

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

На правах рукописи

УДК 621.396.93

ЗАЛОВ НАТИГ САРЫЕВИЧ

**Исследование схем построения синтезаторов частоты
радиотехнических систем**

5A350101 – Телекоммуникационный инжиниринг

**Диссертация
на соискание академической степени магистра**

**Научный руководитель:
К.т.н., доц. Д.Давронбеков**

Ташкент 2015

МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

Факультет ТТ

Магистрант Залов Н.С.

Кафедра СТРВ

Научный руководитель Давронбеков Д.А.

Учебный год 2014/2015

Специальность 5А350101 –

Телекоммуникационный инжиниринг

АННОТАЦИЯ МАГИСТРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Магистерская диссертация посвящена актуальной задаче исследованию схем построения синтезаторов частоты радиотехнических систем. В диссертации проводится комплексное исследование характеристик и особенностей построения синтезаторов частоты. В работе были использованы методы анализа полученных результатов исследования схем построения синтезаторов частоты. Значимость полученных результатов заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы практически при разработке и исследовании синтезаторов частоты.

Результаты исследований обсуждались на семинарах кафедры «Системы телерадиовещания», на Республиканских научно-технических конференциях.

Научный руководитель _____

Магистрант _____

MINISTRY FOR DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES
AND COMMUNICATIONS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Faculty TT

Student Zalov N.S.

Department TRBS

Supervisor of studies Davronbekov D.A.

Academic year 2014/2015

Speciality 5A350101 – Telecommunication
engineering

SUMMARY OF MASTER DISSERTATION

The master thesis is devoted to an actual task to research of schemes of creation of synthesizers of frequency of radio engineering systems. In the thesis complex research of characteristics and features of creation of synthesizers of frequency is conducted. In work methods of the analysis of the received results of research of schemes of creation of synthesizers of frequency were used. The importance of the received results is that the received results can be used practically when developing synthesizers of frequency.

Results of researches were discussed at seminars of Systems of TV and Radio Broadcasting chair, at Republican scientific and technical conferences.

Supervisor of studies _____

Student _____

Оглавление

Введение	5
Глава I. Применение синтезаторов частот в различных радиотехнических устройствах	8
1.Определение синтезатора частот.....	8
2.Основные параметры синтезаторов частоты.....	9
3.Применение синтезаторов частот в радиотехнических системах.....	10
3.1.Синтезаторы частот в радиоприемных устройствах	10
3.2.Синтезаторы частот в радиопередающих устройствах.....	12
3.3.Синтезатор частот приемопередатчика цифровой системы связи.....	16
3.4.Синтезаторы частот систем мобильной связи	18
3.5.Синтезаторы частот в измерительной технике	24
4. Источники эталонных колебаний синтезаторов частот	28
Выводы к главе I.....	32
Глава II. Системы и методы синтеза частот	33
1.Классификация систем синтеза частот	33
2. Прямой аналоговый синтез	34
3. Косвенный синтез частоты на основе фазовой автоподстройки	35
4.Прямой цифровой синтез	37
5.Гибридный синтез.....	45
6.Техника частотного синтеза.....	48
Выводы к главе II	48
Глава III. Разработка методики исследования синтезатора частот	50
1.Описание лабораторной установки по исследованию синтезатора частот .	50
2.Методика проведения лабораторных исследований синтезатора частот	54
3.Экспериментальное исследование синтезатора частот.....	61
Выводы к главе III.....	72
Заключение.....	73
Список литературы	75

Введение

Обоснование темы магистерской диссертации и её актуальность.

В Республике Узбекистан создана современная и мощная законодательная база в сфере информационно–коммуникационных технологий [1–7]. Предусмотрено проведение модернизации, технического и технологического перевооружения предприятий, широкое внедрение современных гибких технологий. Ставится задача ускорения реализации принятых отраслевых программ модернизации, технического и технологического перевооружения производства [8, 24, 25]. Одной из важнейшей задач, которое стоит перед нашим обществом, является обеспечение поступательного и устойчивого развития страны [9, 31].

Последние годы характеризуются бурным развитием радиотехнических систем (РТС) различного назначения: радиосвязи, радиолокации, мобильной связи, навигации и телевидения. При этом требования к техническим характеристикам радиотехнических систем постоянно возрастают, что требует улучшения параметров синтезаторов частот и сигналов, т.к. именно от них в значительной степени зависят наиболее важные технические характеристики РТС [10, 11].

Применение синтезаторов частоты позволило значительно улучшить параметры многих радиотехнических систем (РТС): в радиовещании и телевидении – улучшить качество звуковых и телевизионных сигналов; в радиорелейных и спутниковых системах связи – повысить качество телефонной связи; в радиолокации – повысить разрешающую способность по дальности и по скорости; в навигации – снизить ошибки определения координат объекта; в радиосвязи – улучшить помехоустойчивость, скрытность и надежность сеанса связи; в измерительной технике – формировать прецизионные сигналы с малым шагом сетки частот и низким уровнем амплитудных и фазовых шумов.

Такие достоинства синтезаторов частоты, как технологичность, надежность, устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов, экстремально малое время перестройки частоты при непрерывности фазы формируемых колебаний, способность формирования сложных сигналов, возможность полной микроминиатюризации и программируемость параметров позволяют существенно повысить технические показатели многих радиотехнических систем.

Вследствие выше сказанного, поставленная задача исследования схем построения синтезаторов частоты радиотехнических систем, является актуальной.

Объект и предмет исследований. *Объектами* исследования являются аналоговые и цифровые синтезаторы частот РТС. *Предметом* исследований является разработка методики исследования лабораторного синтезатора частоты.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является проведение анализа существующих способов синтеза частот.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- выполнить анализ использования синтезатора частот в различных радиотехнических системах;
- провести обзор методов синтеза частот;
- разработать методику и провести исследования синтезатора частот.

Научная новизна. На основе проведенных исследований получены следующие научные результаты:

- выполнен научный анализ схем построения синтезаторов частот;
- разработана методика исследования синтезатора частот.

Основные задачи и гипотеза исследований. При проведении исследований в данной диссертации предполагается, что результаты исследований могут быть использованы для практических исследований синтезаторов частоты.

Обзор (анализ) литературы по теме исследований. В настоящее время во всемирной научной литературе большое внимание уделяется вопросам разработки радиотехнических систем, которые представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы. Результаты исследований широко освещены в мировой научной и научно-популярной литературе, а также в интернете. Вопросами исследования и разработки синтезаторов частоты занимались ведущие специалисты и ученые: Светлов П.В., Чистяков Н.И., Шахгильдян В.В., Рыжков А.В., Попов В.Н., Губернаторов О.И., Соколов Ю.Н., Манассевич В., Kroupa V.F., Кочемасов В.Н., Раджабов Т.Д., Абдуазизов А. и др.

Характеристики методик, примененных в исследовании. В работе были использованы методы анализа результатов исследования синтезатора частоты, а также способы реализации на практике данных методов.

Теоретическое и практическое значение результатов исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы практически для исследования синтезаторов частоты.

Характеристика структуры работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Основной текст диссертации занимает 70 страниц. Работа содержит 32 рисунка, включая графики, 2 таблицы, а также список литературы из 36 наименований.

Глава I. Применение синтезаторов частот в различных радиотехнических устройствах

1. Определение синтезатора частот

Синтезатор частот — устройство для генерации электрических гармонических колебаний с помощью линейных повторений (умножением, суммированием, разностью) на основе одного или нескольких опорных генераторов [21, 22]. Синтезаторы частот служат источниками стабильных (по частоте) колебаний в радиоприёмниках, радиопередатчиках, частотомерах, испытательных генераторах сигналов и других устройствах, в которых требуется настройка на разные частоты в широком диапазоне и высокая стабильность выбранной частоты. Стабильность обычно достигается применением фазовой автоподстройки частоты или прямого цифрового синтеза (DDS) с использованием опорного генератора с кварцевой стабилизацией. Синтез частот обеспечивает намного более высокую точность и стабильность, чем традиционные электронные генераторы с перестройкой изменением индуктивности или ёмкости, очень широкий диапазон перестройки без каких-либо коммутаций и практически мгновенное переключение на любую заданную частоту [11-13].

Синтезатор используется в радиоприемных и радиопередающих устройствах систем радиосвязи, радионавигации, радиолокации и другого назначения.

В современных синтезаторах число формируемых им дискретных частот может достигать десятков тысяч, а шаг сетки изменяться от десятков герц до десятков и сотен килогерц. Долговременная нестабильность частоты, определяемая кварцевым автогенератором, составляет 10^{-6} , а в специальных случаях — $10^{-8} \dots 10^{-9}$. Диапазон частот

синтезатора меняется в больших пределах в зависимости от назначения аппаратуры, в которой он используется [12].

2. Основные параметры синтезаторов частоты

К основным параметрам синтезаторов частоты относятся следующие [10, 33]:

- 1) диапазон рабочих частот $f_{\min} \dots f_{\max}$;
- 2) шаг дискретной сетки f_c частот или объем рабочих частот N :

$$N = 1 + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{F_c},$$

где F_c – шаг сетки частот.

- 3) относительная долговременная нестабильность рабочей частоты ($\frac{\delta f_p}{f_p} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ - для кварцевого СЧ; $\frac{\delta f_p}{f_p} = 10^{-9} \dots 10^{-12}$ - для квантового СЧ);

- 4) коэффициент подавления побочных колебаний

$$D = 10 \lg P_p / P_n,$$

характеризующий отношение мощности P_p рабочего колебания к мощности P_n побочного на выходе СЧ, обычно $D > 40 \dots 60$ дБ, в отдельных случаях $D > 100$ дБ;

5) время $t_{пер}$ перехода СЧ с одной частоты на другую, конкретное значение которого определяется задачами радиотехнической системы;

б) мощность колебаний на выходе СЧ P_p , значение которой обычно лежит в диапазоне 1...10 мВт, так как удовлетворить другим перечисленным требованиям к СЧ легче при низком уровне мощности. Кроме отмеченных задаются дополнительные требования к типу и параметрам модуляции (в особых случаях), эксплуатационные, технологические и ряд других.

3. Применение синтезаторов частот в радиотехнических системах

3.1. Синтезаторы частот в радиоприемных устройствах

Синтезаторы частоты находят широкое применение в самых различных радиотехнических устройствах и системах: радиопередатчики, радиоприемники и т.д. Упрощённая структурная схема супергетеродинного радиоприемника с однократным преобразованием частоты показана на рис.1.1. Радиосигнал из антенны подаётся на вход усилителя высокой частоты (в упрощённом варианте он может и отсутствовать), а затем на вход смесителя — специального элемента с двумя входами и одним выходом, осуществляющего операцию преобразования сигнала по частоте. На второй вход смесителя подаётся сигнал с локального маломощного генератора высокой частоты — гетеродина. Колебательный контур гетеродина перестраивается одновременно с входным контуром смесителя (и контурами усилителя ВЧ) — обычно конденсатором переменной ёмкости (КПЕ), реже катушкой переменной индуктивности (вариометром, ферровариометром). В настоящее время широкое применение находит электронная перестройка частоты

с помощью варикапа. Таким образом, на выходе смесителя образуются сигналы с частотой, равной сумме и разности частот гетеродина и принимаемой радиостанции. Разностный сигнал постоянной промежуточной частоты (ПЧ) выделяется с помощью полосового фильтра и усиливается в усилителе ПЧ, после чего поступает на демодулятор, восстанавливающий сигнал низкой (звуковой) частоты [17, 18, 27, 29].

В современных приёмниках в качестве гетеродина используется цифровой синтезатор частот с кварцевой стабилизацией.

Применением синтезатора частот с кварцевой стабилизацией в качестве первого (а нередко и второго) гетеродина резко увеличивает потребительские качества приемников. В основе синтезатора лежит кварцевый генератор, частота которого задаётся частотой колебаний кварцевой пластины. Она очень стабильна, например, на частоте 1 МГц можно добиться ухода частоты на 0,1...10 Гц. С помощью специальных схем (умножителей и делителей частоты, выделения нужных гармоник) синтезатор формирует любые дискретные частоты. В настоящее время синтезаторы делают с цифровым управлением.

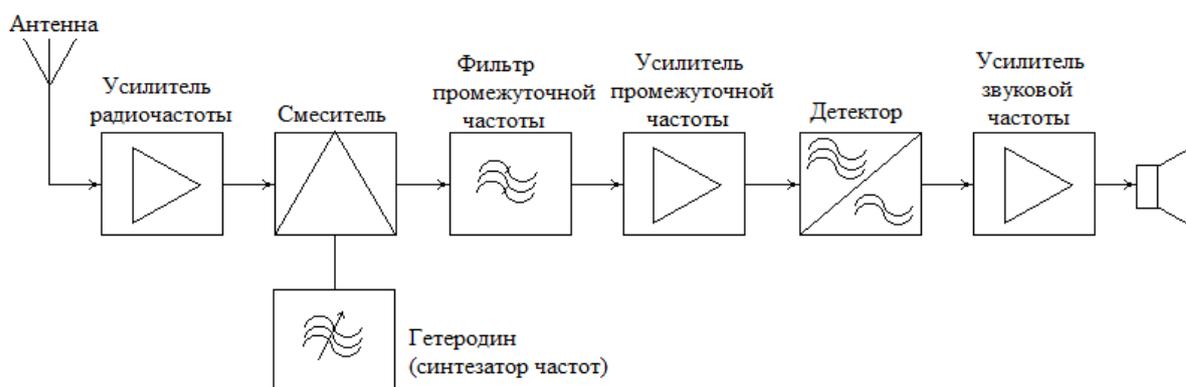


Рис.1.1.Супергетеродинный радиоприемник

Цифровые синтезаторы не только повышают стабильность настройки приемников, но и позволяют осуществить цифровое управление частотой настройки. Достаточно установить частоту станции, и она будет приниматься. Также появилась возможность хранить значения частот принимаемых станций в специальном запоминающем устройстве приемника и использовать переключатель (например, клавишный) для мгновенного выбора нужной станции.

Современный синтезатор частоты может реализоваться на одной специализированной большой интегральной схеме (БИС) или на нескольких микросхемах умеренной степени интеграции. Это позволяет использовать синтезатор частоты в качестве гетеродина супергетеродинных приемников не только профессионального, но и бытового применения: от высококачественных тюнеров до сверхминиатюрных дорожных и карманных всеволновых радиоприемников.

Для управления приемником с синтезатором часто используется микроконтроллер. При этом легко реализуется пошаговая настройка на станции. Часто используются системы поиска работающих радиостанций с их захватом в случае обнаружения. Столь же просто (при наличии индикатора) осуществляется установка частоты приема в цифровой форме и переключение фиксированных настроек приемника, что полезно при применении приемников в системах профессиональной связи [11, 13].

3.2. Синтезаторы частот в радиопередающих устройствах

Схема и конструкция радиопередатчика зависят от различных факторов: назначения, диапазона рабочих частот, мощности и т.д. Тем не

менее, можно выделить некоторые типовые блоки, которые, однако, имеются в большинстве передатчиков [10-16, 32].

Структура передатчика (рис.1.2) определяется его основными общими функциональными возможностями, к которым относятся:

- получение высокочастотных колебаний требуемой частоты и мощности;
- модуляция высокочастотных колебаний передаваемым сигналом;
- фильтрация гармоник и прочих колебаний, частоты которых выходят за пределы необходимой полосы излучения и могут создать помехи другим радиостанциям;
- излучение колебаний через антенну.



Рис.1.2.Функциональная схема радиопередатчика

Рассмотрим более подробно отдельные функциональные узлы радиопередатчика.

Генератор высокой частоты, часто называемый задающим или опорным генератором, служит для получения высокочастотных колебаний, частота которых соответствует высоким требованиям к точности и стабильности частоты радиопередатчиков.

