

Прецизионный синтезатор частоты

В.А. Жмудь¹, Л.В. Димитров², А.Ю. Ивойлов¹

¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.
630090, просп. К. Маркса, д. 20.

²Технический университет Софии, София, Болгария. бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756

Аннотация: Техника создания генераторов, частота которых управляется цифровым кодом, получила широкое развитие в последнее время. Существуют и широко доступны специальные микросхемы синтезаторов частоты. Среди них имеются и синтезаторы сигналов гармонической формы с чрезвычайно малым коэффициентом гармоник. Но для ряда задач и они недостаточно точны. В частности, в лазерных системах синтезатор частоты оказывается чрезвычайно востребованным для управления системами фазовой автоподстройки частоты одного лазера к другому. В этих системах к синтезаторам предъявляется очень важное и специфическое требование отсутствия скачков фазы при изменении управляющего кода. Этот код управляет значением синтезируемой частоты. Такому требованию удовлетворяет очень малое количество видов синтезаторов вследствие принципа их действия. Данная статья посвящена решению указанной задачи путем пооктавного уточнения частоты. Предложен и опробован метод на основе комбинации прямого и косвенного метода синтеза. Синтезатор содержит простейший блок формирования трех опорных частот, несколько одинаковых блоков, называемых октавами по аналогии с декадами в других синтезаторах, а также выходной формирователь. Выбор численных соотношений промежуточных частот обеспечивает применение дешевой и надежной элементной базы высокой степени интеграции, что делает синтезатор малогабаритным, легко настраиваемым и легко тиражируемым. Достижение большой простоты также основывается на том, что не ставится задача обеспечения зависимости между управляющим кодом и формируемой частотой, поскольку достаточно обеспечить линейность и однозначность этой зависимости. Большинство известных синтезаторов основываются на декадном принципе, который базируется на привычной для человека десятичной системе исчисления, которая не удобна для технической реализации. Поскольку синтезатором управляет компьютер, значение коэффициента пересчета несущественно. Шаг перестройки может быть сколь угодно «неудобный» для человеческого восприятия, важно, чтобы он был мал и стабилен. При этом обеспечиваются важнейшие требования к точности и отсутствию скачков в переходном процессе. Приведена функциональная схема и дан выбор элементной базы для реализации синтезатора.

Ключевые слова: синтезатор частоты, прецизионный генератор, частотная автоподстройка, фазовая автоподстройка, лазерные системы, управление частотой, управление фазой

ВВЕДЕНИЕ

Современные сверхточные спектрометры и стандарты частоты на их основе позволяют получать высокостабильное лазерное излучение в различных диапазонах длин волн [1–13]. Высокая стабильность абсолютного значения частоты генерации этих лазеров обеспечивается за счет привязки генерируемой лазером частоты к физическому эталону. Как правило, таким эталоном служат частота некоторой линии молекулярного или атомарного поглощения.

Расширение области использования этих систем для целей абсолютных частотных измерений, изучение спектров новых и уточнение спектров известных физических сред, уточнение фундаментальных физических констант и других исследований требует дальнейшего повышения точности этих систем, обеспечения оперативности и гибкости управления, многофункциональности и универсальности [1–13]. В особенности это стало актуальным в связи с развитием космических систем, таких как ГЛОНАСС и GPS.

Решение этих задач может быть осуществлено за счет применения новейшей элементной базы, перехода на цифровую технику и модульного принципа построения систем, а также переноса существенной части алгоритма управления на программную часть,

реализуемую управляющими компьютерами или специализированными контроллерами.

Задачи управления лазерным излучением от компьютера требуют создания узлов сбора данных о параметрах функционирования физических объектов, узлов управления этими параметрами, модулей для связи с компьютером, типового и специального программного обеспечения. Кроме того, следует выбрать метод объединения этих узлов в единую систему.

В НГТУ совместно с Институтом лазерной физики СО РАН разработана концепция создания универсальных автоматизированных подсистем автоподстройки частоты (АПЧ) лазеров и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для их взаимной привязки. Эта концепция реализована и используется во множестве физических установок, используемых в фундаментальной метрологии. При этом управляющие подсистемы АПЧ и ФАПЧ реализуются в магистрально-модульных исполнениях. Такое исполнение позволяет собрать из стандартизованных узлов систему сбора и обработки данных и управления экспериментом, которая содержит и объединяет отдельные узлы и подсистемы в единую систему и обеспечивает связь с компьютером или несколькими компьютерами. Это, в свою очередь позволяет

связывать несколько сложных систем между собой, создавая макросистему, осуществлять управление экспериментом по сетям Интернет, обеспечивать сохранение данных, их вторичную обработку и печать результата. Подсистемы реализованы в стандарте «Евромеханика» или ее отечественного аналога И-41 [12]. Для реализации этой концепции потребовалось создание соответствующего инструментария в виде парка специализированных цифроаналоговых модулей. Эти модули сочетают использование аналоговых и цифровых узлов для достижения требуемых характеристик. Так, например, подсистема частотной автоподстройки может быть построена из модулей генератора тестовых сигналов, фотоприемника, полосового фильтра, синхронного детектора, регулятора, усилителя мощности и собственно лазера. В системе фазовой автоподстройки частоты имеется два лазера, вместо синхронного детектора используется фазовый детектор, есть и другие отличия. Также соответствующий набор модулей позволяет собрать систему стабилизации температуры с цифровой индикацией достигнутого результата, систему стабилизации мощности излучения лазера и некоторые другие системы.

В сложных физических установках для фундаментальных исследований перечисленные системы играют роль составляющих элементов, т.е. подсистем. Каждая такая подсистема выполняет частную задачу. Например, система АПЧ обеспечивает предварительную стабилизацию одного из лазеров, система ФАПЧ обеспечивает фазовую привязку второго лазера к этому первому лазеру, и т. д. К подсистемам ФАПЧ при этом предъявляются высочайшие требования по точности, но помимо этого такие же требования предъявляются к образцовым генераторам, которые задают

разность частоты, на которую привязывается ведомый лазер (второй) к ведущему (первому).

Чтобы продемонстрировать это, рассмотрим типовую схему использования подсистемы ФАПЧ, показанную на *Рис. 1*. В этой подсистеме первый лазер ведущий, второй – ведомый. Лучи от обоих лазеров совместно поступают на фотоприемник, на выходе которого формируется только сигнал разностной частоты. Опорный (образцовый) генератор формирует другую частоту, которая является предписанием для получаемой разностной частоты. Т.е. цель работы системы ФАПЧ состоит в том, чтобы разностная частота между частотами излучения двух лазеров была равна образцовой частоте, формируемой опорным генератором, с точностью до фазы. Это означает, что постоянная фазовая ошибка допустима, хотя и не желательна, но частотная ошибка недопустима, т.е. фазовая ошибка не может возрастать или убывать во времени непрерывно, а можешь лишь оставаться в некоторых допустимо малых пределах. С этой целью разностная частота и образцовая частота сравниваются на фазовом детекторе, полученный сигнал, пропорциональности разности фаз этих сигналов, он поступает через регулятор на второй лазер и изменяет его частоту так, чтобы обеспечить требуемое условие.

Если частота опорного генератора изменяется, то изменяется и частота второго лазера вследствие работы системы ФАПЧ. Это позволяет сколь угодно малыми шагами перестраивать частоту второго лазера и удерживать ее в нужном значении сколь угодно долго, при условии, что частота излучения первого лазера достаточно стабильна, что обеспечивается работы других подсистем стабилизации.

