

# МОДЕРНИЗАЦИЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ РАДИОСТАНЦИИ УКВ РАДИОСВЯЗИ

**Леньшин Андрей Валентинович,**  
ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия,  
[andrey-lenshin@yandex.ru](mailto:andrey-lenshin@yandex.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-20-27

**Тихомиров Владимир Николаевич,**  
ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия,  
[vtikhomirov@mail.ru](mailto:vtikhomirov@mail.ru)

**Manuscript received** 12 July 2022;  
**Accepted** 20 August 2022

**Шаталов Евгений Владимирович,**  
ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия,  
[evgen1778@mail.ru](mailto:evgen1778@mail.ru)

**Савченко Михаил Петрович,**  
БФУ имени И. Канта, Калининград, Россия,  
[savchenkomp@mail.ru](mailto:savchenkomp@mail.ru)

**Тихомиров Николай Михайлович,**  
БФУ имени И. Канта, Калининград, Россия,  
[n.m.tikhomirov@sozvezdie.su](mailto:n.m.tikhomirov@sozvezdie.su)

**Ключевые слова:** синтез частот, импульсно-фазовая автоподстройка, интегральные микросхемы, дробные делители

Основной проблемой при разработке современных модулей связи является грамотный выбор сигнально-кодовой конструкции (СКК), модели канала и алгоритмов приема сигнала. Востребованность надежной связи в различных сферах деятельности требует дальнейшего развития беспроводных технологий – от новых стандартов, таких как 802.11ax и Wi-Gig, до 5G. Это связано с увеличением числа пользователей и требованием повышения скорости передачи информации, что ставит перед разработчиками сложные технические проблемы. Проанализированы тенденции и перспективы развития современных систем и комплексов радиосвязи, особенности применения синтезаторов частот (СЧ) на основе кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты в современных средствах радиосвязи. Приведены результаты модернизации СЧ на интегральной микросхеме (ИМС) НМС704 для приемопередающих устройств УКВ радиостанций. Проведено моделирование основных узлов модернизированного СЧ в программе TPLatinumSim. Рассчитаны значения элементов ФНЧ и спектральной плотности мощности фазовых шумов выходного сигнала СЧ на ИМС LMX2594. За счет возможности использования высокой частоты сравнения в частотно-фазовом детекторе удалось улучшить массогабаритные показатели, повысить быстродействие и чистоту спектра выходного сигнала модернизированного СЧ, что подтверждено результатами моделирования и экспериментальными исследованиями действующего макета синтезатора.

#### Информация об авторах:

**Леньшин Андрей Валентинович**, д.т.н., профессор кафедры, ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

**Тихомиров Владимир Николаевич**, преподаватель, ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

**Шаталов Евгений Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры, ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

**Савченко Михаил Петрович**, к.т.н., доцент кафедры, БФУ имени И. Канта, Калининград, Россия

**Тихомиров Николай Михайлович**, д.т.н., профессор кафедры, БФУ имени И. Канта, Калининград, Россия

#### Для цитирования:

Леньшин А.В., Тихомиров В.Н., Шаталов Е.В., Савченко М.П., Тихомиров Н.М. Модернизация синтезаторов частот радиостанции УКВ радиосвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №9. С. 20-27.

#### For citation:

Lenshin A.V., Tikhomirov V.N., Shatalov E.V., Savchenko M.P., Tikhomirov N.M. (2022) Frequency synthesizers modernization of VHF radio communication. T-Comm, vol. 16, no.9, pp. 20-27. (in Russian)

## Введение

Последнее десятилетие характеризуется тем, что в системах и комплексах радиосвязи постоянно возрастают требования к скорости передачи и надежности доведения информации до потребителя. Основной проблемой при разработке современных модулей связи является грамотный выбор сигнально-кодовой конструкции (СКК), модели канала и алгоритмов приема сигнала. Востребованность надежной связи в различных сферах деятельности требует дальнейшего развития беспроводных технологий – от новых стандартов, таких как 802.11ax и Wi-Gig, до 5G. Это связано с увеличением числа пользователей и требованием повышения скорости передачи информации, что ставит перед разработчиками сложные технические проблемы. Кроме того, внимание разработчиков средств связи направлено на освоение миллиметрового диапазона частот, значительное повышение стабильности частоты генерируемых колебаний, а также на улучшение спектральных характеристик сигналов и обеспечение заданного быстродействия средства связи (быстрого установления связи при смене рабочей частоты) [1, 2].

Современные системы высокоскоростной передачи различной информации в цифровой форме, системы программируемого радио гражданского и военного назначения широко используют технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), включающие программную реализацию основных блоков приемных и передающих устройств, что легло в основу построения не только гражданских систем беспроводной связи стандартов IEEE802.11 (Wi-Fi) и IEEE802.16 (WiMAX), LTE, 3G, 4G, но и военных систем тактической и оперативно-тактической радиосвязи. В сетях пятого поколения 5G NR (5<sup>th</sup> Generation New Radio) появилась потребность в увеличении объема трафика и скорости информационного обмена.

Одним из основных направлений современной технической политики ведущих стран мира является создание нового поколения конфликтно-устойчивых систем и средств радиосвязи, реализующих метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в качестве меры защиты информации, что подтверждается реализацией целого ряда широкомасштабных программ создания таких систем и средств радиосвязи.