Синтезатор преобразует частоту колебаний опорного генератора, которая обычно постоянна, в любую другую частоту, которая в данное время необходима для радиосвязи или вещания. Стабильность частоты при этом преобразовании не должна существенно ухудшаться. В отдельных случаях синтезатор частоты не нужен, например, если генератор непосредственно создает колебания нужной частоты. Однако с синтезатором легче обеспечить требуемую высокую точность и стабильность частоты, так как он, во-первых, работает на более низкой частоте, на которой легче обеспечить требуемую стабильность; во-вторых, он работает на фиксированной частоте. Кроме того, современные синтезаторы приспособлены для дистанционного или автоматического управления синтезируемой частотой, что облегчает общую автоматизацию передатчика.

Промежуточный усилитель высокой частоты, следующий за синтезатором, необходим по следующим причинам:

— благодаря промежуточному усилителю с достаточно большим коэффициентом усиления от опорного генератора и синтезатора не требуется значительной мощности;

— применение промежуточного усилителя между синтезатором и мощным усилителем ослабляет влияние на генератор и синтезатор возможных регулировок в мощных каскадах передатчика и в антенне.

Усилитель мощности (его называют генератором с внешним возбуждением) увеличивает мощность радиосигнала до уровня, определяемого требованиями системы радиосвязи. Главным требованием к

усилителю мощности является обеспечение им высоких экономических показателей, в частности КПД.

Выходная цепь служит для передачи усиленных колебаний в антенну, для фильтрации высокочастотных колебаний и для согласования выхода мощного оконечного усилителя с антенной, т.е. для обеспечения условий максимальной передачи мощности.

Модулятор служит для модуляции несущих высокочастотных колебаний передатчика передаваемым сигналом. Для этого модулятор воздействует в зависимости от особенностей передатчика и вида модуляции (амплитудная, частотная, однополосная и др.) на один или несколько блоков из числа обведенных пунктиром на рис.1.2. Например, частотная модуляция может получаться в синтезаторе частоты либо (реже) в генераторе; амплитудная модуляция получается воздействием на мощный и промежуточный усилители.

Система электропитания обеспечивает подведение ко всем блокам токов и напряжений, необходимых для нормальной работы входящих в их состав транзисторов, ламп и прочих электронных элементов, а также систем автоматического управления, устройств защиты от аварийных режимов и прочих вспомогательных цепей и устройств. Система электропитания содержит выпрямители, электромашинные генераторы с двигателями внутреннего сгорания, аккумуляторы, инверторы (преобразователи) низкого постоянного напряжения в более высокое или обратно, трансформаторы, коммутационную аппаратуру, резервные источники питания и устройства для автоматического перехода с основного источника на резервный в случае неисправностей и т.п.

На рис.1.2 не показаны многочисленные объекты вспомогательного оборудования, входящие в состав передатчика (особенно мощного), например, средства автоматического и дистанционного управления; контрольно-измерительные приборы, устройства дистанционного контроля

и сигнализации; устройства защиты и блокировки; выключающие цепи высокого напряжения при аварийных режимах или опасности для обслуживающего персонала и др.

3.3. Синтезатор частот приемопередатчика цифровой системы связи

Упрощенная структурная схема приемопередатчика цифровой системы связи приведена на рис.1.3 [13, 15, 16]. Рассмотрим работу этого устройства.

Непрерывное сообщение от источника сообщений поступает на устройство, называемое кодером. Под кодированием в широком смысле понимают операцию преобразования отсчетов непрерывных сигналов в последовательность кодовых символов. В результате, на выходе кодера формируются электрические сигналы, соответствующие кодовой последовательности и определяемой передаваемым сообщением.

Кодовые сигналы в виде последовательности импульсов затем поступают на модулятор, на второй вход которого подается колебание несущей частоты с выхода синтезатора частоты. В модуляторе выполняется соответствующая модуляция (амплитудная, фазовая, частотная и т.д.) колебания несущей частоты в соответствии с поступающей кодовой последовательностью. Затем модулированные сигналы усиливаются до необходимого уровня с помощью усилителя мощности и излучаются передающей антенной.

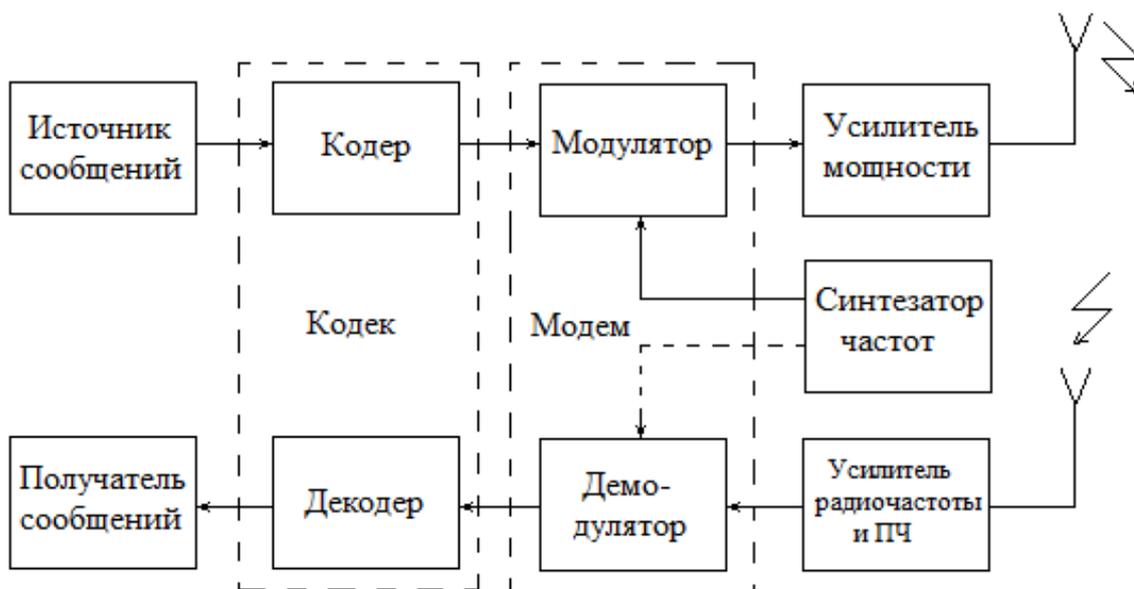


Рис.1.3. Приемопередатчик цифровой системы связи

Наведенные в приемной антенне электромагнитные излучения поступают на вход усилителя и преобразователя частоты, где выделяются и усиливаются колебания несущей частоты полезного сигнала. В демодуляторе выполняется демодуляция принимаемого сообщения, и на выходе демодулятора формируется последовательность импульсов, соответствующая последовательности импульсов передаваемого сообщения (на выходе кодера), которая поступает на декодер. В декодере выполняется операция, обратная кодированию, и восстановленное сообщение направляется получателю сообщений.

В одном приемопередающем устройстве кодер и декодер обычно объединяют в единый конструктивный узел (чаще - это одна микросхема) и объединенный блок кодер-декодер по первым буквам составляющих называют кодеком. Аналогично, объединенный блок модулятор-демодулятор называют модемом.

Важной характеристикой систем связи является стабильность частоты излучаемых колебаний. Под нестабильностью частоты радиопередающего устройства понимают отклонение частоты излучаемых колебаний относительно номинального значения. Недостаточная стабильность частоты ухудшает качество связи и может являться причиной помех для радиотехнических устройств, работающих в смежных диапазонах частот.

Синтезатор частоты обеспечивает стабильность частоты излучения передатчика и стабильность частоты в приемнике.

3.4. Синтезаторы частот систем мобильной связи

Структурная схема цифровой мобильной станции, в данном случае цифрового мобильного радиотелефона, работающего в стандарте GSM, представлена на рис.1.4 [14, 34].

Рассмотрим основные блоки мобильной станции MS стандарта GSM.

Антенный блок.

Антенный блок включает:

- собственно антенну (в простейшем случае четвертьволновый вибратор (штырь), имеющей длину $l = \lambda/4 = 33,7/4 = 8,425$ см, при этом антенна выполняет функции передающей и приемной антенны (следует отметить, что антенну выполняют часто в виде спиральной укороченной антенны, по основным параметрам аналогичную стандартной полуволновой антенне);
- антенный переключатель — электронный коммутатор, управляемый из CPU и подключающий вход антенны либо на выход передатчика, либо на вход приемника.

В системах стандарта GSM передатчик и приемник работают не одновременно и режим передачи осуществляется только в течение 1/8 длительности кадра. Это значительно уменьшает расход энергии аккумуляторной батареи и увеличивает время функционирования как в режиме передачи (разговор), так и в режиме приема (ожидание). Кроме того, это приводит к снижению требований к высокочастотному фильтру приемника.

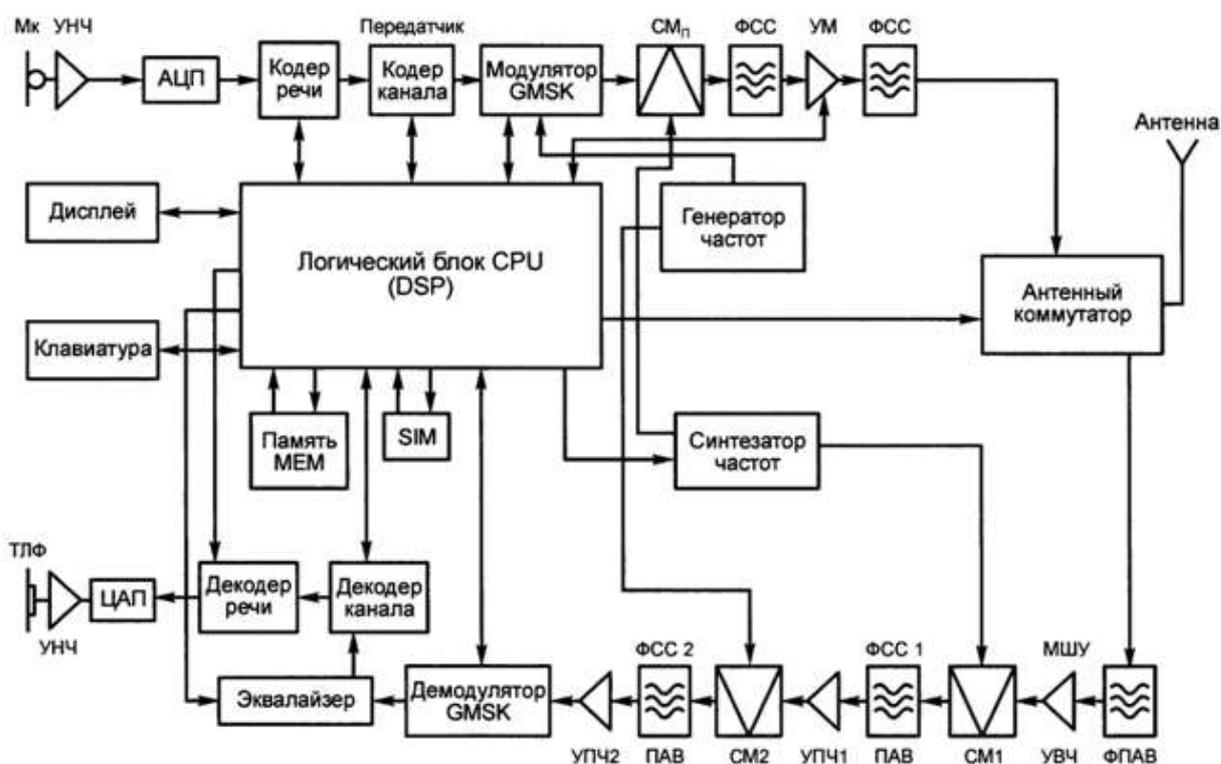


Рис.1.4. Структурная схема цифрового радиотелефона (MS) стандарта GSM 900

Приемо-передающий блок. Передатчик.

Рассмотрим основные блоки передатчика (ПРД), их назначение и функции.

- Речевой сигнал, преобразованный микрофоном (M_k) в электрический аналоговый сигнал и усиленный усилителем низкой частоты (УНЧ), поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП — ADC — Analog-to-Digital Converter), на выходе которого речевой сигнал преобразуется в цифровую форму и далее передача сигнала речи производится в цифровой форме.

- Кодер речи осуществляет кодирование речевого сигнала, то есть преобразование сигнала (имеющего цифровую форму) по определенным законам с целью сокращения его избыточности, то есть с целью сокращения объема информации, передаваемой по каналу связи.

- Кодер канала добавляет в цифровой сигнал, получаемый с выхода кодера речи, дополнительную (избыточную) информацию, предназначенную для защиты от ошибок при передаче сигнала по линии связи; с той же целью информация подвергается определенной переупаковке (перемежению); кроме того, кодер канала вводит в состав передаваемого сигнала информацию управления, поступающую от CPU.

- I/Q генератор предназначен для формирования модулирующего сигнала из сформированного цифрового сигнала при непосредственном управлении от CPU.

- Фазовый модулятор реализует гауссовскую манипуляцию с минимальным частотным сдвигом (GMSK — Gaussian Minimum Shift Keying), то есть реализует перенос цифрового сигнала в область радиочастотного канала. В стандарте GSM с модуляцией GMSK произведение BT_b , определяющее частоту среза предмодуляционного гауссовского фильтра, равно [26-28]

$$BT_b = 0,3, \quad (1.2)$$

где B — полоса частотного спектра;

T_b — длительность бита сообщения).

Такое значение произведения BT_b достигается путем сложной аппаратурной реализации для увеличения требуемого отношения S/N (сигнал/помеха) и уменьшения влияния условий распространения радиоволн и неидеальности аппаратуры. При GMSK обеспечивается высокий КПД усилителя мощности и приемлемая помехоустойчивость: вероятность ошибки $P_e = 10^{-3}$ при $S/N = 30$ дБ (S/N — сигнал/шум).

- Смеситель (СМП) предназначен для переноса сигнала на выходе фазового модулятора в диапазоне частот 890...915 МГц под действием сигнала, поступающего с синтезатора частот (f_{tr}), управляемого из CPU.

- Фильтр сосредоточенной селекции (ФСС) (обычно выполняемый на кремниевом фильтре) настраивается на одну из выбираемых CPU несущих частот и реализует фильтрацию высших гармоник для уменьшения межканальных влияний.

- Усилитель мощности (УМ) не только усиливает высокочастотный сигнал с выхода ФСС, но и под действием команд из CPU меняет коэффициент усиления (то есть используется режим нелинейного усиления), тем самым в зависимости от расстояния между мобильной MS и базовой BTS станциями выходная мощность передатчика MS автоматически регулируется: чем ближе MS к BTS, тем меньше мощность передатчика MS, тем меньше излучаемая антенной MS мощность.

- Высокочастотный сигнал с выхода усилителя мощности через фильтр сосредоточенной селекции (ФСС) поступает в антенный коммутатор (АК) и в случае передачи речевого сигнала CPU переключает АК в режим передачи.

Таким образом, аналоговая часть передатчика выполняет обычные функции переноса информации кодированного цифрового сигнала в область несущей частоты выбранного частотного канала передачи, а цифровая часть — с активным участием CPU — обработку и передачу информации (речь и т.п.) в цифровой форме с добавлением информационных потоков управления, защиты, адреса и т.п.

Приемо-передающий блок. Приемник.

Рассмотрим основные каскады приемника, их назначение и функции.

- Высокочастотный сигнал в диапазоне 935...960 МГц принимается антенной и через антенный коммутатор (включаемый CPU в режиме приема) поступает в высокочастотный фильтр (обычно фильтр поверхностной акустической волны (ФПАВ) — керамический фильтр), усиливается в высокочастотном малошумящем усилителе (МШУ).

