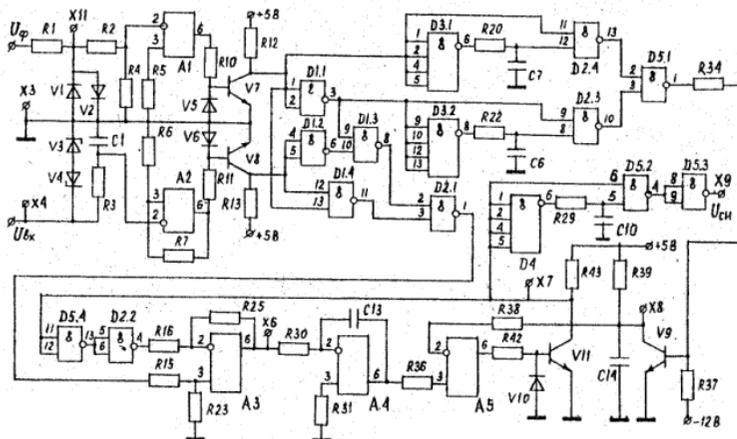


25-2012

ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 9 «Исследование основных свойств и метода стабилизации частоты с помощью фазовой автоподстройки» по дисциплинам «Устройства генерирования и формирования сигналов» и «Устройства передачи и приёма сигналов в СПЦС» направления 2104 00 «Радиотехника», специальностям 210610 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и 090302 «Информационная безопасность ТКС» очной и заочной форм обучения



Воронеж 2012

Составитель канд. техн. наук М.И. Бочаров
УДК 621.396.61

Фазовая синхронизация: методические указания к выполнению лабораторной работы № 9 «Исследование основных свойств и метода стабилизации частоты с помощью фазовой автоподстройки» по дисциплинам «Устройства генерирования и формирования сигналов» и «Устройства передачи и приёма сигналов в СПЦС» направления 210400 «Радиотехника», специальностям 210610 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и 090302 «Информационная безопасность ТКС» очной и заочной форм обучения Сост. М. И. Бочаров. Воронеж, 2012. 29 с.

Методические указания содержат краткие теоретические сведения, домашние и лабораторные задания для выполнения лабораторной работы № 9 «Исследования основных свойств и метода стабилизации частоты с помощью системы фазовой автоподстройки», а также справочный материал для выполнения домашнего задания и контрольные вопросы для допуска к лабораторной работе и её защиты.

Предназначено для специалистов четвертого курса и магистров первого курса.

Табл. 2, Ил. 4. Библиогр: 4 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. Д. Алперин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А. Г. Остапенко

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед началом выполнения работ необходимо:

1. Проверить наличие и надежность соединения лабораторной установки или радиостанции и измерительных приборов к клеммам "Нулевой провод".
2. Подачу электропитания на лабораторную установку или радиостанцию и измерительные приборы производить только после проверки преподавателем правильности выполненных соединений.
3. В случае неисправности лабораторной установки или измерительных приборов сообщить руководителю занятий. Устранять неисправности или производить какие-либо переключения, не предусмотренные работой, студенту запрещается.
4. При выполнении работы необходимо соблюдать меры предосторожности в соответствии с инструкцией по правилам техники безопасности в лаборатории устройств генерирования и формирования сигналов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАБОТЕ

1.1 Цель работы: изучить принцип действия и основные свойства системы фазовой автоподстройки (ФАП); приобрести навыки расчета основных технических характеристик системы ФАП; исследовать метод стабилизации частоты генератора управляемого напряжением с помощью ФАП; приобрести практические навыки по исследованию основных свойств системы ФАП.

1.2 При выполнении лабораторной работы исполь-

зуется следующее оборудование: лабораторная установка; электронно-счетный частотомер; высокочастотный вольтметр; осциллограф.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

- 2.1 Уяснить принцип действия и основные свойства системы ФАП.
- 2.2 Изучить структурную и принципиальную схемы лабораторной установки.
- 2.3 Определить полосы захвата $F_z = \Omega_z/2\pi$, кГц и удержания $F_y = \Omega_y/2\pi$ системы ФАП. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. При проведении расчетов значения недостающих параметров необходимо выбрать произвольно.
- 2.4 Ознакомиться с принципиальной схемой лабораторной установки.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

3.1 При выполнении п.2.1 необходимо, с использованием теоретических сведений, изложенных в [1, с. 355..359; 2, с. 251...254], а также в приложении 1, уяснить принцип работы системы ФАП и ее свойства. При этом необходимо обратить внимание на возможные режимы работы системы ФАП и в особенности режима синхронизма: каким образом достигается синхронизм и роль каждого функционального узла в обеспечении этого режима.

