

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное бюджетное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

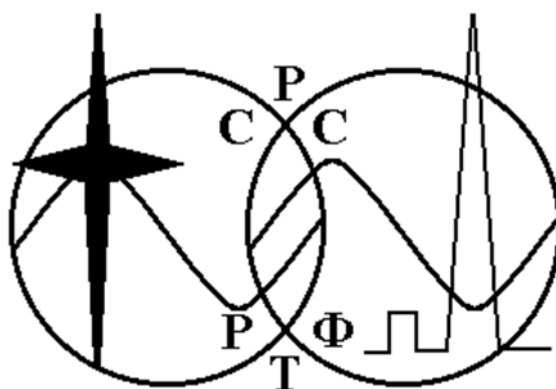
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра средств радиосвязи**

**МЕЛИХОВ С.В., НЕНАХОВ А.В.**

**ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ФАПЧ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ  
СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в компьютерной среде Design Center (PSpice) по дисциплинам «Радиовещание, связь и электроакустика», «Радиовещание и электроакустика», «Системы радиовещания» для студентов радиотехнических специальностей



Томск – 2012

Мелихов С.В., Ненахов А.В. Импульсная система ФАПЧ для цифровых систем связи. Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в компьютерной среде Design Center (PSpice) по дисциплинам «Радиовещание, связь и электроакустика», «Радиовещание и электроакустика», «Системы радиовещания» для студентов радиотехнических специальностей. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2012. – 15 с.

Приводятся краткие теоретические сведения и аналитические выражения, необходимые для исследования параметров импульсной системы ФАПЧ. Представлена методика проведения экспериментального исследования на основе использования компьютерной среды Design Center (PSpice).

© Мелихов С.В., Ненахов А.В. 2012

© Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники, 2012

### Цель работы:

исследование основных параметров импульсной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), применяемой в цифровых телекоммуникациях связи;

приобретение навыков работы с пакетом программ автоматизированного проектирования Design Center (Pspice).

## 1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**1.1 Состав системы ФАПЧ, принцип действия, параметры.** Импульсная система ФАПЧ применяется в аппаратуре асинхронного группообразования и служит восстановителем первичной скорости группового (компонентного) цифрового сигнала. Последний входит в состав агрегатного сигнала, состоящего (в соответствии с иерархией цифровых сигналов) из четырех компонентных сигналов. Восстановление производится путем записи цифрового потока в запоминающее устройство и считывания его с частотой, равной средней частоте записи, вырабатываемой устройством ФАПЧ.

Система ФАПЧ является системой автоматического регулирования. Как известно из теории автоматического управления ФАПЧ состоит из следующих устройств:

- а) фазового детектора (ФД);
- б) фильтра нижних частот (ФНЧ);
- в) управляющего элемента (УЭ);
- г) генератора, управляемого напряжением (ГУН).

ФАПЧ выполнена по структурной схеме, изображенной на рисунке 1.

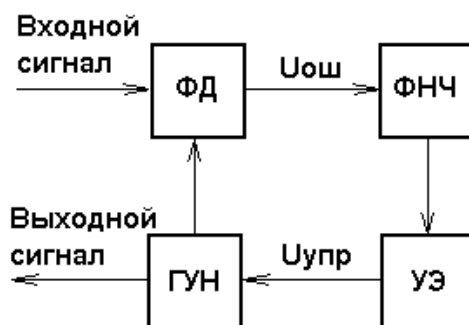


Рисунок 1 – Структурная схема системы ФАПЧ

Данная структурная схема описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\tau \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} + \Omega_y \left( \frac{\varphi}{\pi} - 1 \right) = \Omega_n \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi,$$

где  $\Omega_n = (\omega_{ex} - \omega_{oz})$  – начальная расстройка, определяемая частотой ГУН ( $\omega_{oz}$ ) при разомкнутой цепи управления и частотой входного сигнала ( $\omega_{ex}$ );

$\Omega_y$  – полоса удержания системы;

$\tau$  – постоянная времени ФНЧ.

В исследуемом устройстве в качестве дискриминатора, как различителя фазовой ошибки между входным сигналом и сигналом ГУН, используется ФД.

ФД вырабатывает напряжение, пропорциональное величине рассогласования входных величин.

ФНЧ выделяет медленно меняющиеся во времени (например, из-за нестабильности частоты ГУН) составляющие сигнала ошибки. Сигнал ошибки с ФНЧ поступает на УЭ. При этом частота гетеродина изменяется на величину

$$\omega_{yэ} = S_{yэ} U_{вых} ,$$

где  $S_{yэ}$  – крутизна характеристики УЭ;

$U_{вых}$  – управляющее мгновенное напряжение на выходе ФД.