- Первый смеситель CM1 позволяет сдвинуть сигнал в более низкочастотную область, при этом на второй вход CM1 гетеродинный сигнал подается с синтезатора частот (управляемого от CPU), фильтр сосредоточенной селекции на ПАВ (ФСС1) выделяет сигнал на первой промежуточной частоте и далее этот сигнал усиливается в тракте усилителей первой промежуточной частоты УПЧ1.

- Сигнал первой промежуточной частоты поступает на вход второго смесителя CM2 (на второй вход CM2 подается сигнал гетеродина 2 (генератор частот), далее ФСС2 на ПАВ выделяет сигнал второй промежуточной частоты, который усиливается УПЧ2 и поступает в блок демодуляции.

- Блок демодуляции. В блоке сигнал вначале демодулируется в фазовом демодуляторе (ФДМ), при этом на вход канального эквалайзера он поступает в виде цифрового видеосигнала; (назначение канального

эквалайзера состоит в компенсации той разности хода между составляющими радиолучами при многолучевом распространении радиоволн, которая приводит к межсимвольной интерференции (эквалайзер по своей сути — это адаптивный фильтр, настраиваемый таким образом, чтобы сигнал на его выходе был по возможности в большей степени очищен от межсимвольных искажений, содержащихся во входном сигнале); далее цифровой сигнал попадает в декодеры канала и речевого сигнала.

Декодер канала реализует процесс, обратный кодированию, и с учетом закодированной в кодере канала управляющей информации и речевого закодированного сигнала, декодирует весь поток информации.

Декодер речи декодирует цифровой поток речевой информации для дальнейшего преобразования ее из цифровой формы в аналоговую в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП).

Далее электрический сигнал аналоговой речевой информации подается на телефон. Таким образом, завершается прием информации, переданной базовой станцией BTS мобильной MS.

Управляющим устройством в MS является центральный управляющий процессор CPU, который имеет свою оперативную и постоянную память (MEM) и выполняет широкий спектр функций, которые будут рассмотрены ниже.

Синтезатор частот (СЧ), являющийся задающим генератором колебаний высокой частоты (а именно, несущей частоты, зависящей от условий передачи или приема) для передачи информации по радиоканалу. Синтезатор используется в работе как передающего устройства (при передаче сигнала СЧ \rightarrow СМ_П в блок фазового модулятора), так и приемного (при передаче сигнала СЧ \rightarrow СМ, при этом СЧ играет роль первого гетеродина), переключаясь в разные области выделенной полосы

частот для передачи и приема. Кроме указанных основных функций, СЧ, под действием управляющих сигналов от CPU, реализует процесс скачков по частоте (frequency hopping), при этом в стандарте GSM используются медленные скачки с переключением по частоте в каждом очередном кадре. Учитывая, что в кадре каждому физическому каналу соответствует один слот, то для любого из физических каналов такая частота скачков эквивалентна смене частотных каналов с частотой слотов.

3.5. Синтезаторы частот в измерительной технике

Как уже отмечалось, для создания стабильного по частоте и фазе сигнала используют кварцевые генераторы, имеющие высокую стабильность частоты. Кварцевые стандарты частоты имеют более высокие показатели по стабильности и их нестабильность частоты порядка $10^{-8} \dots 10^{-9}$ [15, 16].

Еще лучшую стабильность частоты (нестабильность порядка 10^{-12}) обеспечивают квантомеханические стандарты частоты, действие которых основано на использовании электромагнитного излучения атомов определенного химического элемента при переходе их из одного энергетического состояния в другое. На этой основе созданы водородные, цезиевые и рубидиевые генераторы.

Все перечисленные кварцевые генераторы и стандарты частоты обеспечивают формирование высокостабильных сигналов только на нескольких (порядка 3) значениях частот. При необходимости иметь большой набор генерируемых частот используют кварцевые синтезаторы частот.

Синтезаторы частот обеспечивают синусоидальную форму, высокую спектральную «чистоту», большую точность установки и возможность

программной перестройки частоты. Синтезаторы позволяют получать напряжения фиксированных частот с дискретностью (сеткой частот) до сотых долей герц. По точности установки и стабильности частоты синтезаторы превосходят обычные измерительные генераторы с плавной перестройкой частоты. Они легко сопрягаются с автоматизированными информационно-измерительными системами.

Кварцевые синтезаторы частоты — это многочастотные генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты. Упрощенная структурная схема аналогового синтезатора частоты приведена на рис.1.5. В нее входят кварцевый генератор частоты f_0 , устройство формирования опорных частот f_1, \dots, f_n , устройство переключения, подключающее на выход сигнал нужной частоты, цифровое отсчетное и выходное устройства [35].



Рис.1.5. Упрощенная структурная схема аналогового синтезатора частоты измерительного генератора

В современных высококачественных широкодиапазонных измерительных генераторах требование высокой стабильности частоты и возможности ее быстрой перестройки являются трудно совместимыми. Поэтому при разработке синтезаторов частоты переходят к дискретному

перекрытию частотного диапазона, при котором допускается генерирование сигналов на любой из множества частот, следующих друг за другом с определенным фиксированным интервалом, называемым шагом дискретной сетки.

На рис.1.6. показана одна из структурных схем аналогового синтезатора частоты с цифровым управлением. Синтезатор содержит опорный кварцевый генератор (ОКГ), управляемый делитель частоты (УДЧ), управляемый генератор (УГ), фазовый детектор (ФД) с цепью фазовой автоматической подстройки частоты и программируемое цифровое устройство (ПЦУ).

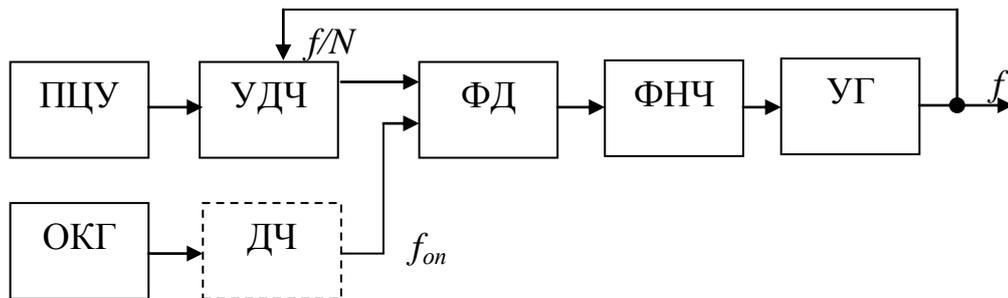


Рис.1.6. Структурная схема аналогового синтезатора частоты с цифровым управлением

На фазовый детектор подают два колебания: первое со стабильной частотой f_{on} — от опорного кварцевого генератора; второе с частотой $f/N \approx f_{on}$ через управляемый делитель частоты с коэффициентом деления N — от управляемого генератора. Напряжение с выхода фазового детектора через фильтр нижних частот (ФНЧ) воздействует на управляемый генератор и подстраивает его до обеспечения равенства частот f/N и f_{on} . Изменяя с помощью ПЦУ коэффициент деления N , можно получить требуемую сетку частот с шагом, равным f_{on} . Поскольку выходная частота синтезатора связана с частотой опорного кварцевого генератора как $f = Nf_{on}$,

то относительные нестабильности этих частот равны. Если в таком синтезаторе требуется стабилизировать очень низкую частоту, то между опорным кварцевым, генератором и фазовым детектором необходимо дополнительно ввести делитель частоты (ДЧ).

Представленный простейший вариант синтезатора частоты имеет серьезные недостатки. Первый из них связан с конечностью ширины полосы синхронизации управляемого генератора, которая зависит от управляющих элементов генератора и коэффициентов передачи ФД и ФНЧ. Поэтому для получения широкой сетки частот приходится изменять собственную частоту f управляемого генератора. Второй недостаток обусловлен узкими возможностями УДЧ, построенного, как правило, на основе счетчика импульсов. Введением обратной связи в делителе частоты можно изменять его коэффициент деления, который будет принимать любые целочисленные значения, допустимые разрядностью счетчика.

Прогресс в области микропроцессорной техники обусловил появление измерительных генераторов с новыми принципами формирования сигналов. Достоинством цифровых методов синтеза является малое время установления частоты колебаний при перестройке, что важно для функционирования быстродействующих автоматизированных систем, а также отсутствие разрыва фазы при смене частот [33].

Метод дробного преобразования частоты используется в новейших разработках цифровых синтезаторов, реализуемых по следующей базовой схеме (рис.1.7).

В таком синтезаторе коэффициент деления программно-управляемого делителя частоты (ПУДЧ) изменяется во времени, образуя последовательность временных циклов определенной длительности. Полученный цикл также делят на несколько подциклов, в течение каждого из которых коэффициент деления постоянен. Изменение коэффициента

деления производится в момент перехода от одного подцикла к другому таким образом, чтобы средний за время цикла коэффициент деления был равен заданному. В схеме цифрового синтезатора частоты используются цифровой фазовый детектор (ЦФД), ЦАП и микропроцессор (МП).

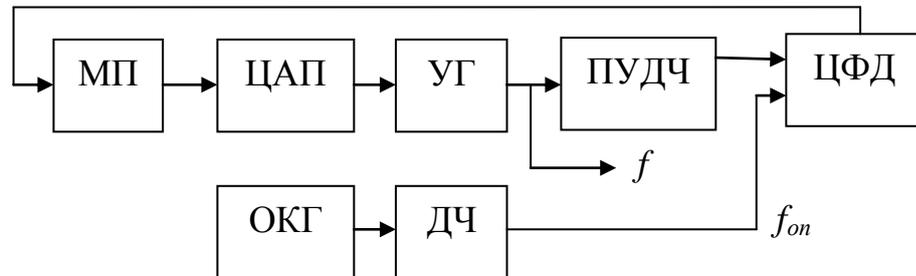


Рис.1.7. Синтезатор частот цифрового измерительного генератора

Подстройку выходной частоты производят в конце каждого цикла. Для этого используют управляемый генератор, напряжение подстройки частоты на который подается с ЦАП. Сигнал управления (ошибки, рассогласования) вырабатывается цифровым фазовым детектором и его уровень соответствует значению средней за время цикла разности фаз колебаний, получаемых от опорного кварцевого генератора и управляемого генератора. Затем сигнал управления с фазового детектора подается на микропроцессор, который через ЦАП по заданному коду требуемой частоты осуществляет программное управление схемой ПУДЧ.

4. Источники эталонных колебаний синтезаторов частот

Выбор типа эталонного генератора определяется требованиями к стабильности формируемой сетки частот. В зависимости от этих требований могут использоваться обычные LC-автогенераторы (до

$10^{-3} \dots 10^{-4}$), кварцевые автогенераторы (до $10^{-6} \dots 10^{-8}$), квантовые стандарты (до $10^{-9} \dots 10^{-18}$) [10].

Рассмотрим особенности применения высокостабильных квантовых стандартов (КС) частоты. КС очень перспективны, однако непосредственному их использованию препятствует высокая рабочая частота и низкая выходная мощность. Так, для КС в виде молекулярного генератора генерируют колебания: на пучке молекул аммиака — с частотой $f_{\text{КС}} = 2,387$ ГГц ($\lambda = 12,5$ см), цезиевый стандарт — $f_{\text{КС}} = 9,193$ ГГц ($\lambda = 3,26$ см) и т.д. Выходная мощность КС обычно не превышает 10^{-9} Вт.

Для использования колебаний КС в диапазоне 1...100 МГц требуются устройства, преобразующие частоту $f_{\text{КС}}$ в более низкую без потери ее стабильности и с увеличением мощности колебаний, т.е. устройства переноса стабильности частоты КС. Такими устройствами могут быть [19, 20]:

- схемы АПЧ высокостабильного кварцевого генератора по сигналу КС;
- схемы двойного преобразования частоты КС (схемы с вычитанием ошибки КГ) с неуправляемым кварцевым генератором. Принципы их построения аналогичны применяемым в рассмотренных ранее схемах прямого и непрямого синтеза сеток опорных частот в СЧ, отличающихся тем, что в их состав введены дополнительно усилители промежуточной частоты (УПЧ) на выходе первого смесителя. Обе схемы содержат в основном одинаковые элементы и для медленных уходов частоты КГ равноценны, т.е. не вносят дополнительной нестабильности в колебания эталона.

При использовании выходного сигнала схемы переноса в качестве эталона желательно преобразовать частоту $f_{\text{КС}}$ так, чтобы получить не-

которое «круглое» значение, например 1,0 МГц. Для этого применяют соответствующие устройства сложения, умножения и др.

Применение устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в автогенераторах ВЧ позволяет получить по некоторым показателям уникальные результаты [10].

Одноканальный ПАВ-автогенератор обычно представляет собой широкополосный усилитель, в цепи обратной связи которого включены последовательно линия задержки на ПАВ и узкополосный фильтр. Уравнение баланса фаз такого АГ имеет вид:

$$\omega l/v + \phi(\omega) = -2\pi n, n = 1, 2, \dots, \quad (1.3)$$

где v — скорость распространения ПАВ;

l — расстояние между двумя встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) на поверхности пьезоэлектрической пластины линии задержки;

$\phi(\omega)$ — ФЧХ фильтра.

Плавная или дискретная электронная перестройка частоты автоколебаний достигается изменением настройки собственной частоты фильтра. Дискретное изменение частоты возможно также получить, переключая в схеме АГ набор узкополосных ПАВ-линий задержек с различными временами запаздывания $\tau = l/v$.

Быстродействующие СЧ прямого синтеза строят на основе многоканальных ПАВ-автогенераторов, обеспечивая набор колебаний на многих частотах, а выбор нужного колебания осуществляется электронной коммутацией фазовращателей в одном или нескольких каналах ПАВ-

автогенератора. Схема двухканального ПАВ-автогенератора показана на рис.1.8 [10].

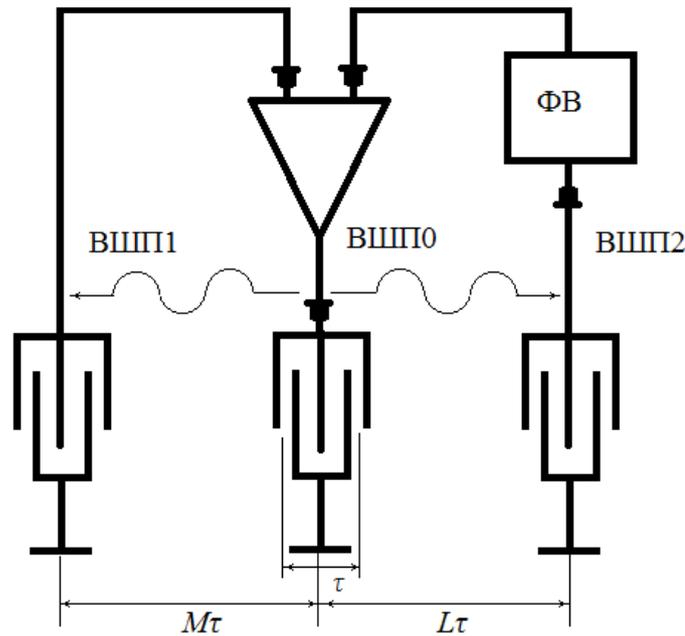


Рис.1.8. Схема двухканального ПАВ-генератора

Запаздывание сигналов между входным и двумя выходными ВШП в каналах выбирают в произвольном целочисленном виде ($M = \tau_1/\tau$, $L = \tau_2/\tau$) по отношению к электрической длине входного ВШП, определяющего его полосу пропускания. При этом в первом автогенераторе в отсутствие второго возможен набор автоколебаний с шагом по частоте $F_1 = 1/M\tau$, аналогично во втором $F_2 = 1/L\tau$. Так, в ПАВ-автогенераторе с $M = 11$ и $L = 1$ ($M\tau = 10^{-5}$ с, $L\tau = \tau = 0,91 \cdot 10^{-6}$ с) обеспечивается генерация колебаний в диапазоне частот 154,8. .155,8 МГц с шагом сетки частот 100 кГц. Время переключения с одной рабочей частоты на другую меньше 10^{-4} с. Дополнительная непрерывная перестройка частоты обеспечивается введением плавного фазовращателя в канале с задержкой $M\tau$.

