МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Национальный исследовательский университет

К.Г. Мишагин

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В СРЕДЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ADS

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 010800 «Радиофизика», 010300 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» и специальности 090106 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

Нижний Новгород 2012 М-71 Мишагин К.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В СРЕДЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ADS: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 19 с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Д.Н. Ивлев

Лабораторная работа посвящена изучению нелинейной линамики фазовой автоподстройки частоты помощью системы С среды схемотехнического моделирования ADS. В описании представлено устройство и принцип действия современных систем фазовой автоподстройки. Описано построение математической модели, представлена СВЯЗЬ безразмерных параметров модели и размерных параметров системы, приведено описание компонентов системы фазовой автоподстройки в среде ADS и дан пример расчета полосы захвата для конкретной реализации системы фазовой автоподстройки в ADS.

Данная работа предназначена для студентов радиофизического факультета, слушающих курс «Моделирование систем», а также для студентов, специализирующихся на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования.

Ответственный за выпуск: зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ, д.ф.-м.н., профессор Е.З. Грибова

> УДК 537.86 ББК В.236.352+236.355

Содержание

1. Цель лабораторной работы 4
 Структурная схема и математическая модель системы фазовой автоподстройки частоты
 Компоненты системы фазовой автоподстройки частоты в среде моделирования ADS
3.1 Модель фазового дискриминатора 8
3.2 Модель генератора, управляемого напряжением (ГУН) 13
 Пример расчета полосы захвата для системы фазовой автоподстройки с RLC- фильтром и фазовым дискриминатором «исключающее ИЛИ» в цепи
управления
5. Задания на лабораторную работу17
6. Вопросы для контроля 18
7. Список литературы 18

1. Цель лабораторной работы

Цель данной работы заключается в ознакомлении студентов С компьютерным моделированием радиотехнических схем на примере изучения нелинейной динамики системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1-5] в пакете схемотехнического моделирования ADS (Advanced Design осуществить компьютерное System) [6], позволяющего исследование максимально приближенно к натурному эксперименту. Предполагается детальное изучение устройства и принципа действия современных аналоговых систем фазовой автоподстройки частоты, построение математической модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений с безразмерными параметрами и сравнение динамики математической модели (анализируемой с помощью программного комплекса «Динамика нелинейных систем» [7]) с динамикой компьютерной модели, реализованной в среде ADS. В качестве характеристики для количественного сравнения двух моделей предлагается использовать зависимость полосы захвата системы фазовой автоподстройки с пропорционально-интегрирующим фильтром в цепи управления от параметра инерционности фильтра. Построение данной зависимости для математической модели в виде системы дифференциальных уравнений осуществляется в ходе выполнения лабораторной работы «Анализ динамики и расчет динамических характеристик системы ФАП с пропорционально-интегрирующим фильтром» по курсу «Моделирование систем».

2. Структурная схема и математическая модель системы фазовой автоподстройки частоты

Общая схема современной системы фазовой автоподстройки частоты представлена на рис. 2.1, [1 - 5]. Основная задача данной системы заключается в синхронизации сигнала подстраиваемого генератора – генератора, управляемого напряжением, (ГУН) относительно сигнала опорного генератора.



Рис. 2.1. Структурная схема системы фазовой автоподстройки частоты

С помощью делителей частоты с коэффициентами деления **m** и **n** сигналы опорного генератора и генератора, управляемого напряжением, сближаются по частоте, после чего сравниваются на фазовом дискриминаторе ($\Phi Д$). Сигнал с выхода фазового дискриминатора, содержащий информацию о разности фаз между сигналами на его входе, усиливается, проходит через фильтр нижних

частот (ФНЧ) и подается на вход ГУН для управления частотой подстраиваемого генератора. Таким образом, реализуется отрицательная обратная связь по фазе, в результате действия которой должна осуществиться синхронизация подстраиваемого генератора, при этом, его частота в режиме синхронизации должна удовлетворять соотношению:

$$\frac{\omega_{\Gamma YH}}{\omega_{\Omega \Gamma}} = \frac{n}{m}.$$
(2.1)

Здесь $\omega_{\Gamma YH}$, $\omega_{O\Gamma}$ – циклические частоты, соответствующие подстраиваемому и опорному генераторам соответственно. Таким образом, система фазовой автоподстройки, представленная на рис. 2.1, может использоваться в качестве синтезатора частоты.

