

Разработка точной петли фазовой автоподстройки частоты с высоковольтным ГУН

Остин ХАРНИ (Austin HARNEY)
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ
dsioffe@yandex.ru

В статье рассказывается о способах создания высококачественных систем фазовой автоподстройки частоты. Перечислены факторы, влияющие на точность системы, даны рекомендации по принятию компромиссных решений в сложных случаях, кратко описаны перспективные изделия.

Введение

Система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, англ. термин — phase-locked loop, PLL) — это один из основных узлов современной аппаратуры связи. ФАПЧ обычно используется при создании локальных генераторов в радиоприемниках или передатчиках. Кроме того, ее применяют для распределения сигнала тактовой частоты и уменьшения его шумов, а также при создании источников тактирующего сигнала для быстродействующих аналого-цифровых преобразователей.

С развитием технологий производства интегральных схем и уменьшением технологических норм уменьшается напряжение питания устройств, в том числе схем ФАПЧ и других узлов обработки смешанного сигнала. Однако практические технологии создания генераторов, управляемых напряжением (ГУН, voltage-controlled oscillators, VCO), — основных узлов ФАПЧ — меняются не так быстро. Наиболее качественные ГУН все еще реализуются на дискретных схемах, которые могут требовать напряжения питания до 30 В. Поэтому перед разработчиками современных систем ФАПЧ или радиочастотных систем встает задача сопряжения низковольтных микросхем ФАПЧ и высоковольтных ГУН. Преобразование уровней обычно осуществляется при помощи активных фильтров.

В статье рассматриваются основы ФАПЧ, дается обзор современного состояния разработки ФАПЧ с высоковольтными ГУН, обсуждаются преимущества и недостатки

различных архитектур, а также приводится вводный обзор возможных альтернатив высоковольтным ГУН.

Основы ФАПЧ

Петля ФАПЧ (рис. 1) — это система с обратной связью, в которой фазовый компаратор (детектор) управляет ГУН так, чтобы частота и фаза генератора точно соответствовали частоте и фазе входной (опорной) частоты. Схема фильтра обычно нужна для того, чтобы интегрировать и сглаживать положительный или отрицательный сигнал ошибки, а также для обеспечения устойчивости петли регулирования. Часто в обратную связь включают делитель частоты, для того чтобы выходная частота была кратна опорной частоте (в диапазоне частот ГУН). Делитель может быть реализован так, что коэффициент умножения частоты, N , будет целым или дробным числом. В зависимости от этого получится ФАПЧ с целым или дробным коэффициентом умножения.

Так как ФАПЧ является системой с отрицательной обратной связью, сигнал ошибки по частоте в состоянии равновесия будет стремиться к нулю. В результате на выходе ГУН будет вырабатываться точная и стабильная частота $N \times F_{REF}$.

Система ФАПЧ может быть реализована разными способами, с использованием полностью цифровых, полностью аналоговых или смешанных схем, в зависимости от требуемых шумов, размеров и диапазона частот. В настоящее время высокочастотные, или ра-

диочастотные, ФАПЧ содержат и полностью цифровые блоки, такие как делители в обратной связи и фазовые детекторы, и прецизионные аналоговые схемы — узлы накачки заряда и ГУН. Смешанные схемы ФАПЧ состоят из следующих частей:

1. Источник опорной частоты. Это стабильная, точная частота, под фазу которой подстраивается радиочастотный выходной сигнал. Обычно ее получают при помощи микросхемы температурно-компенсированного кварцевого генератора (Temperature compensated crystal oscillator, TCXO).
2. Фазово-частотный детектор (Phase frequency detector, PFD). Формирует сигнал ошибки по фазе из сигналов опорной частоты и частоты обратной связи.
3. Схема накачки заряда. Преобразует сигнал ошибки в последовательность положительных или отрицательных импульсов тока, пропорциональных ошибке по фазе.
4. Петлевой фильтр. Интегрирует импульсы тока от схемы накачки заряда, обеспечивая чистое напряжение на управляющем входе ГУН.
5. ГУН. Генератор, у которого частота на выходе зависит от напряжения на его управляющем входе (V_{tune}). ГУН имеет коэффициент преобразования, выражаемый в МГц/В. Основное выражение, связывающее частоту на выходе ГУН с напряжением на его входе, имеет вид $f_o = f_c + K_v(V_{tune})$, где f_c — центральная частота колебаний ГУН.
6. Делитель частоты на N . Делит выходную частоту так, чтобы она была равна частоте фазового детектора или опорной частоте. Он может делить строго на целое число или же на дробное. Дробный делитель может быть просто реализован путем переключения коэффициентов деления в целочисленном делителе для получения дробного среднего коэффициента. Например, чтобы получить средний коэффициент деления 4,25, надо три раза досчитать до четырех и один раз до 5. Будет отсчитано семнадцать импульсов и сформировано

