

Интегральные радиочастотные синтезаторы частоты с ФАПЧ National Semiconductor

Геннадий ШТРАПЕНИН,
к. ф. -м. н.
gshtrapenin@electron.usurt.ru

Фирма National Semiconductor является одним из ведущих производителей интегральных микросхем (ИМС) радиочастотных синтезаторов частоты (РСЧ) на основе системы фазовой автоподстройки частоты — Phase Lock Loop (ФАПЧ — PLL). Последнее семейство синтезаторов серии PLLatinum охватывает частотный диапазон до 5 ГГц и обладает наилучшими в мире характеристиками, аналоги микросхем серии выпускаются и другими фирмами во многих странах. National Semiconductor поставляет свои изделия основным мировым производителям оборудования средств связи, таким как AT&T, Ericsson, Siemens, NEC и Alcatel.

Принцип работы устройств с системой ФАПЧ основан на использовании генератора, управляемого напряжением (ГУН), частота которого подстраивается под частоту входного управляющего сигнала с точностью до некоторого (небольшого) фазового сдвига. Структурная схема простейшей системы ФАПЧ приведена на рис. 1.

Для сравнения частоты и фазы ГУН и входного сигнала $U_{вх}$ используется фазовый детектор ФД, на выходе которого формируется сигнал ошибки $U_{ош}$, поступающий на фильтр нижних частот ФНЧ. Выходной сигнал последнего $U_{упр}$ является сигналом управления для автоматической подстройки частоты и фазы ГУН.

Система ФАПЧ может быть не только аналоговой, но и импульсной, цифровой или комбинированной. В импульсной системе ФАПЧ в качестве ФД используется логическая схема на D-триггерах с программируемой задержкой срабатывания и выходным каскадом в виде управляемого генератора тока на комплементарных полевых транзисторах — так называемой схеме подкачки заряда (Charge Pump), длительность выходных импульсов которой пропорциональна разности фаз входных сигналов, а в цифровой

ФАПЧ выходным является цифровой сигнал (поток данных), полученный в результате обработки квантованных отсчетов аналогового сигнала.

Типовая структурная схема современного радиочастотного синтезатора частоты с импульсно-фазовой ФАПЧ, приведенная на рис. 2, включает делитель частоты входного (опорного) сигнала кварцевого генератора $F_{оп}$ с фиксированным целочисленным коэффициентом деления (ДФКД), коэффициент деления которого R может устанавливаться внешним управляющим кодом, и делитель частоты ГУН с переменным коэффициентом деления (ДПКД) N , также устанавливаемым внешним кодом с шагом 1. Значение частоты выходного сигнала синтезатора $F_{вых}$ рассчитывается по формуле, приведенной на рис. 2.

Отметим, что в современных интегральных синтезаторах частоты для повышения диапазона генерируемых частот ДПКД состоит из двухмодульного (с двойным целочисленным коэффициентом деления $P/P+1$) предварительного высокочастотного делителя частоты — прескалера, выполняемого по технологии БиКМОП, и двух сравнительно низкочастотных поглощающих счетчиков-делителей с коэффициентами пересчета A и B ,

работающих на частотах порядка 300 МГц и ниже, которые могут быть реализованы на комплементарных МОП-структурах. При этом результирующий коэффициент деления N представляется в виде $N = A(P+1) + BP$, и для $N \geq N_{мин} = P(P-1)$ можно получить непрерывную последовательность коэффициентов N вплоть до $N_{макс} = A_{макс} + PB_{макс}$, где величины $A_{макс}$ и $B_{макс}$ определяются разрядностью счетчиков.

К основным параметрам РСЧ с ФАПЧ относятся диапазон генерируемых частот, шаг и время перестройки, уровень побочных составляющих основного сигнала и фазовый шум, характеризующий девиацию фазы и частоты ГУН. Величина фазового шума характеризует убывание мощности сигнала по частоте и рассчитывается как отношение мощности в полосе частот шириной 1 Гц на частоте, отстоящей от основной несущей частоты на 1 кГц, к мощности сигнала основной несущей в такой же полосе частот. Фазовый шум измеряется в дБс/Гц, где дБс — уровень мощности относительно центральной частоты несущей.