Отметим, что усилитель в цепи обратной связи не обязателен, хотя нередко используется для согласования фазового дискриминатора и ФНЧ, а также для изменения динамических характеристик ФАПЧ. В настоящее время многие микросхемы объединяют блоки фазового дискриминатора и делителей частоты. ГУН обычно реализуется в отдельной микросхеме, а ФНЧ рассчитывается и реализуется самим разработчиком системы ФАПЧ.

Составим математическую модель, описывающую динамику петли фазовой автоподстройки. Мгновенная частота ГУН определяется управляющим напряжением с выхода фильтра (u_{ϕ}) :

$$\omega_{\Gamma YH}(t) = \omega_{\Gamma YH}^0 + S \cdot u_{\phi}(t), \qquad (2.2)$$

 $\omega^{0}_{\Gamma YH}$ – частота колебаний ГУН при нулевом управляющем напряжении, *S* – крутизна характеристики ГУН.

В соотношение (2.2) заложено два допущения: во-первых, крутизна характеристики зависимости частоты от входного напряжения ГУН предполагается линейной, во-вторых, предполагается безынерционность управления частотой ГУН.

Напряжение на выходе ФНЧ может быть записано в операторном виде:

$$u_{\phi}(t) = K(p) \cdot u_{\phi \Pi}(t), \qquad (2.3)$$

коэффициент фильтра, d/dt где K(p) = передачи оператор р =дифференцирования, напряжение фазового a $u_{\Phi\Pi}(t)$ _ на выходе дискриминатора. Напряжение $u_{\Phi \Pi}$ определяется разностью фаз сигналов на входе фазового дискриминатора и может изменяться в пределах от u_{low} до u_{high} . Если $u_{\text{high}} \neq -u_{\text{low}}$, то для удобства дальнейшего построения математической модели необходимо выделить среднее напряжение на выходе дискриминатора, $u_0 = 0.5 \cdot (u_{\text{low}} + u_{\text{high}})$:

$$u_{\Phi \mu}(t) = u_0 + E \cdot F\left(\frac{\varphi_{\rm OF}}{m} - \frac{\varphi_{\rm FYH}}{n}\right), \qquad (2.4)$$

$$E = \frac{u_{\text{high}} - u_{\text{low}}}{2}.$$
 (2.5)

Функция $F(\varphi)$ соответствует нормированной характеристике фазового дискриминатора. Характеристики большинства известных фазовых дискриминаторов могут быть описаны подобной функцией, обладающей следующими свойствами:

- 1) $F(\varphi+2\pi) = F(\varphi)$,
- 2) $F(\varphi) = -F(-\varphi)$,

3) $F(\phi)$ имеет единственный максимум на отрезке $[0, \pi]$.

Отметим, что описание поведения фазового дискриминатора с помощью математической функции $F(\varphi)$ является приближенным. Аналоговые фазовые дискриминаторы, начиная от обыкновенного перемножителя и заканчивая широко используемыми в настоящее время фазовыми дискриминаторами на основе элемента «Исключающее ИЛИ» (см. следующий раздел), на выходе выдают не только низкочастотный сигнал, характеризующий разность фаз, но и сигнал удвоенной частоты (возможны и другие гармоники). В связи с этим, главная задача ФНЧ в петле управления заключается в усреднении выходного сигнала фазового дискриминатора и выделении низкочастотной составляющей. Подставим (2.4) в (2.3), а выражение (2.3) в (2.2):

$$\omega_{\Gamma YH}(t) = \omega_{\Gamma YH}^{1} + \Omega \cdot K(p) \cdot F\left(\frac{\varphi_{0\Gamma}}{m} - \frac{\varphi_{\Gamma YH}}{n}\right), \qquad (2.6)$$
$$\omega_{\Gamma YH}^{1} = \omega_{\Gamma YH}^{0} + S \cdot u_{0}, \qquad \Omega = S \cdot E.$$

Смещенная частота $\omega^{1}_{\Gamma YH}$ играет роль собственной (средней) частоты подстраиваемого генератора, охваченного петлей ФАП. Величина Ω определяет полосу синхронизации – максимальное отклонение частоты подстраиваемого генератора, которое может быть скомпенсировано системой автоподстройки.