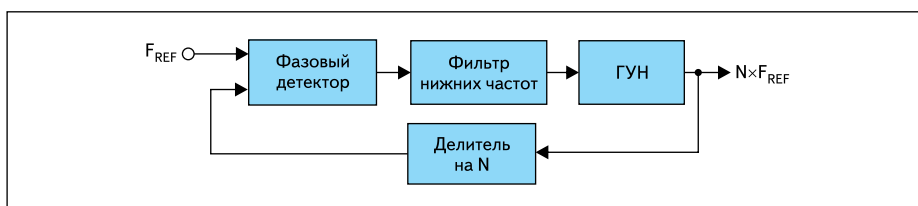


Рис. 1. Основная схема петли ФАПЧ

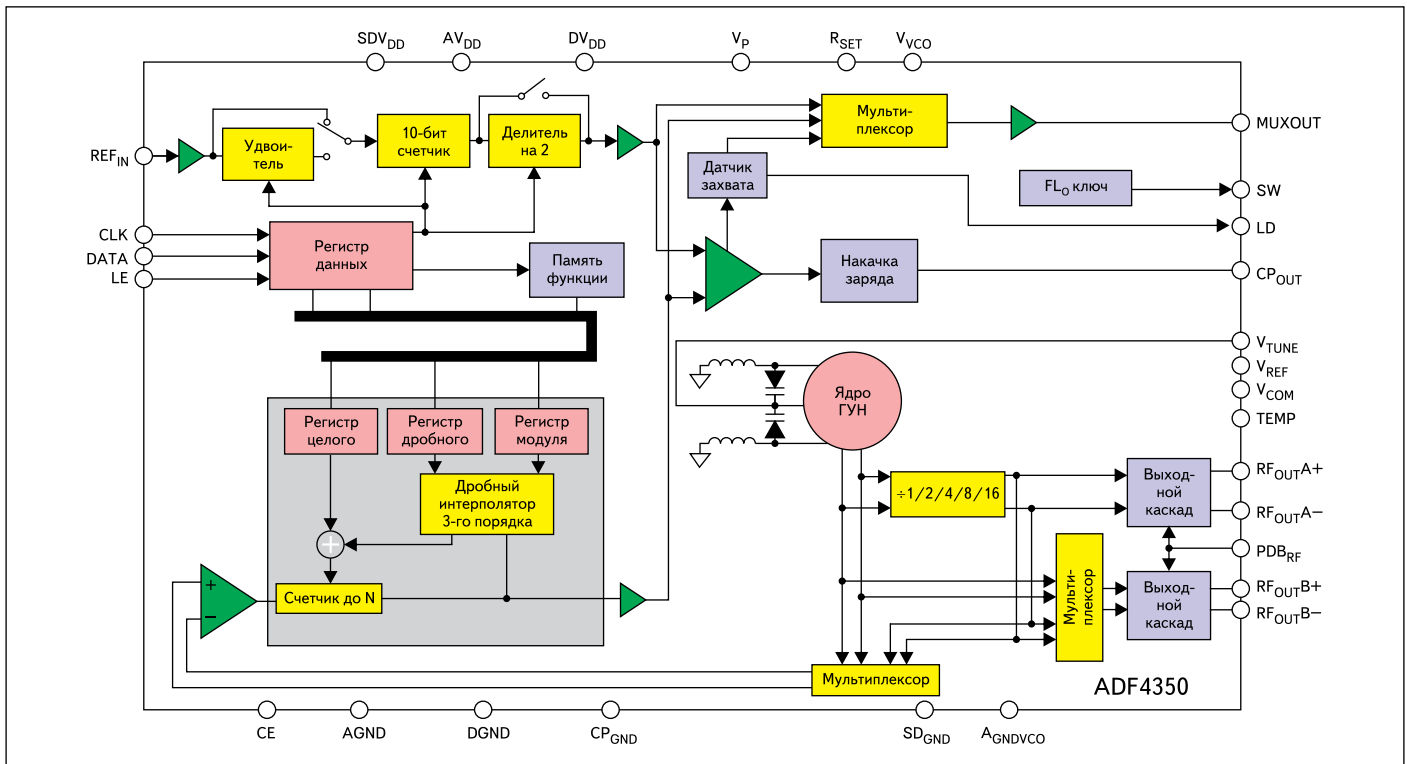


Рис. 2. Блок-схема синтезатора с ФАПЧ ADF4350

четыре импульса. Таким образом, получается коэффициент деления $17/5 = 4,25$. На практике лучшие результаты могут быть достигнуты заимствованием техники, которая используется в шумоподобных (noise-shaped) преобразователях высокого разрешения. Поэтому дробное деление обычно реализуется с использованием сигма-дельта архитектуры, преимуществом которой является уменьшение паразитных частотных составляющих.

На рис. 2 показан пример доступной схемы высокой интеграции. Это функциональная схема микросхемы ФАПЧ с дробным коэффициентом деления ADF4350 — широкополосного синтезатора со встроенным ГУН. Его диапазон выходных частот — от 137,5 до 4400 МГц. (Краткий обзор его возможностей можно найти в разделе «Широкополосные ФАПЧ со встроенным ГУН».)

Основными характеристиками ФАПЧ, влияющими на качество ее работы, являются фазовый шум, паразитные частоты и время захвата.

Фазовый шум — эквивалент джиттера во временной области. Фазовый шум — это шум генератора или ФАПЧ, определенный для частотной области. Он представляет собой среднеквадратичную сумму шумов, вносимых различными компонентами ФАПЧ. В системе ФАПЧ с накачкой заряда подавляются шумы ГУН, лежащие в полосе петлевого фильтра. За пределами полосы пропускания петли шумы ГУН доминируют.

Паразитные частотные составляющие вызваны периодическими выбросами от схемы

накачки заряда в управляющем напряжении ГУН. Они выглядят как смещение частоты от несущей в фазово-частотном детекторе. В ФАПЧ с дробным коэффициентом паразитные составляющие возникают также в результате работы дробного делителя.

