

РАБОТА № 10. СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ С ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Авторы: Белов Л.А., Прокофьев В.А.

1. Цели работы

1. Изучить устройство синтезатора частот, построенного на основе системы фазовой автоподстройки частоты с частотно-фазовым дискриминатором в цепи управления.
2. Оценить параметры качества выходного сигнала синтезатора.
3. Выявить влияние основных параметров синтезатора на уровень регулярной паразитной фазовой модуляции выходного сигнала.

2. Пояснения к работе

Синтезатор частот представляет собой устройство, формирующее из опорного колебания эталонной частоты f_3 колебания дискретной сетки частот $f_N = Nf_3$, где N – целое значение коэффициента деления в делителе частоты, включённом в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Структурная схема лабораторного макета синтезатора сетки частот на основе системы ФАПЧ с целочисленным делителем частоты и частотно-фазовым детектором в цепи обратной связи показана на рис. 1.

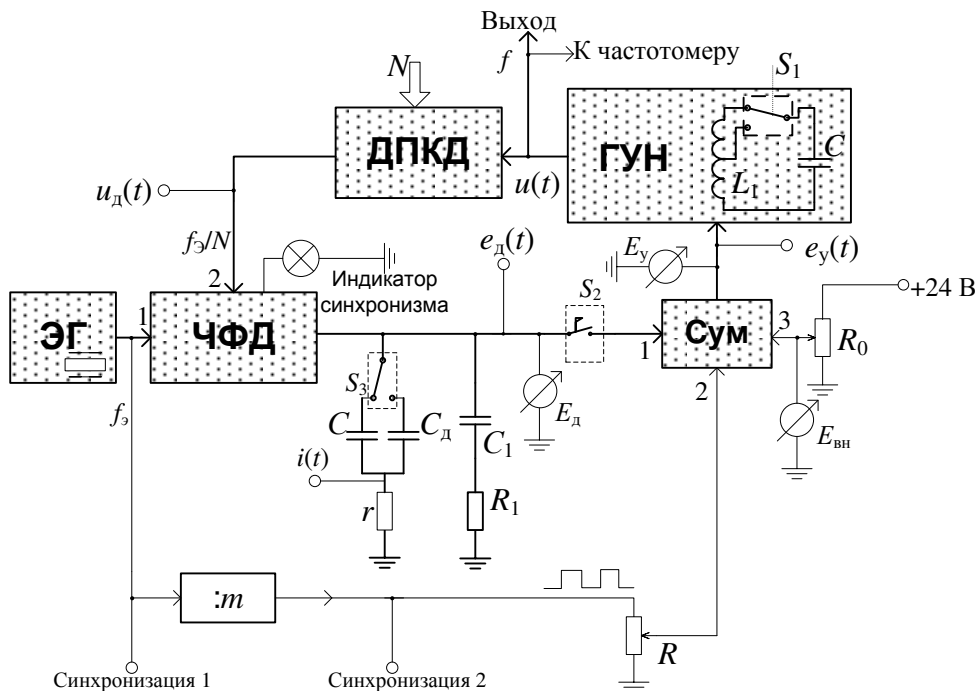


Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда

Основными узлами синтезатора частот (см. рис. 1) являются эталонный генератор ЭГ с кварцевой стабилизацией частоты $f_3 = 1$ кГц и соединённые в кольцо: управляемый напряжением генератор ГУН; делитель частоты ДПКД с фиксированным коэффициентом деления N ; частотно-фазовый детектор ЧФД; цепь обратной связи с накопительным конденсатором C и стабилизирующим (изодромным) звеном C_1R_1 ; сумматор Сум. Выходной сигнал синтезатора $u(t)$ в синхронном режиме имеет среднюю частоту