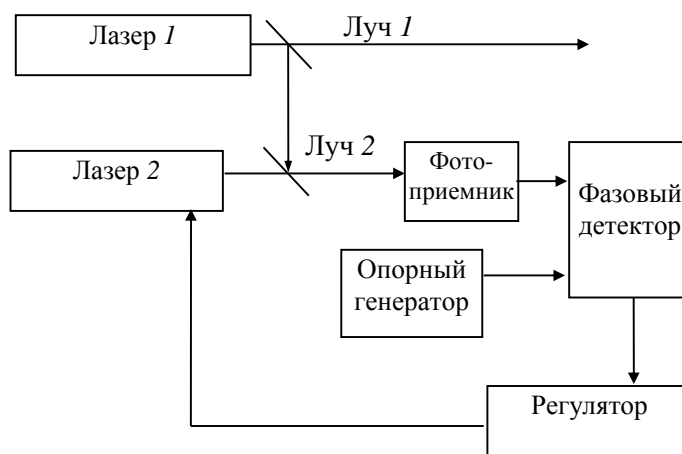


Рис. 1. Функциональная схема подсистемы фазовой привязки двух лазеров

В рассмотренной задаче к опорному генератору предъявляются два противоречивых требования. С одной стороны, этот генератор должен плавно управляться, чтобы имелась возможность плавной перестройки частоты

второго лазера. С другой стороны, предписанное значение должно воспроизводиться с высокой точностью, т.е. в отсутствии изменений команды управления этим генератором его частота должна оставаться сколь угодно долго,

то же самой, которая сформировалась в результате исполнения последней команды.

В первых подобных системах использовался генератор, управляемый напряжением, выполненный полностью на аналоговой технике. Такой генератор характеризуется некоторым дрейфом частоты даже в том случае, если управляющий сигнал постоянен.

Использование синтезатора частоты в качестве опорного генератора дает ряд важнейших преимуществ. Прежде всего, это отсутствие свободного дрейфа частоты при отсутствии изменений команды управления. Также важно и то, что предписанная частота при использовании синтезатора точно известна, ее не требуется дополнительно измерять, тогда как при использовании управляемого генератора характеристика управления (зависимость частоты генерации от величины входного сигнала) не достаточно точно определена и недостаточно точно воспроизводится.

Однако у аналогового управляемого генератора имеются и преимущества. В частности, при сколь угодно медленном изменении управляющего сигнала частота такого генератора сколь угодно плавно изменяется, повторяя форму входного сигнала, при этом в формируемом сигнале отсутствуют резкие скачки фазы, формируемая синусоида плавно растягивается или сжимается во времени. Многие синтезаторы частоты таким полезным свойством не обладают, и поэтому они либо не могут быть использованы в этих целях, либо при их использовании требуется применять множество дополнительных мер, чтобы в системе отсутствовали скачки фазы или они были сведены к минимуму, причем эти меры далеко не очевидны.

Поэтому крайне актуальна разработка и создание такого синтезатора частоты, который бы обладал указанным достоинством аналогового управляемого генератора, но во всем остальном обладал достоинствами цифрового синтезатора частоты, а именно: он должен обладать предельно однозначной и стабильной характеристикой, связывающей код управления и формируемую частоту.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Синтезаторами частоты называют специальные генераторы гармонического напряжения с дискретной перестройкой частоты и стабильностью, равной стабильности частоты лучших генераторов с кварцевой стабилизацией [14–17]. Синтезаторы позволяют получить сетку напряжений фиксированных частот, объединяющую миллионы отсчетов с дискретностью в десятки и даже сотые доли герц. Они обеспечивают хорошую синусоидальную форму, высокую спектральную чистоту, большую точность установки и возможность программной перестройки частоты.

По точности установки и стабильности частоты синтезатора, а также генератора, построенные на их основе, превосходят обычные измерительные генераторы с плавной перестройкой частоты. Используют два метода синтеза частот: прямой и косвенный.

Прямой метод основан на многократном целенаправленном изменении частоты f_0 исходных высокостабильных колебаний с помощью операций деления, умножения, сложения и вычитания. Деление частоты осуществляют пересчетными схемами. Реализация остальных операций базируется на использовании свойств нелинейных электрических цепей. Нелинейный элемент и фильтр, настроенный на n -ю гармонику, позволяет умножить частоту f_0 на целое число n . Объединение схемы смесителя и фильтра обеспечит сложение или вычитание частот двух колебаний.

Косвенный метод синтеза основан на принудительной синхронизации выходного напряжения перестраиваемого генератора с колебаниями вспомогательного кварцевого генератора.

Нами рассматривались различные схемы для разработки синтезатора со сверхмалым шагом, краткий обзор которых приводится ниже.

Каждый синтезатор обязательно имеет либо собственный образцовый генератор, либо вход для подачи образцовой частоты. Различные типы синтезаторов отличаются тем, каким способом из этой образцовой частоты формируется требуемая частота, которая относится к образцовой как некоторое отношение двух целых чисел M и N . Например, если образцовая частота равна $f_0 = 1 \text{ MHz}$, и требуется синтезировать частоту, равную $f_1 = 1,234567 \text{ MHz}$, то необходимо обеспечить соотношение $f_1 / f_0 = 1234567 : 1000000$. Следовательно, $M = 1234567$, $N = 1000000$.

Прямой метод состоит в том, чтобы складывать или вычитать заранее сформированные частоты, которые кратны образцовой частоте. Например, если имеется образцовая частота, равная $f_0 = 1 \text{ MHz}$, то частоты, которые в 2, 4, 8 и т.д. раз меньше, можно получить путем простого деления этой частоты вдвое. Также можно получить частоты, меньше в любое целое количество раз, в частности, в 10, 100, 1000 и т.д. Кроме того, можно получить более высокие частоты, путем внесения искажений в форму исходного гармонического сигнала с последующим выделением требуемой гармоники. Таким путем можно получить высшие гармоники, например, частоты, которые больше исходной в 2, 3, 4, 5 раз и т.д. Разумеется, в некоторых случаях частоту можно получить весьма простым путем, например, разделив третью гармонику на два, можно получить две трети от исходной частоты. Но этот метод не универсален, в зависимости от значения частоты,

которую требуется синтезировать, путь ее синтеза может быть чрезвычайно сложным, поэтому такие синтезаторы могут использоваться лишь при необходимости синтеза ограниченного набора фиксированных частот.

Наиболее эффективный путь синтеза частот состоит в использовании обоих принципов, как прямого, так и косвенного синтеза. Такой подход позволяет последовательно формировать те значения частот, которые наиболее полно отвечают задаче синтеза, и в итоге получить требуемую частоту с высокой точностью.

Эти более сложные синтезаторы также можно отнести к синтезаторам прямого или косвенного принципа действия, в зависимости от того, каким путем формируется в итоге требуемая частота.

Синтезатор частот, использующий прямой метод синтеза (Рис. 2), состоит из генератора с кварцевой стабилизацией частоты, устройства формирования опорных частот, устройства синтеза частот, а также системы электронных коммутаторов и отсчетного устройства. Генератор формирует исходное колебание, частота которого обычно равна, например, $f_0 = 1 \text{ MHz}$. Основное требование к этому генератору – высокая стабильность частоты. Обычно относительная нестабильность (уход) частоты в пределах суток не превышает 10^{-8} – 10^{-9} .