3.2 При выполнении п.2.2 необходимо, используя сведения, приведенные в приложении 1, уяснить принцип стабилизации частоты управляемого LC-автогенератора системой

Таблица 1

№ Вар-та	m	T, мс	Неточ. уст. ч-ты, %	Относ. нестаб. ч-ты, ξ	E_{ϕ} , В	Крут. мод. х-ки, S_{γ} , кГц/В	Тип фильтра
1	0	0,1	0,1	0.0004	1,5	70	ИФ
2	0,15	0,2	0,05	0.0001	2,0	90	ПИФ
3	0,3	0,3	0,2	0.0002	2,5	100	ПИФ
4	0,4	0,3	0,02	0.0001	2,0	80	ПИФ
5	0	0,2	0,3	0.0003	2,5	110	ИФ
6	0,1	0,6	0,2	0.0005	1,5	120	ПИФ
7	0,45	0,5	0,15	0.0003	2,5	60	ПИФ
3	0	0,3	0,01	0.0005	1,5	80	ИФ
9	0,3	0,1	0,4	0.0002	2,0	100	ПИФ
10	0	0,2	0,3	0.0003	1,8	80	ИФ
11	0,2	0,4	0,1	0.0006	2,7	90	ПИФ
12	0,4	0,3	0,03	0.0007	2,2	130	ПИФ

В табл. 1 введены следующие обозначения:

ИФ - интегрирующий фильтр;

ПИФ - пропорционально-интегрирующий фильтр;

E_{ϕ} – управляющее (постоянное) напряжение на выходе фазового дискриминатора;

m - коэффициент, определяющий соотношение между активными сопротивлениями фильтра;

T - постоянная времени фильтра ФАП, а также на возможность обеспечения этого режима в достаточно широкой

полосе частот при медленном изменении дестабилизирующих фактов.

3.3 При выполнении п.2.3 необходимо, по исходным данным варианта домашнего задания, с использованием [3, с.353...357], а также по расчетным формулам, приведенным в приложении 1, определить полосы захвата и удержания. Обратит внимание на то, как тип фильтра и его параметры влияют на технические характеристики системы ФАП.

3.4 При выполнении пункта п. 2.4 необходимо сделать схемотехнический анализ принципиальной схемы исследуемого устройства. Описание принципиальной схемы системы ФАП приведено в приложении 2.

4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1 Ознакомиться с назначением органов управления лабораторной установки и измерительных приборов.

Описание лабораторной установки приведено в приложении 3 методических указаний. Обозначение органов управления лабораторного стенда совпадает с их обозначениями, принятыми на схеме рис. П 2.2 приложения 2.

4.2 Снять статическую модуляционную характеристику (характеристику управления) ГУН.

Включить лабораторную установку. К гнездам Вых 2 подключить вход высокочастотного вольтметра, а к выходу его усилителя - частотомер. (В качестве высокочастотного вольтметра, имеющего выход усилителя, может использоваться любой высокочастотный вольтметр, имеющий выход усилителя). Ручку регулировки E_{ϕ} (крайняя слева) повернуть влево до конца. При этом выходное напряжение, эталонного (кварцевого) генератора установится равным нулю и, соответственно, $E_{\phi} = 0$. Таким образом, в лабораторной установке достигается размыкание (разрыв) кольца ФАП.

Изменяя напряжение смещения E_c на варикапе от минимально возможного до максимально возможного значений с интервалом 1,0...2,0 В снять зависимость $f_{\text{гун}} = \gamma(E_c)$. Результа-

ты измерений занести в табл.2.