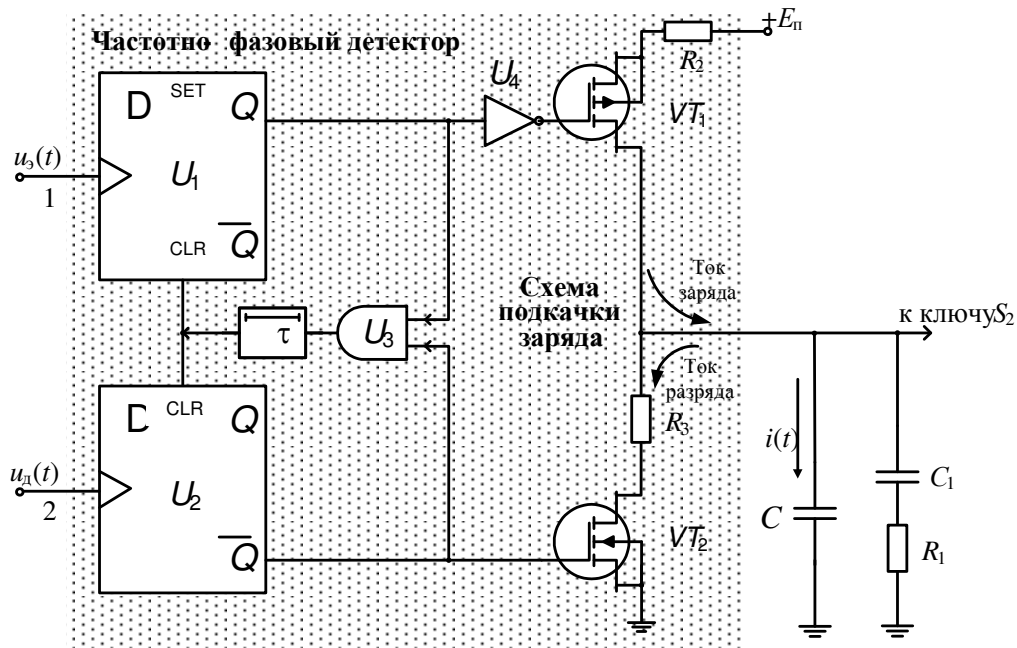
$$f = f_3/N. \quad (1)$$

При этом положение во времени переднего фронта колебания $u_d(t)$ на выходе ДПКД близко к положению переднего фронта эталонного сигнала $u_3(t)$. Это означает, что произошла автоматическая синхронизация частоты и фазы выходного колебания ГУН с сигналом ЭГ. При переключении значения N или при вариации начальной расстройки частоты ГУН f_0 по отношению к установленным ранее значениям, в системе автоподстройки происходит переходный процесс, восстанавливающий фазовую синхронизацию по (1).

В системе ФАПЧ управляемый генератор ГУН является интегратором для фазы выходного сигнала по отношению к вариациям напряжения на выходе ЧФД. Накопительный конденсатор C , обеспечивающий преобразование разности фаз между входами ЧФД в напряжение $e_d(t)$, играет роль второго интегратора в кольце авторегулирования. В результате этого система ФАПЧ с ЧФД обладает свойством астатизма по фазе, то есть способна свести разность фаз на входах ЧФД в процессе установления синхронизма к ничтожно малому значению. Но в этом случае система находится на границе устойчивости, чувствительность фазы выходного сигнала к малым вариациям параметров и к шумам резко возрастает. Для повышения устойчивости и получения заданного уровня её запаса в схему вводят стабилизирующую цепочку («изодромное звено») C_1R_1 .

Частотно-фазовый детектор ЧФД выполняется (рис. 2) на основе D -триггеров U_1 и U_2 , управляемых транзисторных ключей VT_1 и VT_2 , а также схемы управления в виде элемента U_3 «Исключающее ИЛИ» и элемента задержки τ . На входе управления ключом VT_1 включён узел U_4 инвертора логического уровня выходного сигнала триггера U_1 . Схема такого импульсного ЧФД может находиться в одном из трёх состояний. В первом из них ключ VT_1 открыт, ключ VT_2 закрыт, так что через конденсатор C протекает ток заряда положительной полярности $i(t) = E_n/R_2$. В втором состоянии VT_1 закрыт, а VT_2 открыт, так что через конденсатор C протекает ток разряда

противоположной полярности через ключ VT_2 и резистор R_3 . В третьем состоянии оба ключа закрыты, напряжение на конденсаторе может медленно уменьшаться в



результате разряда через цепи утечки и входное сопротивление входа 1 сумматора Сум.

Рис. 2. Принципиальная схема частотно-фазового детектора со схемой подкачки заряда

Элемент задержки на время τ порядка длительности фронта обеспечивает указанную логику переключения (отсутствие состояния с двумя открытыми ключами), если положения фронтов сигналов $u_3(t)$ и $u_д(t)$ на входах ЧФД почти совпадают.

Переход схемы подкачки заряда СПЗ (в англоязычной терминологии Charge of Pump) из одного состояния в другое происходит в зависимости от того, на какой из двух входов ЧФД первым приходит положительный фронт, переводящий соответствующий триггер в состояние «Лог.1». Если в системе ФАПЧ установилось состояние синхронизма, то через конденсатор C протекают короткие импульсы тока заряда $i(t)$ (положительной полярности на рис. 3,а) или тока разряда (отрицательной полярности на рис. 3,б) с частотой $f_3 = 1$ кГц.

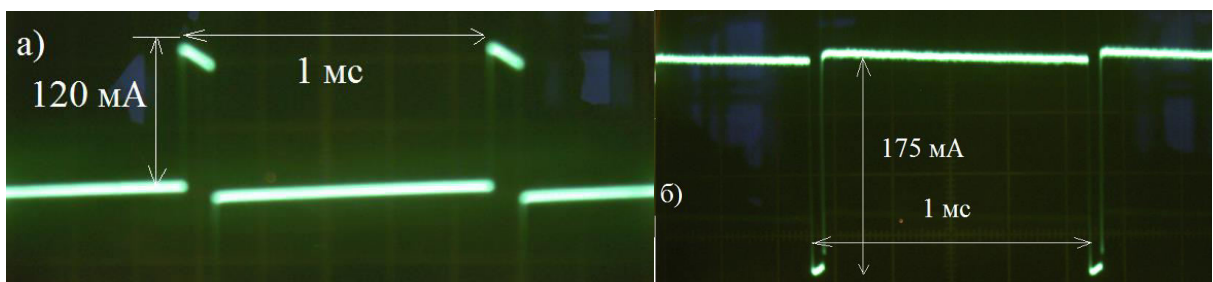


Рис. 3. Осциллограммы импульсов $i(t)$ тока заряда (а) и разряда (б) накопительного конденсатора в режиме синхронизма