Заметим, что направление изменения частоты зависит от полярности управляющего напряжения.

Таким образом, петля обратной связи системы замыкается на ФД, подводя к нему соответственно изменяющуюся частоту ГУН.

При расхождении фаз (вследствие несовпадения частот) входного сигнала и сигнала ГУН, ФД вырабатывает напряжение ошибки, которое (после фильтрации и усиления в петле ФАПЧ) воздействует на частоту ГУН. В результате его частота устанавливается равной частоте входного сигнала. Остается лишь некоторая фазовая ошибка, зависящая от начальной расстройки частоты входного сигнала относительно средней частоты ГУН при разомкнутой петле ФАПЧ:

$$\varphi_{о\ уст} = \pi(1 + \gamma_n) , \quad (1)$$

где  $\gamma_n = 2\Omega_n / \Omega_y$  – относительная начальная расстройка.

*Полоса удержания* системы ФАПЧ определяется максимально допустимой областью расстроек ГУН, в которой обеспечивается эффективная подстройка частоты при любых начальных условиях.

*Полоса захвата* системы ФАПЧ определяется граничной частотой ( $f_{zp}$ ) ФНЧ.

При  $f_{zp} \rightarrow \infty$  полоса захвата равна полосе удержания.

Полоса захвата в реальных системах всегда меньше полосы удержания, так как ФНЧ имеет конечную полосу пропускания. Высокочастотные составляющие сигнала ошибки не поступают на вход УЭ, что затрудняет процесс захвата. Кроме того, ФНЧ влияет и на время переходного процесса. При увеличении постоянной времени ФНЧ увеличивается время переходного процесса, а сам процесс становится колебательным. В рассматриваемой системе ФАПЧ постоянная времени ФНЧ выбрана так, чтобы не затруднять просмотр графиков напряжений на выходе ФД в программе Probe.

Если разность частот входного сигнала и сигнала ГУН превышает величину полосы захвата, то система ФАПЧ находится в режиме биений. При этом на выходе ФД наблюдаются периодические изменения напряжения ошибки с частотой биений. Частота биений определяется тем, насколько величина разности частот  $(\omega_{вх} - \omega_{ог}) = \Omega_n$  отличается от величины полосы захвата. Для системы первого порядка (т.е. при коэффициенте передачи ФНЧ  $K(p)=1$ ) частота биений определяется выражением:

$$\Omega = \frac{\Omega_y \operatorname{sign}(\gamma_n)}{\ln \left( \frac{\gamma_n + 1}{\gamma_n - 1} \right)}. \quad (2)$$

Если  $\Omega_n$  равна полосе захвата, то частота биений стремится к нулю. В системе ФАПЧ наступает захват и удержание, частота ГУН становится равной частоте входного сигнала, на выходе ФД устанавливается постоянное напряжение, соответствующее остаточной разности фаз.

Если частота входного сигнала, подводимого к системе ФАПЧ, изменяется в соответствии с законом модуляции, то частота ГУН будет отслеживать эти изменения. Управляющее напряжение при этом (в случае линейной характеристики УЭ) будет соответствовать закону модуляции сигнала. Это напряжение и используется как выходное, соответствующее закону модуляции.

Срыв синхронизации частот в системы ФАПЧ может произойти, например, из-за нехватки пределов регулирования УЭ. При этом мгновенная разность частот может превысить пределы допустимого регулирования частоты ГУН и система перейдет в режим биений.

*Время переходного процесса системы ФАПЧ.* Принято считать, что для систем ФАПЧ рассматриваемого типа переходный процесс можно считать законченным, если установившееся значение разности фаз не превосходит  $\pm 0,02 \text{ рад}$ .

Максимальное время переходного процесса системы ФАПЧ первого порядка можно рассчитать по формуле:

$$t_{n. \text{ макс}} = \frac{\pi}{\Omega_y} \ln [50 \pi (1 + \gamma_n)]. \quad (3)$$

Система регулирования называется *астатической* по отношению к данному воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому постоянному значению, ошибка стремится к нулю независимо от величины воздействия.

