характеристика управления ГУН этой микросхемы приведена на рисунке 14. Стабильность колебаний ГУН не хуже  $-0,264\%/^{\circ}C$  в диапазоне температуры от  $-20$  до  $75^{\circ}C$ . Максимальная рабочая частота ЧФД не превышает  $38$  МГц при напряжении питания  $5 В$  и  $22$  МГц – при  $3 В$ . Выходной ток секции ЧФД составляет  $\pm 0,5$  мА при разбросе более  $100\%$ .

Несколько слов о токе (токах) смещения BIAS. Внешний резистор, обозначаемый как  $R_{BIAS}$ , задаёт начальный ток смещения, который, наряду с времязадающим конденсатором  $C$ , определяет частоту генерации ГУН и в схеме генератора, построенного на основе перезаряда времязадающего конденсатора калиброванным током, и в схеме кольцевого (ring) генератора. В таких случаях правильнее говорить о генераторе, управляемом током (ГУТ), но внутри ИС предусмотрены схемотехнические элементы для преобразования тока в напряжение (или напряжения в ток, см. рис. 8). К тому же генераторы всех рассматриваемых в статье микросхем управляются напряжением с выхода петлевого фильтра кольца ФАП, поэтому мы везде используем обозначение ГУН.

Микросхема TLC2932 оказалась удачной, и появилась её модификация – TLC2933 – с максимальной частотой генерации до  $130$  МГц, но без встроенного делителя частоты на 2 (см. нижнюю часть рис. 13); вывод 2 обозначается test (см. рис. 11) и при соединении с землёй разрешает работу микросхемы. Рабочая частота ЧФД  $\leq 50$  МГц при напряжении питания  $5 В$  и не превышает  $30$  МГц при  $3 В$ . Выходной ток подкачки заряда секции ЧФД составляет  $\pm 0,5$  мА с разбросом более  $100\%$ . Стабильность колебаний ГУН не хуже  $-0,309\%/^{\circ}C$  в диапазоне от  $-20$  до  $75^{\circ}C$  (см. рис. 15) и осталась примерно на том же уровне, что и у «родоначальницы» серии, но частотный диапазон ИС расширился, а линейность управляющей характеристики повысилась.

Микросхема TLC2934 при единственном питании  $3,3 В$  позволяет получить на выходе секции ГУН частоту до  $180$  МГц. Она полностью совместима с микросхемами TLC2932/33 (см. рис. 16). Максимальная рабочая

частота ЧФД  $\leq 50$  МГц. Выходной ток подкачки заряда секции ЧФД составляет  $\pm 1,5$  мА с разбросом более 100%. Нестабильность частоты ГУН резко уменьшилась и не превышает  $0,03\%/^{\circ}\text{C}$  в диапазоне температур от  $-20$  до  $75^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 17). Все микросхемы серии TLC29xx используют стандартный ЧФД со схемой подкачки (поддержания) заряда; временные диаграммы его работы приведены в [1].

Компания Texas Instruments также выпускает двоянные микросхемы цифровых ФАП типа TLC2942 и TLC2943. Микросхема TLC2942 состоит из двух одинаковых секций TLC2932 с частотой генерации до 70 МГц при напряжении питания 5 В; ЧФД может работать на частотах 20 МГц.

Микросхема TLC2943 состоит из двух одинаковых секций TLC2933 с частотой генерации до 130 МГц при напряжении питания 5 В и 70 МГц при 3,3 В; при этом ЧФД может работать на частотах 50 и 30 МГц соответственно.

Подробную информацию об этих и других ИС можно найти в соответствующих разделах интернет-страниц их производителей.

Разумеется, рассмотренными микросхемами не исчерпывается всё многообразие цифровых систем фазовой автоподстройки. Однако описанные ИС были не просто первыми, но во многих аспектах стали прототипами более совершенных микросхем, цифровых трактов PLL в целом и отдельных операционных узлов – генераторов, усилителей постоянного тока, фазовых детекторов, прескалеров, делителей частоты различных видов и даже арифметических блоков. Спустя примерно 35 лет с момента появления первых микросхем серии 4046, стали доступными полностью интегрированные синтезаторы ФАП с минимальной внешней обвязкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин Ю.А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фа-

зовой автоподстройки частоты. Современная электроника. 2007. № 4 – 6, 8, 9; 2008. №1.