Для приведения уравнения системы ФАП к «стандартному» виду необходимо поделить уравнение (2.6) на n и вычесть ω_{OF}/m из обеих частей уравнения. Тогда с учетом замены переменных получим:

$$\frac{p\varphi}{\Omega^*} + K(p) \cdot F(\varphi) = \gamma, \qquad (2.7)$$

$$\varphi = \frac{\varphi_{\Gamma YH}}{n} - \frac{\varphi_{O\Gamma}}{m}, \quad \Omega^* = \frac{\Omega}{n}, \quad \gamma = \frac{1}{\Omega^*} \left(\frac{\omega_{\Gamma YH}^{l}}{n} - \frac{\omega_{O\Gamma}}{m} \right).$$

Параметр у в (2.7) имеет смысл относительной частотной расстройки системы.

Ниже приведены дифференциальные уравнения модели системы фазовой автоподстройки частоты для двух частных случаев фильтров нижних частот в цепи обратной связи.

1) Математическая модель системы для пропорционально-интегрирующего фильтра в цепи управления

Коэффициент передачи пропорционально-интегрирующего фильтра, представленного на рис. 2.2, в операторной форме имеет вид:

$$K(p) = \frac{1 + pRC_1}{1 + pR(C_1 + C_2)}$$
(2.8)

Подставляя (2.8) в уравнение модели (2.7), получим:

$$\varepsilon \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + (1 + \tau \cdot F'(\varphi)) \frac{d\varphi}{d\tau} + F(\varphi) = \gamma,$$

$$\varepsilon = \frac{\Omega}{n} R(C_1 + C_2), \quad \tau = \frac{\Omega}{n} RC_1.$$
(2.9)



Рис. 2.2. Схема пропорционально-интегрирующего фильтра в среде ADS

2) Математическая модель системы для RLC-фильтра в цепи управления



Рис. 2.3. Схема RLC- фильтра в среде ADS

Коэффициент передачи RLC-фильтра, представленного на рис. 2.3, в операторной форме имеет вид:

$$K(p) = \frac{1}{1 + pRC + p^2 LC}.$$
(2.10)

Подставляя (2.10) в уравнение модели (2.7), получим:

$$\mu \frac{d^{3} \varphi}{d\tau^{3}} + \varepsilon \frac{d^{2} \varphi}{d\tau^{2}} + \frac{d\varphi}{d\tau} + F(\varphi) = \gamma, \qquad (2.11)$$
$$\varepsilon = \frac{\Omega}{n} RC, \ \mu = \left(\frac{\Omega}{n}\right)^{2} LC.$$

Важным параметром, отвечающим за возбуждение автоколебаний [4, 5] в цепи управления системы с резонансным фильтром, является добротность данного фильтра:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu}}{\varepsilon}$$

3. Компоненты системы фазовой автоподстройки частоты в среде моделирования ADS

Исследование динамики системы фазовой автоподстройки частоты с помощью построения максимально подробной модели, описывающей все радиотехнические элементы основе уравнений Кирхгоффа. на не представляется целесообразным. Рассматриваемые ниже компоненты системы: фазовый дискриминатор и генератор, управляемый напряжением, (ГУН) обладают достаточно сложной радиотехнической реализацией, что делает моделирование динамики на низком уровне вычислительно сложным. При этом на более высоком уровне данные компоненты выполняют достаточно простые функции, и логика их поведения может быть легко описана. В среде ADS фазовый дискриминатор и ГУН описываются поведенческими моделями, применение которых позволяет существенно увеличить скорость численного счета, сохраняя высокую точность описания динамики при сопоставлении с натурным экспериментом.

3.1 Модель фазового дискриминатора

Фазовый дискриминатор на основе элемента «исключающее ИЛИ»



Элемент **XOR_PhaseDet** имеет 2 параметра: выходное напряжение высокого и низкого уровня, соответствующее логическим «1» и «0».

Данный фазовый дискриминатор предполагает использование на входе сигналов вида меандр, а на выходе дает последовательность импульсов длительность которых (скважность) пропорциональна разности фаз между сигналами.

