

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

В статье рассмотрено влияние различных конфигураций фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с целочисленными коэффициентами на параметры петли ФАПЧ синтезатора частоты. Показана возможность компьютерного прогнозирования таких параметров фазовой автоподстройки частоты, как энергопотребление, время запуска, джиттер и уровень фазовых шумов по выбору делителя частоты с генератора, управляемого напряжением на выход схемы.

Ключевые слова: синтезатор частот; ФАПЧ; генератор, управляемый напряжением; опорный генератор.

Введение. Назначение синтезатора сигналов заключается в генерации нужной выходной частоты на основе заданной опорной частоты [1]. При этом связь между входной и требуемой выходной частотами не всегда очевидна. Одним из наиболее распространённых методов синтеза частот является косвенный синтез на основе фазовой автоматической подстройки частоты. Основные базовые принципы работы синтезатора частоты с ФАПЧ подробно изложены в работе [2]. Различные схемотехнические решения и результаты моделирования по формированию синтезатора с ФАПЧ также детально рассмотрены в работе [3]. От коэффициентов деления в петле ФАПЧ зависят уровень шума и мощность потребления схемы [4]. В некоторых случаях вопрос выбора оптимальных значений является одним из важнейших, особенно когда имеющееся оборудование уже не соответствует новым требованиям. Генераторы с петлей ФАПЧ, спроектированные на основе современной элементной базы, характеризуются достаточно низким уровнем спектральной плотности фазовых шумов, обладают малыми массогабаритными характеристиками [5]. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП), входящие в состав современного синтезатора частот, содержат собственную систему ФАПЧ [6]. Это позволяет повысить точность цифровой обработки аналоговых сигналов и уменьшить шумы АЦП. Таким образом, разработка методики оптимизации параметров ФАПЧ является актуальной задачей.

Цель работы — оптимизация параметров ФАПЧ синтезатора частот по выбору одного-единственного входного параметра схемы.

Метод. В основе метода лежит нахождение всех возможных конфигураций ФАПЧ (рассматриваются только контуры с целочисленными коэффициентами деления), удовлетворяющих заданным требованиям к входной и выходной частотам [7].

Далее предлагается критерий выбора наилучшей конфигурации для конкретной области применения.

Для поиска оптимальной конфигурации ФАПЧ методом подбора рассматриваются все возможные конфигурации коэффициентов деления ФАПЧ, которые выдают требуемую выходную частоту, а затем выбирается из них оптимальная.

Синтезаторы с целочисленным коэффициентом деления. Структурная схема синтезатора частоты с ФАПЧ показана на рис. 1. Выходной сигнал формируется с помощью генератора, управляемого напряжением (ГУН), на основе частоты сигнала опорного генератора (резонатора):

$$f_{\text{вых}} = kf_{\text{оп}}, \quad (1)$$

где k — коэффициент деления частоты (нормированный множитель).

Будем рассматривать только целочисленные значения k .

Коэффициент деления k формируется с помощью нескольких делителей, установленных в схеме ФАПЧ, рис. 1.

В общем случае используется три блока делителей: делитель опорной частоты (Q) с опорного генератора (резонатора) на фазовый детектор (ФД) и фильтр нижних частот (ФНЧ), делитель

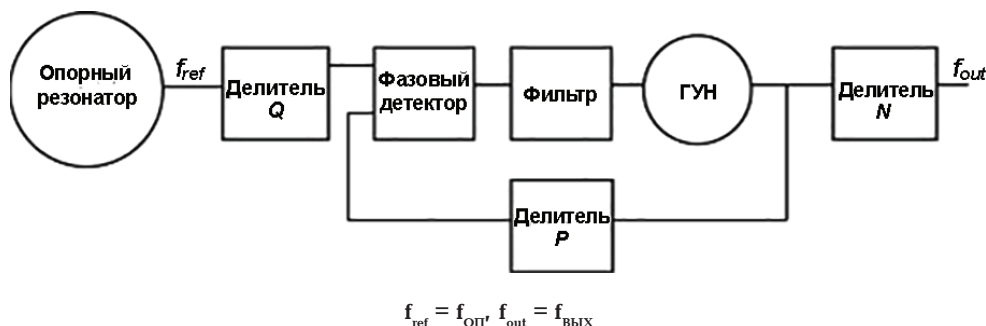


Рис. 1. Функциональная схема ФАПЧ

в петле обратной связи (P) после ГУН на ФД и делитель выходной частоты (N) после ГУН на следующее устройство. Коэффициент k для данного типа синтезатора частоты определяется следующим образом:

$$k = \frac{P}{Q \cdot N} \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем соотношение между входной и выходной частотами:

$$f_{\text{вых}} = \frac{P f_{\text{оп}}}{Q \cdot N} \quad (3)$$

Если коэффициенты N и Q равны единице, то синтезатор может генерировать только частоты, кратные опорной. В этом случае значение P просто определяется из (3). Если только один из коэффициентов Q и N равен единице, то для синтеза желаемой частоты требуется подобрать подходящую конфигурацию, которая определяется соотношением Q/P или N/P .