Время захвата — это время, в течение которого восстанавливается захват ФАПЧ при скачкообразном переходе от одной частоты к другой. Оно может быть задано для установления частоты или фазы. Степень важности этого параметра зависит от области применения.

Почему до сих пор применяют высоковольтные ГУН?

Высококачественные ГУН находятся среди последних электронных узлов, которые сопротивляются волнам кремниевой интеграции. Только в последние несколько лет появились ГУН для сотовых телефонов, полностью интегрированные в их радиочастотные чипсеты. Однако базовые станции для сотовой связи, микроволновые системы связи между двумя точками, военные и аэрокосмические, и другие сложные и высококачественные изделия все еще предъявляют требования, слишком высокие для интегрального кремния, и реализуются на дискретных компонентах. Для этого есть следующие причины.

В большинстве доступных коммерческих дискретных ГУН в качестве управляемого элемента колебательного LC-контура используется варикап — диод с переменной

емкостью. Изменение напряжения на диоде изменяет его емкость и, таким образом, резонансную частоту колебательного контура.

Любое шумовое напряжение на варикапе будет усиливаться с коэффициентом преобразования варикапа, K_V , выражаемым в МГц/В, и превращаться в фазовый шум. Для сохранения минимально возможного фазового шума ГУН необходимо делать K_V как можно меньше. С другой стороны, для достижения достаточно большого диапазона перестройки требуется большой K_V . Поэтому для применений, в которых одновременно требуются малый фазовый шум и широкий диапазон перестройки, изготовители ГУН обычно разрабатывают генераторы с малым коэффициентом преобразования и большим диапазоном входного напряжения, чтобы выполнить эти противоречивые требования.