Синтезаторы частот непрямого синтеза с кольцом частотной автоподстройки строят на основе частотного детектора с большим числом эталонных частот, который содержит прецизионную ПАВ-линию задержки и фазовый детектор, измеряющий фазовый набег $\phi = \omega\tau$ в линии задержки. Недостатком таких синтезаторов частоты является большое время переходного процесса, поскольку для устранения многозначности рабочих частот используют узкополосный фильтр в кольце фазовой автоподстройки [10, 19, 20].

Выводы к главе I

1. Установлено, что синтезаторы частот служат источниками стабильных (по частоте) колебаний в радиоприёмниках, радиопередатчиках, частотомерах, испытательных генераторах сигналов и других устройствах, в которых требуется настройка на разные частоты в широком диапазоне и высокая стабильность выбранной частоты.

2. Приведены основные параметры синтезаторов частоты: диапазон рабочих частот, шаг дискретной сетки частот, относительная нестабильность рабочей частоты, коэффициент подавления паразитных колебаний.

3. Показаны особенности применения синтезаторов частот в различных радиотехнических системах, в том числе в измерительной аппаратуре.

4. Выявлено, что выбор типа эталонного генератора определяется требованиями к стабильности формируемой сетки частот. В зависимости от этих требований могут использоваться обычные LC-автогенераторы, кварцевые автогенераторы, квантовые стандарты.

Глава II. Системы и методы синтеза частот

1. Классификация систем синтеза частот

На рис.2.1 приведена классификация систем синтеза частот [35]. Наиболее широко используемыми являются три группы систем синтеза частот: системы активного (косвенного), системы прямого (пассивного) аналогового синтеза и системы прямого цифрового синтеза.



Рис.2.1. Классификация систем синтеза частот

Системами активного (косвенного) синтеза (*Indirect synthesis*) называют системы синтеза частот, в которых формирование синтезируемого сигнала осуществляется с помощью колец фазовой автоподстройки частоты или компенсационного кольца.

В системах пассивного (прямого) аналогового синтеза (*Direct analog synthesis, DAS*) получение выходных сигналов производится без применения колец АПЧ.

В системах прямого цифрового синтеза ПЦС (*Direct Digital Synthesiser, DDS*) с частотой дискретизации периодически цифровыми методами формируются отсчеты (коды) амплитуды выходного сигнала.

Гибридный синтез, представляет собой комбинацию нескольких методов, описанных выше.

2. Прямой аналоговый синтез

Структурная схема прямого аналогового синтезатора показана на рис.2.2. Этот метод называют прямым потому, что отсутствует процесс коррекции ошибки. Следовательно, качество выходного сигнала напрямую связано с качеством опорного сигнала. Фазовый шум этого синтезатора достаточно низкий вследствие прямого синтеза. Перестройка по частоте также может быть очень быстрой [10, 11, 15, 16].

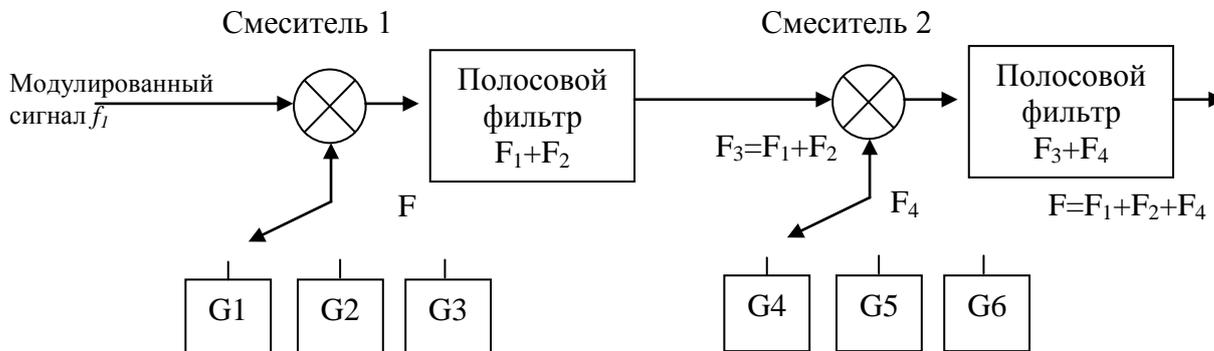


Рис.2.2. Прямой аналоговый синтезатор частоты (DAS)

Одной из важных особенностей такого синтезатора на основе смесителя/фильтра является возможность вернуться на любую частоту и продолжать работать в той же фазе, как и в том случае, если бы перехода вообще не было. Этот эффект называют «фазовой памятью». Для перестройки по частоте используется переключаемый банк опорных генераторов, что подходит, например, для радиостанций с небольшим

количеством каналов. Но для обеспечения широких возможностей по перестройке частоты требуется очень много опорных генераторов, что является весьма дорогостоящим решением. Используя делители частоты (структура/смеситель/фильтр/делитель), можно уменьшить количество необходимых опорных генераторов, хотя и в этом случае возможности по перестройке останутся скромными.

3. Косвенный синтез частоты на основе фазовой автоподстройки

Этот метод синтеза использует принцип сравнения частоты и фазы выходного сигнала, источником которого служит генератор, управляемый напряжением (ГУН) с сигналом опорного генератора [10, 11, 15, 16]. Структурная схема такого синтезатора приведена на рис.2.3. Обнаружение ошибки осуществляется с помощью фазового детектора, который работает на определенной частоте F_C , называемой *частотой сравнения*. Эта частота получается путем деления на N частоты опорного генератора G . Частота выходного сигнала вначале делится на M , а потом сравнивается с частотой F_C . Если частота отклоняется, обнаруженная ошибка вызывает изменение управляющего напряжения ГУН, что приводит к уменьшению отклонения.

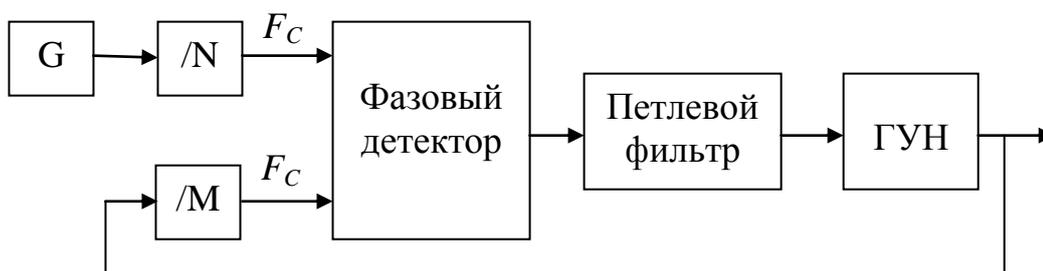


Рис.2.3. Синтезатор частоты на основе фазовой автоподстройки (PLL)

Поскольку делители частоты имеют целочисленные коэффициенты деления, шаг сетки такого синтезатора определяет частота сравнения. Выходная частота определяется по формуле [10]:

$$F_{OUT} = F_c \cdot M = \frac{F_{CLK}}{N} = F_{CLK} \frac{M}{N}, \quad (2.1)$$

где F_{OUT} — выходная частота;

F_c — частота сравнения;

N — коэффициент деления опорной частоты;

M — коэффициент деления выходной частоты.

Другими словами, синтезатор PLL умножает опорную частоту в M/N раз. Коэффициенты N и M могут задаваться микроконтроллером, хотя на практике число N при перестройке меняют редко, так как это влечет за собой изменение частоты сравнения (соответственно и шага сетки) и требует изменения параметров петлевого фильтра.

Фазовый детектор является источником дополнительных фазовых шумов. Попытки получить малый шаг перестройки частоты вынуждают работать на более низкой частоте сравнения, что требует понижения частоты среза петлевого фильтра. А это еще более увеличивает фазовые шумы. Быстрое переключение частоты в этой структуре также обеспечить очень сложно.

Для получения малого шага перестройки, но частоте иногда объединяют в одном синтезаторе несколько петель PLL. Однако многопетлевой синтезатор является весьма дорогим и громоздким устройством, что сдерживает его широкое применение.

4.Прямой цифровой синтез

Прямой цифровой синтез (DDS) — относительно новый метод синтеза частоты, появившийся в начале 70-х гг. XX в. [10, 11, 15, 16]. Появление дешевых микросхем полных DDS и удобных средств разработки делает их сегодня привлекательными для различных сфер применения.

DDS уникальны своей цифровой определенностью: генерируемый ими сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению. Единственным элементом, который обладает свойственными аналоговым схемам нестабильностями, является цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Именно по этой причине в последнее время DDS вытесняют обычные аналоговые синтезаторы частот.

Основные преимущества синтезаторов DDS сводятся к следующему:

- цифровое управление частотой и фазой выходного сигнала;
- очень высокое разрешение по частоте и фазе;
- крайне быстрый переход на другую частоту или фазу, перестройка по частоте без разрыва фазы, без выбросов и других аномалий, связанных с временем установления;
- архитектура, основанная на DDS, вследствие малого шага перестройки по частоте исключает необходимость применения точной подстройки опорной частоты, а также обеспечивает возможность параметрической температурной компенсации;
- цифровой интерфейс позволяет реализовать микроконтроллерное управление;
- для квадратурных синтезаторов имеются DDS с I - и Q -выходами, которые работают согласованно.

Частотное разрешение DDS составляет сотые или тысячные доли герца на выходной частоте порядка нескольких десятков мегагерц. Такое разрешение пока недостижимо в других схемах синтезаторов.

Синтезаторы на основе PLL используют обратную связь и фильтрацию сигнала ошибки, что замедляет процесс перестройки частоты. Для DDS скорость перестройки ограничена практически только быстродействием цифрового управляющего интерфейса. Более того, все перестройки по частоте происходят у DDS без разрыва фазы выходного сигнала. Так как выходной сигнал синтезируется цифровыми методами, то очень просто получить модуляцию различных типов.

Параметры синтезатора частоты имеют большое значение в аппаратуре связи, являясь основой системы настройки, так как именно синтезатор определяет потребительские свойства конкретного устройства. В техническом отношении DDS удовлетворяет большинству критериев идеального синтезатора частоты, например таким, как простота, высокая степень интегрированности, малые габариты. Кроме того, многие параметры DDS программно управляемы, что в значительной мере способствует созданию новых возможностей у этих синтезаторов. Все это делает DDS весьма перспективными приборами современной радиоэлектроники.

Правда, имеются некоторые ограничения, связанные с процессом дискретизации и цифроаналогового преобразования, которые имеют место в DDS, а именно:

- максимальная выходная частота не может быть выше половины тактовой, а практически она даже значительно меньше, что ограничивает области применения DDS на низких и умеренных частотах радиодиапазона;

- отдельные побочные компоненты на выходе DDS могут быть значительно большими, чем у других методов синтеза, и спектральная чистота выходного сигнала DDS сильно зависит от качества ЦАП;

- потребляемая DDS мощность практически прямо пропорциональна тактовой частоте и составляет сотни милливольт, и при больших тактовых частотах DDS могут оказаться малоприспособленными для устройств с батарейным питанием.

Задача, которую должен решать DDS, состоит в получении на выходе сигнала синусоидальной формы с заданной частотой. Так как в DDS формирование выходного сигнала происходит в цифровой форме, то совершенно очевидна необходимость аналого-цифрового преобразования. Это означает, что в структуре DDS должен быть аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В любом случае на выходе DDS нужно использовать ФНЧ (anti-aliasing filter) для подавления побочных сигналов спектра выходного сигнала, повторяющихся с периодичностью частоты F_{CLK} . Для получения синусоидального сигнала на вход ЦАП необходимо подать последовательность отсчетов функции $y = \sin x$, следующих с частотой дискретизации F_{CLK} . Закон изменения функции $y = \sin x$ во времени сложен и цифровыми методами просто его реализовать нельзя. Можно, конечно, вычислять значения $\sin x$ с помощью арифметико-логического устройства, используя полиномиальные представления, но этот подход значительно снизит быстродействие всего устройства DDS. Поэтому наиболее подходящим методом формирования отсчетов функции $y = \sin x$ является табличный метод. Перекодировочная таблица (Look Up Table) чаще всего размещается в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Код, который подается на адресные входы ПЗУ, является аргументом функции $y = \sin x$, а выходной код ПЗУ равен значению этой функции для данного аргумента. Аргумент функции $y = \sin x$, или фаза, в отличие от значения функции, меняется во времени линейно.

Сформировать линейно меняющуюся во времени последовательность гораздо проще — это можно сделать с помощью простейшего двоичного счетчика. Поэтому простейший DDS работает следующим образом: двоичный счетчик формирует адрес для ПЗУ, по которому

записана таблица одного периода функции $\sin x$, отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП, который формирует на выходе синусоидальный сигнал, подвергающийся фильтрации в ФНЧ и поступающий на выход. Для перестройки выходной частоты используется делитель частоты с переменным коэффициентом деления, на вход которого поступает тактовый сигнал с опорного генератора.

Схема простейшего прямого цифрового синтезатора показана на рис.2.4 [10, 11, 15, 16]. Такая структура DDS имеет очевидные недостатки. Основным недостатком структуры является неудовлетворительная способность к перестройке по частоте. Действительно, поскольку тактовая частота испытывает деление на целое число, шаг перестройки будет переменным, причем, чем меньше коэффициент деления, тем больше относительная величина шага. Этот шаг будет недопустимо грубым при малых коэффициентах деления. При перестройке выходной частоты меняется и частота дискретизации. Это затрудняет фильтрацию выходного сигнала, а также ведет к неоптимальному использованию скоростных характеристик ЦАП, так как полностью они используются только на максимальной выходной частоте.

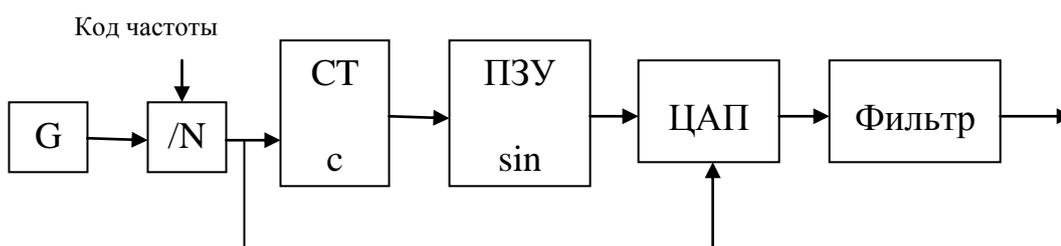


Рис.2.4. Простейший прямой цифровой синтезатор частоты

Отмеченные недостатки можно устранить в результате введения одного изменения: достаточно адресный счетчик ПЗУ заменить другим цифровым устройством, которое называется накапливающим сумматором.

Накапливающий сумматор представляет собой регистр, который в каждом такте работы устройства перезагружается величиной, равной старому содержимому, складываемому с некоторой постоянной добавкой (рис.2.5). При этом содержимое регистра, как и показания счетчика, линейно увеличивается во времени, только теперь приращение не всегда является единичным, а зависит от величины постоянной добавки. Когда накапливающий сумматор используется для формирования кода фазы, его еще называют аккумулятором фазы.