Использование всех трех делителей частоты позволяет задавать выходную частоту контура ФАПЧ программно. Однако одна и та же выходная частота может быть получена с помощью различных сочетаний делителей P , Q и N . При этом остальные характеристики контура ФАПЧ, такие как мощность потребления, время запуска,

джиттер и фазовый шум, будут сильно различаться.

Поиск конфигураций ФАПЧ. Из формулы (3) следует:

$$\frac{P}{Q \cdot N} = \frac{f_{\text{вых}}}{f_{\text{оп}}} \quad (4)$$

Три неизвестных переменных находятся путем перебора в трёх циклах различных сочетаний P , Q и N , которые дают требуемую частоту.

Пример. Для иллюстрации рассмотрим пример из работы [1]. Пусть требуется синтезировать выходную частоту 50 МГц из опорного сигнала 14,3181818 МГц (стандартная частота видеосигнала). Предположим, ГУН можно выбирать в диапазоне частот 100...400 МГц.

Используя алгоритм поиска, описанный в предыдущем разделе, получаем результаты расчета. Это список всех возможных конфигураций, которые будут соответствовать частотным требованиям. Теперь из них необходимо выбрать лучший вариант.

Результаты расчета возможных конфигураций представлены в табл. 1.

Выбор оптимальной конфигурации. Выбор самой оптимальной конфигурации ФАПЧ полностью зависит от приложения [1]:

— для удаленной станции мониторинга, например, может потребоваться быстрый запуск, но не нужна высокая точность;

Таблица 1

Результаты расчёта возможных конфигураций

N	$f_{\text{оп}}$ Гц	$f_{\text{ГУН}}$ МГц	$f_{\text{вых}}$ МГц	$f_{\text{ФД}}$ МГц	Q	P
2	14,318..	100	50	0,227	63	440
3	14,318..	150	50	0,682	21	220
4	14,318..	200	50	0,227	63	880
5	14,318..	250	50	0,227	63	1100
6	14,318..	300	50	0,682	21	440
7	14,318..	350	50	1,591	9	220
8	14,318..	400	50	0,227	63	1760

Здесь: Q — делитель опорного сигнала ($f_{\text{оп}}$); N — делитель сигнала с ГУН ($f_{\text{ГУН}}$) для получения частоты $f_{\text{вых}}$; P — делитель сигнала с ГУН на ФАПЧ для получения $f_{\text{ФД}}$.

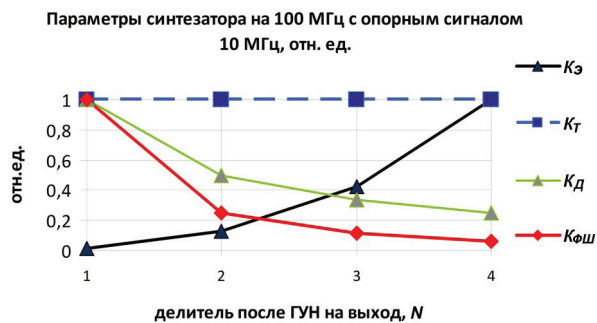


Рис. 2. Графики параметров

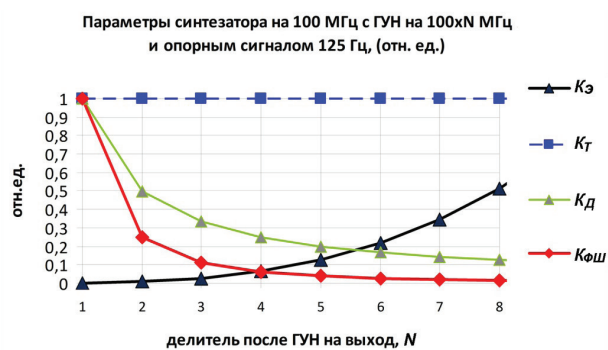


Рис. 3. Графики параметров

— для протокола связи, наоборот, неважно время запуска и энергопотребление, однако требуется источник частоты с очень низким джиттером;

— для ускоренного сбора данных и высокой точности во время передачи этих данных могут иметь значение все параметры.