Типичный диапазон изменения управляющего напряжения для узкополосных ГУН составляет от 0,5 до 4,5 В, а для широкополосных ГУН он обычно лежит в пределах от 1 до 14 В, в некоторых случаях — даже от 1 до 28 В.

Генератор на коаксиальном резонаторе (coaxial resonator oscillator, CRO) — это другой, специальный тип ГУН, в котором для достижения ультранизких фазовых шумов используется очень малый коэффициент преобразования и широкий диапазон перестройки управляющего напряжения. Такие генераторы обычно применяются в частной мобильной радиосвязи и наземных подвижных радиостанциях.

Сопряжение с высоковольтным ГУН

Большинство коммерческих микросхем синтезаторов с ФАПЧ имеют выход с накачкой заряда, максимальное напряжение на котором не превышает 5,5 В. Этого недостаточно для непосредственного управления ГУН, который требует высокого управляющего напряжения, если петлевой фильтр выполнен только на пассивных компонентах. Для получения больших управляющих напряжений необходимо использовать активные петлевые фильтры на операционных усилителях.

Наиболее простой подход состоит в добавлении усилительного каскада за пассивным петлевым фильтром. Несмотря на простоту разработки, в этом подходе есть некоторые подводхи. Операционный усилитель в инвертирующем включении имеет низкий входной импеданс, который нагружает пассивный петлевой фильтр, влияя на динамику петли. Входной импеданс при неинвертирующем включении достаточно велик, чтобы не нагружать фильтр, но в этом случае будет усиливаться любой шум операционного усилителя, а петлевой фильтр, стоящий перед усилителем, не сможет его отфильтровать. Наилучшим решением будет объединить усилительный каскад и фильтр в одно активное фильтрующее устройство. Целесообразно также добавить предварительную фильтрацию, чтобы не перегружать усилитель очень короткими импульсами со схемы накачки заряда и не ограничивать из-за этого диапазон входного напряжения.

На рис. 3 показаны два примера рекомендуемых конфигураций активных фильтров с предварительной фильтрацией, с инвертирующим и неинвертирующим включением усилителя. Обратите внимание, что эти схемы усилителей содержат интеграторы, которые поддерживают нулевое рассогласование на входах фазового детектора. При размыкании петли ФАПЧ напряжение на выходе такого усилителя дрейфует до напряжения одного из источников питания.

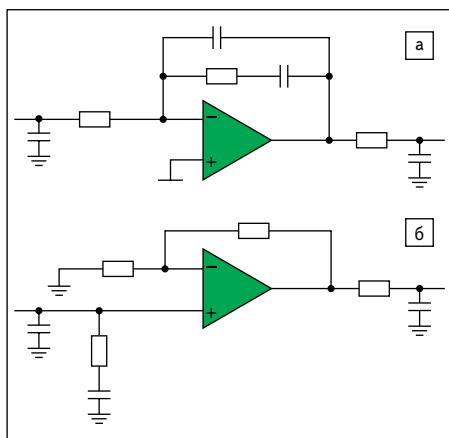


Рис. 3. Активный фильтр с предварительной фильтрацией: а) инвертирующее включение; б) неинвертирующее включение

Преимущество инвертирующей топологии состоит в смещении выходного напряжения схемы накачки заряда на фиксированную величину, обычно равную половине полного размаха напряжения на выходе этой схемы ($V_p/2$), что оптимально с точки зрения искажений. Необходимо позаботиться о чистом напряжении смещения, в идеале — от специального малошумящего линейного регулятора, такого как ADP150, и адекватной развязке как можно ближе к входным выводам операционного усилителя. Номиналы сопротивлений, используемых в цепи делителя, должны быть как можно меньше, чтобы минимизировать вносимый ими шум. При использовании инвертирующего включения необходимо убедиться, что микросхема ФАПЧ позволяет инвертировать полярность фазово-частотного детектора. Семейство ADF4xxx предоставляет такую возможность.