Устройство формирования опорных частот показано на Рис. 3. Оно содержит нелинейный элемент, который преобразует гармонический сигнал таким образом, что в нем возникают

высшие гармоники. Также устройство содержит десять идентичных по структуре узлов, каждый из которых состоит из узкополосного фильтра, блока умножения частоты на десять и блока деления частоты на десять. Фильтры настраиваются так, чтобы выделять частоты $f_1 = 30 \text{ MHz}$, $f_2 = 31 \text{ MHz}$, $f_3 = 32 \text{ MHz}$, ... $f_8 = 39 \text{ MHz}$. Узел деления частоты может быть выполнен на простом счетчике-делителе на десять. Узел умножения частоты может быть выполнен двумя способами. Во-первых, это может быть также нелинейный элемент с узкополосным фильтром, настроенным на нужную частоту. Во-вторых, это может быть включенные в кольцо управляемый генератор, счетчик-делитель на десять и система ФАПЧ. Таким образом, на выходе каждого такого узла формируется три частоты, а именно: $f_k = (29+k) \text{ MHz}$, $f_{k1} = fk/10$ и $f_{k2} = 10fk$. Также узкополосный фильтр выделяет частоту $f_9 = 24 \text{ MHz}$ из сигнала на выходе нелинейного элемента. В описании генератора утверждается, что поскольку все опорные частоты образованы делением или умножением частоты f_0 , то их стабильность равна стабильности частоты исходных колебаний. С этим можно дискутировать, поскольку процесс умножения или деления частоты влияет на стабильность формируемой частоты в сравнении с исходной. Однако если потерь импульсов не происходит, то стабильность за очень высокое время осреднения в целом сохраняется.



Рис. 2. Структурная схема синтезатора частота (прямой метод)

Остальная часть синтезатора работает на следующем принципе. К частоте $f_0 = 24 \text{ MHz}$ прибавляется последовательно на двух стадиях добавочные частоты $f_{10} = 3 \text{ MHz}$ и $f_{11} = (3+x) \text{ MHz}$. В результате выделяется суммарная частота, которая равна $f_{12} = (30+x) \text{ MHz}$. Эта частота затем делится в десять раз, получается новая частота $f_{13} = (3+0,1x) \text{ MHz}$. Далее эта новая частота используется так же, как на предыдущем шаге использовалась частота f_{10} , а вместо частоты f_{11} используется новая частота $f_{14} = (3+y) \text{ MHz}$. В результате получается частота $f_{15} = (3+0,01x + 0,1y) \text{ MHz}$. Далее она таким же образом используется совместно с частотой $f_{16} = (3+z) \text{ MHz}$ для получения новой частоты, равной $f_{17} = (3+0,001x + 0,01y + 0,1z) \text{ MHz}$. И так далее. Тем самым дробная часть

синтезируемой частоты может быть скорректирована сколь угодно точно, в зависимости от числа таких ступеней преобразования, называемых декадами. Каждая декада добавляет дополнительное приращение частоты во втором знаке, а все остальные ранее накопленные приращения перемещаются на следующие после этого знака позиции. Например, для получения частоты, равной $f_1 = 1,234567 \text{ MHz}$, требуется сначала сформировать промежуточную желаемую частоту $f_{ж} = 3,1234567 \text{ MHz}$. Тогда на первой декаде будет получена частота $f_{ж1} = 3,7 \text{ MHz}$, на второй декаде – частота $f_{ж2} = 3,67 \text{ MHz}$, на третьей – $f_{ж3} = 3,567 \text{ MHz}$, на четвертой – $f_{ж4} = 3,4567 \text{ MHz}$, на пятой – $f_{ж} = 3,34567 \text{ MHz}$, на шестой – $f_{ж} = 3,234567 \text{ MHz}$, а на седьмой – желаемая частота $f_{ж7} = f_{ж}$. Все частоты, которые

необходимы для использования в этих преобразованиях, сформированы устройством формирования опорных частот, рассмотренным ранее (см. Рис. 3). Для получения той частоты, которая требуется, теперь достаточно вычесть из этой частоты опорную частоту, равную $f_{10} = 3 \text{ MHz}$, после чего полученную частоту умножить на десять.

Вместо умножения на десять можно поступить иначе, а именно, последний раз частоту не делить на десять, а для суммирования использовать частоту, которая в 10 раз выше, чем на предыдущих декадах. Для этого и требуются более высокие частоты.

Кроме того, такой способ позволяет обеспечить большую стабильность выходной частоты, поскольку операция умножения на десять в этом случае осуществляется не с переменной частотой, а с постоянной. Но зато в этом случае такая операция делается не один раз с единственной переменной частотой, а десять раз с десятью различными постоянными частотами. С позиции возможности реализации это проще, с позиции объема аппаратной части это, безусловно, сложнее. С позиции качества получаемой частоты — это лучше, и, по-видимому, в этом все дело.

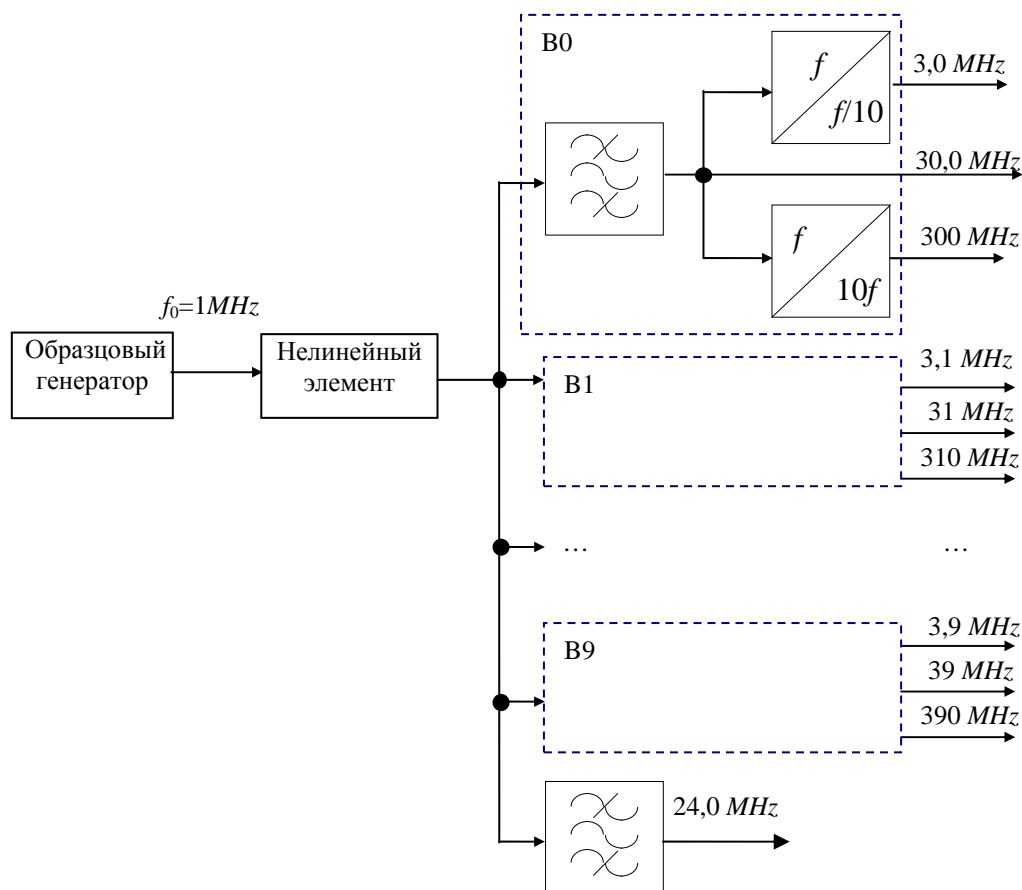


Рис. 3. Структурная схема устройства формирования опорных частот

Таким образом, устройство синтеза частот должно состоять из идентичных узлов, содержащих два сумматора частот и счетчик-делитель на десять. Сумматоры представляют собой последовательное соединение умножителя сигнала и фильтра верхних частот, а схема счетчика-делителя может быть реализована на типовых счетчиках, хотя предпочтительно осуществить сначала деление частоты на 5, а затем на 2, чтобы длительность выходного сигнала составляла половину его периода. По-видимому, также получаемый прямоугольный сигнал требуется каждый раз преобразовывать в гармонический сигнал с помощью узкопо-

лосного фильтра, о чем в литературе не сообщается.