Применение программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) позволяет, в принципе, реализовать любые требования оптимальной конфигурации [8]. Однако к ФАПЧ, встроенной в качественную ПЛИС, выдвигаются новые требования:

— повышение выходной частоты и, соответственно, расширение набора значений реализуемых частот;

— достижение высокой стабильности выходных тактовых сигналов;

— возможность оперативной подстройки фазы;

— низкое потребление мощности [9].

В настоящее время ФАПЧ уже монтируются в составе отдельных микросхем, которые содержат детектор ошибки и два делителя (Q и P) с программируемыми коэффициентами деления. Однако для работы микросхемы нужен внешний опорный генератор и ГУН, а также петлевой ФНЧ. Поэтому рекламный ход кампании Analog Devices по обозначению этих микросхем как синтезаторов (PLL Synthesizer) можно считать не вполне корректным [10].

В работе [1] подробно рассмотрено влияние элементов ФАПЧ на основные параметры: энергопотребление, время запуска, джиттер и уровень фазовых шумов.

Например, энергопотребление определяет-

ся частотой ГУН, током накачки заряда и значениями делителей частоты. Время запуска ФД и установления частоты ГУН определяется собственной частотой петли. Джиттер-дрожание и дрейф напряжения в цепи — зависит от частоты фазового детектора и коэффициента усиления ГУН. Фазовый шум полностью зависит от приложения.

Для учёта влияния элементов ФАПЧ на основные параметры синтезатора в программу вычисления делителей Q , P и N был добавлен блок вычисления относительных коэффициентов энергопотребления K_{ε} , времени запуска K_{τ} , джиттера K_{Δ} и уровня фазовых шумов $K_{\text{фш}}$. В работе вычисленные коэффициенты показаны в виде графиков (рис. 2 и рис. 3) в зависимости от значения делителя N с ГУН на следующее устройство, как показано на рис. 1.

Пример оптимизации. В рассмотренном примере (табл. 1) оптимизация выглядит следующим образом:

— для системы с низким энергопотреблением следует снизить частоту ГУН и значения коэффициентов делителей. В этом случае сочетание $N=3$, $Q=21$, $P=220$ является наилучшим выбором. ГУН работает на низких частотах, коэффициенты P и Q имеют невысокие значения, а частота ФД имеет приемлемое значение;

— для системы с минимальным временем запуска и установления оптимальной является конфигурация с $N=7$, $Q=9$, $P=220$. За счет высокой частоты ФД обеспечивается достаточно высокая частота обновления напряжения фильтра;

— для схемы с низким джиттером, оптимальный набор коэффициентов: $N=7$, $Q=9$, $P=220$. В данной конфигурации частота ФД более чем вдвое выше, чем при других. В результате частота обновления напряжения фильтра повышается. Соответственно, схема обладает наименьшим джиттером;

— для схемы с низким уровнем фазового шума подходит вариант ГУН с высокой частотой и соответствующим делителем P : $N=7$, $Q=9$, $P=220$. Частота ФД в этой конфигурации гораздо выше, чем для сочетания $N=8$, $Q=63$, $P=1760$.

Экспериментальные результаты и их обобщение. В ходе работы было выполнено две задачи.

Задача 1.

Проанализировать конфигурацию изготовленного синтезатора № 1 на выходную частоту 100 МГц из опорного сигнала 10 МГц (выход с высокостабильного кварцевого генератора) с делителями $N=Q=1$ и $P=10$. Результаты расчета элементов ФАПЧ синтезатора № 1 на 100 МГц представлены в табл. 2.

Соответствующие графики зависимости параметров синтезатора №1 от делителя N (частоты ГУН, $f_{\text{ГУН}}$) представлены на рис. 2.

Из рис. 2 для изготовленного синтезатора ($N=1$) следуют выводы:

— по энергопотреблению конфигурация для $N=1$ является оптимальной;

— фазовые шумы и джиттер максимальны;

— оптимальным вариантом по всем параметрам должна быть конфигурация при $N=2$ ($f_{\text{ГУН}}=200$ МГц, делитель P с ГУН на ФД равен 20).