Длительность этих импульсов определяется разностью моментов времени между фронтами импульсов от ЭГ и от ДПКД на входах ЧФД. Среднее значение напряжения на конденсаторе $e_d(t)$ в точности компенсирует начальную расстройку частоты сигналов на выходе ДПКД f_0/N относительно частоты эталонного генератора f_3 . Процесс протекания тока заряда или разряда чередуется с интервалом времени, когда оба ключа закрыты и происходит разряд этого конденсатора, что выглядит на осциллограммах рис. 4,а и 4,б соответственно в виде пилообразного изменения напряжения $e_d(t)$ с отрицательным или положительным угловым коэффициентом и незначительным размахом.

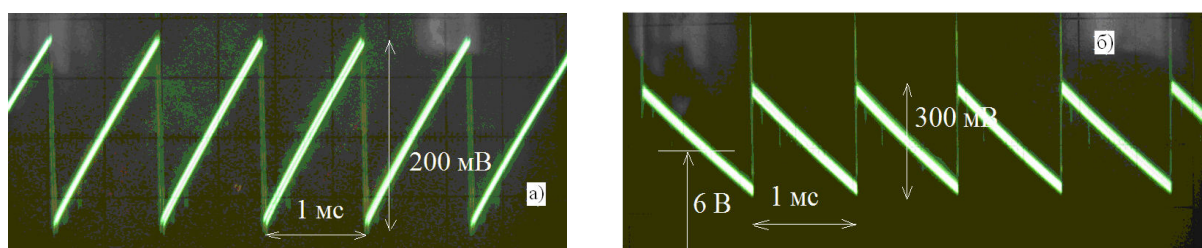


Рис. 4. Осциллограммы изменения напряжения $e_d(t)$ при заряде (а) и разряде (б) накопительного конденсатора в режиме синхронизма

Если частота сигналов на выходе ДПКД f/N больше, чем f_3 , то периодическая подкачка заряда приводит в течение нескольких тактовых интервалов $T_3 = 1/f_3$ к переходному процессу, уменьшающему среднее напряжение на конденсаторе, так что средняя частота ГУН снижается. Если частота сигналов на выходе ДПКД f/N меньше, чем f_3 , то указанные процессы увеличивают среднее напряжение на конденсаторе, так что средняя частота ГУН возрастает. Это означает, что происходит переходный процесс установления синхронного значения частоты. После его окончания происходит процесс уменьшения разности фаз на входах ЧФД до близкого к нулевому значению.

Переходные процессы установления частоты и разности фаз на входах ЧФД носят колебательный характер. При ёмкости накопительного конденсатора $C = 1,2$ мкФ длительность переходного процесса в макете составляет около 60 мс, а размах пилообразных вариаций напряжения $e_d(t)$, показанных на рис. 4 составляет 6 мВ. Уменьшение этой ёмкости до 0,2 мкФ приводит к снижению длительности процесса установления до 6 мс, но сопровождается увеличением размаха вариаций до 20 мВ. Таким образом, при выборе значения C приходится решать компромиссную задачу между уровнем периодических вариаций частоты в установившемся режиме и длительностью переходного процесса.

В системе ФАПЧ с ЧФД может установиться нежелательный для синтезатора асинхронный режим биений. Причиной этого может быть выход по характеристикам ГУН и ЧФД за пределы интервалов функционирования, а также неустойчивый характер процессов установления фазовой синхронизации.

На рис. 5 показана сплошной линией идеализированная статическая модуляционная характеристика ГУН $f(E_y)$ при разомкнутой цепи обратной связи.