Анализируя возможности реализации перечисленных выше тенденций, следует отметить важнейшую роль устройств синтеза высокостабильной сетки частот (синтезаторов частот (СЧ)). СЧ является важнейшим, ключевым элементом практически любой системы связи. Функциональные возможности средств и систем связи в большой степени определяются частотно-временными (динамическими) и спектральными характеристиками используемых СЧ, которые в свою очередь определяются их архитектурой и используемой электронно-компонентной базой.

Ключевыми характеристиками СЧ являются: 1) частотно-временные характеристики (частотный диапазон; разрешение по частоте (шаг сетки частот); точность установки частоты; время установки частоты (время перестройки)); 2) спектральные характеристики (гармонические и субгармонические искажения, негармонические искажения

(побочные спектральные составляющие); амплитудный и фазовый шум (спектральная плотность мощности фазового шума); среднее квадратическое значение паразитного отклонения частоты (фазы); 3) амплитудные характеристики (выходная мощность) [3].

Применение СЧ в современных средствах связи требует снижения их массогабаритных характеристик и энергопотребления, обеспечения герметичности конструкции, заданной устойчивости к механическим нагрузкам и изменению питающего напряжения, возможности устойчивой работы в широком диапазоне температур. Стоимость СЧ оказывает существенное влияние на область применения той или иной архитектуры и использования электронно-компонентной базы. Разработчик должен из всего многообразия выбрать наиболее подходящий для конкретных условий способ (вариант) построения СЧ.

## Исходные соображения

Улучшение технических характеристик СЧ (уровень амплитудных и фазовых шумов, побочные спектральные составляющие, время перестройки, частотный диапазон, шаг сетки частот), расширение функциональных возможностей при одновременном снижении массогабаритных показателей и стоимости является основной тенденцией развития СЧ. На сегодняшний день формирование сигналов в системах связи наиболее часто осуществляется с использованием СЧ, построенных на основе систем с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) или прямого цифрового синтеза (ПЦС). СЧ на основе ФАПЧ представляет собой следящую систему, охваченную обратной связью по частоте. На практике широко применяются интегральные микросхемы (ИМС) СЧ с импульсной ФАПЧ (СЧ-ИФАПЧ), использующие внешние высокостабильные кварцевые генераторы (ОКГ) опорной частоты совместно с делителями частоты с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД). В состав ИМС входят делители выходной частоты с переменным (ДПКД) или дробно-переменным (ДДПКД) делителями, частотно-фазовый детектор (ЧФД), в котором сигнал рассогласования формируется выходным каскадом зарядовой накачки (ЗН) и подается через внешний фильтр нижних частот (ФНЧ) на генератор, управляемый напряжением (ГУН) [1, 4].

Источником колебаний является ГУН (встроенный или внешний), частота колебаний которого является функцией (как правило, нелинейной) управляющего напряжения, формируемого ЧФД и далее ФНЧ, который может быть встроенным или внешним.

Программируемые коэффициенты деления для целочисленного (используется ДПКД) и дробного (используется ДДПКД) режимов, выбор соответствующей опорной частоты позволяют добиться нужного диапазона выходных частот, а также варьировать скорость перестройки и шаг переключения частоты, уровень амплитудного и фазового шумов [4]. При быстром развитии электронной компонентной базы аппаратура систем радиосвязи быстро устаревает, а потому нуждается в доработке и модернизации. Реализация требуемых параметров СЧ возможна только в том случае, когда проектировщик СЧ не только хорошо разбирается в теории импульсной фазовой автоподстройки частоты, в вопросах разработки современных архитектур, но имеет возможность

использовать современную электронно-компонентную базу. Поэтому зачастую ИМС – ключевой компонент в создании СЧ-ИФАПЧ. Современные ИМС СЧ-ИФАПЧ выполнены в различных вариантах корпуса, в выводном или безвыводном вариантах.

### Описание конструкции и узлов штатного синтезатора частот

В середине 2008 года фирма «Hittite» представила линейку ИМС с дробным делением частоты НМС700/701/703/704. Если учитывать, что пальма первенства до этого принадлежала фирме «Analog Devices» с микросхемой ADF4193 (приведенный уровень фазовых шумов –216 дБн/Гц, максимальная частота ЧФД 26 МГц), то на момент начала разработки СЧ для приемо-передающей аппаратуры системы УКВ радиосвязи была выбрана ИМС НМС704, так как в то время бесспорным лидером в области синтезаторов с дробным делением была фирма «Hittite».

Данная ИМС была разработана для получения наилучших показателей фазового шума и низких побочных (паразитных) спектральных составляющих (ПСС), которые только возможны в интегральном синтезаторе. ИМС НМС704 состоит из малошумящего цифрового ЧФД, ДПКД/ДДПКД делителя частоты сигнала ГУН, делителя частоты сигнала ОГ до частоты сравнения и ЗН с точным цифровым управлением величиной тока. У ИМС НМС704 приведенный уровень фазовых шумов составляет –230 дБн/Гц, а максимальная частота сравнения ЧФД 100 МГц. Структурная схема СЧ-ИФАПЧ на основе ИМС НМС704 показана на рисунке 1.

нием псевдослучайной перестройки (ППРЧ). Поэтому СЧ состоит из двух СЧ: СЧ с фиксированной выходной частотой (СЧФ), используемый в качестве источника сигнала второго гетеродина и опорного сигнала СЧ с перестраиваемой выходной частотой (СЧП).