Результаты расчёта элементов ФАПЧ синтезатора № 1 на 100 МГц

N	$f_{оп}$ Гц	$f_{ГУН}$ МГц	$f_{вых}$ МГц	$f_{ФАП}$ МГц	Q	P
1	10	100	100	10	1	10
2	10	200	100	10	1	20
3	10	300	100	10	1	30
4	10	400	100	10	1	40

Таблица 3

Результаты расчёта элементов ФАПЧ синтезатора № 2 на 100 МГц

N	$f_{оп}$ Гц	$f_{ГУН}$ МГц	$f_{вых}$ МГц	$f_{ФАП}$ МГц	Q	P
1	0,000125	100	100	0,0000625	2	1600000
2	0,000125	200	100	0,0000625	2	3200000
3	0,000125	300	100	0,0000625	2	4800000
4	0,000125	400	100	0,0000625	2	6400000
5	0,000125	500	100	0,0000625	2	8000000
6	0,000125	600	100	0,0000625	2	9600000
7	0,000125	700	100	0,0000625	2	11200000
8	0,000125	800	100	0,0000625	2	12800000

Задача 2.

Проанализировать конфигурацию синтезатора № 2 на выходную частоту 100 МГц из опорного сигнала 125 Гц (выход со схемы цифровой обработки сигнала) для ГУН с частотой от 100 до 800 МГц. Результаты расчёта элементов ФАПЧ синтезатора № 2 на 100 МГц представлены в табл. 3.

Соответствующие графики зависимости параметров синтезатора № 2 от делителя N (частоты ГУН, $f_{ГУН}$) представлены на рис. 3.

Из рис. 3 и данных табл. 3 оптимальный вариант синтезатора № 2 на 100 МГц по всем параметрам соответствует делителям $N=4$ и 5:

Следовательно:

— по энергопотреблению оптимальны конфигурации с $N=1-3$;

— по фазовым шумам и джиттеру — конфигурация с $N=6-8$;

— оптимальным вариантом по всем параметрам должна быть конфигурация при $N=5$ ($f_{ГУН} = 500$ МГц, делитель P с ГУН на ФД равен 8×10^6).

В обоих вариантах синтезаторов коэффициент времени запуска K_T не меняется из-за пропорционального изменения делителя P и $f_{ГУН}$ при постоянном делителе Q с опорного генератора ($f_{оп}$).

Выводы.

1. Показана возможность компьютерного прогнозирования таких параметров ФАПЧ, как энергопотребление, время запуска, джиттер

и уровень фазовых шумов по выбору единственного элемента ФАПЧ синтезатора частоты — делителя частоты с генератора на выход схемы.

2. Разработана компьютерная модель прогнозирования с графическим представлением результатов.

Библиографический список

1. Майская В. Когда часть лучше целого // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 5 (79). С. 10–16.
2. Шапиро Д. Н., Паин А. А. Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
3. Шахтарин Б. И., Федотов А. А. Анализ синтезатора частот с петлёй ФАП // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 2 (95). С. 53–62.
4. Мартиросов В. Е., Алексеев Г. А. Программная реализация системы фазовой автоподстройки частоты // Труды МАИ. 2013. Вып. 71. С. 1–16.
5. Баронов А. А., Шадский В. А. Особенности проектирования гетеродина с петлёй ФАПЧ Ку-диапазона // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2015. № 4 (160). С. 18–22.
6. Сизов М. АЦП с контуром фазовой автоподстройки частоты // Современная электроника. 2016. № 6. С. 2–5.
7. Mentze E. What is the best PLL configuration for your app-and how do you find it?. URL: <https://www.embedded.com/design/industrial-control/4217828/What-is-the-best-PLL-configuration-for-your-app-and-how-do-you-find-it-> (дата обращения: 00.00.2019).
8. Бормонтов Е. Н., Ключин В. И., Быстрицкий С. А. Гигагерцовый генератор для интегрированной в ПЛИС си-

стемы ФАПЧ // Вестник Воронежского государственного университета. 2011. Т. 7, № 2. С. 130–133.

9. Бормонтон Е. Н., Ключин В. И., Быстрицкий С. А. Стабилизация параметров выходного сигнала в системе ФАПЧ для ПЛИС // Радиолокация, навигация, связь: тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2010. Т. 1. С. 396–401.

10. Михалёв П. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе // Компоненты и технологии. 2006. № 4 (57). 48–53.

КОЩУК Галина Андреевна, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: galina_koshuk@mail.ru

ТИХОНОВ Игорь Анатольевич, инженер-конструктор отдела разработчиков АО «НПО Завод «Волна», г. Омск.

Адрес для переписки: kauk20000007@ro.ru

КОСАРЕВ Борис Андреевич, инженер по специальности «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: BorisK_88@mail.ru

Для цитирования

Кошук Г. А., Тихонов И. А., Косарев Б. А. Оптимизация фазовой автоподстройки частоты синтезатора частот // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 28–32. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-28-32.

Статья поступила в редакцию 18.03.2019 г.

© Г. А. Кошук, И. А. Тихонов, Б. А. Косарев