Неинвертирующая конфигурация петлевого фильтра не требует специального смещения, поэтому схема может получиться более компактной. Напряжение накачки заряда вместо того, чтобы смещаться на фиксированный уровень, изменяется в пределах всего рабочего диапазона. Поэтому для такого типа фильтра очень важно использовать операционный усилитель с диапазоном входных напряжений от питания до питания.

Выбор операционного усилителя

Выбор операционного усилителя — это ключевой момент для извлечения максимума возможностей из активного фильтра. Помимо полосы пропускания, необходимо учитывать следующие основные параметры:

- Плотность напряжения шума, выражаемую в $nV/\sqrt{Гц}$.
- Токковый шум, выражаемый в $nA/\sqrt{Гц}$.
- Входной ток.
- Диапазон входного синфазного напряжения.

Выходное напряжение фильтра непосредственно влияет на генерируемую частоту и фазу. Поэтому плотность шумового напряжения операционного усилителя позволяет судить о том, какой фазовый шум будет вноситься как внутри полосы пропускания петли ФАПЧ, так и вне ее. Его влияние наиболее заметно на сопрягающей частоте петлевого фильтра, особенно для усилителей с высокой плотностью напряжения шума. Поэтому для выполнения предназначения усилителя и высоковольтного ГУН — обеспечения минимального фазового шума — важно обеспечить низкий шум усилителя. В качественной схеме он не должен быть выше $10 nV/\sqrt{Гц}$. Токковый шум, как правило, очень мал по сравнению с импульсами тока ошибки, поэтому его влияние намного меньше, чем у напряжения шума.

Операционные усилители, которые имеют значительный ток смещения по сравнению

с выходным током фазово-частотного детектора, могут вносить большую погрешность в выходной спектр ФАПЧ. Чтобы сохранить управляющее напряжение ГУН постоянным, а ФАПЧ — в состоянии захвата, схема накачки заряда должна возмещать утечку тока через вход операционного усилителя на каждом цикле работы фазово-частотного детектора. Это приводит к модуляции управляющего напряжения ГУН V_{TUNE} с частотой работы детектора и вызывает отклонение несущей частоты на величину этой частоты. Увеличение входного тока смещения увеличивает модуляцию V_{TUNE} и повышает амплитуду погрешности.

Диапазон синфазного напряжения, или диапазон входного напряжения, — это другой важный параметр операционного усилителя. На него часто не обращают внимания, но он может вызвать серьезные проблемы в конце разработки. Этот параметр определяет разницу между максимальным и минимальным напряжением на входных выводах и положительным и отрицательным напряжениями питания соответственно.

Старые операционные усилители, которые работали при напряжении питания ± 15 В, имели типичный диапазон входного синфазного сигнала ± 12 В. Медленные дополнительные входные *rnr*-каскады, которые стали добавлять позднее, расширяют диапазон синфазного сигнала до отрицательного напряжения питания. Это позволяет использовать в схеме однополярное питание. Несмотря на то, что любой операционный усилитель может работать с напряжением 0 В в качестве отрицательного напряжения питания, необходимо следить за разницей между сигналом и питающими напряжениями.

Например, популярный OP27 имеет диапазон входного сигнала $\pm 12,3$ В при напряжении питания ± 15 В. Это означает, что напряжения на входах микросхемы не должны подходить к напряжениям питания ближе чем на 2,7 В. Такое ограничение на нижней стороне диапазона делает этот операционный усилитель непригодным для работы с большим размахом сигнала на входе при однополярном питании. Возможность использовать двухполярное питание, если она есть, позволяет значительно расширить выбор операционных усилителей (и упростить решение проблемы входного тока). Если необходимо однополярное питание, то следует использовать операционные усилители с размахом входных напряжений от питания до питания, но большинство из них имеет высокое шумовое напряжение. Таким образом, для получения наилучшего результата необходим операционный усилитель с малой плотностью шумового напряжения для получения низкого фазового шума, с небольшим входным током для уменьшения погрешности и с диапазоном входных напряжений от питания до питания для возможности работы с однополярным питанием. В таблице пока-

Таблица. Операционные усилители, рекомендуемые для использования в активных фильтрах ФАПЧ

Операционный усилитель	Напряжение шума на частоте 1 кГц, нВ/√Гц	Токовый шум на частоте 1 кГц, нА/√Гц	Входной ток (типичное значение)	Диапазон входных напряжений, расстояние от отрицательного питания, В	Максимальное напряжение однополярного питания, В
AD820	16	0,8	2 нА	-0,2	36
OP184	3,9	0,4	60 нА	0	36
AD8661	12	0,1	0,3 нА	-0,1	16
OP27	3	0,4	10 нА	+2,7	36
AD8099	3	8	100 нА	+1,3	12

заны некоторые операционные усилители фирмы Analog Devices и их параметры, относящиеся к перечисленным выше условиям.