СЧП, в свою очередь, используется в медленном режиме ФРЧ и быстром режиме ППРЧ. Для обеспечения этих режимов в СЧП предусмотрена коммутация ФНЧ2 и ФНЧ3 в цепи управления системы ИФАПЧ. Эти фильтры соответственно имеют узкую и широкую полосы пропускания. Одновременно с коммутацией ФНЧ2 и ФНЧ3 производится изменение значения токов зарядовой накачки ИМС НМС704 для изменения полосы пропускания замкнутого кольца ИФАПЧ: узкая полоса для режима ФРЧ и широкая полоса для ППРЧ.

Целесообразность реализации СЧП с широкой полосой пропускания замкнутого кольца ИФАПЧ возникает тогда, когда значение суммарных фазовых шумов ОКГ и ИМС НМС704 в полосе соседнего канала меньше, чем шумы ГУН. При максимальной полосе пропускания ФНЧ2 канала управления кольца мгновенное значение частоты ГУН будет отслеживать сигнал ошибки с выхода ЧФД и суммарный шум ОКГ и ИМС НМС704 в широкой полосе рабочих частот. Проблема реализации СЧ с широкой полосой кольца ИФАПЧ заключается в том, что полоса пропускания замкнутого кольца ИФАПЧ зависит не только от полосы пропускания ФНЧ, но и от величины тока ЗН и крутизны управления ГУН. Вместе с тем, указанные параметры не могут быть выбраны произвольно, потому что крутизна управления ГУН должна обеспечивать перестройку во всем частотном диапазоне (в полосе рабочих частот). Достаточно серьезной проблемой разработки СЧ является выполнение жестких требований по снижению уровня фазовых шумов при расширении рабочего диапазона частот.

Для обеспечения узкой полосы пропускания замкнутого кольца ИФАПЧ СЧП необходимо применять ФНЧ3 с минимальной полосой пропускания, что успешно реализуется при условии, что шумы ОКГ и ИМС НМС704 в полосе частот соседнего канала больше, чем шумы ГУН.

В этом случае ГУН отслеживает сигнал и шум ОКГ и ИМС НМС704 только в узкой полосе частот, примыкающей к несущей частоте. В полосе частот соседнего канала ГУН уже функционирует как автономное устройство, шумы выходного сигнала СЧП в большей степени определяются шумами ГУН и в минимальной степени зависит от шумов ОКГ и шумов ИМС НМС704.

На сегодняшний день в приемо-передающих устройствах УКВ радиостанций практически реализованы два варианта СЧ-ИФАПЧ с широкой и узкой полосой пропускания. В общем случае скорость переключения частот СЧП на ИМС НМС704 зависит от параметров всей системы и ограничивается самым инерционным элементом в системе, каким является ФНЧ2 кольца ИФАПЧ.

Расширение полосы пропускания ФНЧ2 либо увеличение коэффициента передачи кольца ИФАПЧ в момент переключения частот позволяет значительно увеличить скорость переключения частот. Следует особо отметить, что при повышенной скорости перехода к новой частоте система ИФАПЧ должна оставаться устойчивой, при этом спектральная чистота выходного сигнала не всегда является обязательной.

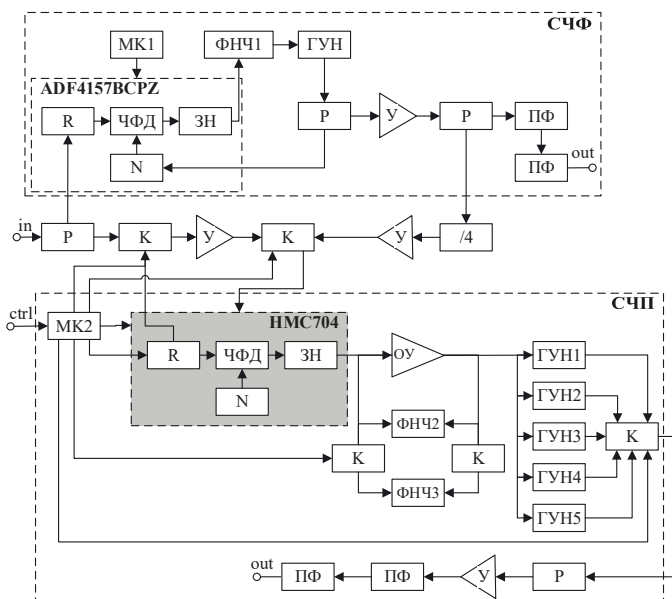


Рис. 1. Структурная схема СЧ на ИМС НМС704:

- МК1, МК2 – микроконтроллеры; Р – разветвитель;
- У – усилитель; ПФ – полосовой фильтр; R – делитель по опорной частоте ДФКД; N – ДПКД/ДДПКД; К – ключ;
- 4 – делитель на четыре; ОУ – операционный усилитель

Возимая радиостанция имеет два основных режима работы: 1) режим фиксированных рабочих частот (ФРЧ); 2) режим скачкообразного изменения рабочей частоты с использова-



Несомненным достоинством разработанного СЧП на основе ИМС НМС704 является: возможность формирования на выходе СЧП большого числа дискретных частот с относительной стабильностью, равной относительной стабильности ОКГ; низкий уровень амплитудных и фазовых шумов; приемлемые массогабаритные показатели устройства и низкое энергопотребление. Следует отметить и ряд достаточно серьезных недостатков, выявленных в ходе практической реализации СЧП, таких как: неудовлетворительный уровень подавления гармонических побочных составляющих; недостаточная линейность АЧХ; высокий уровень паразитных составляющих в спектре выходного сигнала СЧП, а также проблемы технологического характера.