При постоянных задающем и возмущающем воздействиях система ФАПЧ находится в состоянии устойчивого равновесия лишь при постоянстве управляющего воздействия. В том случае, если управляющее воздействие пропорционально вели-

чине сигнала на выходе датчика рассогласования (на выходе ФД), равновесие в системе возможно лишь при постоянстве напряжения, вырабатываемого ФД. Если это напряжение не постоянно, то происходит управление частотой ГУН (т.е. система не находится в устойчивом состоянии). Постоянное напряжение на выходе ФД будет лишь при неизменной разности фаз сравниваемых напряжений. Последнее осуществимо только при равенстве частот двух колебаний: в режиме удержания частота ГУН всегда равна эталонной частоте. Следовательно, *система ФАПЧ является системой астатической по отношению к изменениям частоты.*

**1.2 Фазовый детектор системы ФАПЧ.** ФД используется в приемной части аппаратуры группообразования цифровых сигналов для определения текущего значения временного интервала между моментами записи и считывания информационных символов.

На ФД подаются входная импульсная последовательность с изменяющейся частотой (фазой) следования импульсов и опорная последовательность импульсов ГУН.

Входная импульсная последовательность управляет записью информационных символов в запоминающее устройство приемника цифровой системы. С помощью опорной импульсной последовательности производится считывание информации из запоминающего устройства.

Выходным сигналом ФД является напряжение, изменяющееся пропорционально разности фаз между входными сигналами.

Принципиальная схема ФД, состоящего из триггера и ФНЧ, изображена на рисунке 2.

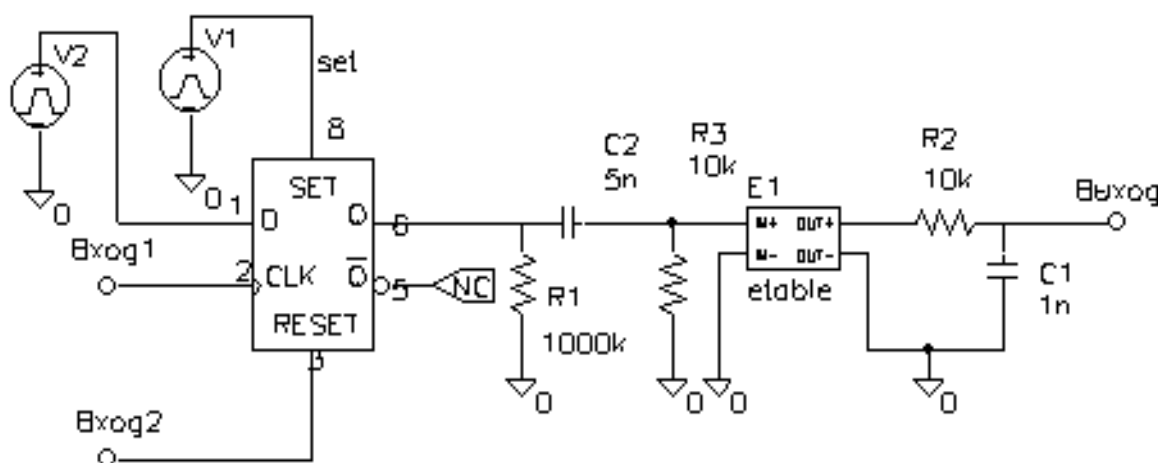


Рисунок 2 - Принципиальная схема ФД

Импульсные последовательности записи и считывания подаются на отдельные входы триггера. На выходе триггера скважность сигнала характеризует взаимное положение импульсов записи и считывания. Цепь C2,R3 предназначена для уст-

ранения постоянной составляющей выходного напряжения триггера. Это необходимо для того, чтобы напряжение на выходе ФД было или отрицательным, или положительным (в зависимости от знака ошибки). С выхода триггера сигнал подается на вход ФНЧ (R2,C1). Знак и величина выходного напряжения ФНЧ определяются разностью длительностей положительных и отрицательных импульсов с выхода триггера.

Если временной интервал между моментами записи и считывания равен требуемому значению, скважность сигнала на выходе триггера равна двум, а напряжение на выходе ФНЧ равно нулю. Если временной интервал между моментами записи и считывания отклоняется от требуемого значения, скважность сигнала на выходе триггера уменьшается или увеличивается (в зависимости от знака временного интервала), и на выходе ФНЧ имеется сигнал, характеризующий величину и знак этого отклонения. Дискриминационная характеристика ФД имеет пилообразную форму. На рисунке 3 и рисунке 4 приведены эпюры напряжений в узлах схемы ФД при положительном и отрицательном напряжениях на его выходе.

Вырабатываемое ФД управляющее напряжение не зависит от величины входной импульсной последовательности, а определяется только частотой ее следования. Это является следствием того, что триггер в схеме ФД имеет только два дискретных состояния.