Фазовый шум существенно влияет на параметры приемопередающей аппаратуры с РСЧ. С ростом коэффициента деления N фазовый

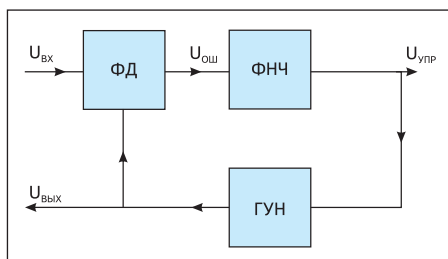


Рис. 1. Упрощенная структурная схема устройства фазовой автоподстройки частоты

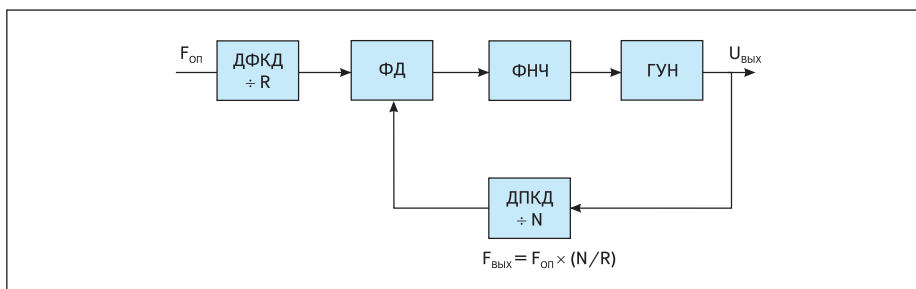


Рис. 2. Упрощенная структурная схема синтезатора частоты с целочисленным коэффициентом деления

Таблица. Основные параметры интегральных РСЧ National Semiconductor

Тип	Корпус	Диапазон частот основного входного сигнала, ГГц	Диапазон частот второго входного сигнала, ГГц	Напряжение питания, В		Потребляемый ток, мА	Нормированный фазовый шум, Дбс/Гц	Коэффициенты деления основного прескалера	Коэффициенты деления второго прескалера	Выходной ток, мА	Примечание
		тип	тип	мин	макс	тип	тип			тип	
LMX2306	TSSOP-16, CSP-16	0,025–0,55		2,3	5,5	1,7	–210	8/9		0,25/1,0	Экономичный
LMX2326	TSSOP-16, CSP-16	0,1–2,8		2,3	5,5	4,7	–210	32/33		0,25/1,0	То же
LMX2310U	TCSP-20	0,5–2,5		2,7	5,5	2,3	–212	16/17 или 32/33		1,0/4,0	Сверхэкономичный
LMX2313U	TCSP-20	0,045–0,6		2,7	5,5	1,0	–212	8/9 или 16/17		1,0/4,0	То же
LMX2324	TSSOP-16, CSP-16	0,1–2,0		2,7	5,5	3,5	–	32/33		4,0	Упрощенный
LMX2346	TSSOP-16, CSP-16	0,2–2,0		2,7	5,5	3,0	–217	32/33		4,0	Низкий фазовый шум
LMX2347	TSSOP-16, CSP-16	0,2–2,5		2,7	5,5	3,6	–217	32/33		4,0	То же
LMX1600	TSSOP-16, CSP-16	0,2–2,0	0,040–0,50	2,7	3,6	5,0	–197	32/33	8/9	0,16/1,6	
LMX2330L	TSSOP-16, CSP-16	0,2–2,0	0,045–0,51	2,7	5,5	5,0	–211	32/33 или 64/65	8/9 или 16/17	1,0/4,0	
LMX2330U	TSSOP-16, CSP-16	0,2–2,5	0,045–0,60	2,7	5,5	3,3	–212	32/33 или 64/65	8/9 или 16/17	1,0/4,0	Экономичный
LMX2370	TSSOP-20, CSP-24	0,045–2,5	0,045–1,2	2,7	5,5	5,0	–211	16/17 или 32/33	8/9 или 16/17	1,0/4,0	
LMX2377U	TSSOP-20, CSP-24	0,2–2,5	0,045–0,60	2,7	5,5	3,5	–212	16/17 или 32/33	8/9 или 16/17	1,0/4,0	Экономичный
LMX2430	TSSOP-20, UTCSP-20	0,25–3,0	0,10–0,80	2,35	2,75	4,2	–219	8/9 или 16/17	8/9 или 16/17	1,0/4,0	Высококачественный
LMX2433	TSSOP-20, UTCSP-20	0,5–3,6	0,25–1,7	2,35	2,75	5,2	–219	8/9 или 16/17	8/9 или 16/17	1,0/4,0	То же
LMX2434	TSSOP-20, UTCSP-20	1,5–5,0	0,50–2,5	2,35	2,75	7,0	–219	16/17 или 32/33	8/9 или 16/17	1,0/4,0	То же
LMX2350	TSSOP-24, UTCSP-24	0,5–2,5	0,010–0,55	2,7	5,5	6,5	–201	32/33 или 16/17	8/9	0,1–1,6	Дробный
LMX2352	TSSOP-24, UTCSP-24	0,25–1,2	0,010–0,55	2,7	5,5	4,7	–201	8/9 или 16/17	8/9	0,1–1,6	То же
LMX2354	TSSOP-24, UTCSP-24	0,5–2,5	0,010–0,55	2,7	5,5	6,0	–204	16/17/20/21 или 8/9/12/13	8/9	0,1–1,6	То же
LMX2364	TSSOP-24, UTCSP-24	0,5–2,6	0,05–0,85	2,7	5,5	7,0	–210	16/17/20/21 или 8/9/12/13	8/9	1,0/4,0/8,0/16	Высококачественный
LMX2470	UTCSP-24	0,5–2,6	0,05–0,80	2,35	2,75	4,1	–210	16/17/20/21	8/9 или 16/17	0,1–1,6	Сигма-дельта коррекция
LMX2471	UTCSP-24	0,5–3,6	0,25–1,7	2,35	2,75	5,6	–210	16/17/20/21	8/9 или 16/17	0,1–1,6	То же