Таблица 2

$E_c, В$								
$f_{гун},$ кГц								
$\Delta f_{гун},$ кГц								

При проведении эксперимента время счета (измерения) τ частотомера установить в положение $\tau = 0,1$ с (100 мс).

По полученным результатам:

1. Определить значения $\Delta f_{гун} = f_{гун} - f_{\text{ЭО}}^*$, которые также занести в табл. 2.

2. Построить график зависимости $\Delta f_{гун} = \varphi(E_c)$.

$f_{\text{ЭО}}^* = 8175$ кГц- частота эталонного (кварцевого) генератора, используемого в лабораторной установке.

Определить крутизну модуляционной характеристики варикапа (управителя)

$$S_y = \Delta f_{гун} / \Delta E_c, \quad (4.1)$$

где $\Delta E_c = E''_c - E'_c$;

E''_c - максимальное напряжение смещения на варикапе, соответствующее линейному участку модуляционной характеристики;

E'_c - напряжение смещения на варикапе, при котором $f_{гун} = f_{\text{ЭО}}$.

4.3 Определить полосу захвата системы ФАП.

Как и в п. 4.2 к лабораторной установке подключить высокочастотный вольтметр Вых 2, а к его выходу частотомер. Кроме этого к гнездам Вых 3 подключить осциллограф для визуального определения режима работы системы ФАП.

Ручку регулировки E_ϕ (крайняя слева) вывести в крайнее правое положение, что соответствует максимальному напряжению, поступающему с эталонного генератора на вход ФД (при этом напряжение E_ϕ в режиме синхронизма также будет максимальным). Полоса захвата определяется таким образом, чтобы начальная расстройка изменялась от больших значений к меньшим..

Для этого ручкой регулировки E_c установить напряжение смещения на варикапе, при котором в кольце ФАП устанавливается режим биений. Это состояние системы ФАП легко определяется по временной диаграмме на экране осциллографа, форма которой близка к синусоидальной.

Медленно изменять напряжение смещения на варикапе, чтобы частота напряжения биений, наблюдаемых на экране осциллографа, уменьшалась (период увеличивался) и фиксировать при этом показания частотомера.

Эту процедуру проводить до тех пор, пока переменное колебание с экрана быстро не исчезнет (на экране осциллографа появится прямая линия). Это состояние соответствует установлению в системе ФАП режима синхронизма и, соответственно, частоты $f_{\text{вых}} = f_{\text{ЭО}}$.

Полосу захвата системы ФАП определить как разность частот

$$F_3 = |f_{\text{ио}} - f_{\text{ЭО}}|, \quad (4.2)$$

где $f_{\text{ио}}$ - частота, измеренная частотомером в состоянии, при котором режим биений в системе ФАП еще сохранялся (значение частоты напряжения биений минимально возможное).

Для более точного определения полосы захвата процедуру измерений следует провести несколько раз. Минимальное значение F_3 , полученное по (4.2) в процессе повторных измерений, соответствует более точному значению полосы захвата.

4.4 Определить полосу удержания системы ФАП.

Исходное состояние режима работы системы ФАП - режим синхронизма. Оно легко устанавливается (п.4.3).

Для определения полосы удержания F_y необходимо, наоборот, медленно изменять напряжение E_c таким образом, чтобы начальная расстройка изменялась от малых значений к большим значениям, при которых система ФАП выходит из синхронизма (устанавливается режим биений).

Полоса удержания определяется следующим образом. Зафиксировать в режиме синхронизма значения частоты $f_{Э0}$ и напряжения $E_{фс}$ на выходе ФД. Медленно изменять напряжение смещения E_c варикапа до выхода системы ФАП из синхронизма (выход системы ФАП из синхронизма определить по появлению биений на экране осциллографа и показаниям частотомера, когда $f_{гунб}$ значительно отличается от $f_{Э0}$). Зафиксировать значения частоты $f_{гунб}$, при которой система ФАП вышла из синхронизма и, соответственно, напряжение $E_{фб}$ на выходе ФД.

Полосу удержания определить как разность частот

$$F_y = |f_{Э0} - f_{гунб}|. \quad (4.3)$$

По полученным значениям $E_{фс}$, $E_{фб}$ и крутизне S_y (п. 4.2) расчетным путем определить полосу удержания.