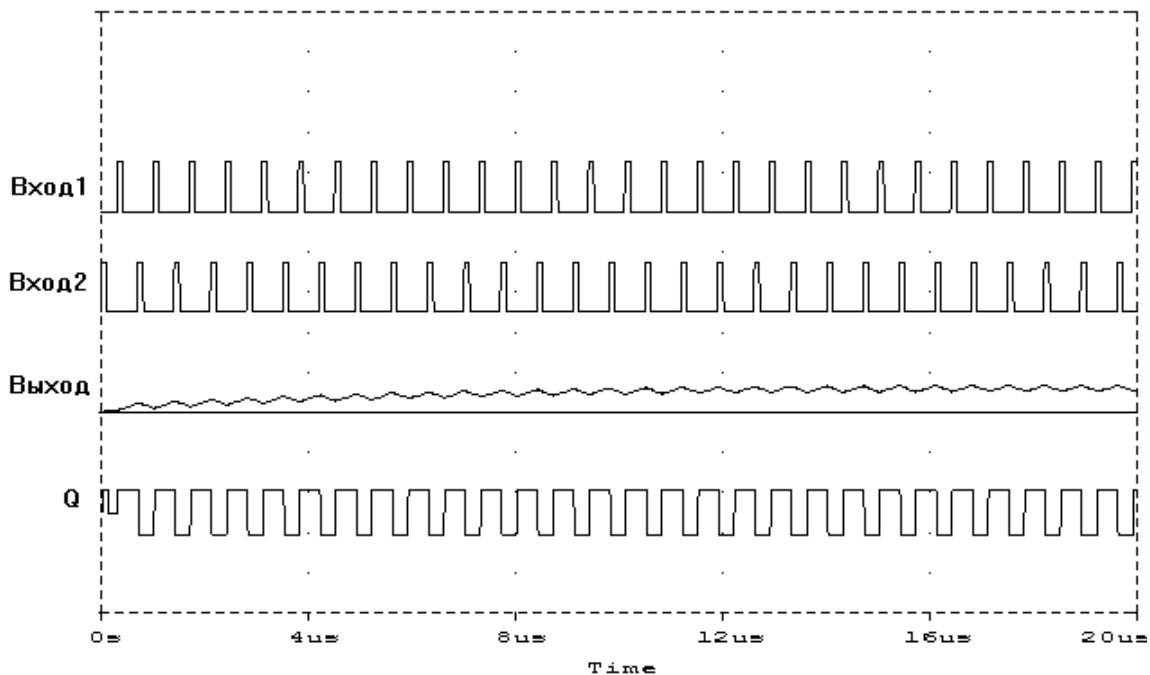


Рисунок 3 - Эпюры напряжений в узлах схемы ФД при положительном напряжении на выходе

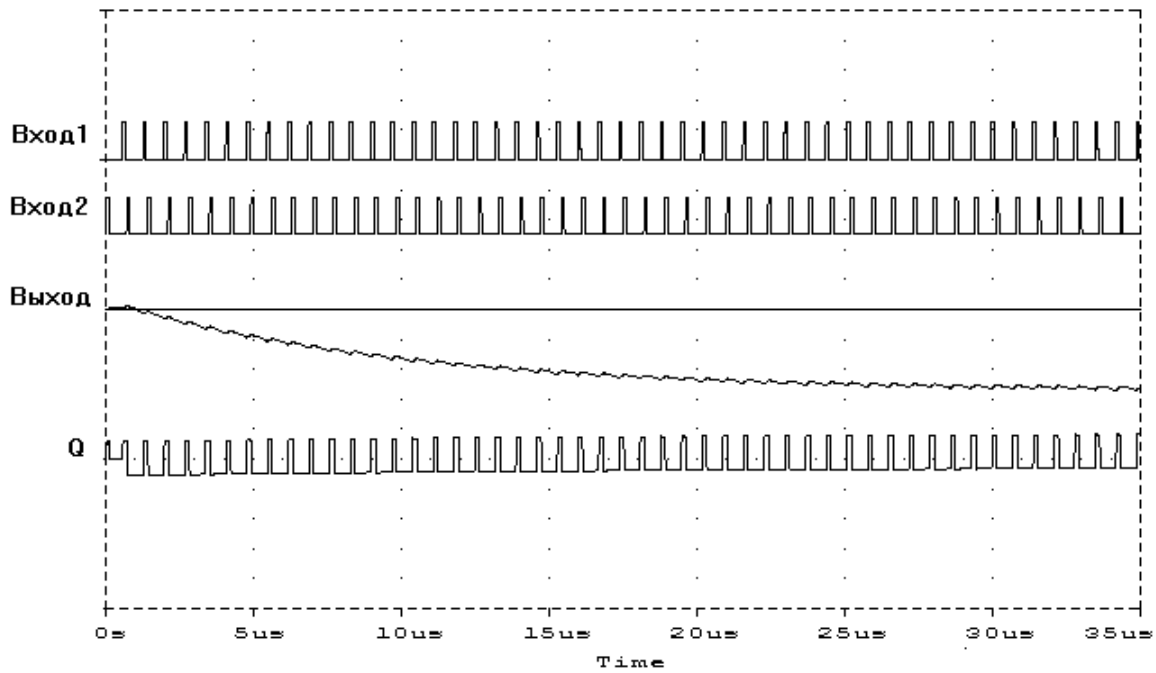


Рисунок 4 - Эпюры напряжений в узлах схемы ФД при отрицательном напряжении на выходе