шум возрастает, поэтому для уменьшения N приходится повышать частоту сигнала на входе ФД, но при целочисленном N эта частота не может быть больше шага перестройки частоты РСЧ, поэтому коэффициент N приходится выбирать довольно большим.

Стремление к уменьшению уровня фазовых шумов привело разработчиков интегральных РСЧ к созданию синтезаторов с дробно-переменным коэффициентом деления, в которых частота выходного сигнала ГУН определяется функцией суммы $N+F$, где N — целочисленный, а F — дробный компонент коэффициента деления частоты ДПКД. Дробный коэффициент достигается чередованием целочисленных коэффициентов деления N определенным образом, например, для достижения коэффициента деления 100,3 за время десяти выходных импульсов устанавливают три раза $N = 101$ и семь раз $N = 100$, для чего в РСЧ вводится специальный программируемый счетчик-аккумулятор, выдающий сигнал переключения для изменения коэффициента деления основного делителя на 1. Поскольку дробные синтезаторы могут работать с меньшими значениями N , чем целочисленные, их фазовые шумы оказываются меньше. Положительным качеством дробных синтезаторов является также низкий уровень спектральных составляющих вблизи основной частоты, что весьма важно для аппаратуры связи. Метод ФАПЧ и принципы построения РСЧ на его основе подробно рассматриваются в серии статей [1].

Перейдем далее к рассмотрению некоторых интегральных микросхем РСЧ National Semiconductor, полная номенклатура которых насчитывает около 50 изделий [2].

Обзор начнем с интегральных микросхем одиночных целочисленных синтезаторов, основные параметры ряда которых представлены в таблице.

Серия экономичных РСЧ LMX2306/16/26 охватывает диапазон частот до 2,8 ГГц и предназначена для применения в портативной аппаратуре с автономным питанием. Используется совместно с внешними ГУН, опорным генератором и ФНЧ. Функциональная схема ИМС синтезатора представлена на рис. 3.

Управление синтезатором осуществляется по трехпроводной последовательной шине Microwire сигналами Data, Enable (LE) и Clock. Имеется программируемая установка одного из двух значений выходного тока фазового детектора (Charge Pump Current) 0,25 мА или 1 мА, а также программируемый режим быстрого захвата (Fast Lock), в котором переключение выходного тока фазового детектора происходит в течение определенного числа периодов выходного сигнала. В микросхеме имеется также специальный вывод FL₀, используемый для подключения внешнего резистора, изменяющего полосу пропускания ФНЧ, что ускоряет процесс захвата частоты, и многофункциональный выход F₀LD, на который можно программно коммутировать различные внутренние сигналы микросхемы. В дежурном режиме (Power down) потребление тока ИМС снижается до 1 мкА.

Серия сверхэкономичных синтезаторов LMX2310U/1U/2U/3U работает в диапазоне частот от 45 МГц до 2,5 ГГц и предназначена для использования в устройствах мобильной связи и приемниках GPS. Отличается переключаемыми коэффициентами деления прескалера (16/17 или 8/9 для LMX2313U и 32/33 или 16/17 для остальных) и низким минимальным уровнем сигналов шины управления 1,72 В. По остальным параметрам эти устройства аналогичны предыдущей серии.