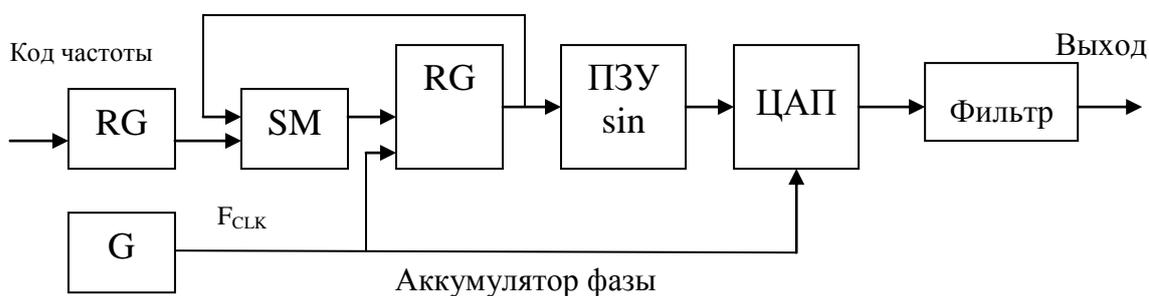


Рис.2.5. Прямой цифровой синтезатор на основе накапливаемого сумматора

Выходной код аккумулятора фазы представляет собой код мгновенной фазы выходного сигнала. Постоянная добавка, которая используется при работе аккумулятора фазы, представляет собой приращение фазы за один такт работы устройства. Чем быстрее изменяется фаза во времени, тем больше частота генерируемого сигнала. Поэтому значение приращения фазы фактически является кодом выходной частоты. Действительно, если приращение фазы равно единице, то поведение накапливающего сумматора ничем не отличается от поведения обычного счетчика. Но если приращение фазы будет равно, например, двум, то код фазы будет изменяться вдвое быстрее. При этом на ЦАП будут поступать коды с той же частотой, но они будут представлять собой не соседние отсчеты функции $\sin x$, а отсчеты, взятые через один. Частота генерируемо-

го сигнала при этом будет вдвое большей, а частота дискретизации останется прежней.

Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю 2^N . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции $\sin x$ с периодом 2π . Иными словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Эта частота определяется формулой [10, 11]:

$$F_{OUT} = \frac{MF_{CLK}}{2^N}, \quad (2.2)$$

где F_{out} — выходная частота;

M — код частоты;

F_{CLK} — тактовая частота;

N — разрядность аккумулятора фазы.

Таким образом, тактовая частота испытывает деление на некоторое число, которое определяется кодом частоты и разрядностью аккумулятора фазы. При этом шаг перестройки частоты не зависит от ее значения и равен [10, 11]:

$$F_{OUT} = \frac{F_{CLK}}{2^N}. \quad (2.3)$$

Из этого соотношения следует еще одно свойство синтезатора частоты на основе накапливающего сумматора, заключающееся в том, что если увеличить разрядность N , то уменьшится шаг перестройки частоты. При этом нет особых ограничений. Например, если разрядность накапливающего сумматора составляет 32 бита, а тактовая частота равна 50 МГц, то частотное разрешение составит порядка 0,01 Гц. Увеличение

разрядности аккумулятора фазы не требует обязательного увеличения разрядности адреса ПЗУ. Для адресации можно использовать лишь необходимое количество старших разрядов кода фазы.

Для уменьшения объема ПЗУ можно использовать свойства симметрии функции $y = \sin x$. В большинстве DDS в ПЗУ содержится только $\frac{1}{4}$ периода. Правда, при этом немного усложняется логика формирования адреса.

Таким образом, в DDS аккумулятор фазы формирует последовательность кодов мгновенной фазы сигнала, которая изменяется линейно, что демонстрируется на рис.2.6. Скорость изменения фазы задается кодом частоты. Далее с помощью ПЗУ линейно изменяющаяся фаза преобразуется в изменяющиеся по синусоидальному закону отсчеты выходного сигнала. Эти отсчеты поступают на ЦАП, на выходе которого формируется синусоидальный сигнал, состоящий из ступенек. Эти ступеньки фильтруются с помощью аналогового фильтра низких частот, на выходе которого получается синусоидальный сигнал.

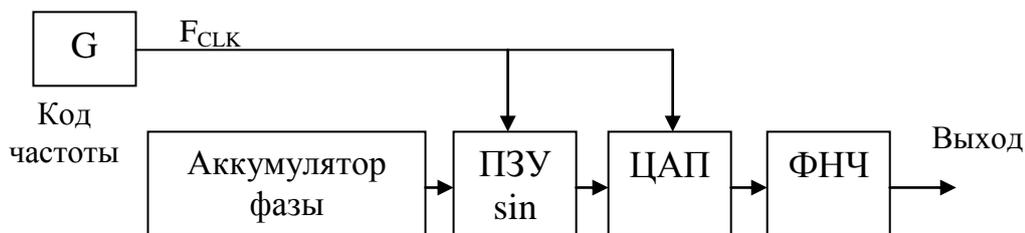


Рис.2.6. Пояснение работы синтезатора DDS

Выходной синусоидальный сигнал восстанавливается из отдельных отсчетов. Целое число отсчетов на период укладывается лишь в частном случае. В большинстве случаев это не так, и на каждом новом периоде сигнала отсчеты лежат в новых местах. Конечно, картина повторяется, но период повторения может быть самым разным, так как он зависит от кода частоты, разрядности аккумулятора фазы и от разрядности используемого

кода фазы. В любом случае с равным успехом из последовательности отсчетов будет восстановлен сигнал синусоидальной формы.

Рассмотренная структура синтезатора частоты применяется во всех современных DDS. Объединение в одном чипе быстродействующего ЦАП и собственно DDS, представляющее собой так называемый полный DDS (complete DDS), позволило получить заманчивую альтернативу обычным синтезаторам на основе PLL. Синтезаторы DDS, не имеющие встроенного ЦАП, иногда называют Numerically Controlled Oscillator (NCO), несмотря на то что DDS не содержит никаких генераторов.

Кроме интегрированного ЦАП, DDS могут иметь некоторые дополнительные цифровые блоки, выполняющие над сигналом различные дополнительные операции. Эти блоки обеспечивают большую функциональность DDS и улучшенные пользовательские характеристики. К таким блокам относятся [10, 11, 15, 16]:

- встроенный умножитель опорной частоты;
- дополнительный цифровой сумматор для суммирования фазы;
- инверсный sinc-фильтр для компенсации неравномерности АЧХ;
- дополнительный цифровой умножитель для амплитудной модуляции;
- дополнительный ЦАП для получения квадратурных сигналов I и Q;
- дополнительный компаратор с низким джиттером для получения цифрового тактового сигнала;
- дополнительные регистры частоты и фазы, которые могут быть заранее запрограммированы для осуществления высокоскоростной модуляции.

5. Гибридный синтез

Обычно для создания генератора высокочастотного сигнала применяется два подхода: генераторы с петлей фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (PLL) и синтезаторы DDS. Выбор между этими двумя вариантами не всегда прост, часто разработчик вынужден идти на некоторые компромиссы или усложнять схему, чтобы компенсировать недостатки того или иного подхода. Однако сейчас, так как PLL и DDS стали доступны в виде весьма недорогих микросхем, стало вполне практичным совмещение этих двух подходов, что позволяет избежать недостатков, присущих схемам PLL, и DDS по отдельности. Такое совмещение позволяет получить более высокие характеристики, чем обеспечивает каждый из этих подходов. Рассмотрим более подробно преимущества гибридных генераторов DDS/PLL [30, 33]:

- высочайшее разрешение по частоте;
- быстрая перестройка по частоте;
- малое время установления;
- широкая полоса;
- низкое энергопотребление;
- низкий уровень шума и гармоник в спектре сигнала.

Рассмотрим гибридную схему совмещения PLL и DDS – схему, в которой синтезатор DDS обеспечивает опорный сигнал с высоким разрешением по частоте для PLL. На рис.2.7 показан синтезатор с фазовой автоподстройкой частоты (PLL), где в качестве опорного источника применен синтезатор DDS с фильтром на выходе.

За счет использования гибридного решения высокая разрешающая способность по частоте обеспечивает высокую разрешающую способность системы в целом, чего невозможно достичь при применении одной только PLL. В этом примере петля PLL состоит из синтезатора ADF4106, внешнего фильтра и генератора, управляемого напряжением (ГУН). Такой

подход позволяет разработчику выбрать ГУН, а также конфигурацию и параметры фильтра в соответствии с конкретными требованиями разрабатываемой схемы. Опорный сигнал для PLL генерируется синтезатором DDS AD9834, к которому подключен фильтр и делитель, предназначенные для уменьшения уровня шумов и гармоник. Синтезатор DDS, обладая 28-разрядным разрешением по частоте, позволяет очень точно устанавливать значение опорной частоты для петли PLL и, соответственно, частоты выходного сигнала.

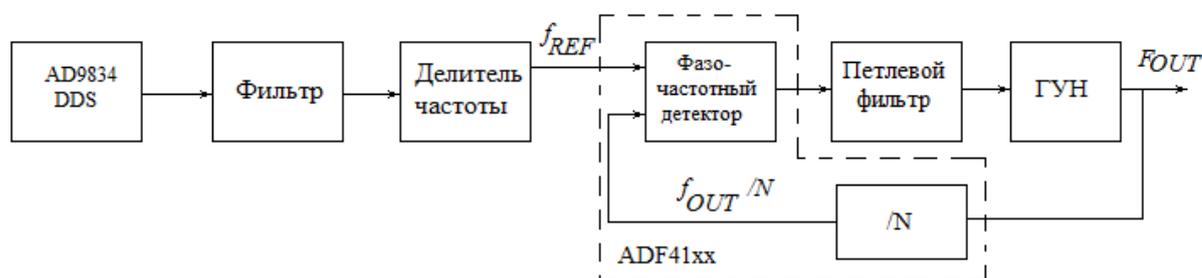


Рис.2.7. Гибридная схема совмещения PLL и DDS

Это гораздо удобнее, чем применять с этой целью синтезатор PLL с дробным делителем частоты в петле обратной связи. Например, если ГУН, работает в частотном диапазоне 100-500 МГц, а частота выходного сигнала DDS порядка 5 МГц, то коэффициент умножения частоты N будет составлять от 20 до 100. Изменение N на единицу соответствует изменению выходной частоты ГУН на 5 МГц (100 МГц, 105 МГц, 110 МГц и т.д.). Однако на выходе синтезатора AD9834 можно менять частоту с очень маленьким шагом путем записи кода в регистр частоты. DDS AD9834 обеспечивает шаг изменения частоты всего 0,2 Гц при частоте кварцевого опорного генератора 50 МГц. В результате, можно обеспечить очень высокое разрешение по частоте всей гибридной системы в целом. Идеальный источник опорного сигнала должен иметь низкий уровень фазового шума и гармоник. Выходной сигнал DDS

действительно обладает низким уровнем фазовых шумов, но в спектре выходного сигнала присутствуют максимумы на некоторых частотах. Эти побочные максимумы возникают на определенных частотах в результате округления значения кода, находящегося в регистре – аккумуляторе фазы. Они могут быть значительно подавлены с помощью дополнительной фильтрации и при тщательном выборе параметров дискретизации. Если скорость перестройки частоты не играет большой роли, то ширина полосы пропускания петли PLL может быть очень узкой. Это уменьшит уровень побочных максимумов в спектре сигнала. Тогда величина фазового шума и гармоник будет зависеть практически только от ГУН. Если применить хороший ГУН, обеспечивающий чистый сигнал, то такая схема будет самым простым решением, позволяющим построить синтезатор частот с широкой полосой, высоким разрешением по частоте, низким уровнем побочных максимумов в спектре, малыми размерами и энергопотреблением. Хотя время перестройки частоты будет довольно большим. Чтобы воспользоваться таким преимуществом DDS, как высокая скорость переключения частоты, необходимо обеспечить более широкую полосу в петле PLL, и здесь характеристики фильтра будут в значительной степени определять уровень шумов и побочных максимумов. Необходимо обратить внимание, что после PLL амплитуда побочных максимумов увеличивается, но их смещение по частоте относительно основного сигнала не меняется. Таким образом, фильтр на рис.2.7 необходим для ограничения генерируемых синтезатором DDS побочных максимумов и шумов за счет узкой полосы пропускания. После умножения частоты на N уровни шумов и побочных максимумов увеличатся на $20\lg N$, но только в пределах полосы пропускания фильтра. В конечном счете, выбор ширины полосы пропускания фильтра и центральной частоты определяется компромиссом между требуемой скоростью перестройки частоты, уровнем шумов и помех и разрешением по частоте.

6. Техника частотного синтеза

По технике осуществления частотного синтеза можно выделить [10]:

- некогерентный синтез, когда несколько исходных частот используются для получения многих частот на выходе частотного синтезатора;
- когерентный синтез, когда одна исходная частота используется для получения многих выходных частот частотного синтезатора.

При этом различают:

- когерентный прямой синтез (называется также арифметическим методом), когда частотный смеситель, частотный делитель и частотный перемножитель используются для получения многих частот на выходе частотного синтезатора;
- когерентный прямой цифровой синтез, когда цифровой аккумулятор, представляющий собой память только для чтения, и ЦАП используются для генерирования дискретного во времени сигнала, но форме приближающегося к синусоидальной;
- когерентный непрямой синтез, когда управляемые напряжением генераторы, смесители, цепи обратной связи, частотные перемножители и частотные делители генерируют на выходе сигналы, что имеют определенные соотношения с величинами исходных частот.

Выводы к главе II

1. Приведена классификация систем синтеза частот и показано, что наиболее широко используемыми являются три группы систем синтеза частот: системы активного (косвенного), системы прямого (пассивного) аналогового синтеза и системы прямого цифрового синтеза.

2. Рассмотрена схема прямого аналогового синтеза частот и установлено, что одной из важных особенностей такого синтезатора на

основе смесителя/фильтра является возможность вернуться на любую частоту и продолжать работать в той же фазе.

3. Для косвенного синтеза частоты на основе фазовой автоподстройки показано, что этот метод синтеза использует принцип сравнения частоты и фазы выходного сигнала, источником которого служит генератор, управляемый напряжением (ГУН) с сигналом опорного генератора.

4. Прямой цифровой синтез уникален своей цифровой определенностью: генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению.

5. Установлено, что гибридные синтезаторы частот обладают следующими преимуществами: высочайшее разрешение по частоте, быстрая перестройка по частоте, малое время установления, широкая полоса, низкое энергопотребление, низкий уровень шума и гармоник в спектре сигнала.

Глава III. Разработка методики исследования синтезатора частот

1. Описание лабораторной установки по исследованию синтезатора частот

В Ташкентском университете информационных технологий ведутся большие работы по модернизации учебного процесса, производится переоснащение имеющихся учебных лабораторий новым оборудованием, создаются новые учебные лаборатории [36]. На кафедре «Технологии мобильной связи» учебная лаборатория «Радиопередающие и приемные устройства», которая расположена в аудитории 125 блока А, была оснащена новыми лабораторными установками «Устройства приема и обработки сигналов», «Устройства генерации и формирования сигналов». В состав лабораторной установки «Устройства генерации и формирования сигналов» входит лабораторный стенд «Исследование синтезатора частот». Мне было предложено разработать методику по проведению исследований на базе данного стенда (рис.3.1).



Рис.3.1. Проведение исследований синтезатора частот

Назначение установки

Лабораторная установка «Устройства генерации и формирования сигналов» предназначена для практического изучения и исследования особенностей работы блоков устройств генерирования и формирования сигналов (радиопередатчиков).

Установка позволяет проводить лабораторные работы по темам: «Автогенераторы», «Исследование автогенератора с частотной модуляцией», «Исследование однополосной модуляции», «Исследование синтезатора частоты» [23].

Описание установки

Внешний вид установки представлен на рис.3.2.



Рис.3.2. Внешний вид установки

Лицевая сторона установки имеет три панели, две из которых являются стационарными, а средняя панель вместе с установленными на ней элементами и платами (именуемая в дальнейшем сменным блоком) является съемной. Содержание выполняемой студентами лабораторной работы определяется видом установленного сменного блока. Замена сменного блока осуществляется лаборантами (старшими лаборантами, инженерами) кафедры.