**1.3 ГУН системы ФАПЧ.** Автогенератор ГУН выполнен на транзисторе Q 1 по схеме емкостной трехточки (рисунок 5) [4].

Управляющим сигналом ГУН является напряжение с выхода ФНЧ. Это напряжение поступает на УЭ, которым является варикап, включенный в контур автогенератора.

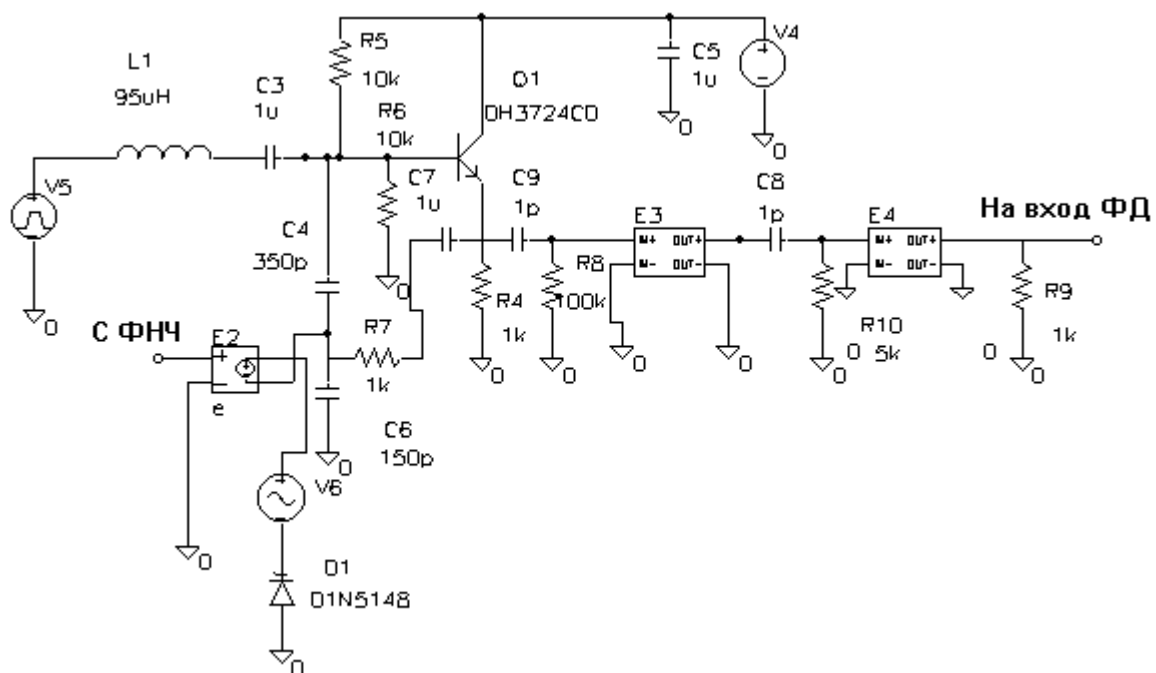


Рисунок 5 - Принципиальная схема ГУН



Контур автогенератора образован индуктивностью  $L1$ , емкостями  $C4$ ,  $C6$ , а также емкостью варикапа, величина которой определяется напряжением смещения источника  $V6$ . Средняя частота ГУН при разомкнутой петле обратной связи  $f_{cp} = 1,41 \text{ МГц}$ .

Смещение на варикапе задается управляемым источником напряжения  $E2$ , на вход которого подается сигнал с выхода ФНЧ.

Элементы схемы  $E3$ ,  $E4$  являются соответственно ограничителем и преобразователем. Ограничитель преобразует синусоидальное напряжение ГУН в импульсный сигнал со скважностью два. Преобразователь формирует импульсную последовательность, имеющую скважность большую, чем два. Это необходимо для надежной работы триггера ФД.