Интегральный РСЧ LMX2324 — вариант простого и дешевого решения для построения различных персональных радиочастотных устройств — мобильных и бесшнуровых телефонов различных стандартов, устройств связи компьютеров и т. п. Работает в широком диапазоне частот и отличается сравнительной простотой схемотехники внешних элементов и программирования по трехпроводной шине Microwire. Выпускается также улучшенный вариант LMX2324 — серия LMX2346/7, отличающаяся низким уровнем фазовых шумов. По расположению выводов микросхемы LMX2346 и LMX2347 совместимы с очень популярными ранее выпускавшимися ИМС LMX2323.

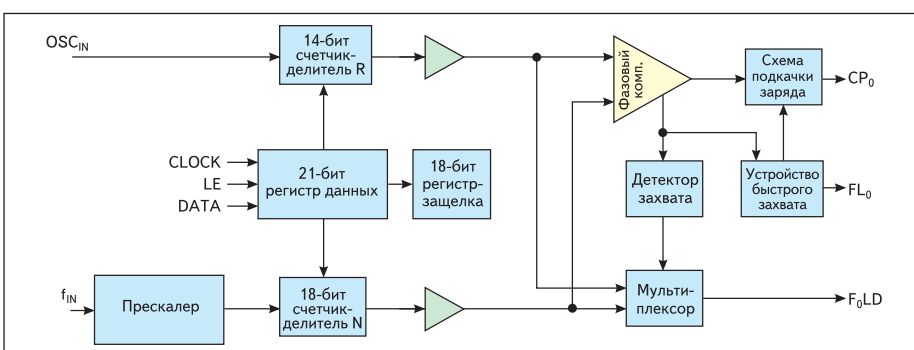


Рис. 3. Функциональная схема ИС с ФАПЧ серии LMX2306/16/26

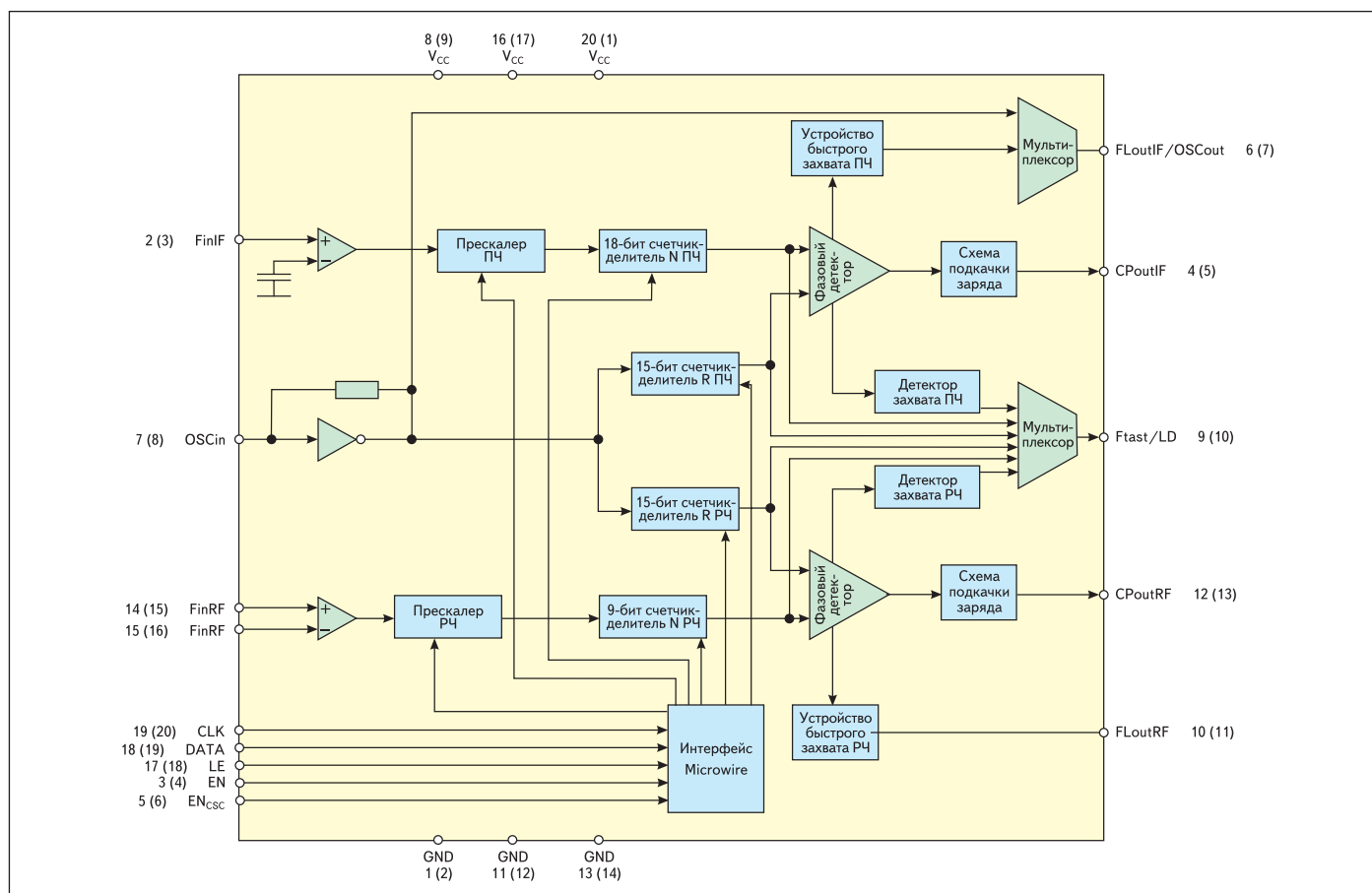


Рис. 4. Функциональная схема ИС с ФАПЧ серии LMX2430/33/34

Перейдем далее к рассмотрению двойных интегральных РСЧ, предназначенных для использования совместно с внешними ГУН и ФНЧ в качестве гетеродинов приемных и передающих устройств с двойным преобразованием частоты, при этом из одного опорного сигнала формируются когерентные сигналы двух частот, например, радио (RF) и промежуточной (IF) частоты.

Серия недорогих двойных целочисленных синтезаторов **LMX1600/1/2** (в таблице приведены параметры только LMX1600) охватывает диапазон частот до 2 ГГц основного и до 500 кГц второго канала и предназначена для использования в бытовых средствах связи. Отличается сравнительной простотой применения и программирования. Имеется встроенный программируемый цифровой детектор захвата ФАПЧ в обоих каналах и аппаратный и программный режим пониженного энергопотребления Power Down.