2. Шило В.Л. Функциональные аналоговые интегральные микросхемы. Радио и связь, 1982.
3. www.national.com.
4. www.nxp.com.
5. Зарецкий М.М., Мовшиович М.Е. Синтезаторы частот с кольцом фазовой автоподстройки. Энергия, 1974.
6. Лейнов М.Л. и др. Цифровые делители частоты на логических элементах. Энергия, 1975.
7. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. Радио и связь, 1991.
8. Шишов С.Я. Быстродействующий делитель частоты с переменным коэффициентом деления. Техника средств связи, Серия ТРС. 1981. Вып. 9. С. 83–88.
9. www.freescale.com.
10. www.onsemi.com.
11. www.intersil.com.
12. www.ti.com.
13. www.fairchildsemi.com.



## Новости мира News of the World Новости мира

### Светодиод-вспышка

Фирма Avago объявила о миниатюрном светодиоде с автофокусировкой для плоских приборов. ASMT-FJ30, согласно информации производителя, является в настоя-

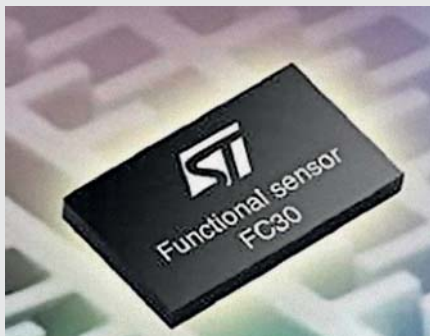


щее время самыми плоским светодиодом с автофокусировкой в мире (размеры корпуса  $3,2 \times 2,4 \times 2,4$  мм). Оранжевый светодиод-вспышка является SMT-светодиодом с обтекателем и прозрачной, не диффузной линзой с углом рассеяния света  $18^{\circ}$ .

[www.avagotech.com](http://www.avagotech.com)

### Объёмный сенсор положения

Компания STMicroelectronics представила объёмный сенсор распознавания положения. Корпус LGA с 14 контактами имеет размеры  $3 \times 5 \times 0,9$  мм. В распоряжении имеются три выведенных вывода прерываний.

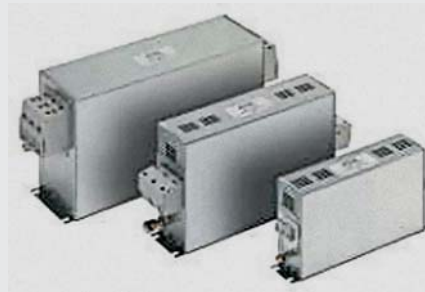


Примером применения является автоматическое распознавание снимков в книжном и альбомном формате для переносных устройств со встроенной фотокамерой. Сенсор пригоден для компонентов с батарейным питанием и потребительских продуктов.

[STMicroelectronics](http://STMicroelectronics)

### Входной электромагнитный фильтр для преобразователей частоты

Фирма Epcos расширила ассортимент своих трёхпроводных электромагнитных фильтров серий для преобразователей частоты. Фильтры серии B84143D\*R127 рассчитаны на токи 16...200 А при номинальном напряжении 520 В. При допустимой температуре  $50^{\circ}\text{C}$  они пригодны также для монтажа в распределительных шкафах. При их исполнении в форме книги они годятся для монтажа даже в теснённых усло-



виях. Приложениями являются насосы, вентиляционные установки, печатные машины и подъёмно-транспортное оборудование.

[www.epcos.com](http://www.epcos.com)

### Сдвижные переключатели с монтажной высотой 0,9 мм

Фирма Alps предлагает сдвижные переключатели SSAH с длиной рабочего хода 1,5 мм и с монтажной высотой 0,9 мм. Размер опорной площадки составляет  $9,5 \times 3,0$  мм. Сдвижные переключатели с боковым расположением движка представляют собой однополюсные трёхпозиционные переключатели и рассчитаны на коммутацию токов 1 мА при максимальном напряжении 5 В. Их срок службы составляет 10 000 циклов переключений. Начальное контактное сопротивление равно максимум 200 МОм. Типичными областями применения являются мобильные телефоны, цифровые камеры, цифровые видеокамеры и ноутбуки.

[www3.alps.com](http://www3.alps.com)