Одним из недостатков СЧП на основе ИМС НМС704 является тот факт, что даже при использовании в нем ДДПКД с сигма-дельта-модуляторами существуют помехи, генерируемые синтезатором, так как в нем имеется паразитная связь между генерируемым сигналом и опорным входом ЧФД. Генерируемые частоты не кратны частоте сигнала на опорном входе ЧФД (частоте сравнения), в выходном сигнале появляются побочные (паразитные) спектральные составляющие.

Наиболее высокий уровень побочных спектральных составляющих возникает в том случае, когда разница между генерируемыми частотами и ближайшей частотой, кратной частоте сравнения, настолько мала, что ФНЧ не обеспечивает требуемого уровня подавления ПСС. Поэтому в качестве опорного сигнала для СЧП на ИМС НМС704 используется два сигнала: один от СЧФ, поделенный по частоте на 4, или второй от внешнего опорного генератора.

Для перекрытия диапазона рабочих частот с малым уровнем амплитудных и фазовых шумов в составе схемы СЧП на ИМС НМС704 используются 5 коммутируемых малощумящих ГУН с низкой крутизной управления с максимальным управляющим напряжением не более +5 В.

Для синхронизации любого из 5 ГУН используется одно кольцо ИФАПЧ с переключаемыми фильтрами (ФНЧ2 и ФНЧ3). ИМС НМС704 использует режим с дробным коэффициентом деления ДДПКД, поэтому частота сравнения ЧФД не может превышать величину 50 МГц.

### Описание конструкции и узлов модернизированного синтезатора частот

В аппаратуре УКВ радиостанции самой актуальной на данный момент задачей явилась модернизация синтезатора частот, построенного на устаревшей элементной базе – ИМС НМС704. Одним из возможных способов модернизации является применение новейших на данный момент ИМС. Фирма «Texas Instruments» представила самые совершенные на сегодняшний день ИМС СЧ-ИФАПЧ с интегрированным ГУН. При самых низких уровнях амплитудных и фазовых шумов однокристалльные устройства LMX2591/92/94/95 и LMX2820 позволяют разработчикам СЧ получить характеристики, для достижения которых еще совсем недавно требовалось применение нескольких дискретных устройств.

Для модернизации синтезатора УКВ радиостанции из представленной линейки ИМС СЧ-ИФАПЧ была выбрана LMX2594 в безвыводном исполнении [5]. Структурная схема модернизированного СЧ на ИМС LMX2594 приведена на рисунке 2.

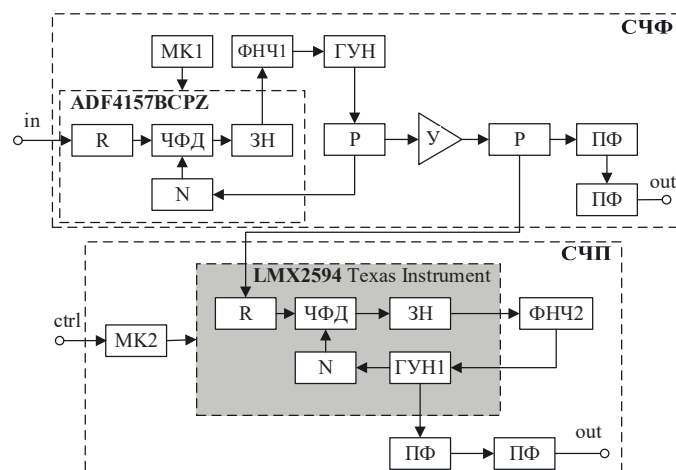


Рис. 2. Структурная схема модернизированного СЧ на ИМС LMX2594

Микросхема LMX2594 – высокопроизводительный широкополосный СЧ-ИФАПЧ, который может генерировать частоты от 10 МГц до 15 ГГц с приведенным уровнем шумов –236 дБн/Гц и высокой частотой сравнения ЧФД, которая составляет 300 МГц. Высокоскоростной делитель частоты ДПКД/ДДПКД не имеет предварительного делителя, что позволяет уменьшить амплитуду и количество ПСС. Также имеется программируемый входной умножитель для уменьшения целочисленных ПСС. Алгоритм быстрой калибровки позволяет менять частоты быстрее, чем за 20 мкс. Выходные драйверы позволяют получить мощность выходного сигнала в 7 dBm на частотах до 15 ГГц. Устройство работает от одного источника питания +3,3 В. ИМС LMX2594 стала доступна для потребителя относительно недавно и является новейшей на данный момент ИМС СЧ-ИФАПЧ фирмы «Texas Instruments».

Естественным образом, продолжая успешно эволюционирующее семейство LMX259X, новый синтезатор LMX2594 позволяет существенно повысить уровень технических характеристик СЧП на ИМС НМС704. Кроме того, повышенная степень интеграции и меньшее число необходимых внешних компонентов обеспечивают дополнительную экономию средств.

На одном кристалле нового радиочастотного синтезатора LMX2594, изготовленного в компании «Texas Instruments» по собственной технологии, интегрированы широкополосный ГУН, двойное ядро ИФАПЧ с целочисленным и дробным коэффициентами деления, малощумящие стабилизаторы напряжения, а также набор программируемых аппаратных опций, обеспечивающих соответствие прибора широкому кругу требований, диктуемых радиочастотными стандартами. Что касается снижения уровней ПСС, то использованная в LMX2594 технология подавления побочных спектральных составляющих дает уникальную возможность удалять спектральные «спуры», возникающие в режиме целочисленного (использование ДПКД) и дробного деления (использование ДДПКД) [4, 6].