Структурная схема устройства для синтеза требуемой частоты с последовательным включением декад показано на Рис. 5. Здесь все используемые частоты поступают на коммутатор от устройства, показанного на Рис. 3, а коммутатор выбирает из них необходимые в соответствии с значением требуемой для синтеза частоты.

Основной недостаток рассмотренного метода синтеза состоит в его чрезмерной сложности.

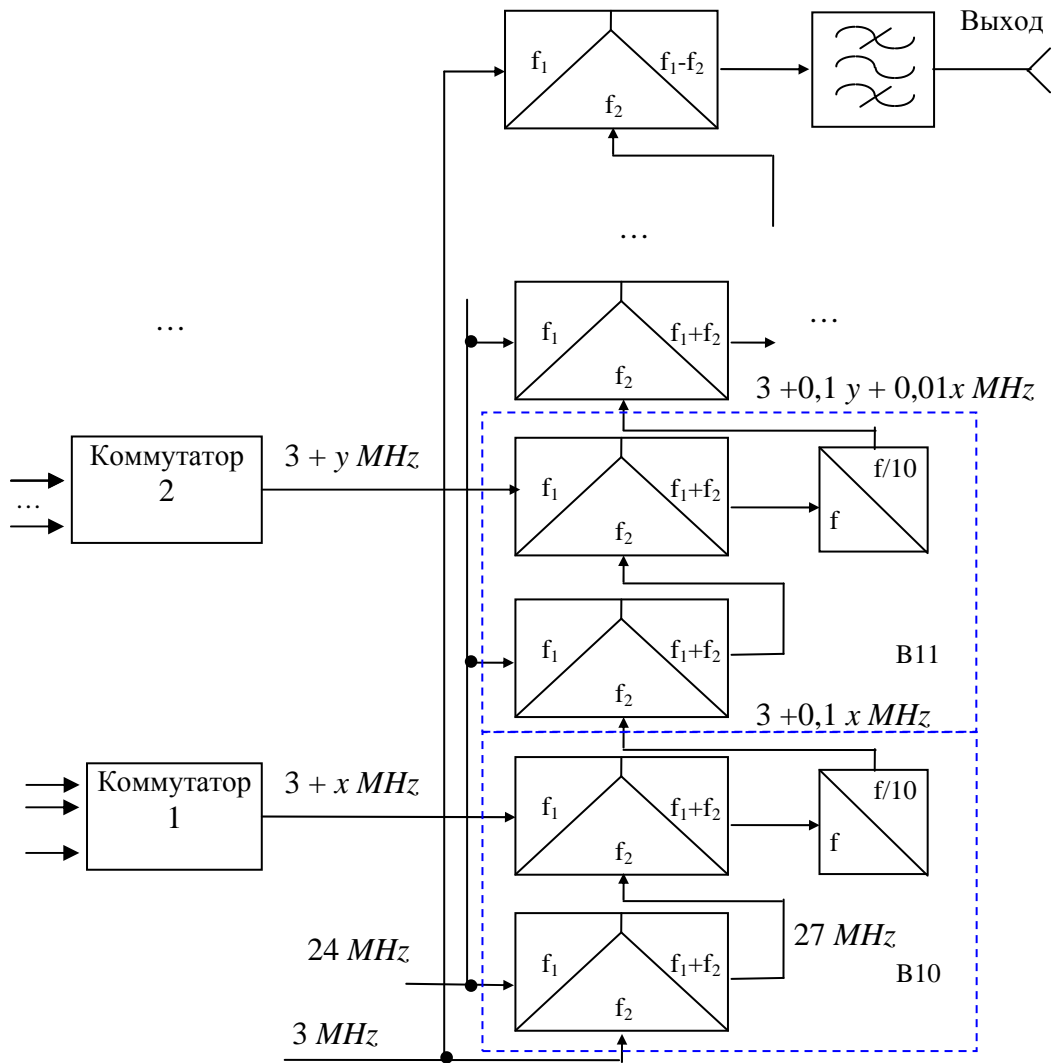


Рис. 5. Устройство синтеза с последовательным включением частотных декад

Косвенный способ синтезировать требуемую частоту состоит в том, чтобы частоту сигнала опорного генератора разделить счетчиком на коэффициент N , также иметь управляемый генератор, частота которого делится на M , полученные две частоты следует подать на фазовый детектор, после чего его сигнал через регулятор подать с нужным знаком на управляемый генератор. Такое соединение образует систему ФАПЧ, которая подстраивает частоту управляемого генератора, деленную на коэффициент M , к частоте опорного генератора, деленной на коэффициент N . В этом случае частоты, поступающие на вход фазового детектора, будут равны вследствие работы системы ФАПЧ, следовательно, будет выполнено требуемое условие. Простейший синтезатор частоты, использующий такой метод синтеза (Рис. 6), состоит из управляемого генератора с плавной перестройкой частоты, образцового генератора с кварцевой стабилизацией и системы фазовой автоподстройки частоты (кольцо ФАПЧ). Выходным напряжением синтезатора служит напряжение управ-

ляемого генератора. В этом случае частота образцового генератора не делится на N или можно считать, что генератор вместе со счетчиком-делителем объединены в новый блок «образцовый генератор», который формирует низкую стабильную частоту.

Недостатком такого синтезатора является малое быстродействие. Следствием этого является возможность больших фазовых скачков при попытке управления таким синтезатором в темпе, превышающем его фактические возможности. Действительно, чем точнее требуется синтез частоты, тем больше разрядность чисел M и N . Поэтому тем в большее количество раз сравниваемые частоты в системе ФАПЧ будут ниже, чем собственно формируемая частота, следовательно, тем ниже будет быстродействие такого синтезатора. В рассмотренном примере шаг перестройки синтезатора составляет $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, сравниваемые в системе ФАП частоты равны этому значению. Быстродействие такого контура будет намного ниже, чем $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, возможно, частота среза ФАПЧ будет равна $f_c = 0.01 \text{ Hz}$ или даже

меньше. В поставленной задаче требуется намного более плавное управление синтезатором, шаг его перестройки должен быть в 100-1000 раз меньше, соответственно, тогда и

быстродействие такого синтезатора должно быть в 100-1000 раз меньше. Безусловно, это неприемлемо.