Выбор операционного усилителя зависит от применения. Если погрешность фазово-частотного детектора лежит далеко за пределами полосы пропускания петли (например, в синтезаторе с дробным коэффициентом умножения), тогда годятся операционные усилители с биполярными плоскостными транзисторами на входах (bipolar junction transistor, BJT), такие как OP184 или OP27. Погрешности фазово-частотного детектора, вызванные большим входным током биполярного транзистора, хорошо ослабляются петлевым фильтром, и ФАПЧ может полностью использовать преимущества, которые дает малошумящий усилитель с биполярными транзисторами на входе.

Если требуется небольшое отношение частоты работы фазово-частотного детектора к полосе пропускания (например, в синтезаторе с целым коэффициентом умножения), то приходится искать компромисс между уровнями шума и погрешности. Здесь хорошим выбором будут AD820 и AD8661.

Несмотря на то, что активный фильтр добавляет шумы в ФАПЧ, в некоторых применениях его буферные свойства обеспечивают преимущество в качестве перед пассивным фильтром. Например, если вход ГУН имеет большой ток утечки, который вызывает значительную погрешность, то для ее уменьшения можно использовать операционный

усилитель. Выход операционного усилителя благодаря своему низкому импедансу может легко компенсировать ток утечки входа ГУН.

Пример разработки

Рассмотрим для примера следующие требования:

- Диапазон перестройки равен одной октаве, от 1000 до 2000 МГц.
- Фазовый шум: -142 дБн/Гц при смещении 1 МГц.
- Погрешность: менее -70 дБн.
- Интервал между каналами: 250 кГц.
- Время захвата: менее 2 мс.
- Можно использовать напряжение питания от 15 до 30 В.

Чтобы перекрыть диапазон в 1 ГГц и выполнить требования по фазовому шуму, необходимо использовать высоковольтный ГУН и активный петлевой фильтр. Требования по фазовому шуму и погрешностям, а также необходимость использовать однополярное питание определяют выбор операционного усилителя. Чтобы выполнить требования по погрешностям, операционный усилитель должен иметь малый входной ток. В то же время для получения низкого фазового шума он должен иметь малую плотность напряжения шума. Для достижения компромисса между этими двумя требованиями можно использовать операционный усилитель со входом на полевых транзисторах с *p-n*-переходом (JFET), такой как AD8661, который имеет

входной ток 0,3 пА и плотность напряжения шума 12 нВ/√Гц. Это устройство может работать и с однополярным питанием. Чтобы обеспечить диапазон в одну октаву, выберем ГУН RFMD UMS-2000-A16.

Начать работу лучше всего с моделирования активного фильтра при помощи программы ADIsimPLL. Два рекомендуемых типа фильтров показаны на рис. 3, но ADIsimPLL поддерживает и другие конфигурации.

Для ФАПЧ выберем микросхему ADF4150. Она может работать как с целым, так и с дробным коэффициентом умножения. Кроме того, ее выходной делитель обеспечивает набор коэффициентов 2/4/8/16/32, что позволяет получить непрерывный диапазон частот от 2 ГГц до 31,25 МГц. Микросхема ADF4150 подобна ADF4350, показанной на рис. 2, но она позволяет использовать внешний ГУН при более жестких требованиях к фазовому шуму. При моделировании петлевого фильтра ФАПЧ был установлен на 20 кГц, чтобы попытаться минимизировать влияние шума операционного усилителя и одновременно сохранить время захвата ФАПЧ менее 2 мс.