## **2 ОПИСАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ**

**2.1 Основные характеристики среды Design Center.** Основу среды системы составляет программа PSpice, которая является наиболее известной модификацией программы схемотехнического моделирования SPICE (Simulation program with Integrated Circuit Emphasis, разработана в начале 70-х годов в Калифорнийском университете).

Система Design Center работает последовательно: графический ввод принципиальных схем (программа Schematics); проверка на правильность соединения; создание списка соединений (т.е. что к чему подключается и к каким узлам схемы); передача всех данных о схеме в программу моделирования PSpice; графическое отображение, обработка и документирование результатов моделирования (программа Probe).

При работе с пакетом Design Center разнообразная информация о схеме и результатах моделирования записывается в отдельных файлах, основные из них:

- \*.sch – файл с изображением принципиальной схемы;
- \*.net – список соединений схемы;
- \*.out – текстовые файлы результатов моделирования;
- \*.dat – файл данных моделирования ;
- \*.als – список соответствий номеров выводов компонентов именам подсоединённых к ним цепей.

К пакету Design Center прилагаются библиотеки графических изображений символов и математических моделей компонентов (диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов, цифровых компонентов и пр.) производства фирм США, Западной Европы и Японии.

Графика символов находится в файлах \*.slb., математические модели - в файлах \*.lib.

Имеется возможность создания своих собственных библиотек символов и мо-

делей компонентов.

Система имеет следующие директивы моделирования: расчет характеристик линейаризованной схемы в частотной области и уровня её внутреннего шума; расчёт режима по постоянному току при вариации входного напряжения, входного тока или окружающей температуры; установка температуры; расчет переходных процессов и спектральный Фурье - анализ, а также и другие директивы моделирования.

**2.2 Графический редактор Schematics.** Графический редактор Schematics позволяет в среде Windows создавать файлы, характеризующие принципиальные схемы, и передавать управление ими другим программам (PSpice, Probe и т.д.). Моделируемая схема может состоять из следующих типовых компонентов: резисторы, конденсаторы, индуктивности, импульсные источники напряжений и тока, источники синусоидальных сигналов, вентили, триггеры, устройства контроля и пр. Вся информация о параметрах каждого компонента хранится в библиотечных файлах с расширением \*.lib. Информация о графическом изображении этих компонентов хранится в файлах \*.slb.

Редактирование существующей схемы начинается с загрузки файла с изображением принципиальной схемы (\*.sch) по команде File/Open. Это сокращенная запись команды. Команда выполняется в два этапа: первый - в меню редактора выбрать пункт File; второй - в ниспадающем меню выбрать команду Open. Затем выбирается имя файла с принципиальной схемой.

Размещение символа компонента на схеме, если это необходимо, начинается с указания имени компонента в панели диалога, открывающейся по команде Draw/Get New Part. Затем символ с помощью "мыши", ставится в нужное место на схеме и фиксируется левой кнопкой.

После графического ввода схемы необходимо подготовить ее к моделированию. Для этого необходимо с помощью оболочки редактора Schematics под управлением пункта меню Analysis выполнить три этапа:

1. Команда ERC (Electric Rule Check) – проверка на правильность соединений, на наличие неподсоединённых (плавающих) выводов компонентов, совпадающих позиционных названий и других ошибок. При обнаружении ошибок на экран выводится информационное сообщение и перечень ошибок с указанием координат.

2. Команда Setup – задание директив моделирования. Для данного эксперимента используется расчёт цепей во временной области, т.к. устройство имеет цифровые компоненты. Для задания этой директивы выбирается пункт Transient из перечня подкоманды Setup. В окне временного анализа для программы Probe указывается шаг распечатки характеристик схемы на график, конечное время счета, время задержки и т.д. Включение этой директивы осуществляется пометкой переключателя около кнопки ОК в нижней части окна и нажатием ОК.

3. Команда Create Netlist – создание списка соединений и задания на моделирование.

После подготовки схемы к моделированию запускается программа PSpice по команде Analysis/Run PSpice (или нажатием клавиши F11).

**2.3 Программа моделирования PSpice.** В верхней части диалогового окна программы PSpice помещена строка меню для загрузки файлов, изменение цвета и шрифта информационных сообщений, вызова помощи. Ниже выводится название задания на моделирование, имя файла, название выполняемой команды и значение варьируемых параметров (напряжение питания, частоты входного воздействия, температуры и т.д.). В средней части окна указывается название вида анализа и приводятся информационные сообщения о фазах выполнения задания на моделирование и сообщения об ошибках. В нижней части экрана в реальном масштабе времени выводятся текущие значения варьируемого параметра и информация о шаге изменения независимых переменных и диапазоне изменения их значений.