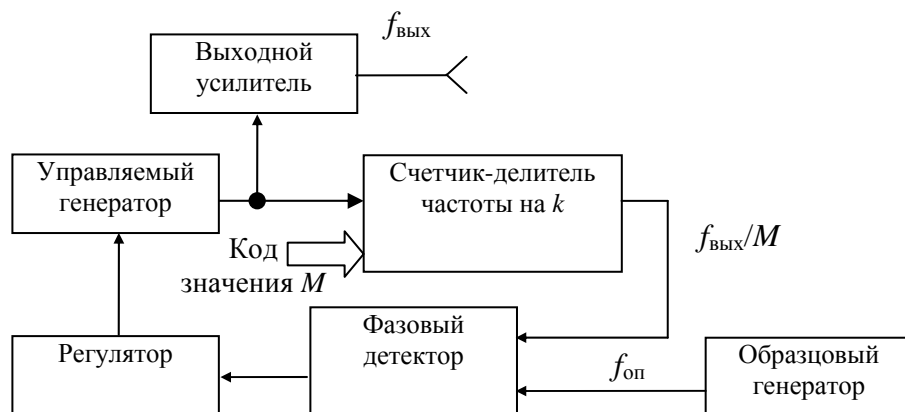


Рис. 6. Структурная схема синтезатора частоты с использованием косвенного метода синтеза

В литературе встречаются системы, в которых имеются несколько узлов сравнения частот. Например, наряду с фазовым детектором используется также и частотный детектор. Такое техническое решение следует признать устаревшим, поскольку систему ФАПЧ вполне успешно можно сделать с единственным частотно-фазовым детектором, например, импульсного типа [12–13]. Также два узла сравнения не потребуются, если сравниваемые частоты не слишком сильно отличаются друг от друга, например, не более, чем на 20 %, что можно обеспечить соответствующим выбором рабочих диапазонов. Если же с помощью устройства по структуре Рис. 6 попытаться сделать синтезатор с большой кратностью перестройки частоты, то такая схема будет неприемлема. Например, если синтезируемая частота лежит в диапазоне от $f_{\min} = 100 \text{ KHz}$ до $f_{\max} = 1 \text{ MHz}$, диапазон перестройки составляет $f_{\max}/f_{\min} = 0,1$. При этом кратность перестройки частоты составляет обратную величину, равную 10. Если же нижняя частота равна, например, $f_{\min} = 1 \text{ Hz}$, то кратность составит 1000000, что делает невозможным применение такой схемы синтеза. Для преодоления этой проблемы можно осуществить два этапа синтеза, а именно: на первом этапе синтезировать некоторое значение на несущей высокой частоте, в этом случае кратность перестройки частоты будет невысокой, например, не более 10. Далее следует применить вычитание опорной частоты подобно тому, как это делается в ранее рассмотренной структуре.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗАТОР НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ

Прогресс в области вычислительной техники обусловил появление измерительных генера-

торов с новыми принципами формирования сигналов.

При создании синтезатора частоты со сверхмалым шагом выбран принцип построения генератора с диапазонно-кварцевой стабилизацией в силу следующих причин:

1. Синтезатор состоит из однотипных узлов, настраиваемых на одну и ту же частоту, что облегчает разработку, настройку, тиражирование и ремонт.

2. Невысокое значение рабочей частоты каждого узла позволяет реализовать эти узлы на элементной базе с высокой степенью интеграции: применяемые микросхемы 1564ГГ1 и 564ИЕ15 полностью содержат систему ФАПЧ (генератор, фазовый детектор, корректирующий усилитель) и программируемый счетчик.

3. Функциональная схема содержит узлы, на которые может быть подан сигнал девиации, необходимой во многих применениях синтезатора, что служит дополнительным преимуществом по сравнению с иными схемами синтеза частоты.

4. Ранее был разработан аналогичный синтезатор с десятичными декадами [5]. По сравнению с прототипом последний вариант нового синтезатора удалось существенно упростить за счет более удачного выбора соотношения коэффициентов при преобразовании частот. В каждой декаде производится понижение частоты не в 10, а в 8 раз, поэтому суммарная и разностная частоты разнесены на большее расстояние, что облегчает задачу фильтрации.

Синтезатор частоты формирует частоту $F_2 = 1 \text{ MHz} + \Delta f$, близкую к опорной частоте $F_1 = 1 \text{ MHz}$, вырабатываемой кварцевым генератором. Добавка синтезируется от той же самой опорной частоты F_1 посредством пошагового приближения с кратным шагом, задаваемым управляющим кодом. Уменьшение шага

управления достигается добавлением стандартных узлов. Конструктивно синтезатор состоит из трех модулей с возможностью их наращивания точности синтеза частоты без потери быстродействия.

Схема синтезатора показана на *Рис. 7*. Устройство содержит образцовый кварцевый генератор частоты $F_0 = 10 \text{ MHz}$, компаратор для формирования сигналов ТТЛ-уровня от внешнего генератора, ряд счетчиков для получения кратных частот: $F_1 = 1 \text{ MHz}$, $F_2 = 6,25 \text{ KHz}$ и $F_3 = 125 \text{ KHz}$, интерфейс для ввода управляющего кода и ряд однотипных узлов суммирования и деления частот.

Каждый узел содержит систему ФАПЧ, частотный сумматор и счетчик-делитель. Каждый такой узел осуществляет преобразование входной частоты в частоту с приращением, определяемым управляющим кодом. С этой целью ФАПЧ вырабатывает частоту по соотношению

$$F_{out} = F_{in} \times (140 + \Delta_i).$$

Здесь входная частота близка к значению $F_2 = 6,25 \text{ KHz}$. После умножения на 140 выходная частота близка к значению $F = 875 \text{ KHz}$. На выходе первого узла далее выходная частота складывается с частотой $F_3 = 125 \text{ KHz}$, в результате получается частота, близкая к значению $F_1 = 1 \text{ MHz}$, эта частота делится на 8. В результате получается частота, которая снова близка к исходному значению $F_3 = 125 \text{ KHz}$, но уже содержит полученную добавку по частоте, разделенную на 8. Добавка частоты исходно кратна значению $F_2 = 6,25 \text{ KHz}$, поскольку именно к этому значению подстраивается частота управляемого генератора, разделенная на соответствующий код, подаваемый в данный узел.

Таким образом, после первого преобразования из частоты $F_1 = 1 \text{ MHz}$ формируется частота $F_{01} = 1 \text{ MHz} + x$, где x принимает одно из следующих значений:

$$\begin{aligned} x_0 &= 0 \text{ KHz}, \\ x_1 &= F_2 = 6,25 \text{ KHz}, \\ x_2 &= 2F_2 = 12,5 \text{ KHz}, \\ x_3 &= 3F_2 = 18,75 \text{ KHz}, \\ x_4 &= 4F_2 = 25 \text{ KHz}, \\ x_5 &= 5F_2 = 31,25 \text{ KHz}, \\ x_6 &= 6F_2 = 37,5 \text{ KHz}, \\ x_7 &= 7F_2 = 43,75 \text{ KHz}. \end{aligned}$$

После деления на 8 получается частота в 8 раз меньше, следовательно, и приращения частоты становятся в 8 раз меньше. Эта частота используется во втором преобразовании, где добавляется новое приращение, и так далее.