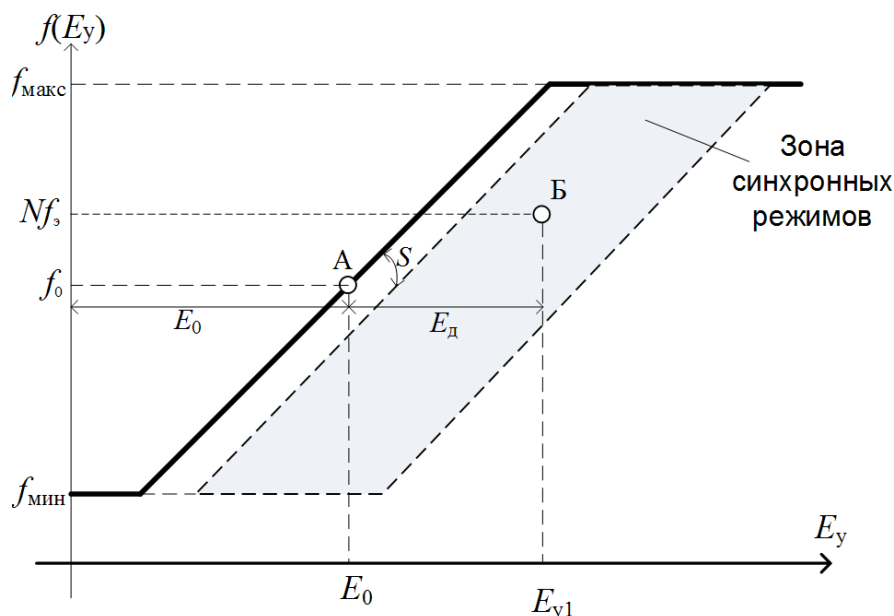


Рис. 5. Область значений частоты и начального напряжения в рабочей точке ГУН, в пределах которых возможно достижение синхронного режима

Модуляционная характеристика свободного ГУН на рабочем участке имеет крутизну управления S с размерностью [Гц/В], а за его пределами диапазон изменения частоты ограничен минимальным f_{\min} и максимальным f_{\max} значениями. При внешнем напряжении E_0 , которое устанавливается по схеме рис. 1 на входе 3 сумматора Сум потенциометром R_0 , в свободном ГУН генерируется колебание с начальной частотой f_0 (точка А на рис. 5).

После замыкания выключателя S_2 на схеме рис. 1 и установления режима синхронизма, на входе 1 сумматора действует напряжение E_d от ЧФД такой величины, что под влиянием суммы

$$E_y = E_0 + E_d \quad (2)$$

частота колебаний в ГУН имеет по (1) значение $f = N \cdot f_3$ в пределах зоны синхронных режимов, выделенных на рис. 5. Выходное напряжение ЧФД E_d ограничено снизу (см. схему рис. 2) значением E_{\min} (суммой напряжений на резисторе R_3 и транзисторе открытого ключа VT_2), а также сверху значением E_{\max} (разностью напряжения $E_{\text{п}}$ питания СПЗ и падений напряжения на резисторе R_2 и сопротивлении открытого ключа

VT_1). Таким образом, зона синхронных режимов на рис. 5 ограничена значениями E_{\min} , E_{\max} , f_{\min} , f_{\max} . Вне этой зоны в синтезаторе частот устанавливается режим биений или происходит срыв колебаний в ГУН.

В зоне потенциально синхронных режимов может произойти самовозбуждение, если не выполнены условия устойчивости в системе ФАПЧ.

Осциллограмма выходного сигнала $u(t)$ лабораторного синтезатора частот в режиме синхронизма для выходной частоты 1506 кГц при $f_s = 1$ кГц и $N = 1506$ представлена на рис. 6,а, его амплитудный спектр мощности – на рис. 6,б.

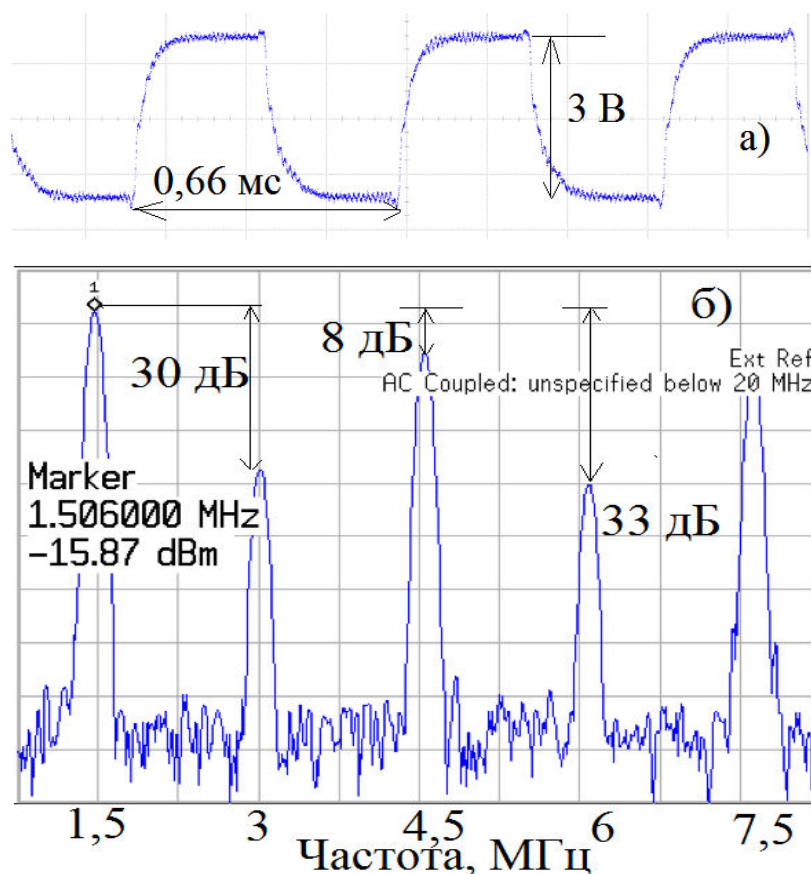


Рис. 6. Осциллограмма (а) и амплитудный спектр (б) выходного сигнала в синхронном режиме при $f_s = 1$ кГц и $N = 1506$