Сравнить полученные значения полосы удержания и полосы захвата (п.4.3) со значениями, полученными в домашнем задании расчетным путем по соотношениям, приведенным в приложении 1.

4.5 Определить временную нестабильность частоты ГУН при разомкнутом кольце ФАП.

Подключить измерительные приборы аналогично п.4.2, обеспечив при этом в кольце ФАП режим биений, установив $E_{ф} = 0$ (ручка потенциометра слева в крайнем левом положении), а частоту $f_{гун}$ изменением E_c установить приблизительно равным $f_{Э0}$.

Измерьте несколько значений ($N=5...7$) частоты $f_{гун}$ на интервале времени $\Delta t = 60... 100$ с. Результаты измерений зане-

сите в отчет.

Определите абсолютную нестабильность частоты ГУН, используя соотношения

$$\Delta f_{гун} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^N [f_{гун}(t_i, \tau) - f_{гунср}] \right\}^2} / (N-1), \quad (4.4)$$

где t_i - момент измерения частоты;

τ - время счета частотомера ($\tau = 0,01$ с);

$$f_{гунср} = \sum_{i=1}^N [f_{гун}(t_i, \tau)] / N. \quad (4.5)$$

По результатам измерений определить относительную нестабильность частоты $\Delta f_{гун} / f_{гунср}$.

4.6 Измерить временную нестабильность частоты эталонного генератора.

Переключить высокочастотный вольтметр вместе с подключенным к его усилителю частотомером к гнездам Вых 1. Ручку регулировки $E_{ф}$ поставить в положение, при котором выходное напряжение достаточно для нормальной работы частотомера (ручка регулировки $E_{ф}$ в среднем положении).

Абсолютную нестабильность частоты Δf_3 определить аналогичным п.4.5 образом, с той разницей, что время счета τ частотомера должно составлять 1 с (10 с).

Относительную нестабильность частоты эталонного генератора определить как $\Delta f_{Эт} / f_{Э0}$.

4.7 Измерить нестабильность частоты ГУН при замкнутом кольце ФАП.

Измерительные приборы подключены аналогично п.4.5.

Однако необходимо замкнуть ФАП.

Для этого ручку регулировки $E_{ф}$ повернуть до отказа часовой стрелке. При этом начальную расстройку между частотами ГУН и ЭГ изменением E_c установить меньше полосы захвата. Измерения проводить по методике п. 4.6 при $\tau = 1$ с (10 с). На основе проведенных в п.4.5...4.7 измерений сделать вывод об эффективности метода стабилизации частоты системой ФАП.

4.8 Исследовать зависимость полосы захвата и удержания от напряжения E_{ϕ} фазового дискриминатора.

Установить амплитуду напряжения эталонного генератора такой величины, чтобы обеспечить нормальную работу ФАП (ручка регулировки E_{ϕ} в среднем положении).

Определить значения полосы захвата и удержания. Результаты измерений занести в отчет.

Сравнить полученные значения полосы захвата и удержания со значениями, полученными в п.п 4.3, 4.4.

4.9 Исследовать влияние постоянной времени ФНЧ на полосу захвата системы ФАП.

К гнездам X1, X2 и X3 подключить исследуемый фильтр нижних частот таким образом, чтобы резистор R_2 внешней RC - цепочки находился между X2 и X3. Обозначения элементов соответствуют схеме рис. П 1.2. При этом резистор R_1 схемы (рис. П1.2) на принципиальной схеме лабораторной установки (рис. П2.2) приведен как элемент R 19.

Установить $E_{\phi} = E_{\phi_{\max}}$. Ручка потенциометра R10 (крайняя слева) в правом положении.

Определить полосы захвата системы ФАП по методике п.4.3 для случаев:

1. Интегрирующего фильтра. В этом случае резистор R19 закортить на корпус лабораторной установки с помощью штекера.

2. Пропорционально - интегрирующего фильтра (резистор R19 включить в схему).

Результаты эксперимента сравнить с расчетными значениями, полученными в процессе выполнения домашнего задания.

4.10 Определить полосы захвата и удержания поисковой системы ФАП при ФНЧ интегрирующего типа.