Сумматор частот представляет собой последовательное соединение перемножителя сигналов и фильтра верхних частот. Фильтр пропускает на свой выход суммарную частоту и не пропускает разностную частоту. Минимальная частота, которую фильтр должен пропустить, равна $F_1 = 1 \text{ MHz}$. Максимальная

частота, которую должен пропустить фильтр, соответственно, равна $F_1 + 7F_2 = 1,04375 \text{ MHz}$. Поэтому можно использовать не фильтр верхних частот, а резонансный полосовой фильтр с низкой добротностью, пропускающий частоты в этом диапазоне. Высокая избирательность не требуется. Действительно, разностная частота лежит в диапазоне от $706,25 \text{ KHz}$ до 750 KHz , что, как минимум, на 25% ниже значения минимальной частоты, которую фильтр должен пропустить. Это относительно простые требования к фильтру. Достаточно сравнить их с требованиями к фильтрам, используемым в структуре по *Рис. 5*. В этой структуре следует пропустить на выход частоту вблизи 27 MHz и не пропустить частоту вблизи 24 MHz , которая отличается всего лишь на 7,4%. К фильтрам, используемым в схеме по структуре *Рис. 3*, требования еще более жесткие, там, например, требуется пропустить частоту вблизи 39 MHz и не пропустить частоту вблизи 38 MHz , которая отличается всего лишь на 2,57%. В описываемой и предлагаемой схеме указанные фильтры, устраняющие частоты, отличающиеся в меньшую сторону на 25% - это самые сложные фильтры во всей системе, и, пожалуй, самые сложные функциональные узлы. Остальные узлы еще более просты, чего нельзя сказать о других синтезаторах, рассмотренных выше.

Таким образом, в результате суммирования частот формируется частота $F_1 + x_i$ на первом узле, который можно назвать октавой по аналогии с декадами в рассмотренных ранее синтезаторах. На выходе второго узла (второй октавы) формируется частота, равная $F_1 + y_j + 0,1 x_i$. На выходе третьей октавы формируется частота, равная $F_1 + z_k + 0,1 y_j + 0,01 x_i$, и т. д. Таким образом, каждая октава сдвигает полученное ранее приращение частоты в 8 раз вниз и добавляет новое приращение, сохраняя при этом значение несущей 1 MHz . Это позволяет уменьшать величину шага установки частоты за счет добавления стандартных узлов. Все блоки октавы идентичны, что облегчает изготовление и отладку синтезатора.

Последний узел не содержит счетчика-делителя, поскольку в применениях к лазерным системам указанная несущая частота как раз является той частотой, которая нужна именно в этом качестве.

Если бы требовалось реализовать выходной сигнал на другой несущей частоте, можно было бы это выполнить различными способами, разной степени простоты. Например, при необходимости получения более низкой частоты, например, ниже вдвое, достаточно было бы применить счетчик-делитель, но не в восемь раз, а в шестнадцать. Если бы несущая частота потребовалась вдвое выше, то можно было бы либо удвоить полученную частоту, либо прибавить к ней недостающую частоту,

равную 1 МГц. Если бы потребовалось, чтобы выходная частота формировалась от нуля до некоторой верхней частоты, это также можно было бы легко обеспечить, например, путем вычитания из полученной частоты несущей частоты, равной 1 МГц. В данном случае вычитание осуществить очень легко, поскольку при перемножении этих частот разностная частота лежит в интервале от нуля до 43,75 КГц, а суммарная выше 2 МГц, фильтр для целей такой фильтрации тривиален.

Наконец, если требуется более высокочастотный диапазон генерации, то последнюю октаву (или две последних октавы) можно реализовать на более высокочастотной технике, не используя предварительное деление. Например, если перед последней октавой не использовать деление на восемь, а вместо этого сложить частоту в области одного мегагерца с частотой, равной трем мегагерцам, то получим несущую на частоте 4 МГц, а перестраиваемая добавка будет изменяться от нуля до 200 КГц. Если такое проделать с двумя октавами, то на первой высокочастотной октаве получим указанную частоту, а на следующей – в 8 раз выше, т. е. 32 МГц. Перестраиваемая добавка в этом случае будет изменяться от нуля до 800 КГц. Аналогичным путем можно получить перестройку частоты в любом требуемом диапазоне частот, в том числе и от нуля до любой требуемой частоты. Важно отметить, что при этом вся наиболее сложная часть синтезатора, обеспечивающая точную и плавную перестройку частот под управлением кода, остается той же самой, универсальной и предельно простой.

Функциональная схема синтезатора в его рекомендуемом для лазерных систем виде показана на *Рис. 7*. Устройство содержит образцовый генератор, например, на частоту 10 МГц, счетчики-делители для формирования необходимых частот, требуемое количество узлов-кварт, и оконечный каскад, а также интерфейс для записи кодов в счетчики, коэффициент деления которых задается этим кодом.

Выбранные значения несущих частот и коэффициентов преобразования позволили реализовать это устройство на современной элементной базе и отказаться от многоконтурных резонансных полосовых фильтров для выделения суммарной частоты.

Кроме того, выбранные частотные соотношения позволили применить широкодоступные микросхемы высокой степени интеграции, которые как будто специально сделаны для этих целей. Действительно, наиболее сложная цифроаналоговая часть каждой октавы может быть реализована всего лишь на двух микросхемах – микросхеме ФАПЧ, например, КР1564ГГ1, и микросхеме счетчика-делителя, например, 564ИЕ15. Обе эти микросхемы надежно работают в требуемом частотном диапазоне и просты в использовании.

В качестве опорной частоты используется частота 10 МГц, которая формируется встроенным кварцевым генератором, подается от внешнего эталонного генератора. Формирование стабильной частоты в этом случае достаточно просто обеспечивается вследствие наличия доступных недорогих кварцев, а также готовых кварцевых генераторов на эту частоту. Выбор намного более высокой частоты усложнил бы схему генератора, выбор намного более низкой частоты увеличил бы его габариты и также усложнил бы схему. Кварцевые генераторы в диапазоне частот 1–20 МГц наиболее просты и надежны. Внешним генератором следует воспользоваться в случае, если требуется чрезвычайно высокая точность формирования частоты, которая не может быть обеспечена обычным кварцевым генератором, т.е. в том случае, когда точность превышает шесть десятичных знаков. Отметим, что точность до девяти десятичных знаков может быть обеспечена термостатированным кварцевым генератором. С помощью счетчиков-делителей частоты из образцовой частоты легко получаются частоты 1 МГц, 0,125 МГц и 6,25 КГц. Для этого достаточно образцовую частоту разделить сначала на 10, затем на 8, затем на 20. Счетчики-делители в этом случае предельно просты, а поскольку коэффициенты деления четные, то легко получить на выходе прямоугольные сигналы типа меандр, для этого достаточно, чтобы последняя операция деления была делением на два, т.е. в первом случае, частота делится сначала на 5, затем на 2 (одна микросхема), во втором случае, просто на 8 (одна микросхема), в третьем случае, сначала на 10 (одна микросхема), затем на 2 (еще одна микросхема).