Трапецеидальная форма колебания $u(t)$ на рис. 6,а соответствует по спектрограмме рис. 6,б наличию, кроме составляющей с несущей частотой около 1,5 МГц высших гармоник на частотах 3,0 МГц, 4,5 МГц, 6,0 МГц, 7,5 МГц. Уровень высших гармоник с чётными номерами значительно ниже, чем с соседними нечётными. Это объясняется высоким уровнем центральной симметрии осциллограммы $u(t)$. Для более детального рассмотрения формы спектра колебания вблизи несущей частоты на рис. 7 представлены спектрограммы колебания вида рис. 6,а при разных значениях накопительной ёмкости C . При малом значении накопительной ёмкости (рис. 7,а) заметны спектральные составляющие с отстройкой от несущей, кратной частоте

сравнения в ЧФД $f_3 = 1$ кГц. Если эта ёмкость увеличена до 1,2 мкФ, то в спектре сигнала на рис. 7,б такие компоненты имеют значительно более низкий уровень.

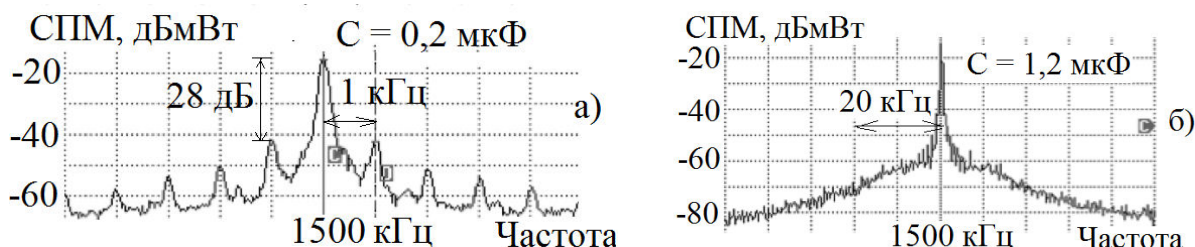


Рис. 7. Амплитудный спектр выходного сигнала в синхронном режиме при $f_3 = 1$ кГц и $N = 1500$ при значениях ёмкости накопительного конденсатора 0,2 мкФ (а) и 1,2 мкФ (б)

На рис. 8 показан вид односторонней спектральной плотности мощности фазового шума (СПМ ФШ) при изменении отстройки от несущей частоты.

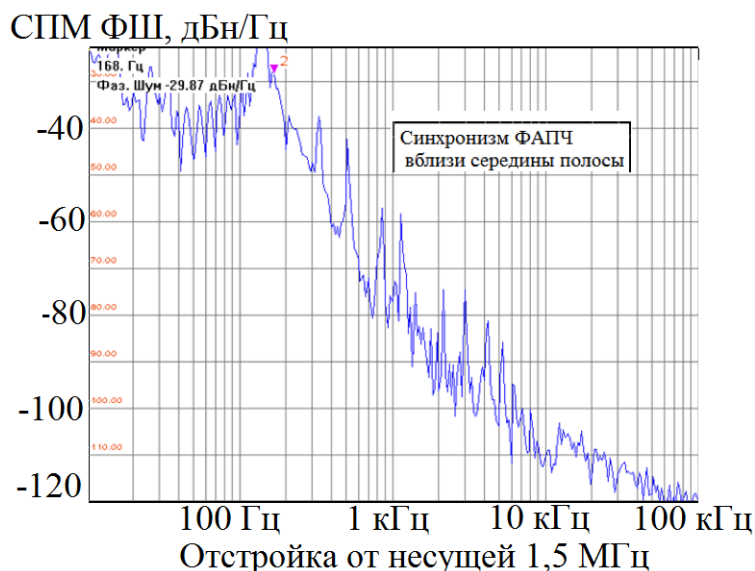


Рис. 8. Спектральная плотности мощности фазового шума в зависимости от отстройки от несущей в режиме синхронизма

Рассмотрение рис. 8 показывает, что в пределах полосы пропускания системы ФАПЧ (при отстройке от несущей менее 100 Гц) собственные фазовые шумы ГУН существенно подавляются. На границе указанной полосы (при отстройке около 104 Гц) имеется заметный подъём амплитудно-частотной характеристики, что указывает на приближение к границе устойчивости системы ФАПЧ. При дальнейшем увеличении отстройки спектральная плотность мощности фазового шума незначительно отличается от СПМ ФШ свободного ГУН.