Характеристика, описывающая усредненное напряжение на выходе дискриминатора в зависимости от разности фаз сигналов на входах, может быть представлена следующим образом:

$$F_{XOR}(\varphi) = \begin{cases} (V_{high} - V_{low})\frac{\varphi}{\pi} + V_{low}, \ 0 < \varphi < \pi, \\ (V_{high} - V_{low})\frac{(2\pi - \varphi)}{\pi} + V_{low}, \ \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$
(3.1)

При математическом моделировании бывает удобно пользоваться нормированной характеристикой:

$$F_{XOR2}(\varphi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right), & 0 < \varphi \le \pi, \\ \frac{2}{\pi} \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi \right), & \pi < \varphi \le 2\pi. \end{cases}$$
(3.2)

На рисунке 3.1 представлена зависимость усредненного напряжения на выходе фазового дискриминатора типа «исключающее ИЛИ» от разности фаз сигналов на входе.



Рис. 3.1. Характеристика фазового дискриминатора «исключающее ИЛИ», полученная путем медленного изменения разности фаз сигналов на входе. Представлена зависимость усредненного напряжения на выходе фазового дискриминатора от разности фаз сигналов на входе

Частотно-фазовый дискриминатор, работающий по фронтам импульсов.



PhaseFreqDet Элемент имеет параметры, те же что И предыдущий фазовый дискриминатор. Элемент имеет два выхода, один выход выдает импульсы, если фронт сигнала на входе 1 опережает фронт сигнала на входе 2, в противном случае импульсы идут с другого выхода. Можно отметить, ЧТО подобные микросхемы обычно предполагают использование внешнего источника тока, управляемого импульсами с выходов

микросхемы. Для получения информации как о положительной так и об отрицательной разности фаз между сигналами необходимо использовать оба выхода (рис. 3.2):



Рис. 3.2. Схема включения частотно-фазового дискриминатора при моделировании в среде ADS

Опишем подробно принцип работы особенности И данного дискриминатора. Рассматриваемый дискриминатор реагирует только на относительное положение фронтов опорного сигнала и сигнала на выходе ГУН. В зависимости от того до или после возникновения фронта опорного сигнала возникает фронт сигнала ГУН, на выходе фазового детектора будут формироваться импульсы опережения или отставания соответственно, рис. 3.3. Важно отметить, что фазовый детектор реагирует только на передний фронт импульса. Импульсам опережения соответствует высокий уровень **H**, а импульсам отставания соответствует низкий уровень L выходного тока (Do) Длительность импульсов опережения напряжения. И отставания или пропорциональна интервалу между фронтами опорного сигнала и сигнала ГУН и может принимать значения от 0 до T, где T – период опорного сигнала. Таким образом, интервал детектирования сдвига фаз между опорным сигналом и сигналом ГУН составляет от -2π до 2π . В случае если фронты импульсов ГУН отстают от фронтов опорного сигнала на время меньше, чем t_{WU} , или если фронты импульсов ГУН опережают фронты опорного сигнала на время меньше, чем t_{WL} , то выход фазового детектора переводится в состояние высокого сопротивления – Z, импульсы на выходе фазового детектора отсутствуют. При этом конденсатор фильтра в цепи управления сохраняет заряд и напряжение управления.

Можно выделить следующие основные отличия рассматриваемого фазового дискриминатора от дискриминатора «исключающее ИЛИ», относящегося к 1-му типу фазовых дискриминаторов (детекторов):

- 1) Полоса захвата в режим синхронизации совпадает с полосой удержания синхронного режима и составляет весь диапазон ГУН.
- 2) Детектирование фазового сдвига в интервале - 2π до 2π .
- 3) Отсутствуют остаточные пульсации в синхронном режиме, так как в режиме синхронизации сигнал на выходе фазового детектора отсутствует.
- 4) Не важна форма (скважность) входного сигнала, так как срабатывает по фронту.
- 5) Плохое подавление помех, высокий уровень фазовых шумов.

Теперь представим функциональное описание работы фазового детектора и математическую модель, которая может быть использована при численном расчете системы фазовой автоподстройки частоты.



Рис. 3.3. Осциллограммы токов и напряжений (из описания к микросхеме MB15E03SL); а – опорный сигнал, б – сигнал ГУН, в – выходной ток (Do) фазового детектора

На рис. 3.4 изображена схема, описывающая функциональную работу фазового детектора. По вертикальной оси отложены напряжение и ток на выходе фазового детектора. Среднее значение тока $I_{\Phi Д} = (I_{High} + I_{Low})/2$. Обычно $I_{High} = -I_{Low}$, т.е. среднее значение $I_{\Phi Д} = 0$. Среднее значение $U_{\Phi Д} = (U_{High} + U_{Low})/2$. Значения U_{High} , U_{Low} , I_{High} , I_{Low} , также как значения t_{WU} , t_{WL} даны в спецификации. Сдвиг фазы вдоль горизонтальной оси рассматривается на интервале от 0 до 2π .