Более совершенные двойные интегральные РСЧ серий **LMX2330L/31L/32L** и их экономичный вариант **LMX2330U/31U/32U** позволяют получить расширенную сетку частот при низком уровне фазовых шумов, содержат цифровой и аналоговый детектор захвата и обеспечивают весьма высокие параметры выходных сигналов RF и IF. По аналогичным схемам выполнена серия интегральных РСЧ **LMX2370/77U**, отличающаяся широким

диапазоном рабочих частот и низким минимальным уровнем сигналов шины управления Microwire (1,8 В). Основной синтезатор ИМС LM2377U снабжен программируемой системой быстрого захвата частоты Fast Lock.

Последнее достижение National Semiconductor в области создания двойных целочисленных РСЧ — ИМС **LMX2430/33/34**, предназначенные для синтеза частот в диапазоне до 5 ГГц. Микросхемы отличаются высокой экономичностью при низком напряжении питания 2,5 В и чрезвычайно малым уровнем фазовых шумов, необходимым для высококачественной аппаратуры связи. Функциональная схема интегрального РСЧ серии LMX243x приведена на рис. 4.

Оба синтезатора микросхемы имеют программируемые системы Fast Lock и цифровой и аналоговый детекторы захвата частоты Lock Detect (выход последнего конфигурируется как двухтактный или с открытым стоком), а также два мультиплексированных выхода внутренних сигналов микросхемы, расширяющих возможности использования РСЧ LMX243x в приемопередающей аппаратуре.

Как уже было отмечено выше, синтезаторы ФАПЧ с дробным коэффициентом деления обладают по сравнению с целочисленными рядом преимуществ, а именно снижением фазового шума вблизи несущей частоты и уменьшением времени перестройки. Ком-

пания National Semiconductor выпускает одиночные и двойные интегральные РСЧ с дробным коэффициентом деления (у двойных синтезаторов с дробным коэффициентом реализуется высокочастотная секция RF, а секция промежуточной частоты IF выполняется на базе целочисленного делителя).