При появлении сообщения об ошибке необходимо вернуться в программу Schematics, и по команде Analysis/Examine Output... просмотреть файл выходных результатов (\*.out), где будет подробнее указано о возможной ошибке на английском языке.

При успешном завершении моделирования автоматически или принудительно из редактора Schematics по команде Analysis/Run Probe (клавиша F12) загружается программа графического постпроцессора Probe.

**2.4 Графический постпроцессор Probe.** Программа Probe выводит на экран графики результатов моделирования, производит их математическую обработку с выводом на экран (в табличной форме) их важнейших характеристик, наносит на графики поясняющие надписи и позволяет получать жесткие копии результатов моделирования в графической форме. Математические преобразования над графиками заключаются в выполнении арифметических операций, вычислении различных функций, взятии интегралов, расчете спектров, изменении параметров формы графиков, построении зависимости любой характеристики графика от любого варьирующего параметра схемы.

Переменные, графики которых должны быть выведены на экран, указываются двояко: введением их имени по команде Trace/Add или отметкой их специальным маркером на принципиальной схеме.

Результаты моделирования, полученные программой PSpice, заносятся в файл данных (\*.dat). По этим данным строятся соответствующие зависимости в окне программы Probe.

При вводе значений величин в программа Probe используются следующие суффиксы:

p – пико;	m – милли;
n – нано;	k – кило;
u – микро;	M – мега.

Кроме того, пользуются следующими суффиксами для простановки единиц размерности на осях координат:

V – вольты; d – градусы;

A – амперы; s – секунды;

W – ватты; H – герцы.

Построение графиков зависимостей осуществляется выбором пункта меню Trace и команды Add. В результате открывается окно выбора переменных. Типы переменных, перечень которых выведен в окне, определяются положением выключателей, находящимся под списком переменных:

Analog – аналоговые переменные;

Digital – цифровые переменные;

Voltages – напряжения;

Currents – токи;

Alias Name – псевдонимы.

Переменные помечаются курсором и их имена переносятся в командную строку Trace Command. Так можно выбрать несколько переменных. Графики строятся после нажатия кнопки ОК. На экран выводится координатная сетка графика, по горизонтали которой откладывается независимая переменная, соответствующая выбранному режиму моделирования (например, Time - время).

Для измерения амплитуд (временных промежутков, частот) построенных графиков сигналов используется электронный курсор. В программе Probe можно считать координаты точек на графиках с помощью двух электронных курсоров. Дисплей переключается в режим считывания по команде Cursor/Display. В правом нижнем углу экрана располагается окно, в котором отображаются текущие координаты двух курсоров C1, C2 и расстояние между ними по двум осям ординат (dif), а также текущее значение координат по осям абсцисс.

Курсоры могут быть связаны с одним или двумя графиками аналоговых переменных. В первый момент после вызова курсоров оба курсора помещены в начало первого аналогового графика. Первый курсор переключается с одного графика на другой путём нажатия на соответствующий значек под осью абсцисс левой кнопкой “мыши”. Второй курсор аналогично, но правой кнопкой. Положение первого курсора на каком-либо графике определяется указанием места и нажатием левой кнопки, второго курсора – правой кнопкой. Соответствующие координаты курсоров отображаются в правом нижнем углу дисплея.

Изменение масштаба осуществляется командой Axis/Set Range. После ее активизации появится окно, в котором предлагается ввести пределы по соответствующим осям.

### **3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

3.1 Перед началом лабораторной работы ознакомиться с описанием рабочей

среды и методическими указаниями по проведения эксперимента. Ответить на контрольные вопросы раздела 5.

3.2 Из операционной среды Windows запустить редактор схем Schematics (из окна пакета программ Design Center).

3.3 После загрузки редактора открыть файл с принципиальной схемой фазового детектора Lab1.sch. Снять дискриминационную характеристику ФД.

3.4 Открыть файл с принципиальной схемой гетеродина Lab2.sch. Определить полосу удержания системы.

3.5 Открыть файл с приципиальной схемой системы ФАПЧ Lab3.sch.

3.5.1 Смоделировать режим биений, найти частоту биений.

3.5.2 Смоделировать процесс захвата. Определить полосу захвата.

3.5 В программе Probe построить графики напряжений соответствующих режимов и с помощью буфера обмена по команде Display/Copy to Clipboard сохранить графики, например, в Microsoft Word.

Отчёт о лабораторной работе представить в письменной или электронной форме. В отчете должны быть графики с результатами эксперимента и выводы по полученным экспериментальным результатам.