Рис. 3.4. Характеристика фазового детектора

Как видно из рис. 3.4, характеристика фазового детектора на интервале от 0 до 2π является неоднозначной. В случае если фронты импульсов ГУН отстают от фронтов опорного сигнала больше чем на t_{WU} , то на выходе фазового детектора имеют место импульсы высокого уровня **H**, тогда используется верхняя половина характеристики. Если фронты импульсов ГУН опережают фронты опорного сигнала больше чем на t_{WL} , то на выходе имеют место импульсы низкого уровня **L**, тогда используется нижняя половина характеристики. Если

 $d\phi/dt > 0$ то движение осуществляется в направлении толстых стрелок, в обратном случае направление движения отмечено тонкими стрелками.

Алгоритм работы фазового дискриминатора представлен ниже. Уровень выходного сигнала хранится в регистре Level. Здесь рассматривается нормированная характеристика фазового детектора $F(\varphi)$: min $F(\varphi) = -1$, max $F(\varphi) = 1$. ($\varphi_{WU} = 2\pi t_{WU}/T$, $\varphi_{WL} = 2\pi t_{WL}/T$)

1.
$$\varphi > 0 \rightarrow \text{Level} = \text{H},$$

 $\varphi < 0 \rightarrow \text{Level} = \text{L},$
2. $\varphi > 2\pi \rightarrow \text{Level} = \text{H}, \varphi = \varphi - 2\pi \rightarrow 0 \le \varphi \le 2\pi,$
 $\varphi < -2\pi \rightarrow \text{Level} = \text{L}, \varphi = \varphi + 2\pi \rightarrow -2\pi \le \varphi \le 0,$
3. $F(\varphi) = \begin{cases} 0, & -\varphi_{\text{WL}} < \varphi < \varphi_{\text{WU}}, \\ \frac{\varphi}{2\pi}, & \varphi > \varphi_{\text{WU}}, & \varphi < -\varphi_{\text{WL}}. \end{cases}$

На рис. 3.5 представлен результат моделирования рассматриваемого фазового дискриминатора в ADS. Слева представлен график изменения разности фаз между сигналами на входе дискриминатора, справа – усредненное напряжение на объединенном выходе дискриминатора (рис. 1.2).



Рис. 3.5. Результат моделирования частотно-фазового дискриминатора

При использовании сигнала только с одного (верхнего) выхода элемента PhaseFreqDet зависимость усредненного выходного напряжения от разности фаз становится несимметричной (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Результат моделирования частотно-фазового дискриминатора



Как было сказано выше, частотно-фазовые дискриминаторы рассматриваемого класса не выдают на выходе импульсы (выход находится в состоянии высокого сопротивления), если интервал времени между ближайшими фронтами двух сигналов меньше чем t_{WU} или t_{WL} . Для учета данной особенности при моделировании в ADS необходимо элемента PhaseFreqDet использовать вместо элемент PhaseFreqDet2. Однако этот элемент предполагает, что $t_{WU} = t_{WL}$, соответствующий параметр обозначен как DeadTime.

3.2 Модель генератора, управляемого напряжением (ГУН)

			VCOout
•	7	VCO	VCOfreq
-		aN van	VCOoutN
Ŧ	÷ ,	/CO_Divi	deByN
	1 N	/CO1 👘	
	$> \Lambda$	/CO_Free	q=S * _v1 🔗
	. F	0=fvco	·
	F F	l=n Rout=50 (Power=db	Dhm mtow(0)
		relay-0 fi	Sec

При моделировании ГУН удобно пользоваться элементом VCO_DivideByN, имеющим встроенный делитель частоты на N – выход VCOoutN. Использование в кольце ФАП сигнала с выхода делителя частоты VCOoutN вместо использования сигнала самого ГУН VCOout и отдельного модуля делителя частоты позволяет при моделировании выбирать больший шаг по времени и существенно снизить вычислительные затраты. Сигнал на выходе ГУН имеет не

синусоидальную, а пилообразную форму, что является особенностью системы моделирования ADS. Такие сигналы используются при моделировании частотно-фазовых дискриминаторов вида PhaseFreqDet. Коэффициент деления может быть нецелым, он равен N+dN. Смещение dN задается напряжением на втором входе ГУН.