На рис. 4 показана зависимость шума (в дБн) от частоты смещения по результатам моделирования и по результатам измерений в реальной системе. Использовалась ФАПЧ ADF4150, ГУН UMS и фильтр на основе AD8661. Пик -90 дБн из-за шума активного петлевого фильтра виден на обоих графиках, но требование по фазовому шуму -142 дБн/Гц при смещении 1 МГц выполняется. Чтобы уменьшить шум в полосе пропускания, надо использовать малошумящий операционный усилитель, такой как OP184 или OP27, заплатив за это увеличением погрешности, или же сделать полосу ФАПЧ менее 20 кГц.

На рис. 5 показано улучшение примерно на 6 дБ при использовании OP27. Погрешность в этом случае увеличивается незначи-

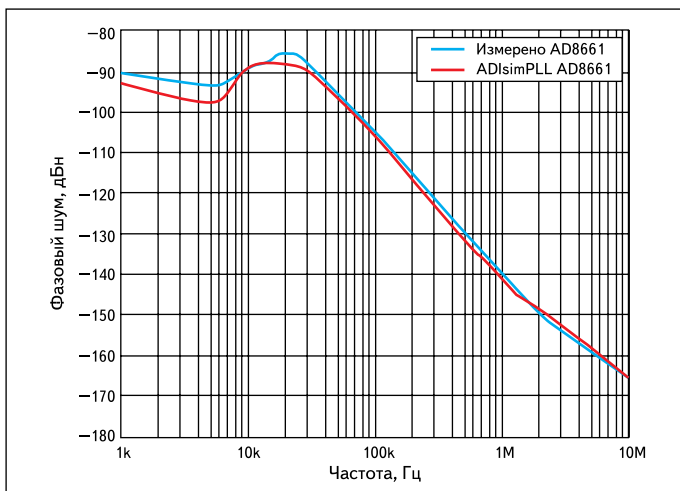


Рис. 4. Результаты моделирования в программе ADIsimPLL в сравнении с реальными измерениями при использовании операционного усилителя AD8661 в активном фильтре ФАПЧ

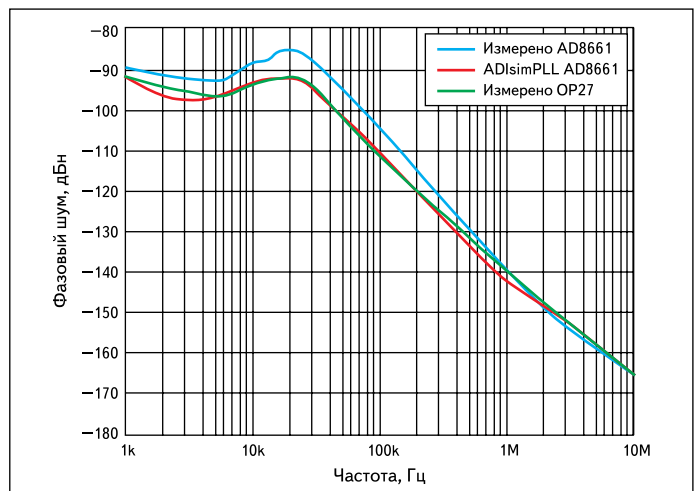


Рис. 5. Сравнение качества работы ФАПЧ при использовании в активном фильтре операционных усилителей AD8661 и OP27