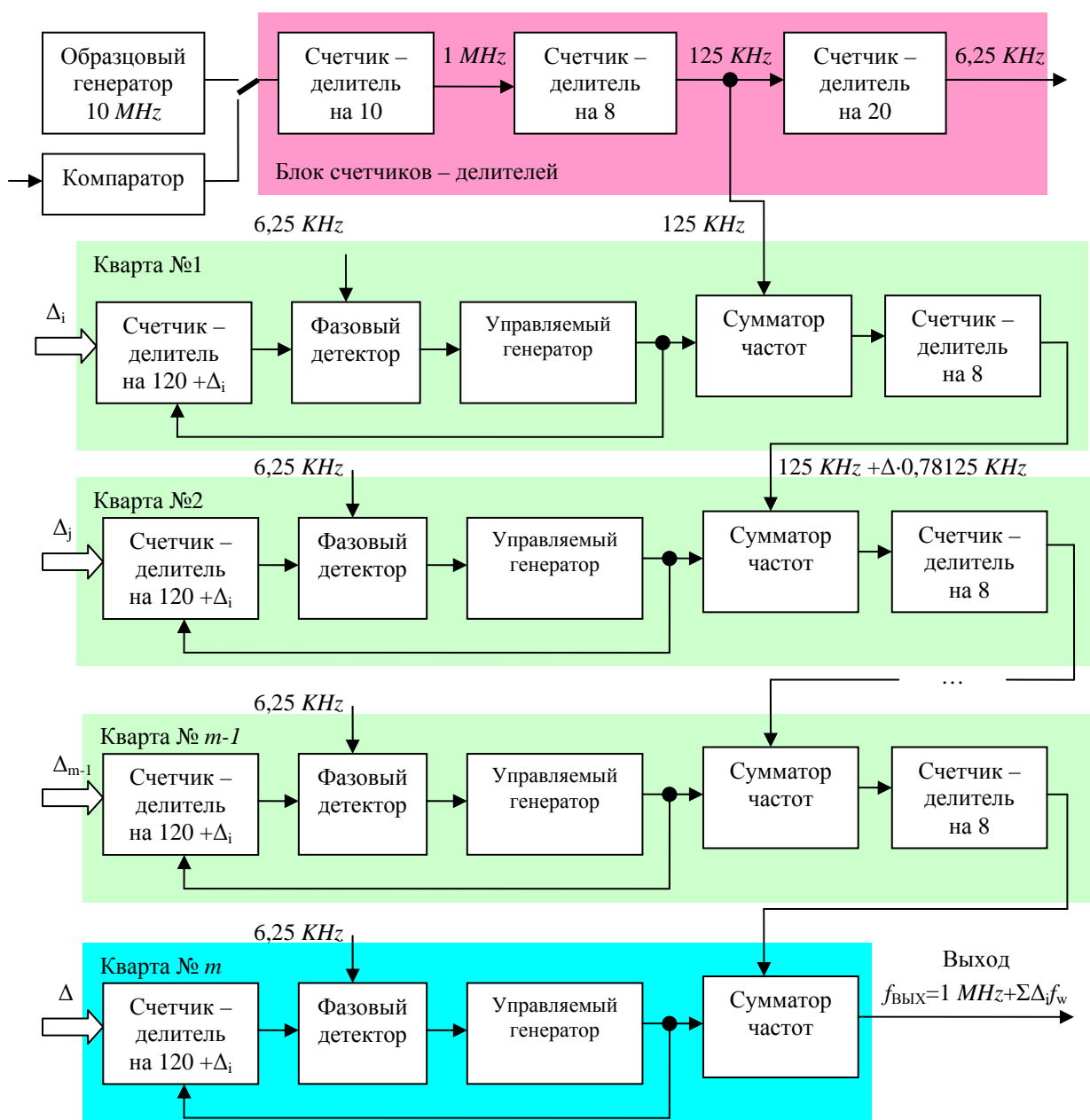


Рис. 7. Функциональная схема синтезатора

Система ФАПЧ собрана на микросхеме КР1564ГГ1 с включением счетчика 564ИЕ15 в тракт между управляемым генератором и фазовым детектором. Применение питания +5В для КМОП-серии делает ее совместимой по уровням с ТТЛ-серией, что позволяет исключить преобразователи уровней. Микросхемы ТТЛ-уровней целесообразно применять в качестве буферных преобразователей, питающих пассивные фильтры, выполненные на дросселях, резисторах и конденсаторах. Применение только КМОП-серии также нецелесообразно из-за низкого быстродействия, которое осложняет суммирование частот. Все узлы не требуют никаких подстроечных элементов, для фильтров были использованы резисторы и конденсаторы среднего класса

точности (МЛТ-0.125, КМ-5а), правильно собранные узлы работают при первом включении. Фильтр собран на основе резонансного контура, настроенного на частоту, равную половине диапазона. Умножение сигналов осуществляется на схеме «Исключающее ИЛИ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена новая схема синтезатора, которая легко изготавливается, настраивается и тиражируется. Она позволяет наращивать точность (уменьшать шаг частотной сетки) за счет добавления идентичных узлов. Описанный синтезатор применяется в системах прецизионной фазовой автоподстройки в составе аппаратуры обработки сигналов. Обес-

печена возможность за счет дальнейшего наращивания количества квартов сколь угодно уменьшать шаг управления. При этом разностная частота Δf имеет точность и стабильность опорного генератора. Это особенно важно при создании систем, ориентированных на достижение высокой долговременной стабильности, в которых повышение точности требует дальнейшего уменьшения шага управления частотой с сохранением высокой стабильности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. S.N.Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Российско-Германский лазерный симпозиум. Новосибирск, 27.06–1.07.97. Technical digest. p. P12–P13.
- [2] S.N. Bagaev, A.K. Dmitriev, V.M. Klementyev et al. Progress towards optical clock. In MPLP'95 Digest, 28 August - 2 September, 1995, Novosibirsk, Russia, p. 73–74.
- [3] Bagaev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. sponsors: Ministry Sci./Techn. Russian Fed., Russian Foundation for Basic Res., Ministry Ed. of the Russian Fed., Basic Optics/Spectrosc. Ed./Res.. Moscow, RUS, 1999. С. 310–318.
- [4] В.А. Жмудь. Разработка автоматизированной системы адаптивного управления спектрометром сверхвысокого разрешения и мобильным стандартом частоты на его основе. Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология». Сб. отчетов за 1996 г. Новосибирск, 1996. С. 158–162.
- [5] Дмитриев А.К., Жмудь В.А., Охупкин М.В. Лазерная спектроскопия, свободная от квадратичного эффекта Доплера. Отчет о НИР № 94-02-04920 (РФФИ).
- [6] Воевода А.А., Жмудь В.А. Возможные пути повышения кратковременной стабильности лазерных стандартов частоты. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2007. Т. 2. № 2. С. 36–39.
- [7] Жмудь В.А. Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 104–119.
- [8] Жмудь В.А. Научная школа академика С.Н. Багаева. К юбилею основателя. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 110–125.
- [9] Жмудь В.А. Системы автоматического управления высшей точности. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 128–136.
- [10] Багаев С.Н., Дычков А.С., Ефимов А.С. и др. Создание абсолютного стандарта частоты для экспериментов по прецизионной спектроскопии муония. Отчет о НИР № 96-02-19195 (РФФИ)
- [11] Дмитриев А.К., Бабушкин Д.Г., Бармасов С.В., и др. Нелинейная лазерная спектроскопия на компонентах дублета отдачи. Отчет о НИР № 97-02-18531 (РФФИ)
- [12] Жмудь, В. А. Системы автоматического управления. Прецизионное управление лазерным излучением: учебное пособие для вузов / Жмудь В.А., Багаев С.Н. - под общ. ред. –2-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 437 с. – (Серия: Университеты России). – ISBN 978-5-534-06607-4. <http://urait.ru/catalog/412103>
- [13] Жмудь, В.А. Электронные системы для прецизионного управления лазерным излучением: учеб. пособие. / В.А. Жмудь. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 435 с. – ISBN 978-5-7782-3325-6.
- [14] Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. Пособие для радиотехнич. Спец. вузов / под ред. В.И.Винокурова. - 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Высш. шк. 1986. - 351 с.
- [15] Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. - М.: Радио и связь, 1991. - 264 с.
- [16] А.С. Ефимов, В.А. Жмудь. Синтезатор частоты со сверхмалым шагом для систем частотной и фазовой автоподстройки. Автометрия, 1996, No 2. С. 21–25.
- [17] Воевода А.А., Жмудь В.А., Падюков И.В., Бармасов С.В. Прецизионное управление лазерным спектрометром с помощью синтезаторов частоты, персональной ЭВМ и цифроаналогового интерфейса. Сб. научн. тр. НГТУ. 1998. № 4 (13). С. 145–152.