3. Лабораторный стенд

Структурная схема лабораторного стенда показана выше на рис. 1. Подстраиваемый генератор ГУН выполнен по схеме индуктивной трёхточки на полевом транзисторе КП303Г. Верхний или нижний частотные поддиапазоны коммутируются переключением контурных индуктивностей. Электронное управление частотой производится встречно включёнными варикапами. При помощи потенциометра R_0 на входе 3 сумматора Сум изменяется значение внешнего напряжения $E_{вн}$, определяющего положение рабочей точки на модуляционной характеристике ГУН при разомкнутой цепи обратной связи. Начальная частота генерации f_0 принимает значения для нижнего поддиапазона от 0,9 до 2,5 МГц, а для верхнего от 1,8 до 4,8 МГц. Значение частоты измеряется встроенным в лабораторный стенд цифровым частотомером, значение $E_{вн}$ измеряется стрелочным вольтметром на универсальном стенде питания.

Декадными переключателями коэффициент N деления частоты в ДПКД изменяется в пределах от 1 до 9999. Частота эталонного генератора стабилизирована кварцевым резонатором и составляет $f_3 = 1$ кГц. Делитель частоты $\div m$ служит для периодического переключения управляющего напряжения, что вызывает переходный процесс в системе авторегулирования. На выходе этого делителя с коэффициентом деления $m = 400$ формируется модулирующий сигнал формы «меандр» с уровнями 0 В и +5 В и с частотой переключения уровней $F = f_3/400 = 2,5$ Гц. Размах модулирующего сигнала $e_n(t)$ на втором входе сумматора устанавливается потенциометром R .

Светодиодный Индикатор синхронизма горит, если напряжение $e_d(t)$ изменяется в асинхронном режиме переходного процесса или биений. При наступлении синхронного режима этот светодиод гаснет.

Форму тока подкачки заряда $i(t)$ через конденсатор C можно наблюдать при помощи осциллографа, подключаемого к контрольной точке на резисторе r с сопротивлением 10 Ом. Эти импульсы протекают на интервалах времени между передними фронтами сигналов на входах ЧФД, поэтому для их наблюдения надо установить синхронизацию от сигнала $u_3(t)$ (клемма Синхронизация 1).

Форма характеристики ЧФД $e_d(\varphi)$ контролируется следующим образом. В крайнем левом положении движка R ключом $S2$ размыкается цепь обратной связи, а «открытый» (пропускающий постоянный ток) вход усилителя вертикального отклонения осциллографа подключается к клемме $e_d(t)$. При фиксированном значении коэффициента деления N подбирается такое значение напряжения $E_{вн}$, чтобы частота сигнала $e_d(t)$ на выходе ДПКД f/N была близка к f_3 . Если $f/N < f_3$, то разность фаз

равномерно увеличивается $\varphi(t) \approx (f/N - f_3)t$, а ординаты на экране характеризуют форму характеристики при увеличении разности фаз ЧФД. Примерный вид осциллограмм $e_d(t)$ показан на рис. 9.

На графиках рис. 9 пилообразные изменения $e_d(t)$ с размахом около 1 В определяются процессами подкачки заряда с частотой сравнения в ЧФД $f_3 = 1$ кГц. Если $f/N < f_3$, так что разность фаз сигналов на входах ЧФД увеличивается (рис.9,а), то последовательные циклы подкачки заряда приводят к увеличению среднего напряжения на ёмкости, а при напряжении около 10 В наступает насыщение из-за влияния ограниченного напряжения питания +12 В.

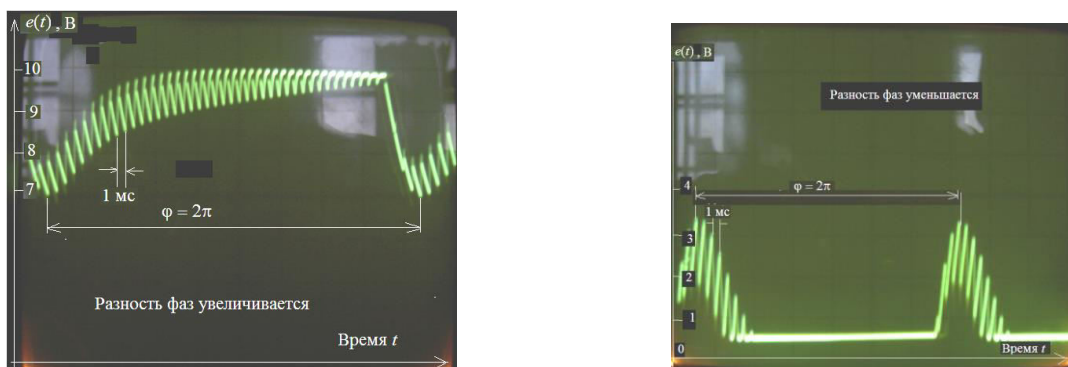


Рис. 9. Вид $e_d(t)$ для разомкнутой цепи обратной связи при изучении характеристики ЧФД

Если теперь установить $f/N > f_3$, то разность фаз отрицательна и равномерно увеличивается по модулю $\varphi(t) \approx -(f/N - f_3)t$. Последовательные циклы разряда и кратковременного заряда конденсатора C приводят к снижению среднего напряжения на ёмкости, а при напряжении около 0,5 В наступает насыщение из-за влияния падения напряжения на резисторе R_2 и ключе VT_2 .