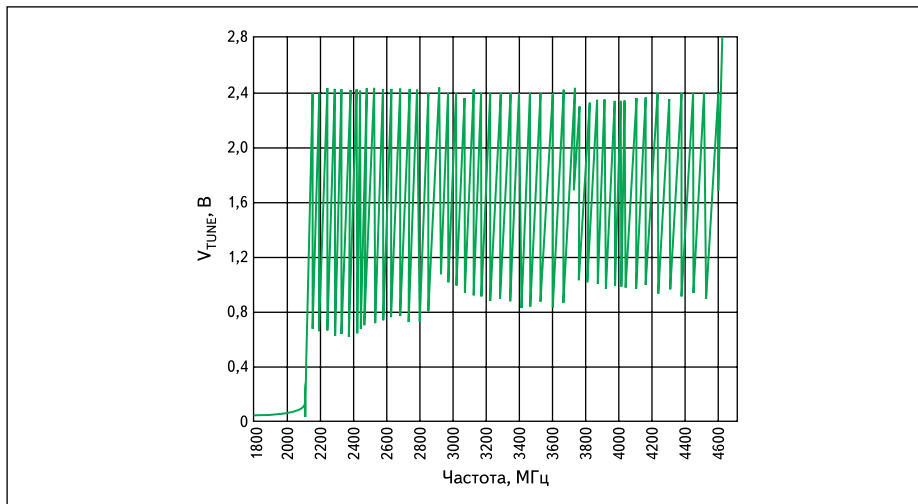


Рис. 6. График, показывающий связь управляющего напряжения ГУН ADF4350 и частоты

ся автоматическая калибровка для выбора соответствующего поддиапазона ГУН.

Это показывает реальные преимущества при переходе разработки ГУН от дискретных решений к интегральным. Высокий уровень интеграции может быть получен при минимальной площади с увеличением гибкости проекта. Например, в ADF4350 также встроены программируемый выходной делитель, который обеспечивает полное перекрытие диапазона частот от 137,5 МГц до 4,4 ГГц. Это весьма полезно для радиоинженеров, которые хотят многократно использовать свои разработки для разных частот и стандартов.

ADF4350 выпускается в 5-мм квадратном корпусе LFCSP: сравним это со стандартным 12,7-мм квадратным корпусом ГУН. Качественные показатели приближаются к уровню дискретных проектов, с фазовым шумом -114 дБн/Гц при смещении 100 кГц и -134 дБн/Гц при смещении 1 МГц (рис. 2).

На сайте фирмы Analog Devices [4] в разделе "PLL Synthesizers/VCOs" [5] можно познакомиться с крупнейшим в полупроводниковой индустрии портфолио устройств для ФАПЧ, которое включает микросхемы с целым и дробным коэффициентом умножения, встроенным ГУН и высоковольтными микросхемами ФАПЧ. ■

Литература

1. Applied Radio Labs Forums — <http://www.radiolab.com.au/Forums/default.asp>
2. Best R.E. Phase-Locked Loops. Design, Simulation, and Applications. McGraw Hill.
3. Curtin M., O'Brien P. Phase-Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters. Part 2. Analog Dialogue, Volume 33. 1999. — <http://www.analog.com/library/analogDialogue/cd/vol33n1.pdf#page=15>
4. www.analog.com
5. <http://www.analog.com/en/rfif-components/pll-synthesizersvcos/products/index.html>

тельно, так как полоса пропускания петли относительно узкая. Дальнейшее уменьшение полосы улучшит фазовый шум для смещений менее 100 кГц ценой увеличения времени захвата ФАПЧ. Все эти компромиссы можно проверить в программе ADIsimPLL, перед тем как приступить к лабораторным экспериментам.

Последние новости: высоковольтные ФАПЧ

До сих пор мы обсуждали то, как использовать активные фильтры для сопряжения низковольтных устройств ФАПЧ с высоковольтными ГУН. Однако недавно стали доступны высоковольтные ФАПЧ, которые заметно уменьшили потребность в активных фильтрах. Примером может служить устройство ADF4113HV, которое содержит высоковольтную схему накачки заряда и имеет наименьший уровень фазового шума: -212 дБн/Гц. Выходное напряжение схемы накачки заряда может достигать 15 В, что позволяет упростить пассивный фильтр перед ГУН.

Это семейство высоковольтных ФАПЧ скоро пополнится устройствами с максимальным напряжением до 30 В и дробным коэффициентом умножения, которые будут иметь высоковольтную схему накачки заряда.

Широкополосные ФАПЧ со встроенным ГУН

Другой альтернативой использованию активных фильтров с высоковольтными ГУН является применение полностью интегрированных высококачественных ФАПЧ, таких как устройство ADF4350, показанное на рис. 2. В этом случае ГУН интегрирован на кристалл. Неизбежный компромисс между широким диапазоном перестройки и низким фазовым шумом, который мы обсуждали выше, разрешается применением многополосного ГУН. В ADF4350 на кристалле расположены три отдельных ГУН, каждый из которых имеет 16 перекрывающихся поддиапазонов, что в результате дает 48 поддиапазонов (рис. 6). При каждом изменении частоты производит-