Установка имеет в своем составе следующие устройства, необходимые при проведении лабораторных работ:

- генератор НЧ;
- генератор ВЧ;
- генератор импульсов;
- частотомер;
- анализатор спектра;
- источник постоянного напряжения;
- источник напряжения смещения;
- встроенный тестер.

Генератор НЧ перестраивается по частоте в четырех поддиапазонах:

- 1) 20 Гц – 200 Гц;
- 2) 200 Гц – 2 кГц;
- 3) 2 кГц – 20 кГц;
- 4) 20 кГц – 150 кГц.

Генератор имеет встроенный индикатор частоты. Выходное напряжение генератора регулируется в пределах от 0 вольт до 5 вольт на гнезде 0 дБ. Индикация выходного напряжения осуществляется стрелочным вольтметром. Выход генератора НЧ соединен с модулирующим входом генератора ВЧ.

Генератор ВЧ перестраивается по частоте в трех поддиапазонах:

- 1) 460 кГц – 540 кГц;
- 2) 860 кГц – 1160 кГц;
- 3) 1370 кГц – 1700 кГц.

Выходное напряжение генератора равно 1 В при установке стрелки индикатора уровня ВЧ на деление 0 дБ. Амплитудная модуляция осуществляется напряжением НЧ, подаваемым от генератора НЧ, расположенного на этой же панели установки. Глубина модуляции регулируется ручкой «амплитуда» генератора НЧ и определяется визуально с помощью осциллографа.

Генератор импульсов вырабатывает прямоугольное и пилообразное напряжения, симметричные относительно «земли». Частота повторения импульсов регулируется в пределах 400 Гц – 2000 Гц. Амплитуда импульсов регулируется в пределах 0 – 4 В.

Частотомер предназначен для измерения частоты напряжений ВЧ. Имеет три режима работы. В режиме «ВНЕШ.» индицирует частоту напряжения, подаваемого на внешний вход частотомера. В режиме «ГВЧ» - частоту напряжения на выходе генератора ВЧ. В режиме «АНАЛИЗАТОР» - приведенную частоту настройки фильтра анализатора спектра.

Анализатор спектра позволяет выявить спектральные составляющие исследуемого напряжения, измерить их частоту и относительную амплитуду. Диапазон перестройки анализатора спектра 420 кГц – 490 кГц.

Диапазон входных напряжений 0,1 – 1,0 В.

Выходное напряжение анализатора спектра подается на стрелочный индикатор.

Источник постоянного напряжения вырабатывает напряжение, регулируемое в пределах от 0 до 14 В.

Величина выходного напряжения контролируется тестером.

Источник напряжения смещения вырабатывает напряжение, регулируемое в пределах от 0 до 10 В.

Напряжение подается в сменный блок через разъем сменного блока.

Величина выходного напряжения контролируется стрелочным вольтметром. Этот же вольтметр показывает выходное напряжение анализатора спектра при нажатой кнопке «АНАЛИЗАТОР» частотомера.

Встроенный тестер позволяет измерять токи и напряжения в различных точках сменного блока. Питание тестера производится от выпрямителя установки.

Для проведения лабораторных занятий из внешних измерительных приборов требуется двухканальный осциллограф с полосой 20 МГц.

2.Методика проведения лабораторных исследований синтезатора частот

Цель работы

Изучить принципы построения синтезаторов частот в возбудителях передатчиков, экспериментально исследовать синтезатор частоты с импульсно-фазовым компаратором [23].

Содержание работы

1. Определение диапазона перестройки генератора, управляемого напряжением (*ГУН*). Снятие характеристики управления. Определение нестабильности частоты *ГУН* при разомкнутой петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.
2. Определение параметров опорного генератора и расчет шага сетки частот для $M = 50, 100, 200$.
3. Расчет допустимых значений N для заданного шага сетки частот и измеренного диапазона перестройки *ГУН*.
4. Расчет значений M и N для заданного диапазона частоты.
5. Экспериментальная проверка правильности расчета M и N .

6. Определение неустойчивости частоты $ГУН$ при замкнутой петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.

Описание лабораторного макета

Исследуемый макет (рис.3.3) представляет собой синтезатор частоты с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты. Структурная схема синтезатора частоты (рис.3.4) включает в себя:

- кварцевый опорный (эталонный) генератор ($ОГ$) частотой 500 кГц;
- делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления M ($ДФКД$);
- генератор, управляемый напряжением, $ГУН$;
- делитель частоты с переменным коэффициентом деления N ($ДПКД$);
- импульсный фазовый компаратор ($ИФК$), являющийся основным звеном кольца фазовой автоподстройки частоты;
- фильтр низкой частоты ($ФНЧ$) с устройством запоминания уровня управляющего напряжения.

К дополнительным устройствам относится регулируемый источник управляющего напряжения. Напряжение питания $ОГ$ и $ГУН$ изменяется в небольших пределах с помощью переменного резистора « $U_{пит}$ ».

Коэффициент деления M может принимать значения 50, 100, 200 и определяет шаг сетки частот. Изменение коэффициента деления осуществляется кнопочным переключателем «УСТАНОВКА M ». Таким образом, в лабораторном макете могут быть получены три сетки частот с шагом 10 кГц, 5 кГц и 2,5 кГц соответственно.

Коэффициент деления N высвечивается трехразрядным индикатором и может принимать значения от 20 до 999. Изменение коэффициента деления N осуществляется подачей кодированной команды от устройства управления поразрядно кнопочным переключателем «УСТАНОВКА N ».



Рис.3.3. Лицевая панель сменного блока «Синтезатор частот»

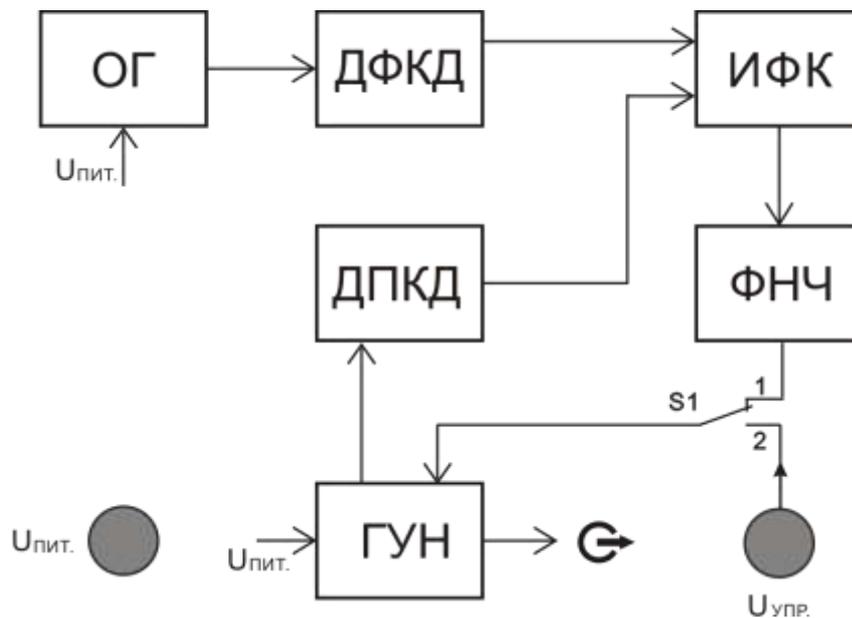


Рис.3.4. Структурная схема синтезатора частоты

В стационарном режиме работы синтезатора [23]:

$$F_{OG} / M = f_{ГУН} / N, \quad (3.1)$$

а фазовый сдвиг между колебаниями на входе ИФК постоянен.

Последний термин по отношению к импульсным последовательностям следует трактовать как разность фаз между их первыми гармониками.

Для смены рабочей частоты на соседнюю в сетке частот достаточно изменить значение N на единицу.

Выполнение лабораторной работы предполагает использование помимо лабораторной установки двухлучевого (двухканального) осциллографа.

Порядок выполнения работы

1. Определение диапазона перестройки генератора, управляемого напряжением (ГУН). Снятие характеристики управления.

Соединить $KT7$ исследуемого макета с входом частотомера, расположенного на правой лицевой панели установки. Включить питание частотомера, переключатель режимов работы частотомера установить в положение «Внеш.».

Переключатель режимов работы тестера установить в положение, соответствующее измерению постоянного напряжения до 20 В. Напряжение с гнезд $KT6$ подать на вход тестера. Регулятором « $U_{\text{ПИТ}}$ » установить максимально возможное напряжение питания $ГУН$ и $ОГ$. Записать величину $U_{\text{ПИТ МАКС}}$.

Вход тестера подключить к $KT5$. Переключатель $S1$ установить в положение 2.

Регулятор « $U_{\text{УПР}}$ » повернуть против часовой стрелки до упора. Записать показания тестера ($U_{\text{УПР}}$) и минимальное значение частоты $ГУН$, измеренное частотомером.

Изменяя величину $U_{УПР}$ от минимального до максимального, фиксировать значение частоты $ГУН$, соответствующее каждому значению $U_{УПР}$. Полученные данные занести в таблицу. Построить характеристику управления $ГУН$. Определить максимальную частоту $ГУН$. Рассчитать диапазон перестройки $ГУН$.

2. Определение неустойчивости частоты ОГ и ГУН при изменении питающего напряжения.

Изменяя величину $U_{УПР}$ установить частоту $ГУН$, равной 500 кГц. Записать значение $U_{УПР}^*$, соответствующее этой частоте.

Измерить и записать частоту опорного генератора, подключив вход частотомера к $КТ1$.

Вход тестера подключить к $КТ6$. Регулятором « $U_{ПИТ}$ » установить минимально возможное напряжение питания $ГУН$ и $ОГ$. Записать величину $U_{ПИТ\ мин}$.

Измерить и записать частоту опорного генератора.

Вход частотомера подключить к $КТ7$. Вход тестера подключить к $КТ5$. Регулятором « $U_{УПР}$ » установить $U_{УПР} = U_{УПР}^*$. Измерить и записать частоту $ГУН$.

Определить абсолютную и относительную неустойчивость частоты $ОГ$ и $ГУН$ при изменении питающего напряжения. Сравнить полученные величины, сделать необходимые выводы.

3. Определение шага сетки частот для $M = 50, 100, 200$.

Рассчитать частоту импульсов на выходе $ДФКД$ для $M = 50, 100, 200$. Подключить вход частотомера к $КТ2$ и, изменяя величину M с помощью переключателя «УСТАНОВКА M », сравнить полученные результаты с показаниями частотомера.

Полученные значения частоты определяют шаг сетки частот.

4. Расчет допустимых значений N для заданного шага сетки частот и измеренного диапазона перестройки ГУН.

Для $M=50, 100, 200$ и измеренного диапазона перестройки ГУН рассчитать допустимые значения N .

Для проверки правильности расчета установить значение M переключателем «УСТАНОВКА M ».

Подключить вход частотомера к $KT7$. Переключатель $S1$ установить в положение 1 . Нажатием кнопок «УСТАНОВКА N » последовательно изменять значение коэффициента деления N , высвечиваемое на индикаторе, от минимально возможного до максимального. При этом фиксировать показания частотомера. Убедиться в правильности произведенного расчета допустимых значений N .

5. Расчет значений M и N для заданного диапазона частот и шага сетки частот. Экспериментальная проверка правильности определения M и N .

По заданному преподавателем диапазону работы синтезатора и шагу сетки частот рассчитать значения M и N [23]:

$$\begin{aligned}M &= f_{OG} / F_{Ш}, \\N_{МИН} &= f_{МИН} / F_{Ш}, \\N_{МАКС} &= f_{МАКС} / F_{Ш},\end{aligned}\tag{3.2}$$

где $F_{Ш}$ – шаг сетки частот,

$f_{МИН}$ – минимальная частота заданного диапазона частот,

$f_{МАКС}$ – максимальная частота заданного диапазона частот.

Установить рассчитанные значения M и N . Сравнить показания частотомера с заданными преподавателем значениями частоты. Изменяя значения N , убедиться в правильности установки шага сетки частот.

Определить по характеристике управления ГУН напряжения $U_{УПР}$, соответствующие $f_{МИН}$ и $f_{МАКС}$. Отметить эти точки на характеристике управления ГУН.

Вход тестера подключить к $КТ5$. Измерить $U_{УПР}$ в $КТ5$ для $f_{МИН}$ и $f_{МАКС}$. Сравнить полученные результаты с расчетными. Сделать необходимые выводы.

6. Определение неустойчивости частоты ГУН при замкнутой петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.

Подбором M и N установить частоту ГУН равной 500 кГц. Записать точное значение частоты. Регулятором « $U_{ПИТ}$ » поочередно установить максимально и минимально возможное напряжение питания ГУН и ОГ.

Определить абсолютную и относительную неустойчивость частоты ГУН при изменении питающего напряжения. Сравнить результаты вычислений с результатами, полученными в п.2, сделать необходимые выводы.

7. Получение осциллограмм процессов в петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.

Соединить вход « $Y1$ » осциллографа с $КТ2$, а вход « $Y2$ » – с $КТ3$. Синхронизация осциллографа – по входу « $Y1$ ». Переключая M и N , наблюдать изменение длительности и взаимного расположения импульсов в $КТ2$ и $КТ3$. Вход « $Y2$ » подключить к $КТ4$. Переключая M и N в пределах допустимых значений N , наблюдать процессы, происходящие в $КТ2$ и $КТ4$. Проследить за показаниями частотомера и тестера, подключенного к $КТ5$.

3. Экспериментальное исследование синтезатора частот

1. Определение диапазона перестройки генератора, управляемого напряжением (ГУН). Снятие характеристики управления.

Соединяем *КТ7* исследуемого макета с входом частотомера, расположенного на правой лицевой панели установки. Включаем питание частотомера, переключатель режимов работы частотомера устанавливаем в положение «Внеш.».

Переключатель режимов работы тестера устанавливаем в положение, соответствующее измерению постоянного напряжения до 20 В. Напряжение с гнезд *КТ6* подаём на вход тестера. Регулятором « $U_{\text{пит}}$ » устанавливаем максимально возможное напряжение питания *ГУН* и *ОГ* (рис.3.5).



Рис.3.5 Соединение блоков лабораторного стенда для определения

$$U_{\text{пит макс}}$$

Записываем величину $U_{\text{пит макс}}=2,50 \text{ В}$.

Вход тестера подключаем к *КТ5*. Переключатель *S1* устанавливаем в положение 2 (рис.3.6).



Рис.3.6. Соединение блоков лабораторного стенда для определения минимального значения частоты $f_{ГУН}$

Регулятор « $U_{УПР}$ » поворачиваем против часовой стрелки до упора. Записываем показания тестера $U_{УПР}=0 В$ и минимальное значение частоты $f_{ГУН}$, измеренное частотомером: $f_{ГУН\text{ мин}}=128,1 кГц$.

Изменяя величину $U_{УПР}$ от минимального до максимального, фиксируем значение частоты $f_{ГУН}$, соответствующее каждому значению $U_{УПР}$. Полученные данные заносим в таблицу 3.1. Строим характеристику управления $f_{ГУН}$ (рис.3.7). Определяем максимальную частоту $f_{ГУН}$. Рассчитываем диапазон перестройки ГУН.