Рассмотрение начнем с двойных дробных РСЧ серии **LMX2350/2** (выпускается также одиночный РСЧ LMX2353 с параметрами, аналогичными RF-части LMX2350), охватывающих частотный диапазон 0,5–2,5 ГГц и 0,25–1,2 ГГц соответственно. Обе ИМС серии включают схему ФАПЧ промежуточной частоты (IF) с целочисленным коэффициентом деления, работающую в диапазоне от 10 до 550 МГц. Радиочастотные (RF) делители представляют собой схему деления на 15/16 с дробной компенсацией для обеспечения дробно-переменного коэффициента деления.

Выходные токи фазовых детекторов LMX2350/2 могут программно устанавливаться в диапазоне от 0,1 до 1,6 мА с шагом 100 мкА для радиочастотной части и 0,1 или 0,8 мА для части ПЧ. Имеется режим пониженного энергопотребления Power Down (потребляемый ток 5 мкА при напряжении питания 3 В), которым можно управлять с помощью сигналов, подаваемых на разрешающие выходы ИМС RF_EN и IF_EN или с помощью кода по трехпроводной шине управления. Отме-

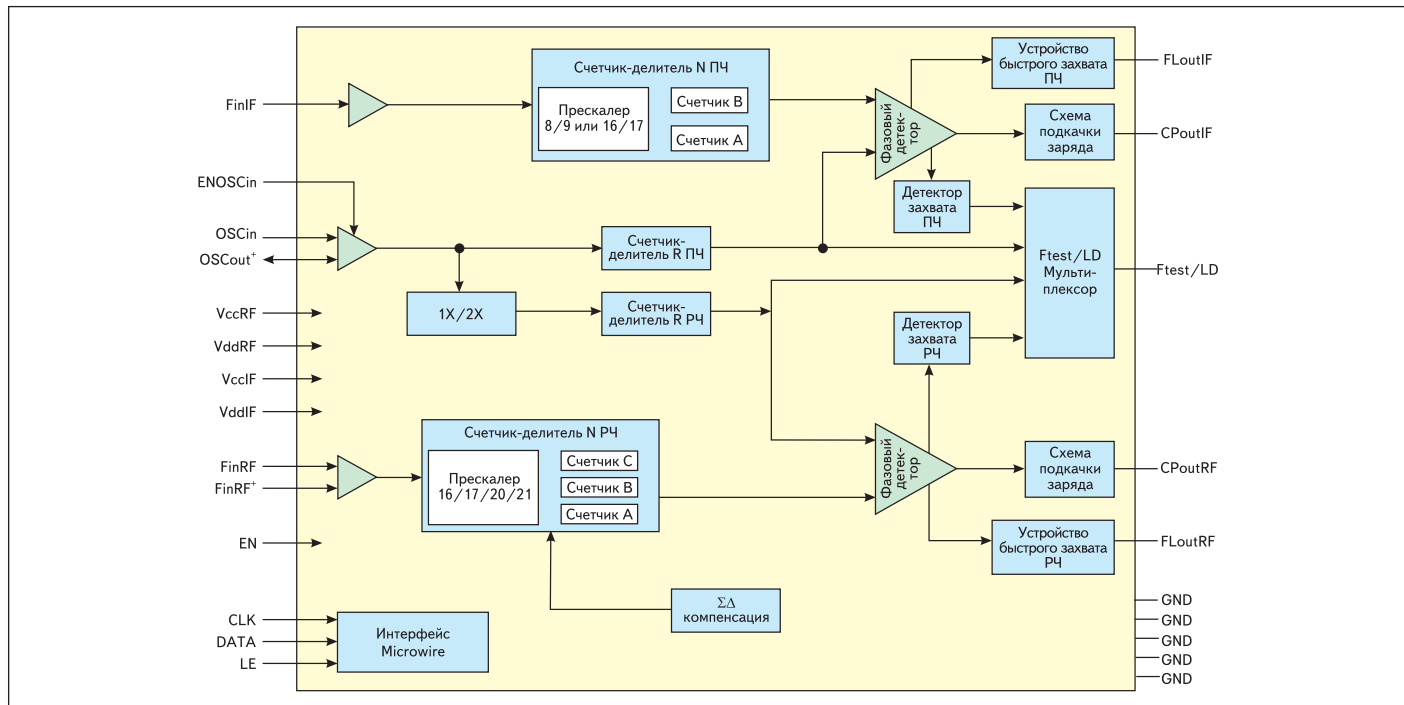


Рис. 5. Функциональная схема ИС с ФАПЧ серии LMX2470/71

тим, что в общем случае состояние разрешающих выводов преобладает над кодом шины управления режимом Power Down (за исключением кода управления RF-части схемы ФАПЧ). Активация режима пониженного энергопотребления любой схемы ФАПЧ останавливает соответствующий счетчик N, а также опорный счетчик. Переустановка счетчиков может быть произведена командой переключения режимов. В режиме пониженного энергопотребления шина управления остается активной и позволяет загружать новые данные. ИМС LMX2350 и LMX2352, как и другие интегральные РСЧ с ФАПЧ серии PLLatinum, изготавливаются по запатентованной технологии BiCMOS National Semiconductor.

Дальнейшее развитие дробные РСЧ получили в виде ИМС двойного LMX2354 синтезатора и его усовершенствованного аналога LMX2364, отличающихся расширенным диапазоном коэффициентов деления основного прескалера и меньшим энергопотреблением, а также в серии микросхем LMX2470/1, в которых для снижения фазового шума дробности используется цифровая коррекция с сигма-дельта модулятором [1], действующая как эффективный аналоговый фильтр, при этом шумовой спектр переносится в область более высоких частот за пределы частоты захвата, где шумы хорошо подавляются. Порядок сигма-дельта модулятора от 2 до 4, влияющий на параметры фильтрации, устанавливается программно. Функциональная схема ИМС двойного РСЧ LMX2471 представлена на рис. 5.

Радиочастотный тракт серии LMX2470/1 охватывает диапазон частот от 500 МГц