С помощью ключа $S3$ величина накопительной ёмкости может быть установлена либо 0,2 мкФ, либо 1,2 мкФ. Сумматор Сум, выполнен на операционных усилителях типа К140УД20А. Входная ёмкость сумматора составляет 100 пФ. Внешние стрелочные вольтметры, расположенные на универсальном стенде питания, позволяют измерять средние значения напряжений на входе управления ГУН E_y , на накопительной ёмкости E_d и на втором входе сумматора $E_{вн}$. Потенциометром R_0 устанавливается величина $E_{вн}$ на втором входе сумматора.

Литература

1. Генерирование колебаний и формирования радиосигналов: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Кулешова и Н.Н.Удалова –М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 414 с.; (для изучения пп. 9.5, 9.6, стр. 271-282).

2. Устройства генерирования и формирования радиосигналов: Учебник для вузов / Под ред. Г. М. Уткина, В. Н. Кулешова и М. В. Благовещенского. –М.: Радио и связь, 1994. -416 с.; (для изучения пп. 21.4, 21.5, стр. 355-364).

3. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов. –М., Изд. центр «Академия», 2005. -224 с.

4. ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке

1. Изобразите функциональную схему синтезатора сетки частот без цепей ручного управления и переключений, отметив контрольные точки $e_d(t)$, $e_y(t)$, $u_3(t)$, $u_r(t)$, $u(t)$, $i(t)$.
2. Изобразите ожидаемые зависимости тока $i(t)$ и напряжения на выходе ЧФД $e_d(t)$ при работе замкнутой системы ФАПЧ в режиме синхронизма.
3. Оцените уровень паразитной девиации частоты в выходном сигнале синтезатора по отношению к уровню несущей, если размах рабочего участка характеристики ЧФД составляет 10 В, модуляционная характеристика ГУН линейна с крутизной 0,2 МГц/В, а размах пульсаций управляющего напряжения составляет 100 мВ.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Снимите контрольные *регулируемые характеристики* синтезатора в синхронном режиме в нижнем поддиапазоне. Для этого разомкните цепь обратной связи включателем S_2 , установите переключатель S_1 в положение, соответствующее нижнему поддиапазону, установите движок потенциометра R в крайнее левое положение, устраняющее влияние напряжения делителя частоты m . Снимите по точкам модуляционную характеристику ГУН $f(E_y)$, изменяя напряжение $E_{вн}$ от 0 до +24 В. По полученным данным постройте на **рис. 1 отчёта** модуляционную характеристику ГУН. Установите переключатель S_1 в положение, соответствующее верхнему поддиапазону, снимите характеристику $f(E_y)$ и постройте её график на **рис. 2 отчёта**. Рассчитайте значения коэффициента перекрытия ГУН по частоте $k_f = f_{\max}/f_{\min}$ для каждого поддиапазона.
2. Оцените вид *характеристики ЧФД* $e_d(\varphi)$ в режимах возрастания и уменьшения во времени разности фаз. Для этого в нижнем поддиапазоне работы ГУН установите $N = 1500$, подключите открытый вход вертикального отклонения $Y1$ осциллографа к точке $e_d(t)$ и подберите значение $E_{вн}$ так, чтобы получить график вида рис. 9,а в зоне увеличения разности фаз. Зарисуйте полученную осциллограмму. Измените $E_{вн}$ так, чтобы получить график вида рис. 9,б в зоне уменьшения разности фаз во времени и зарисуйте полученную осциллограмму.

3. Найдите **множество параметров** N и $E_{\text{вн}}$ синтезатора, при которых сохраняется синхронный режим. Для этого замкните ключом S_2 цепь управления системы ФАПЧ, установите S_1 в положение нижнего поддиапазона, установите $E_{\text{вн}} = +15$ В, $N = 1600$. Измерьте и запишите в отчёт значение наименьшего дискретного шага синтезируемой сетки частот. Измерьте при $E_{\text{вн}} = +15$ В наибольшее и наименьшее значения коэффициента деления N , при которых сохраняется синхронный режим, контролируя его по состоянию светодиода индикатора синхронизма и по форме напряжения биений $e_d(t)$. Нанесите полученные значения N и f на график модуляционной характеристики рис. 1. Повторите такие измерения для $E_{\text{вн}} = +20$ В и нанесите значения N и f на рис. 1. Переключите ГУН для работы в верхнем поддиапазоне и измерьте предельные значения $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{макс}}$ для $E_{\text{вн}} = +14$ В и $E_{\text{вн}} = +20$ В и нанесите полученные значения N и f на модуляционные характеристики по рис. 2. Рассчитайте и запишите в отчёт количество дискретных стабильных частот сетки при вариациях N для каждого поддиапазона.

4. Установите для нижнего поддиапазона $N = 1200$ и изменяйте $E_{\text{вн}}$ в синхронном режиме. **Убедитесь**, что среднее напряжение E_y и измененное значение частоты не изменяются, а вариации $E_{\text{вн}}$ автоматически компенсируются изменениями E_d с противоположным знаком.