Элемент VCO_DivideByN имеет идеальную линейную характеристику с крутизной S. F0 – частота свободных колебаний ГУН (т.е. при нулевом управляющем напряжении), частота колебаний на выходе $\Gamma YH = FO + S^* v_1$, где _v1 – управляющее напряжение на входе ГУН.

4. Пример расчета полосы захвата для системы фазовой автоподстройки с **RLC-фильтром и фазовым дискриминатором «исключающее ИЛИ» в цепи** управления

Рассмотрим следующую задачу. Пусть требуется:

1) Рассчитать параметры системы фазовой автоподстройки для синтеза 160 МГц частоте опорного генератора частоты при 40 МГц. Предположим, что существует ограничение на частоту входного сигнала «исключающее ИЛИ» 10 МГц. Пусть элемента задана крутизна характеристики ГУН: $S^* = S/(2\pi) = 20$ МГц/В. Также известны величины выходного напряжения фазового дискриминатора: $u_{high} = 5$ B, $u_{low} = 0$.

2) Рассчитать зависимость полосы захвата системы от величины

индуктивности фильтра нижних частот в цепи управления. Подберем коэффициенты деления *m* и *n*:

$$\frac{\omega_{\text{ГУН}}}{\omega_{\text{ОГ}}} = \frac{160}{40} = \frac{20}{5} = \frac{n}{m}.$$

С учетом ограничений можно выбрать коэффициент деления частоты колебаний ГУН: n = 20 и коэффициент деления частоты опорного генератора m = 5.



Рис. 4.1. Схема системы фазовой автоподстройки в среде ADS

Так как среднее значение выходного напряжения на выходе фазового дискриминатора при идентичных частотах сигналов на его входе: $0,5(u_{high} + u_{low})$ отличается от нуля, то собственную частоту ГУН необходимо сместить:

F0 =
$$160M\Gamma\mu - S^* \frac{u_{\text{high}} - u_{\text{low}}}{2} = 110M\Gamma\mu.$$

С учетом выбранных коэффициентов деления характерная частота следования импульсов на выходе фазового дискриминатора равна 16 МГц (в два раза выше частоты сигналов на входе). Параметры фильтра нижних частот подбираются с учетом необходимости усреднения выходного сигнала дискриминатора, подавления спектральных компонент на частоте 16 МГц и выше.

Возможный вариант схемы, удовлетворяющий условиям поставленной задачи, представлен на рис. 4.1. Амплитудно-частотная характеристика фильтра, используемого в схеме, показана на рис. 4.2.



Рис. 4.2. АЧХ фильтра для схемы на рис. 4.1

Для поиска полосы захвата в процессе моделирования частота ГУН медленно изменяется от значения 55 МГц (вне полосы удержания, гарантированный режим биений) до 110 МГц (соответствует нулевой относительной частотной расстройке с опорным сигналом). Собственная частота ГУН, при которой начинается синхронизация, может быть определена по графику зависимости частоты выходных колебаний ГУН от параметра собственной частоты ГУН (рис. 4.3). На представленном графике маркер установлен на границе полосы захвата, разделяющей режим биений (слева), при котором частота выходного сигнала ГУН колеблется, и режим синхронизации (справа), при котором частота сигнала ГУН стабилизирована.

Ниже представлены размерные и безразмерные параметры, при которых осуществлялось моделирование, а также результирующий график зависимости $\gamma(\mu)$, соответствующий границе захвата в синхронный режим.