Таблица 3.1

Зависимость $f_{ГУН}(U_{УПР})$

$U_{УПР}, В$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$f_{ГУН}, кГц$	127,96	144,9	474,8	817,2	1049,3	1136,0	1203,6	1297,5	1354,0

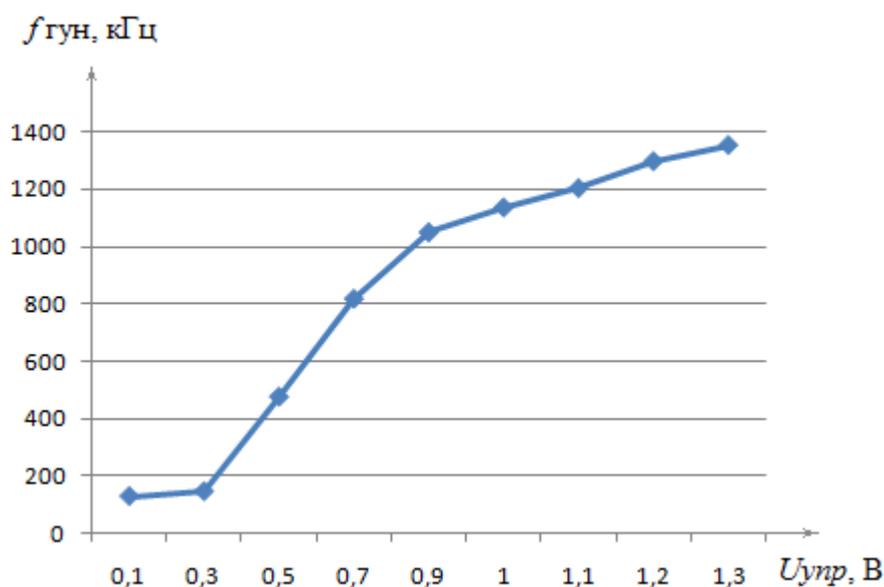


Рис.3.7. График зависимости $f_{ГУН}(U_{УПР})$

Максимальная частота ГУН – $f_{МАКС.ГУН}=1354$ кГц.

Диапазон перестройки ГУН: 127,96 кГц – 1354 кГц.

2. Определение нестабильности частоты ОГ и ГУН при изменении питающего напряжения.

Изменяя величину $U_{УПР}$ устанавливаем частоту ГУН, равной 500 кГц. Запишем значение $U_{УПР}^*=0,5$ В, соответствующее этой частоте (рис.3.8).

Измеряем и записываем частоту опорного генератора, подключив вход частотомера к КТ1: $f_{он}=500,06$ кГц.

Вход тестера подключаем к КТ6. Регулятором « $U_{ПИТ}$ » устанавливаем минимально возможное напряжение питания ГУН и ОГ. Запишем величину $U_{ПИТ\ мин}=1,92$ В.

Измерим и запишем частоту опорного генератора $f_{он1}=499,90$ кГц.

Вход частотомера подключаем к КТ7. Вход тестера подключаем к КТ5. Регулятором « $U_{УПР}$ » устанавливаем $U_{УПР} = U_{УПР}^*=0,5$ В. Измеряем и записываем частоту ГУН $f_{ГУН}=498,77$ кГц.



Рис.3.8. Соединение блоков лабораторного стенда для определения f_{on}

Определим абсолютную и относительную нестабильность частоты ОГ и ГУН при изменении питающего напряжения.

Абсолютная и относительная нестабильность частоты ОГ:

$$\Delta f_{OG} = |f_{on} - f_{on1}| = |500,06 - 499,90| = 0,16 \text{ (кГц)};$$

$$\delta f_{OG} = (\Delta f_{OG} / f_{on}) * 100 = (0,16 / 500,06) * 100 = 0,03 \text{ (%)}.$$

Абсолютная и относительная нестабильность частоты ГУН:

$$\Delta f_{ГУН} = |f_{on} - f_{ГУН}| = |500,06 - 498,77| = 1,29 \text{ (кГц)};$$

$$\delta f_{ГУН} = (\Delta f_{ГУН} / f_{on}) * 100 = (1,29 / 500,06) * 100 = 0,26 \text{ (%)}.$$

Вывод: ОГ обладает лучшими характеристиками и меньшей нестабильностью частоты по сравнению с ГУН, т.к. в ОГ используется кварцевый резонатор.

3. Определение шага сетки частот для $M = 50, 100, 200$.

Рассчитаем частоту импульсов на выходе ДФКД для $M = 50, 100, 200$. Подключим вход частотомера к КТ2 и, изменяя величину M с

помощью переключателя «УСТАНОВКА М», сравним полученные результаты с показаниями частотомера (рис.3.9).



Рис.3.9. Определение шага сетки частот

Получились следующие значения:

- при $M=50$ шаг сетки частот 10 кГц;
- при $M=100$ шаг сетки частот 5 кГц;
- при $M=200$ шаг сетки частот 2,5 кГц;

4. Расчет допустимых значений N для заданного шага сетки частот и измеренного диапазона перестройки ГУН.

Для $M=50, 100, 200$ и измеренного диапазона перестройки ГУН рассчитаем допустимые значения N .

Для проверки правильности расчета установим значение M переключателем «УСТАНОВКА М».

Подключим вход частотомера к $KT7$. Переключатель $S1$ установим в положение 1. Нажатием кнопок «УСТАНОВКА N» последовательно изменяем значение коэффициента деления N , высвечиваемое на индикаторе, от минимально возможного до максимального. При этом фиксируем показания частотомера (рис.3.10).

В таблице 3.2 приведены значения коэффициента деления и значения частоты, соответствующие этому коэффициенту.



Рис.3.10. Определение правильности проведенных расчетов коэффициента М

Значение частоты получается умножением значения «УСТАНОВКА N» на шаг сетки частот 2,5 кГц. Исключение составляет начальный край диапазона формирования частоты 128,2 кГц.

Таблица 3.2

Результаты измерения значения частоты при определенном коэффициенте деления (M=200, шаг сетки 2,5 кГц)

Значение «УСТАНОВКА N»	050	060	070	080	090	100	110
Значение частоты, кГц	128,2	150	175	200	225	250	275
Значение	120	150	200	300	400	500	600

«УСТАНОВКА N»							
Значение частоты, кГц	300	375	500	750	1000	1250	1500

5. Расчет значений M и N для заданного диапазона частот и шага сетки частот. Экспериментальная проверка правильности определения M и N .

По заданному диапазону работы синтезатора и шагу сетки частот рассчитаем значения M и N :

$$\begin{aligned}
 M &= f_{OG} / F_{Ш}, \\
 N_{МИН} &= f_{МИН} / F_{Ш}, \\
 N_{МАКС} &= f_{МАКС} / F_{Ш},
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

где $F_{Ш}$ – шаг сетки частот,

$f_{МИН}$ – минимальная частота заданного диапазона частот,

$f_{МАКС}$ – максимальная частота заданного диапазона частот.

Установим рассчитанные значения M и N . Сравним показания частотомера с заданными значениями частоты. Изменяя значения N , убедимся в правильности установки шага сетки частот.

$$f_{OG} = 500 \text{ кГц}, F_{Ш} = 2,5 \text{ кГц},$$

$$f_{МИН} = 128,2 \text{ кГц}, f_{МАКС} = 1500 \text{ кГц}$$

$$M = 500 / 2,5 = 200,$$

$$N_{МИН} = 128,2 / 2,5 = 51,$$

$$N_{МАКС} = 1500 / 2,5 = 600.$$

Определим по характеристике управления ГУН напряжения $U_{УПР}$, соответствующие $f_{МИН}$ и $f_{МАКС}$ (рис.3.11). Отметим эти точки на характеристике управления ГУН (рис.3.11).

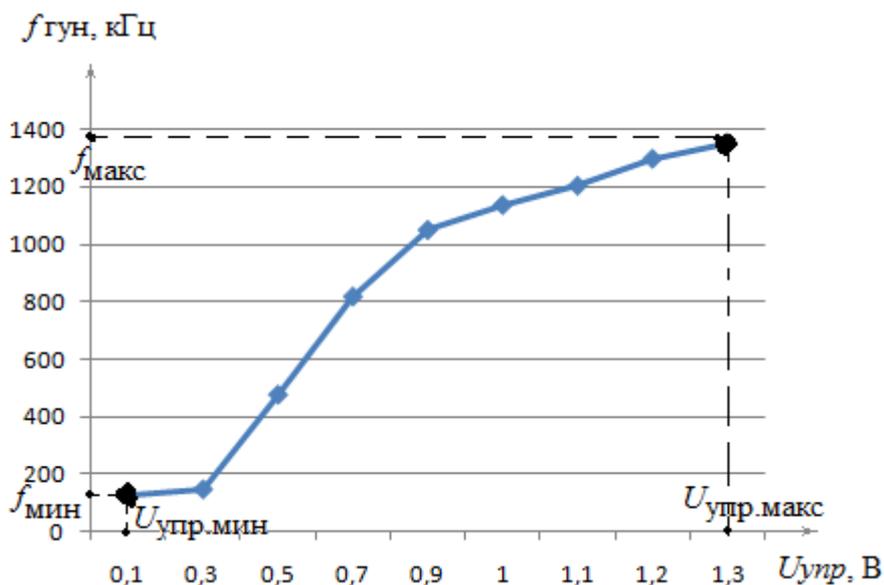


Рис.3.11. Определение по характеристике управления ГУН напряжения $U_{УПР}$, соответствующие $f_{МИН}$ и $f_{МАКС}$

$$U_{УПР.МИН}=0,1 \text{ В}, f_{МИН}=125 \text{ кГц};$$

$$U_{УПР.МАКС}=1,3 \text{ В}, f_{МАКС}=1375 \text{ кГц}.$$

6. Определение неустойчивости частоты ГУН при замкнутой петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.

Подбором M и N установим частоту ГУН равной 500 кГц. Запишем точное значение частоты:

$$M=200, N=200, f_{ГУН}=500,05 \text{ кГц}.$$

Регулятором « $U_{ПИТ}$ » поочередно устанавливаем максимально и минимально возможное напряжение питания ГУН и ОГ.

$$U_{\text{пит.мин}} = 2,03 \text{ В}, f$$

7. Получение осциллограмм процессов в петле импульсной фазовой автоподстройки частоты.

Соединим вход «Y1» осциллографа с $KT2$ (выход с делителя M опорного генератора), а вход «Y2» – с $KT3$ (выход с делителя N ГУН). Синхронизацию осциллографа выполним по входу «Y1». Переключая M и N , наблюдаем изменение длительности и взаимного расположения импульсов в $KT2$ и $KT3$ (рис.3.12-рис.3.14).

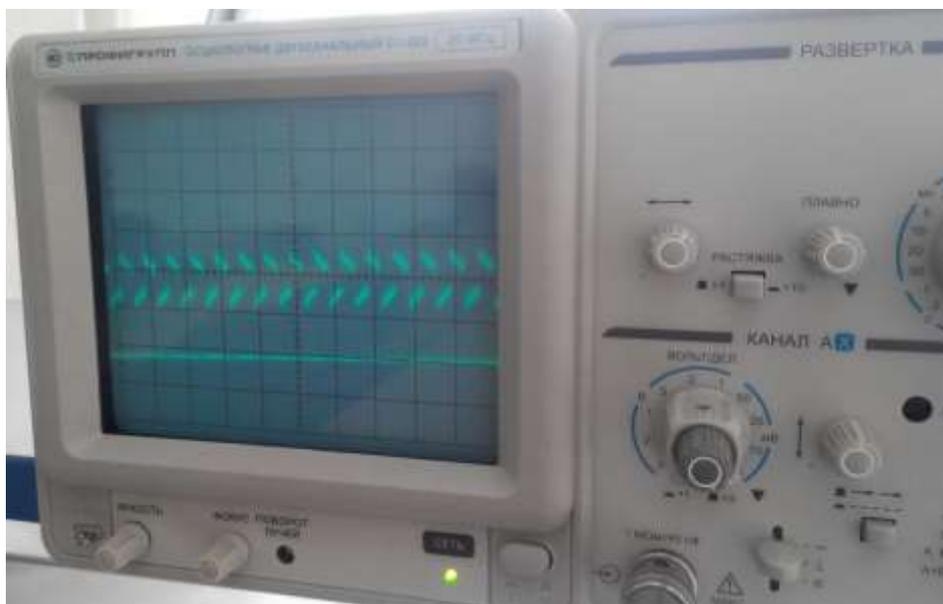


Рис.3.12. Осциллограмма при $M=50$ (верхняя), $N=50$ (нижняя)

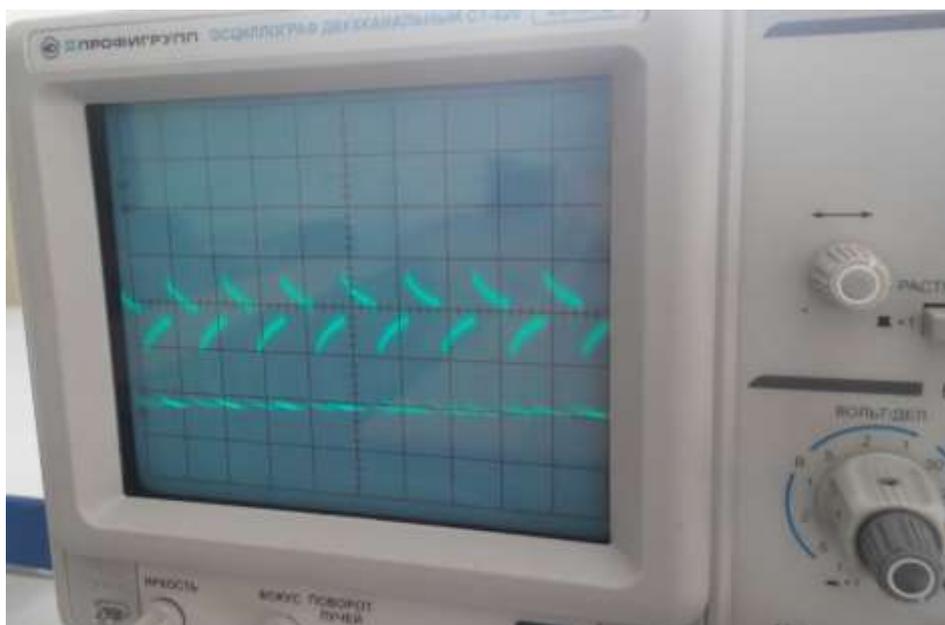


Рис.3.13. Осциллограмма при $M=100$ (верхняя), $N=100$ (нижняя)

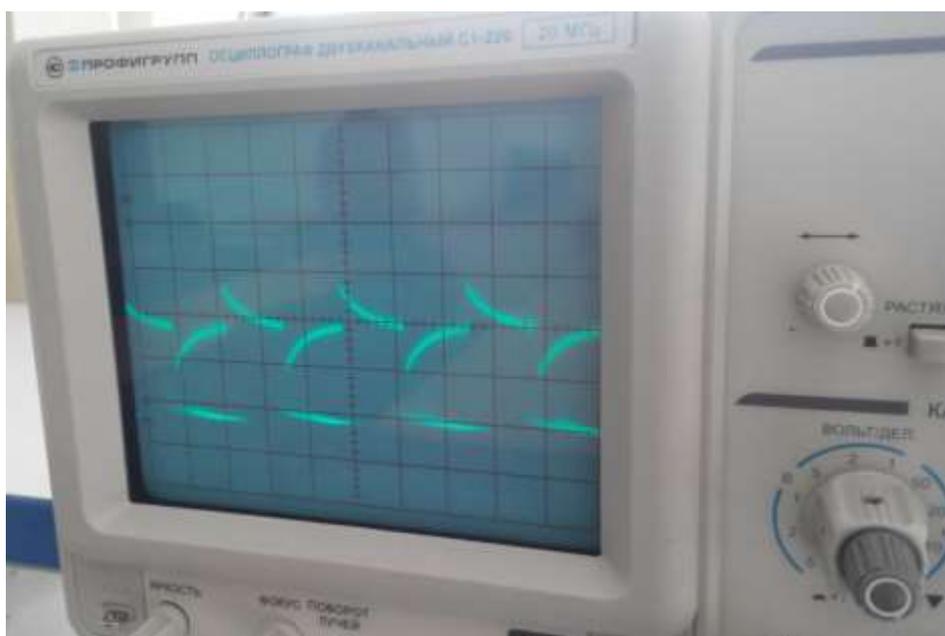


Рис.3.14. Осциллограмма при $M=200$ (верхняя), $N=200$ (нижняя)

Вход «Y2» подключаем к $KT4$ (выход импульсного фазового компаратора ($ИФК$)). Переключая M и N в пределах допустимых значений N , наблюдаем процессы, происходящие в $KT2$ и $KT4$ (рис.3.15-рис.3.17).