Включить поисковую систему ФАП: тумблер СХЕМА ПОИСКА поставить в положение ВКЛ, а тумблер АВТОПОИСК/УПТ в положение АВТОПОИСК.

4.11 По методике п. 4.3. и п. 4.4. определить полосы захвата и удержания с ФНЧ интегрирующего типа.

Полученные результаты сравнить с обычной системой ФАП.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1 Цель работы.

5.2 Расчеты, выполненные в соответствии с вариантом домашнего задания.

5.3 Результаты измерений и расчетов, выполненных на основе экспериментальных исследований, представленные в виде таблиц и графиков.

5.4 Выводы по работе, содержащие сопоставление результатов домашнего расчета и эксперимента, а также анализ полученных результатов и их оценку.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы

6.1. Нарисуйте типовую статическую модуляционную характеристику ГУН., Поясните почему крутизна модуляционной характеристики влияет на полосу удержания (захвата) кольца ФАП?

6.2. Поясните назначение фазового дискриминатора системы ФАП. Как влияет схема ФД на технические характеристики выходного сигнала?

6.3. Назовите характерные особенности режимов работы системы ФАП. В каком режиме системы ФАП достигается стабилизация частоты перестраиваемого генератора?

6.4. Каким образом экспериментально определить режим синхронизма и полосу удержания? Какую измерительную аппаратуру необходимо при этом использовать?

6.5. Как экспериментально определить полосу захвата? Какие измерительные приборы необходимо для определения полосы захвата?

6.6. Нарисуйте структурную схему системы ФАП и поясните принцип её работы?

6.7. Каким образом экспериментально по форме колебаний, наблюдаемых на выходе ФД (ВЫХ 3 лабораторной установки) с помощью осциллографа определить режим работы системы ФАП?

6.8. Каким образом в системе ФАП лабораторной установки можно установить режим биений?

6.9. Каким образом в лабораторной установке осуществляется регулирование напряжения E_{ϕ} ? Как устанавливается режим $E_{\phi} = 0$ (размыкание кольца ФАП)?

Вопросы для защиты лабораторной работы

6.10. Нарисуйте принципиальную схему ГУН. Поясните назначение элементов этой схемы и принцип работы устройства?

6.11. Чем обусловлена паразитная частотная (фазовая) модуляция ГУН? Как уменьшить ПЧМ выходного сигнала ФАП?

6.12. Как мощность ГУН влияет на следующие технические характеристики кольца ФАП? Полосы захвата и удержания, уровень шумов, нелинейные искажения, стабильность частоты.

6.13. Как устранить (минимизировать) влияние переходных процессов на работу радиопередатчика?

6.14. С какой погрешностью экспериментально определяется полоса захвата? Полоса удержания?

6.15. Почему изменяется напряжение E_{ϕ} на выходе ФД при изменении начальной расстройки в пределах полосы удержания? Чем определяется максимум этого напряжения?

6.16. Чем обусловлено расхождение значений полосы удержания и полосы захвата, полученных расчётным путём с использованием данных варианта домашнего задания, и экспериментально при выполнении лабораторной работы?

6.17. Какой тип фильтра нижних частот (ИФ, ПИФ или

ЛС- фильтр) обеспечивает наилучшие качественные характеристики выходного сигнала?

6.18. На какие технические характеристики влияет переходный процесс в кольце ФАП? Как уменьшить длительность переходного процесса?

6.19. Как с помощью ФАП можно уменьшить уровень шумов на выходе ГУН?

6.20. Как в системе ФАП можно осуществить угловую модуляцию? В какой точке схемы устройства наиболее целесообразно подключить источник управляющего напряжения?

6.21. Для какой цели в радиопередатчиках применяется система ФАП?

6.22. Для какой цели в радиоприемных устройствах применяется система ФАП?

6.23. Чем обусловлены фильтрующие свойства системы ФАП?

6.24. Как выбрать полосу пропускания ФНЧ кольца ФАП?

6.25. Для какой цели в кольцо ФАП наряду с ФНЧ включается фильтр верхних частот?

6.26. Каким образом можно обеспечить широкую полосу захвата системы ФАП и малый уровень ПЧМ выходного сигнала?