#### **4 ПОЯСНЕНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ**

4.1 Для начала работы в среде Windows в окне диспетчера программ выбрать пиктограмму Design Center. В окне Design Center “кликнуть” по пиктограмме Schematics. Загрузка файла с принципиальной схемой осуществляется по команде File/Open. Необходимое увеличение или уменьшение размера схемы осуществляется по команде Zoom/In или Zoom/Out.

4.2 Для снятия дискриминационной характеристики необходимо на входы ФД подать импульсные последовательности (в программе PSpice это осуществляется с помощью источников VPULSE) с одинаковыми периодами следования, но задержанными на определенную величину относительно друг друга. Для изменения параметров любого компонента необходимо дважды “кликнуть” по изображению его символа. Величину задержки (td) необходимо менять только у какого-либо одного источника и одновременно с этим оценивать выходное напряжение ФД. После изменения задержки запустить схему на счет (клавиша F11). Входные и выходные узлы ФД помечены маркерами. Поэтому после окончания процесса моделирования и для отображения результатов в программе Probe в оболочке редактора схем Schematics необходимо выполнить команду Markers/Show All.

4.3 Для определения полосы удержания системы ФАПЧ необходимо определить максимальную величину расстройки частоты ГУН относительно его средней частоты  $f_{cp}$ , при которой наблюдается устойчивый режим автоколебания. Для это-

го управляющее напряжение источника V6 (voff) необходимо менять в пределах от  $2 В$  до  $16 В$ . Средняя частота гетеродина определяется напряжением смещения на варикапе управителя  $U_{V6} = 8,5 В$ . Для определения величины частоты ГУН необходимо воспользоваться преобразованием Фурье от полученной временной реализации в программе Probe. Для этого после процесса моделирования нужно построить в программе Probe выходное синусоидальное напряжение ГУН и выполнить команду Axis/Fourier. По отображенному спектру колебания ГУН измерение частоты провести с помощью курсоров по методике, изложенной в подразделе 2.4.

4.4 Моделирование режима биений осуществляется путем задания начальной расстройки  $\Omega_H$ , превышающей половину полосы захвата  $\Omega_3$ . Начальная расстройка входного сигнала задается путем изменения периода входных импульсов. Необходимо несколько раз задать различные значения частоты входных импульсов в окрестностях частоты  $f_{cp}$  и получить модель режима биений, при котором наблюдаются периодические изменения выходного напряжения ФД. Перед каждым испытанием следует уменьшать величину  $\Omega_H$  и наблюдать за характером переходного процесса системы. Попутно, необходимо хотя бы один раз измерить частоту биений и сравнить полученную величину с величиной, рассчитанной по формуле (2). В тот момент, когда значение начальной расстройки примерно совпадет с половиной величины  $\Omega_3$ , в системе наступит захват. Последняя полученная величина начальной расстройки приблизительно будет являться половиной полосой захвата. Необходимо сравнить полученную величину полосы захвата с величиной полосы удержания. Оценить время переходного процесса и сравнить его с рассчитанным по формуле (3), а также рассчитать установившуюся разность фаз по формуле (1). Результаты эксперимента свести в соответствующие таблицы.

## **5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Система ФАПЧ является статической или астатической? Ответ обоснуйте.
2. Система ФАПЧ является статической или астатической? Ответ обоснуйте.
3. От чего зависит величина остаточной разности фаз в установившемся режиме импульсной системы ФАПЧ ?
4. Что будет происходить в системе ФАПЧ, если постоянную времени системы увеличить (уменьшить) ?
5. От чего зависит величина полосы захвата системы ФАПЧ ?
6. От чего зависит величина полосы удержания системы ФАПЧ ?
7. В каком случае в системе ФАПЧ наступает захват ?
8. В каком случае в системе ФАПЧ может наступить срыв синхронизации, т.е.

выход из режима захвата в режим биений ?

9. Чем определяется частота биений в системе ФАПЧ ?

10. Поясните принцип работы пакета программ схемотехнического моделирования PSpice ?

11. Перечислите этапы подготовки принципиальной схемы к моделированию.

12. Что такое электронные курсоры и как ими пользоваться?

### ***РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА***

1. Разевиг В.Д. Системы схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). - М.: СК ПРЕСС, 1996.-272с.

2. Левин Л.С., Плоткин М.А. Цифровые системы передачи информации. - М.: Радио и связь, 1982.- 216с.

3. Боккер П. Цифровая сеть с интеграцией служб. Понятия, методы, системы. - М.: Радио и связь, 1991.-303с.

4. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. - М.: Связь, 1972.-447 с.

5. Поляков В.Т. Радиовещательные ЧМ приемники с фазовой автоподстройкой. - М.: Радио и связь, 1983.- 96с.