В модернизированном СЧП на ИМС LMX2594 необходимость в коммутации опорных сигналов отпадает, поэтому опорный сигнал подается напрямую от СЧФ.

Конструктивно СЧП на LMX2594 компании Texas Instruments реализуется с помощью одного корпуса ИМС и за счет применения программируемых делителей частоты позволяет получить широкую сетку высокостабильных частот, кратных частоте опорного кварцевого генератора.

### Моделирование основных узлов модернизированного синтезатора частот

Было проведено моделирование основных узлов СЧП в программе TI PLLatinumSim. Результаты расчетов значений элементов ФНЧ и спектральной плотности мощности фазовых шумов (СПМФШ) выходного сигнала СЧП на ИМС LMX2594 приведены на рисунке 3.

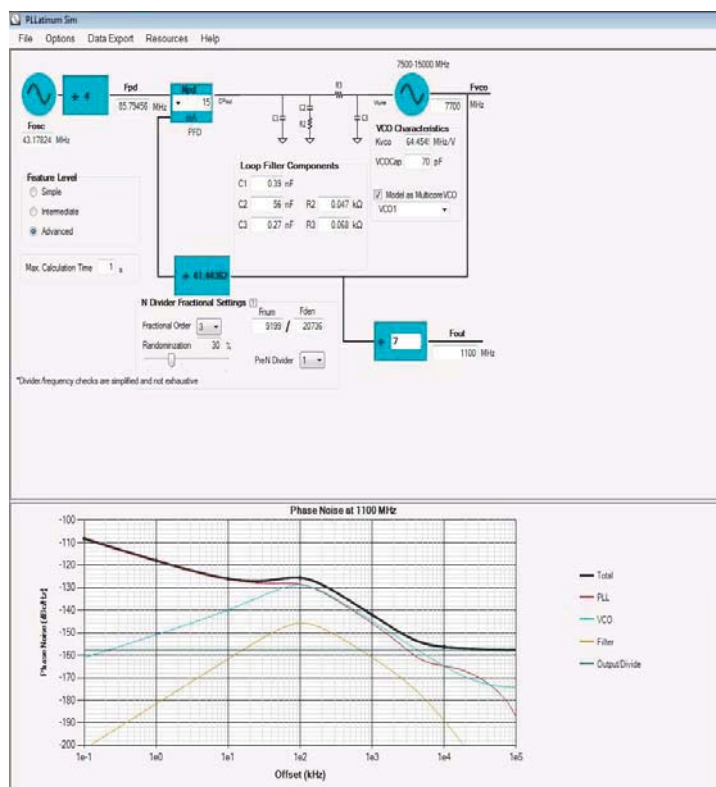


Рис. 3. Расчет элементов ФНЧ и расчет фазовых шумов модернизированного СЧП на ИМС LMX2594

Из графиков на рисунке 3 видно, что для расчетных параметров элементов ФНЧ спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройке на 10 кГц от несущей составляет -125 дБн/Гц. Также в программе TI PLLatinumSim был проведен расчет времени перестройки частоты выходного сигнала СЧП на ИМС LMX2594 при тех же параметрах ФНЧ.

Изображение результатов моделирования переходного процесса, возникающего в СЧП при перестройке рабочей частоты в режимах ППРЧ и ФРЧ, приведено на рисунке 4.



Рис. 4. Результаты моделирования переходного процесса

На основании анализа кривых переходного процесса на рисунке 4 можно сделать вывод о том, что благодаря использованию передовых алгоритмов переключения компонентов ИМС LMX2594 время перестройки модернизированного СЧП теоретически может составлять 18 мкс.

### Экспериментальные результаты

По результатам произведенных расчетов на основе имеющейся документации отладочной платы ИМС LMX2594EVM проведено макетирование модернизированного СЧП.

Для измерений основных параметров конструктивного макета СЧП было собрано рабочее место (рис. 6) согласно рисунку 5.