<u>Размерные параметры:</u>

Параметры фильтра: R = 31.831 Ом, L = 2.203 ÷ 6.095 мкГн, C = 2000 пФ. Частота опорного генератора: $f_{O\Gamma} = 40$ МГц. Коэффициент деления сигнала опорного генератора: m = 5. Частота свободных колебаний ГУН: $f_{\Gamma YH} = 110$ МГц. Коэффициент деления сигнала ГУН: n = 20. Чувствительность ГУН: $S^* = 20$ МГц/В. Выходное напряжение ФД: $U_{low} = 0$ В, $U_{high} = 5$ В. $\Omega = 2\pi S \frac{U_{high} - U_{low}}{2} = 1.57 \cdot 10^7$ рад/с. Средняя частота колебаний ГУН: $f_0 = f_{\Gamma YH} + 0.5S(U_{high} + U_{low}) = 160 \text{ M}\Gamma \text{ц}.$

<u>Безразмерные параметры:</u> $\varepsilon = 1, \mu = 0.1 \div 3, \gamma = -1.1 \div 0.$



Рис. 4.4. Полоса захвата в зависимости от величины индуктивности в безразмерных величинах

5. Задания на лабораторную работу

1. Рассчитать параметры системы фазовой автоподстройки с фазовым дискриминатором «исключающее ИЛИ» и пропорциональноинтегрирующим фильтром для синтеза колебаний частоты $f_{\text{вых.}}$ (значения из таблицы). Общие фиксированные параметры: $U_{\text{low}} = 0$ B, $U_{\text{high}} = 5$ B, $f_{\text{OF}} = 40$ МГц.

Номер	$f_{ m bbix.},$ МГц	<i>S</i> /(2 <i>π</i>), МГц/В
варианта		
1	100	10
2	150	20
3	200	20
4	250	30
5	300	30
6	350	40
7	400	40
8	450	40

- 2. Рассчитать параметры пропорционально-интегрирующего фильтра в цепи управления. Используя ADS построить амплитудно-частотную характеристику фильтра.
- 3. Используя готовый проект ADS для моделирования системы фазовой автоподстройки с пропорционально-интегрирующим фильтром, рассчитать зависимость полосы захвата от параметра С₂ фильтра. Представить соответствующий график для безразмерных параметров у и *є*. Величина изменения параметра у на графике должна составлять не менее 0,3. Сопоставить данный график с графиком, полученным при расчете полосы захвата для математической модели в пакете «Динамика нелинейных систем» [7].
- 4. Построить графики напряжений на выходе фазового дискриминатора и на выходе фильтра нижних частот для схемы, используемой в задании 3.
- 5. Используя готовый проект ADS для моделирования системы фазовой автоподстройки с RLC фильтром пронаблюдать и зафиксировать качественно-различные осциллограммы колебаний напряжения в цепи управления и спектры при увеличении индуктивности в фильтре. Максимальное значение индуктивности должно соответствовать добротности фильтра $Q \sim 10$.

6. Вопросы для контроля

- 1. Принципы моделирования в среде для исследования электрических схем ADS. Типы моделей (во временной, в частотной области), параметры моделирования.
- 2. Особенности современных фазовых дискриминаторов: элемент "исключающее ИЛИ", импульсные частотно-фазовые детекторы. Модели фазовых дискриминаторов в среде ADS.
- 3. Математическая модель системы фазовой автоподстройки частоты с делителями частоты в цепи управления. Приближения модели. Связь безразмерных параметров модели и размерных параметров электрической схемы.
- 4. Моделирование системы фазовой автоподстройки частоты в среде ADS, особенности элементов модели, точность моделирования.
- 5. Возможности визуализации и обработки данных моделирования в среде ADS. Диагностика динамических режимов системы фазовой автоподстройки частоты по данным моделирования.

7. Список литературы

- 1. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.
- 2. Системы фазовой синхронизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982.
- 3. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Бакаева Ю.Н. и Капранова М.В. М.: Сов. радио, 1978.
- 4. Матросов В.В., Шалфеев В.Д. Динамический хаос в фазовых системах. Учебное пособие. Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2007.
- 5. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д., Пономаренко В.П. Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решетках: Учебное пособие. Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2007.
- Проектирование радиотехнических устройств в среде Advanced Design System: Учебное пособие / А.Д. Головин, О.А. Смирнова, А.Н. Глотов, Р.Ш. Загидуллин; Под ред. В.Н. Рождествина. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

(http://www.bmstu.ru/~rl1/courses/ads/ads.pdf)

7. Динамика нелинейных систем. Программный комплекс для исследования нелинейных динамических систем с непрерывным временем: Учебнометодическая разработка / Сост. В.В. Матросов. Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2002. Константин Геннадьевич Мишагин

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В СРЕДЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ADS

Практикум

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч-изд. л. Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского 603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37 Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01