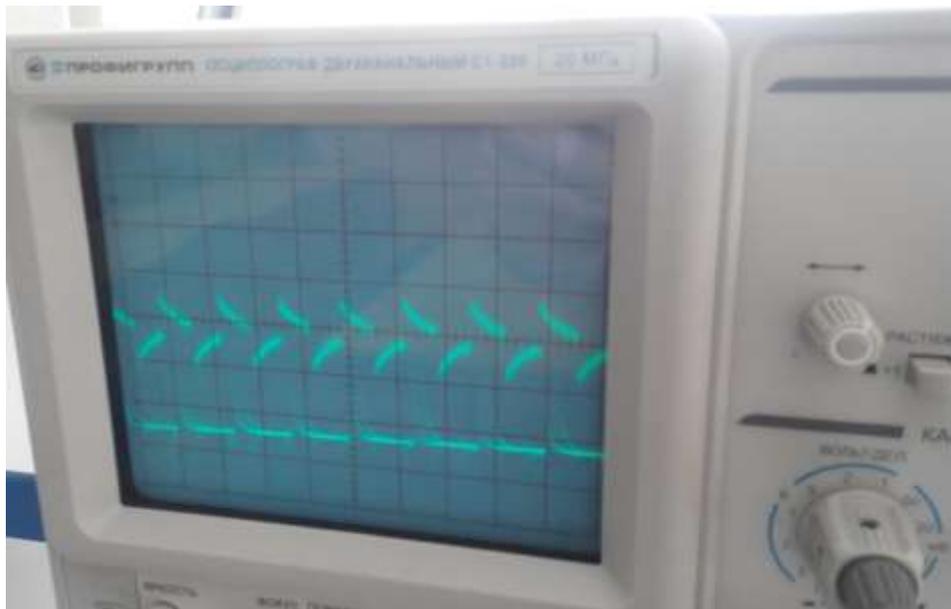


Рис.3.15. Осциллограммы сигналов на выходе делителя ОГ (верхняя) и выходе ИФК (нижняя) при $M=50$, $N=50$

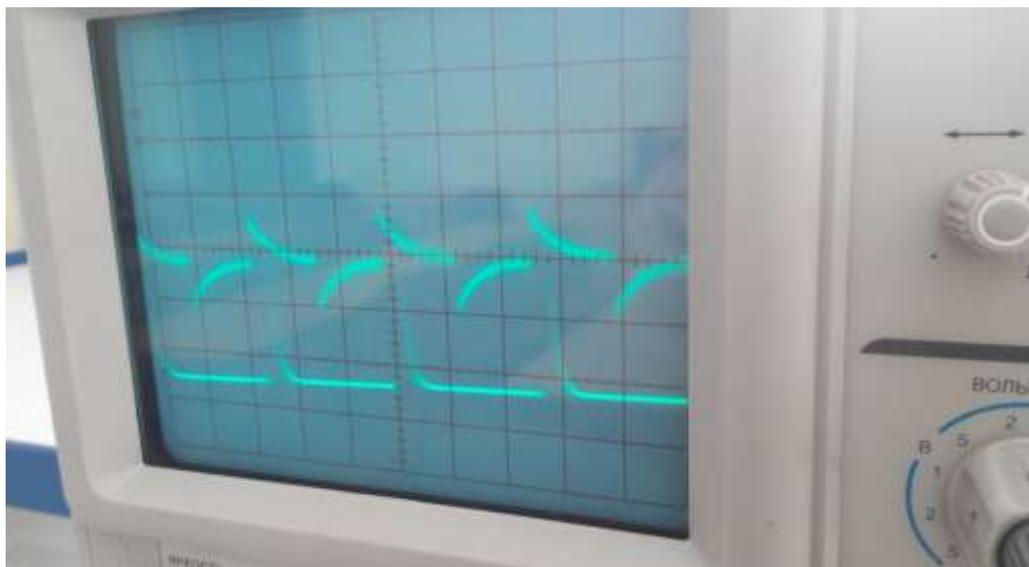


Рис.3.16. Осциллограммы сигналов на выходе делителя ОГ (верхняя) и выходе ИФК (нижняя) при $M=100$, $N=100$

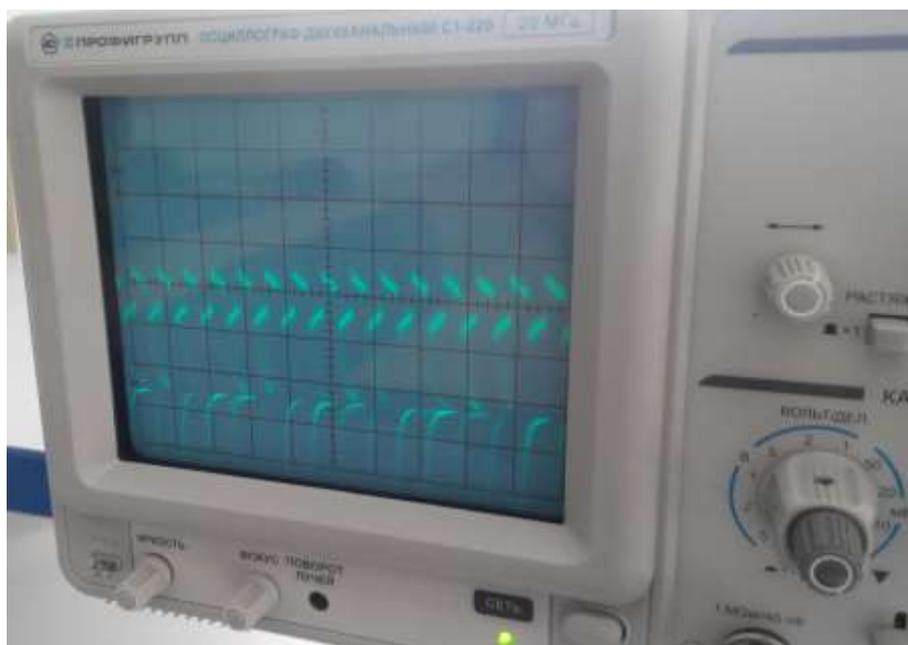


Рис.3.17. Осциллограммы сигналов на выходе делителя ОГ (верхняя) и выходе ИФК (нижняя) при $M=200$, $N=200$

Таким образом, проведенные исследования, результаты измерений и расчетов синтезатора частот показали наглядность и возможность применения данной методики исследований в учебном процессе.

Выводы к главе III

1. Приведено описание лабораторной установки по исследованию синтезатора частот.
2. Разработана методика исследования синтезатора частот.
3. Выполнены полномасштабные исследования синтезатора частот, которые показали наглядность и возможность применения данной методики проведения лабораторной работы в учебном процессе. Выполнение исследований синтезатора частот по предложенной методике позволит более полно и широко на практике изучить схемотехнику построения, принцип работы как синтезатора частот в целом, так и каждой его составляющей в отдельности.

Заключение

На основе проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Установлено, что синтезаторы частот служат источниками стабильных (по частоте) колебаний в радиоприёмниках, радиопередатчиках, частотомерах, испытательных генераторах сигналов и других устройствах, в которых требуется настройка на разные частоты в широком диапазоне и высокая стабильность выбранной частоты.

2. Приведены основные параметры синтезаторов частоты: диапазон рабочих частот, шаг дискретной сетки частот, относительная нестабильность рабочей частоты, коэффициент подавления паразитных колебаний.

3. Приведена классификация систем синтеза частот и показано, что наиболее широко используемыми являются три группы систем синтеза частот: системы активного (косвенного), системы прямого (пассивного) аналогового синтеза и системы прямого цифрового синтеза.

4. Рассмотрена схема прямого аналогового синтеза частот и установлено, что одной из важных особенностей такого синтезатора на основе смесителя/фильтра является возможность вернуться на любую частоту и продолжать работать в той же фазе.

5. Для косвенного синтеза частоты на основе фазовой автоподстройки показано, что этот метод синтеза использует принцип сравнения частоты и фазы выходного сигнала, источником которого служит генератор, управляемый напряжением (ГУН) с сигналом опорного генератора.

6. Прямой цифровой синтез уникален своей цифровой определенностью: генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза

сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению.

7. Установлено, что гибридные синтезаторы частот обладают следующими преимуществами: высочайшее разрешение по частоте, быстрая перестройка по частоте, малое время установления, широкая полоса, низкое энергопотребление, низкий уровень шума и гармоник в спектре сигнала.

8. Приведено описание лабораторной установки по исследованию синтезатора частот. Разработана методика исследования синтезатора частот. Выполнены полномасштабные исследования синтезатора частот, которые показали наглядность и возможность применения данной методики проведения лабораторной работы в учебном процессе. Выполнение исследований синтезатора частот по предложенной методике позволит более полно и широко на практике изучить схемотехнику построения, принцип работы как синтезатора частот в целом, так и каждой его составляющей в отдельности.

Список литературы

І. Законы Республики Узбекистан

1. Закон Республики Узбекистан «О связи». Ведомости Верховного Совета Республики Узбекистан, 1992г., №3, ст. 159; Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1998г., №3, ст. 38; 2000г., №5-6, ст. 153; 2003г., №5, ст. 67.

2. Закон Республики Узбекистан «О телекоммуникациях». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999г., №9, ст. 219; Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2004г., №37, ст. 408; 2005г., №37-38, ст. 279; 2006г., №14, ст. 113; 2007г., №35-36, ст. 353; 2011г., №52, ст. 557.

3. Закон Республики Узбекистан «О радиочастотном спектре». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999 г., №1, ст. 16; 2003 г., №5, ст. 67.

4. Закон Республики Узбекистан «Об информатизации». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 2004 г., №1-2, ст.10.

5. Закон Республики Узбекистан «О внесении изменений и дополнений в закон Республики Узбекистан «Об электронной коммерции» (Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2015 г., № 20, ст. 250). 22 мая 2015 г., № ЗРУ-385.

6. Закон Республики Узбекистан «Об электронном документообороте» (Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2004 г., № 20, ст. 230). 29 апреля 2004 г., № 611-П.

7. Закон Республики Узбекистан «Об электронной цифровой подписи» (Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 2004 г., № 1-2, ст. 12). 11 декабря 2003 г., № 562-П.

II. Указы и постановления Президента Республики Узбекистан, Постановления Кабинета Министров

8. Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий». 21 марта 2012 г., №ПП-1730. Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2012 г., №13, ст. 139.

III. Произведения Президента Республики Узбекистан

И.А.Каримова

9. Каримов И. А. Обеспечить поступательное и устойчивое развитие страны – важнейшая наша задача. – Т. 17. – Т. «Узбекистан» - 2009. – 184с.

IV. Основная литература

10. Ворона В. А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета: Учебное пособие для вузов. - М.: Горячая линия-Телеком. -2007- 384 с.: ил.

11. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов /В.В. Шахгильдян, В.Б.Козырев, А.А.Ляховкин и др.; Под ред. В.В.Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.: ил.

12. Радиопередающие устройства: Учебник / Вильям Ильич Каганов. – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2002. – 288 с.

13. Abduazizov A.A., Yusupov Y.T. Radiotexnik tizimlar: o`quv qo`llanma, 1-qism/Toshkent axborot texnologiyalari universiteti. Toshkent, 2015.

14. А.Абдуазизов, Д.Давронбеков. Радиоузатиш ва қабул қилиш қурилмалари. Ўқув қўлланма. –Т.: “Фан ва технология”, 2011, 272 б.

15. Шахтарин Б.И., Прохладин Г.Н., Быков А.А. и др. Синтезаторы частот: Учебное пособие. - М.: Горячая линия-Телеком. -2007- 384 с.

16.Ильин А.Г. Автогенераторы и синтезаторы. Учебное пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 68 с.

17.Радиоприёмные устройства. Учебник для вузов/ Н.Н.Фомин, Н.Н.Буга, О.В.Головин и др.; Под ред.Н.Н. Фомина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 520 с.: ил.

18.Головин О.В. Радиоприемные устройства. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с.: ил.

19. Abduazizov A.A., Raximov T.G`. Radiotexnik tizimlar: o`quv qo`llanma, 2-qism/Toshkent axborot texnologiyalari universiteti. Toshkent, 2015.

20. Abduazizov A.A. Elektr aloqa nazariyasi: darslik/ Toshkent axborot texnologiyalari universiteti. Toshkent, 2013.

V. Дополнительная литература

21.Русско-узбекский толковый словарь терминов по системам мобильной связи. Центр научно-технических и маркетинговых исследований. – Ташкент.- 2008.

22.Русско-узбекский толковый словарь терминов по системам беспроводного доступа. Государственное унитарное предприятие Центр научно-технических и маркетинговых исследований – «UNICON.UZ». – Ташкент. - 2010.

23. Д.Давронбеков, Э.Ни, М.Назаров, М.Азимов, А.Шамсиев, Н.Залов. Радиопередающие устройства. Сборник лабораторных работ и методические указания по их выполнению. – ТУИТ, Ташкент. – 2014. – 48 с.

VI. Периодические издания, статистические сборники и отчеты

24. Доклад Президента Республики Узбекистан Ислама Каримова на заседании Кабинета Министров, посвященном итогам социально-экономического развития страны в 2014 году и важнейшим приоритетным

направлениям экономической программы на 2015 год. Газета «Народное слово», 17 января 2015 г., №11 (6164).

25. Материалы Коллегии ГКСИТТ РУз, посвященной итогам работы отрасли за 2014 г., ходу внедрения и развития информационно-коммуникационных технологий, определению перспектив и направлений дальнейшей деятельности.

(http://ccitt.uz/ru/press_center/news_committee/1713/?sphrase_id=48852)

26. Жабин А.С., Кулешов В.Н., Голубков А.В. Собственные шумы ИЧФД и их влияние на работу синтезатора частот // Вестник МЭИ.- 2011.- № 1.- С. 60-68.

27. Вишняков Д.Ю., Калямин А.Н. Структурный синтез СЧ-ИФАПЧ на основе оптимального фильтра Винера // Докл. 13-й международ. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва.2011.Т.1, С. 19-22.

28.Вишняков Д.Ю. Структурный синтез многокольцевых прецизионных синтезаторов частот косвенного типа // Докл. научно-тех. сем. "Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания", Одесса, 2011. С. 49-51.

29.Залов Н. Синтезаторы частоты радиоприемных устройств// Республиканская научно-техническая конференция “Перспективы эффективного развития информационных технологий и телекоммуникационных систем”. - Сборник трудов. Том III.. –Ташкент, 13-14 марта, 2014 г., с.254-256.

30.Залов Н. Особенности гибридного синтеза частот // Республиканская научно-техническая конференция «Проблемы информационных и телекоммуникационных технологий».- Сборник докладов. Том III. –Ташкент, 12-13 марта, 2015 г., с.184-187.

VII. Интернет сайты

31.<http://scitt.uz> (сайт Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан)

32.<http://radio-technica.ru> (сайт онлайн журнала радиотехники, электротехники и схемотехники)

33.<http://www.life-prog.ru> (сайт компании «Life-prog»)

34.<http://afu.com.ua> (сайт компании АФУ)

35.<http://www.rfdesign.ru> (РадиоДизайн и РЧ технологии)

36.<http://www.tuit.uz> (сайт Ташкентского университета информационных технологий)