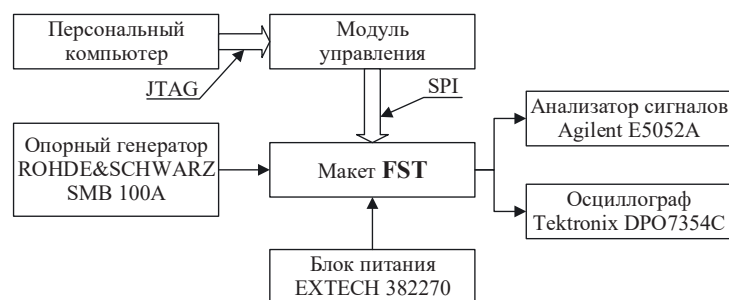


Рис. 5. Блок-схема измерительной установки

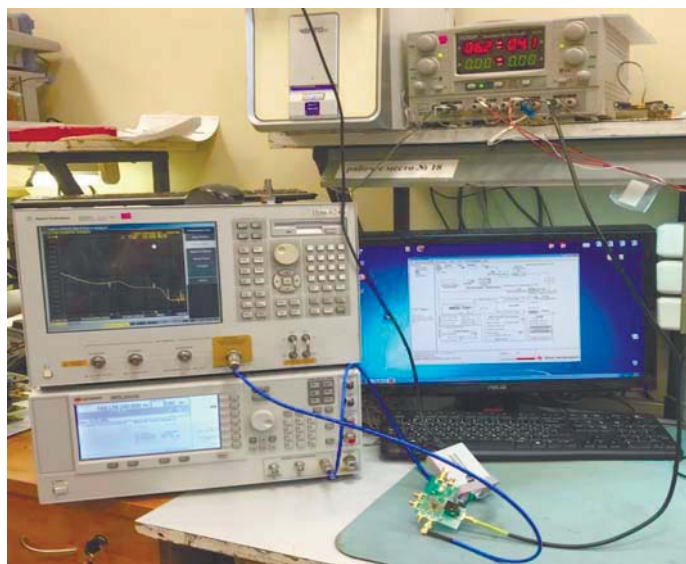


Рис. 6. Рабочее место

Измерение выходного сигнала макета СЧП на LMX2594 производилось измерителем параметров сигналов фирмы «Agilent Technologies» E5052A Signal Source Analyzer (SSA), четырехканальным цифровым осциллографом Tektronix DPO7354C. Напряжение питания на конструктивный макет СЧП поступает от источника питания Extech 382270. В качестве сигнала ОКГ использовался сигнал, подаваемый с генератора Rohde&Schwarz SMB 100A.

Для управления СЧП с помощью персонального компьютера была написана индивидуальная программа на языке программирования C++ в среде Visual Basic. В результате проведенных измерений были получены характеристики спектральной плотности мощности фазовых шумов на частоте 1073,5 МГц модернизированного СЧП на LMX2594, приведенные на рисунке 7. Для сравнения на данном рисунке изображена характеристика СПМ ФШ СЧП на НМС704 на той же частоте.

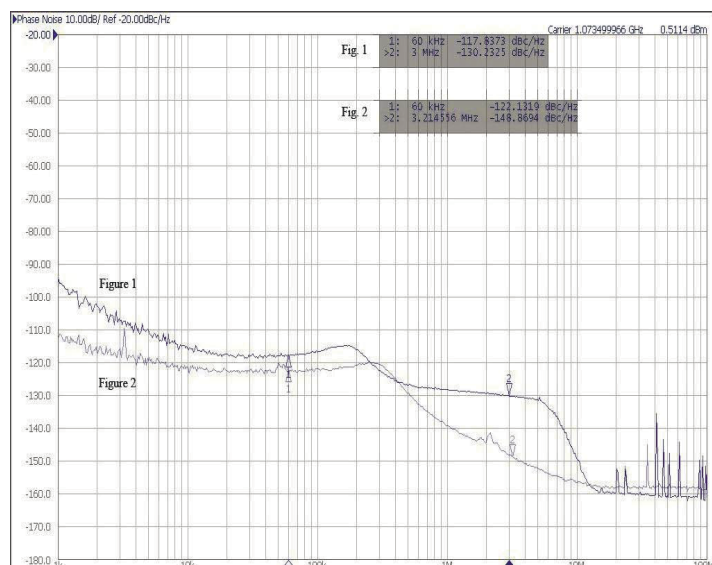


Рис. 7. Спектральная плотность мощности шумов на частоте 1073,5 МГц (Fig. 1 – измерения СЧП на НМС704, Fig. 2 – результат моделирования и измерения макета СЧП на LMX2594)

На рисунке 8 приведена характеристика СПМ ФШ на частоте 958,5 МГц предлагаемого СЧП на LMX2594. Для сравнения на данном рисунке изображена характеристика СПМ ФШ СЧП на ИМС НМС704 на той же частоте.

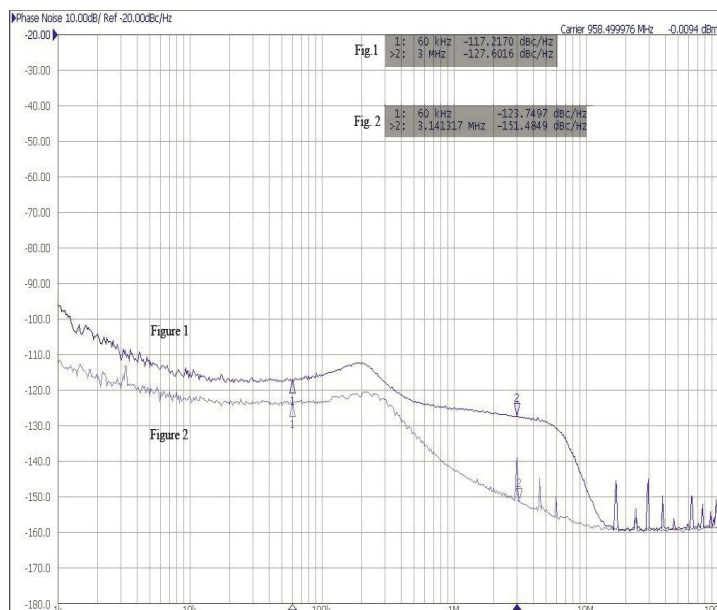


Рис. 8. Спектральная плотность мощности шумов на частоте 958,5 МГц (Fig. 1 – измерения СЧП на НМС704, Fig. 2 – результат моделирования и измерения макета СЧП на LMX2594)

На основе полученных данных можно сделать вывод, что СПМФШ модернизированного СЧП на LMX2594 лучше, чем СПМФШ СЧП «Аксион-В» на НМС704.