до 3,6 ГГц. Микросхема содержит все элементы, необходимые для эффективной работы — систему быстрого захвата частоты Fast Lock в обоих каналах с переключаемым выходным током и детекторы захвата Lock Detect, поддерживает программный и аппаратный режимы Power Down и т. д. Максимальная частота входного опорного сигнала 110 МГц, имеется встроенный удвоитель опорной частоты для RF-канала. Стандартное напряжение питания ИМС LMX2470/1 — 2,5 В. Применяется в различных устройствах соответствующего диапазона — мобильных телефонах и базовых станциях, беспроводных компьютерных сетях, системах кабельного и спутникового телевидения и др.

Кроме управляющих микросхем ФАПЧ синтезаторов частоты в ассортименте продукции National Semiconductor имеются ИМС генераторов, управляемых напряжением — Voltage Controlled Oscillator (ГУН — VCO), и комбинированные микросхемы, сочетающие в одном корпусе схему ФАПЧ и ГУН. В частности, сдвоенный интегральный ГУН LMX2604, выпускаемый в корпусе LLP-20 с размерами 4×4,075 мм работает в диапазонах частот 880–915 МГц, 1710–1785 МГц и 1850–1910 МГц различных стандартов мобильной телефонии и предназначен для применения в соответствующих устройствах. Одна из последних разработок компании — комбинированная ИМС LMX2531, включающая высококачественный ФАПЧ ИСЧ с дробным коэффициентом деления и сигма-дельта коррекцией, частично интегрированный программируемый ФНЧ и ГУН. Микросхема выпускается в семи модификациях, охватывающих диапазон частот 765–2790 МГц,

и предназначена для использования в аппаратуре радиосвязи различных стандартов, передачи данных и др. Функциональная схема ИМС LMX2531 приведена на рис. 6.

LMX2531 рассчитана на типовое напряжение питания 3 В, ток потребления 37 мА (7 мА в режиме Power Down). Управление производится по трехпроводной шине Microwire 1,8 В. Выпускается в 36-выводном корпусе LLP. Нормальная работа всех рассмотренных в обзоре микросхем гарантируется в диапазоне температур от –40 до +85 °С.

Для сокращения затрат времени на выбор и тестирование интегральных синтезаторов частоты с ФАПЧ компания National Semiconductor создала и разместила на сайте по адресу <http://webench.national.com/appinfo/webench/EasyPLL> удобную программную оболочку Easy PLL, являющуюся частью онлайн-ового программного пакета автоматизированного проектирования электронных устройств WEBENCH и дающую возможность произвести оптимальный выбор подходящих микросхем, а также спроектировать и проанализировать работу радиочастотного синтезатора частоты ФАПЧ с требуемыми параметрами. Используя Easy PLL, разработчик электронных устройств освобождается от необходимости производить трудоемкие расчеты схем и дорогостоящее физическое макетирование. Технология обеспечивает мгновенный доступ к самой свежей информации о компонентах National Semiconductor, а также позволяет пользователю проводить сравнение характеристик нескольких устройств одновременно.