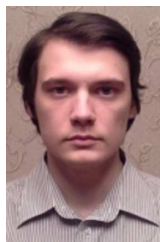
Вадим Аркадьевич Жмудь - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oaonips@bk.ru

630073, Новосибирск,
просп. К.Маркса, д. 20



Любомир Ванков Димитров – Проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор технических наук, профессор, почетный доктор НГТУ.
E-mail: lyubomir.dimitrov@tu-sofia.bg

Бул. „св. Климент Охридски“ 8,
1756 Студентски Комплекс,
София, Болгария



Андрей Юрьевич Ивойлов - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: iau13hv@mail.ru

630073, Новосибирск,
просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.

Precision Frequency Synthesizer

V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, A. Yu. Ivoilov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, str. Prospekt K. Marksa, h.20

Technical University of Sofia, Sofia. Str. Sv. Kliment Orkhidski 8, 1756

Abstract: The technique of creating generators, whose frequency is controlled by the digital code, has been widely developed recently. There are also widely available special microcircuits for frequency synthesizers. Among them there are also synthesizers of signals of a harmonic form with an extremely small coefficient of harmonics. But for a number of tasks and they are not accurate enough. In particular, in laser systems, the frequency synthesizer is extremely demanded for controlling phase-locked loop systems of one laser to another. In these systems, a very important and specific requirement for synthesizers is the absence of phase jumps when the control code changes. This code controls the synthesized frequency value. This requirement is met by a very small number of types of synthesizers due to the principle of their action. This article is devoted to solving this problem by means of an exact frequency refinement. A method based on a combination of a direct and an indirect synthesis method is proposed and tested. The synthesizer contains a simple block for the formation of three reference frequencies, several identical blocks, called octaves, in analogy with the decades in other synthesizers, as well as the output shaper. The choice of numerical ratios of intermediate frequencies ensures the use of a cheap and reliable element base with a high degree of integration, which makes the synthesizer small, easily configurable and easily replicable. The achievement of great simplicity is also based on the fact that there is no task of providing a relationship between the control code and the generated frequency, since it is sufficient to ensure the linearity and unambiguity of this dependence. Most of the known synthesizers are based on the ten-day principle, which is based on the usual decimal system of man, which is not convenient for technical implementation. Since the synthesizer is controlled by a computer, the value of the conversion factor is insignificant. The step of restructuring can be arbitrarily "uncomfortable" for human perception, it is important that it is small and stable. This ensures the most important requirements for accuracy and the absence of jumps in the transient process. The functional scheme is given and the choice of the element base for the implementation of the synthesizer is given.

Key words: frequency synthesizer, precision oscillator, frequency-locked phase-locked laser systems, frequency control, phase control

REFERENCES

- [1] Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. S.N.Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. p. P12–P13.
- [2] S.N. Bagayev, A.K. Dmitriev, V.M. Klementyev et al. Progress towards optical clock. In MPLP'95 Digest, 28 August - 2 September, 1995, Novosibirsk, Russia, p. 73–74.
- [3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. sponsors: Ministry Sci./Techn. Russian Fed., Russian Foundation for Basic Res., Ministry Ed. of the Russian Fed., Basic Optics/Spectrosc. Ed./Res.. Moscow, RUS, 1999. C. 310-318.
- [4] V.A. Zhmud. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy adaptivnogo upravleniya spektrometrom sverhvyssokogo razresheniya i mobil'nyh standartom chastoty na ego osnove. Gos. nauchno-tehnicheskaja programma «Fundamental'naja metrologija». Sb. otchetov za 1996 g. Novosibirsk, 1996. S. 158–162.
- [5] Dmitriev A.K., Zhmud V.A., Ohapkin M.V. Lazernaja spektroskopija, svobodnaja ot kvadraticnogo jeffekta Doplera. Otchet o NIR № 94-02-04920 (RFFI).
- [6] Voevoda A.A., Zhmud V.A. Vozmozhnye puti povysheniya kratkovremennoj stabil'nosti lazernyh standartov chastoty. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Fizika. 2007. T. 2. № 2. S. 36-39.
- [7] Zhmud V.A. Precizionnye izmereniya chastoty dlja attestacii chastotnyh standartov. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2014. № 1 (7). S. 104-119.
- [8] Zhmud V.A. Nauchnaja shkola akademika S.N. Bagaeva. K jubileju osnovatelja. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2016. № 3 (17). S. 110-125.
- [9] Zhmud V.A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija vysshej tochnosti. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2016. № 3 (17). S. 128-136.
- [10] Bagaev S.N., Dychkov A.S., Efimov A.S. i dr. Sozdanie absoljutnogo standarta chastoty dlja jeksperimentov po precizionnoj spektroskopii mjuonija. Otchet o NIR № 96-02-19195 (RFFI)
- [11] Dmitriev A.K., Babushkin D.G., Barmasov S.V., i dr. Nelinejnaja lazernaja spektroskopija na komponentah dubleta otdachi. Otchet o NIR № 97-02-18531 (RFFI)
- [12] Zhmud, V. A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija. Precizionnoe upravlenie lazernym izlucheniem: uchebnoe posobie dlja vuzov / Zhmud' V.A., Bagaev S.N. - pod obshh. red. –2-e izd. – M. : Izdatel'stvo Jurajt, 2018. – 437 s. – (Serija : Universitety Rossii). – ISBN 978-5-534-06607-4. <http://urait.ru/catalog/412103>
- [13] Zhmud, V.A. Jelektronnye sistemy dlja precizionnogo upravlenija lazernym izlucheniem: ucheb. posobie. / V.A. Zhmud. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017. – 435 s. – ISBN 978-5-7782-3325-6.
- [14] Vinokurov V.I., Kaplin S.I., Petelin I.G. Jelektorradioizmereniya: Ucheb. Posobie dlja radiotekhnich. Spec. vuzov / pod red. V.I.Vinokurova. - 2-e izd., pererab. I dop. - M.: Vyssh. shk., 1986. - 351 s.

- [15] Ryzhkov A.V., Popov V.N. Sintezatory chastot v tehnikе radiosvjazi. - M.: Radio i svjaz', 1991. – 264 s.
- [16] A.S. Efimov, V.A. Zhmud. Sintezator chastoty so sverhmalym shagom dlja sistem chastotnoj i fazovoj avtopodstrojki. Avtometrija, 1996, No 2. S. 21–25.
- [17] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Padjukov I.V., Barmasov S.V. Precizionnoe upravlenie lazernym spektrometrov s pomoshh'ju sintezatorov chastoty, personal'noj JeVM i cifroanalogovogo interfejsa. Sb. nauchn. tr. NGTU. 1998.№ 4 (13). S. 145-152.



Vadim Arkadievich Zhmud – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.
E-mail: oao_nips@bk.ru

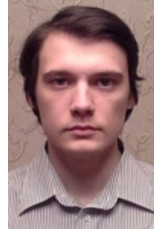
630073, Novosibirsk,
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



Lubomir Vankov Dimitrov - Vice-Rector of the Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria), Doctor of Science, Professor, Honorary Doctor of the NSTU.

E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Bul. "St. Kliment Ohridski" 8, 1756 Studentski Complex, Sofia, Bulgaria



Andrey Yurievich Ivoylov – PhD-student of Department of Automatics of NSTU.

E-mail: iau13hv@mail.ru

630073, Novosibirsk,
srt. Prosp. K. Marksa, h. 20

Paper was received 12 December 2018 r.