Одним из недостатков штатного СЧП является необходимость использования двух режимов работы: в режиме ППРЧ время перестройки частоты 40 мкс, в режиме ФРЧ – 1000 мкс. Модернизированный СЧП позволяет использовать один режим работы, при этом скорость переключения значительно возрастает и время перестройки частоты составляет 35 мкс. Также к недостаткам СЧП на ИМС НМС704 относится то, что для получения высоких спектральных характеристик выходного сигнала используются пять коммутируемых малошумящих ГУН UMV-X5X-16 фирмы «УМС», стоимость которых составляет большую часть стоимости СЧП в целом. ИМС LMX2594, используемая в модернизированном СЧП, уже содержит в себе ГУН с необходимыми параметрами, что значительно удешевляет конструкцию СЧП и его габаритные размеры.

### Заключение

Основные технические параметры синтезаторов фирмы «Texas Instruments» серии LMX2592/4/5 можно реализовать в полной мере только в том случае, когда разработчики СЧ хорошо представляют не только физические процессы, протекающие в системе ИФАПЧ, но и теорию работы блоков и узлов систем ИФАПЧ, астатических по параметру, в нашем случае – астатических по фазе.

Сущность предлагаемого варианта модернизации СЧП возимой УКВ радиостанции за счет использования современной ИМС LMX2594 состоит в следующем:



1. В СЧП на ИМС LMX2594 можно использовать частоту сравнения ЧФД 300 МГц в отличие от ИМС НМС704, позволяющей реализовать только 50 МГц. За счет этого можно существенно повысить быстродействие и чистоту спектра выходного сигнала модернизированного СЧП. Это подтверждено компьютерным моделированием, проведенными расчетами и экспериментальными измерениями параметров действующего макета синтезатора.

2. В СЧП на ИМС НМС704 для получения требуемых динамических и спектральных характеристик потребовалось применение в схеме 5 малошумящих дорогостоящих ГУН и изменение структуры СЧ-ИФАПЧ с помощью дополнительных элементов коммутации широкополосного и узкополосного фильтров ФНЧ2 и ФНЧ3. Макет СЧП на ИМС LMX2594 позволяет обойтись без этих компонентов структуры синтезатора.

3. В СЧП на ИМС НМС704 для ослабления ПСС используется коммутация опорного сигнала в системе ИФАПЧ, а в схеме макета СЧП на ИМС LMX2594 такая необходимость отпадает, так как в самой ИМС заложена фирменная передовая технология подавления побочных составляющих.

4. При регулировке СЧП из-за особенностей архитектуры ИМС НМС704 приходится настраивать направление и величину токов утечки в блоке зарядовой накачки, что значительно замедляет процесс настройки СЧП. В схеме макета СЧП на ИМС LMX2594 за счет оригинальных схемотехнических решений этот процесс производится в автоматическом режиме.

5. Подробно изучив документацию на ИМС LMX2594, была написана программа управления СЧП. Программа максимально эффективно использует внутренние режимы работы микросхемы, благодаря чему значительно улучшаются динамические и спектральные характеристики СЧП.

Изображение действующего конструктивного макета СЧП на ИМС LMX2594 приведено на рисунке 9.

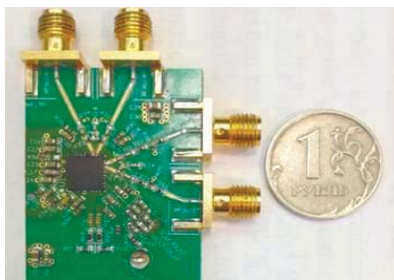


Рис. 9. Действующий конструктивный макет для модернизации СЧП

Для сравнения массогабаритных размеров на рисунке 10 приведено фото СЧП на НМС704.

Макет СЧП на LMX2594 позиционируется как вариант модернизации СЧП на ИМС НМС704, входящего в состав приемопередающей аппаратуры подвижной УКВ радиостанции. Достигнутые технические характеристики и малые массогабаритные показатели делают разработанный макет СЧП достойным конкурентоспособным изделием в классе встраиваемых широкополосных СЧ-ИФАПЧ для УКВ радиостанции. Макет СЧП на LMX2594, разработанный и испытанный в целях проведения модернизации штатного синтезатора подвижной УКВ радиостанции, обладает высокой скоростью перестройки, что требуется в режиме ведения связи с ППРЧ.

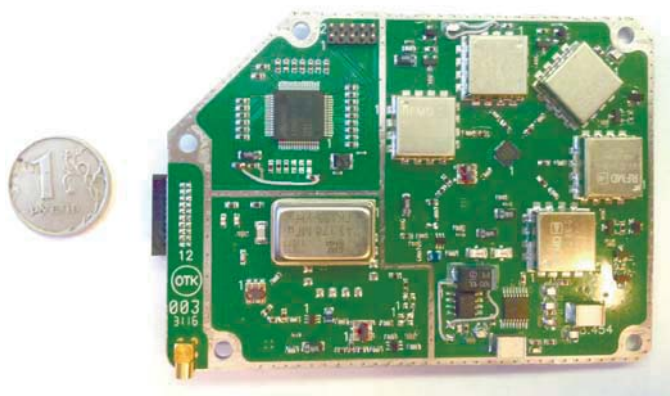


Рис. 10. Внешний вид штатного СЧП на НМС704

При шаге 25 кГц в диапазоне 900,0...1400,0 МГц время захвата ИФАПЧ составляет менее 25 мкс при требуемом значении 40 мкс. В широком диапазоне перестройки, например, при переходе с 900,0 до 1400,0 МГц или, наоборот, с 1400,0 до 900,0 МГц, время увеличивается примерно до 35 мкс. Эти показатели приведены с запасом и с учетом задержки на программную обработку и загрузку данных.