Использование программной оболочки Easy PLL абсолютно бесплатно. Компания National Semiconductor гарантирует поставку любых

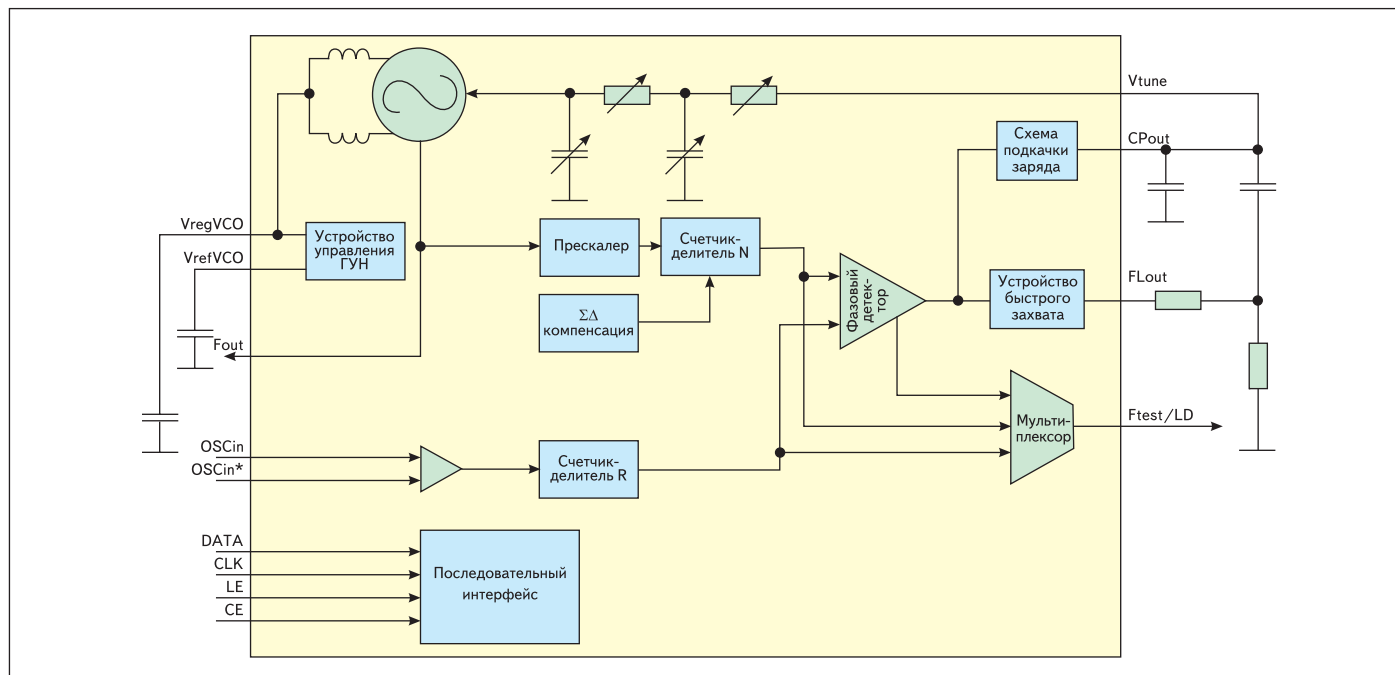


Рис. 6. Функциональная схема ИС с ФАПЧ и встроенным ГУН LMX2531

поддерживаемых средствами WEBENCH продуктов в пределах 24 часов.

Широкая номенклатура, относительно невысокая стоимость и возможность онлайн-вого выбора интегральных радиочастотных синтезаторов частоты National Semiconductor делает их весьма привлекательными для ши-

рокого круга российских разработчиков РЭА.

Более подробную техническую информацию можно найти на сайте ЗАО «ПРОМЭЛЕКТРОНИКА», официального дилера компании National Semiconductor, по электронному адресу: <http://www.promelec.ru/lines/nsc.html>

Литература

1. Стариков О. Метод ФАПЧ и принципы синтезирования высокочастотных сигналов // Chip News. 2001. NN 6–8, 10.
2. National Analog Products Databook. 2004 Edition.