5. **Измерьте пределы** изменения напряжения $E_{\text{вн}}$, при которых сохраняется синхронный режим, и нанесите полученные точки на рис. 1. Повторите такие измерения для $N = 2000$ и нанесите полученные точки на рис. 1. Переключите ГУН для работы в верхнем поддиапазоне, проведите такие измерения для $N = 2500$ и $N = 4000$, нанесите полученные значения на рис. 2. Постройте на графиках рис. 1 и рис. 2 огибающие полученных областей синхронного режима и убедитесь, что их границы определяются, главным образом, достижением напряжения на выходе ИЧФД значений $E_{d \text{ мин}} = +2$ В и $E_{d \text{ макс}} = +10$ В.

6. Изучите **форму импульсов тока** заряда и разряда накопительного конденсатора $i(t)$. Для этого установите нижний поддиапазон работы ГУН; $N = 1500$; подключите «закрытый» (без постоянной составляющей) вход усилителя вертикального отклонения осциллографа Y1 к клемме $i(t)$; вход Y2 к точке $e_3(t)$; установите значение чувствительности по каналу Y1 50 мВ/дел, по каналу Y2 – 0,5 В/дел, скорость развёртки 0,1 мс/дел с множителем $\times 0,2$; синхронизацию осциллографа установить от выхода «Синхронизация 1». Подбирая величину $E_{\text{вн}}$, получите режим с положительными импульсами, характерными для открывания ключа VT_1 зарядного тока и зарисуйте полученную осциллограмму. Изменив $E_{\text{вн}}$, получите режим с отрицательными импульсами, характерными для открывания ключа VT_2 тока разряда и зарисуйте полученную осциллограмму.

7. Измерьте *длительность переходного процесса*. Для этого: в нижнем поддиапазоне ГУН установите $N = 1500$; $E_{\text{вн}} = +15$ В; переведите движок потенциометра R в правое положение; подключите вход осциллографа $Y1$ к точке $e_y(t)$, открытый вход $Y2$ к точке $e_d(t)$; установите чувствительность по каналам $Y1$ и $Y2$ по $0,5$ В/дел, а скорость развёртки 5 мс/дел с множителем $\times 1$. Синхронизация осциллографа производится от выхода «Синхронизация 2». Убедитесь, что процесс установления имеет колебательный характер. Зарисуйте графики $e_d(t)$ и $e_y(t)$, объясните их различия. Измерьте по калиброванной развёртке осциллографа и запишите в отчёт длительность процесса установления для двух значений накопительной ёмкости $0,2$ мкФ и $1,2$ мкФ, зарисуйте вид этих осциллограмм.

8. Проведите измерение *паразитных вариаций* управляющего напряжения на входе ГУН в синхронном режиме. Для этого: установите потенциометром R нулевой размах модулирующего напряжения; переключите вход вертикального отклонения осциллографа $Y1$, подключённого к контрольной точке $e_y(t)$, в закрытое состояние; установите по каналу $Y1$ чувствительность 20 мВ/дел при скорости развёртки $0,1$ мс/дел с множителем $\times 1$ и подберите $E_{\text{вн}}$ для получения наименьшего размера паразитных вариаций управляющего напряжения. Зарисуйте в отчёт характерные осциллограммы этого процесса в синхронном режиме ФАПЧ при разных $E_{\text{вн}}$. Измерьте по калибровке отклонения луча размах паразитных вариаций управляющего напряжения и пересчитайте его в вариации мгновенной частоты, используя значение крутизны управления, измеренной в п. 2.

5. Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: а) результаты домашней подготовки; б) рис.1 для нижнего поддиапазона и рис. 2 для верхнего поддиапазона с нанесёнными модуляционными характеристиками и областями синхронной работы; в) осциллограммы $e_d(t)$ по п. 2, $i(t)$ по п. 6 и $e_y(t)$ по п. 7; г) результаты расчёта коэффициента перекрытия по частоте k_f , измерений шага сетки, длительности переходного процесса и паразитных вариаций частоты в синхронном режиме; д) выводы о влиянии параметров ЧФД, коэффициента деления ДПКД, напряжения $E_{\text{вн}}$ и величины накопительной ёмкости на область синхронной работы, на длительность переходных процессов и на уровень паразитных вариаций частоты в синхронном режиме.

6. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные технические требования к синтезаторам сетки частот.
2. Изобразите функциональную схему непрямого синтезатора частот с ФАПЧ.

3. От каких параметров схемы синтезатора зависит время установления нового значения частоты на входе ЧФД после переключения кода N ?
4. Какое влияние на характеристики синтезатора оказывают параметры ЧФД и величина накопительной ёмкости?
5. Какое влияние оказывает нелинейность модуляционной характеристики ГУН?
6. От каких параметров зависит длительность переходного процесса?
7. Чем определяется период следования и наибольший уровень паразитных вариаций частоты синтезатора в синхронном режиме? При каких сочетаниях параметров уровень паразитных вариаций частоты наименьший?