Стоимость СЧП на LMX2594: стоимость закупаемой комплектации снижается более, чем в два раза.

Время регулировки СЧП на LMX2594 уменьшается с 1 часа до 10 минут за счет сокращения количества исходных настроек микросхемы LMX2594 по сравнению с НМС704.

Перестройка по частоте СЧП на LMX2594: использование новой ИМС LMX2594 позволило уменьшить скорость перестройки до 25... 35 мкс.

Уменьшение номенклатуры элементной базы: 5 ГУН, 3 усилителя, делитель на 4, 8 ключей, операционный усилитель, стабилизатор, 2 разветвителя.

Аналогичная архитектура (структурная схема) СЧП может быть реализована на отечественной элементной базе с применением ГУН, разрабатываемых АО «Метеор», интегральных микросхем СЧ-ИФАПЧ 1288ПЛ1У, 1508ПЛ9Т, 1508МТ015 и цифровых сигнальных процессоров 1892ВМ10Я, 1892ВМ7Я, 1892ВМ196 и 1892ВМ206 российской компании АО НТЦ «ЭЛВИС», прецизионные малошумящие кварцевые генераторы ГК341-ТС и ГК342-ТС от АО «Морион». Вместе с тем такой СЧП будет реализован с некоторым ухудшением эксплуатационно-технических характеристик.

## Литература

1. Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот. М.: Радио и связь, 2010. 328 с.
2. Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В., Тихомиров В.Н. Переходные процессы в синтезаторах с коммутацией элементов в системе фазовой автоподстройки частоты // Радиотехника. 2013. № 12. С. 104-111.
3. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое построение синтезаторов частот СВЧ-диапазона. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 280 с.
4. Леньшин А.В., Шаталов Е.В., Тихомиров В.Н. Методика проектирования астатической по фазе системы фазовой автоподстройки для цифровых синтезаторов частот // Телекоммуникации. 2019. № 4. С. 35-41.
5. LMX2594. URL: <https://www.ti.com/product/LMX2594>.
6. Romanov S.K., Leshin A.V., Tikhomirov V.N., Shatalov E.V. Application of linearization transient PLL to eliminate slips // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). Yaroslavl, July 2019. С. 58-63.

## FREQUENCY SYNTHESIZERS MODERNIZATION OF VHF RADIO COMMUNICATION

**Andrey V. Lenshin**, VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, [andrey-lenshin@yandex.ru](mailto:andrey-lenshin@yandex.ru)

**Vladimir N. Tikhomirov**, VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, [vtikhomirov@mail.ru](mailto:vtikhomirov@mail.ru)

**Evgeny V. Shatalov**, VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, [evgen1778@mail.ru](mailto:evgen1778@mail.ru)

**Mikhvil P. Savchenko**, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, [savchenkomp@mail.ru](mailto:savchenkomp@mail.ru)

**Nikolai M. Tikhomirov**, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, [n.m.tihomirov@sozvezdie.su](mailto:n.m.tihomirov@sozvezdie.su)

### Abstract

Trends and prospects for the development of modern systems and complexes of radio communication, features of the use of frequency synthesizers based on the pulse-phase-locked loop in modern radio communications are analyzed. The results of the MF modernization on an integrated circuit HMC704 for transceivers of VHF radio stations are presented. The modeling of the upgraded midrange main units was carried out in the TI PLLatinumSim program. The LPF elements values and power spectral density of the output MF signal phase noise on LMX2594 IC are calculated. Due to the possibility of using a high comparison frequency in a frequency-phase detector, it was possible to improve the weight and size indicators, increase the speed and purity of the output signal spectrum of upgraded MF, which was confirmed by the results of modeling and experimental studies of the current synthesizer layout.

**Keywords:** frequency synthesis, pulse phase lock, integrated circuits, fractional dividers.

### References

1. S.K. Romanov, N.M. Tikhomirov, A.V. Len'shin (2010). Pulse-phase-locked loop systems in frequency synthesis and stabilization devices. Moscow: Radio and communication. 328 p.
2. S.K. Romanov, N.M. Tikhomirov, A.V. Lenshin, V.N. Tikhomirov (2013). Transient processes in synthesizers with switching of elements in a phase locked loop system. *Radiotekhnika*. No. 12, pp. 104-111.
3. A.V. Chenakin, A.V. Gorevoy (2021). Practical construction of microwave frequency synthesizers. Moscow: Hotline-Telecom. 280 p.
4. A.V. Lenshin, E.V. Shatalov, V.N. Tikhomirov (2019). Methodology for designing a phase-astatic phase-locked loop system for digital frequency synthesizers. *Telecommunications*. No. 4, pp. 35-41.
5. LMX2594. URL: <https://www.ti.com/product/LMX2594>.
6. S.K. Romanov, A.V. Lenshin, V.N. Tikhomirov, E.V. Shatalov. (2019). Application of linearization transient PLL to eliminate slips. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*. Yaroslavl, July 2019: IEEE Xplore digital library, pp. 58-63.