6.27. Какие характеристики сигнала эталонного генератора влияют на качественные характеристики выходного сигнала системы ФАП?

6.28. Какой тип транзистора (полевой или биполярный) и почему целесообразно использовать при построении ЭГ?

6.29. Какой тип транзистора (полевой или биполярный) целесообразно использовать в схемах ГУН?

6.30. Какие преимущества аналогового кольца ФАП перед цифровым?

6.31. Почему в современных синтезаторах частот используется как аналоговые так и цифровые кольца ФАП?

6.32. Какой общий электрод схемы автогенератора ГУН обеспечивает лучшие характеристики системы ФАП?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ ФАП

В основе фазовой синхронизации с помощью кольца ФАП лежит измерение текущей разности фаз колебаний подстраиваемого генератора (ПГ) и эталонного генератора (ЭГ) с последующим использованием этой разности фаз в качестве сигнала ошибки для коррекции частоты и фазы ПГ.

Типовая структурная схема системы ФАП приведена на рис. П 1.1 [1,2].

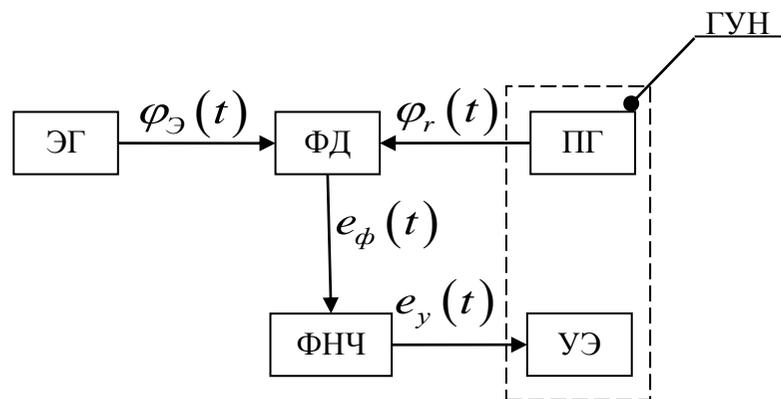


Рис. П 1.1. Структурная схема кольца ФАП

В фазовом дискриминаторе (ФД) кольца ФАП текущая фаза $\varphi_r(t)$ колебаний ПГ сравнивается с фазой эталонного генератора $\varphi_э(t)$ и вырабатывается напряжение ошибки $e_φ(t)$, которое преобразуется цепью управления в виде фильтра нижних частот (ФНЧ) в управляющее напряжение $e_y(t)$, подаваемое на управляющий элемент (УЭ). В технике УЭ вместе с ПГ реализуются единым узлом, называемым генератором управляемым напряжением (ГУН). Подбором параметров ФНЧ достигаются нужные фильтрующие и динамические свойства кольца ФАП. Под действием управляющего напряжения в колебательный

контур ПГ вносится расстройка $\Delta\omega(t)$, которая, совместно с частотой $\omega_{св}$ свободного ПГ, уменьшает текущее рассогласование фаз $\varphi(t) = \varphi_r(t) - \varphi_э(t)$ колебаний ПГ и ЭГ. При монохроматическом эталонном сигнале $\varphi_э(t) = \omega_э t$ ($\omega_э$ - частота эталонного генератора) возможен стационарный режим, называемый режимом синхронизма, при котором устанавливается постоянная разность фаз $\varphi_0 = \text{const}$ и поэтому $\omega_r = \omega_э$. В этом случае $e_y = \text{const}$. Это напряжение подается на вход УЭ. Нежелательные составляющие, которые образуются в ФД, отфильтровываются ФНЧ. При неидеальном ФНЧ остаток побочных составляющих, попадая на вход УЭ, вызывает паразитную частотную (фазовую) модуляцию частоты перестраиваемого генератора.

Дифференциальное уравнение системы ФАП в операторной форме имеет следующий вид

$$p \cdot \varphi + k(p) \cdot \Omega_y \cdot F(\varphi) = \omega_{св} + p \cdot \varphi_э, \quad (\text{П 1.1})$$

где $k(p) = \frac{K(p)}{K(0)}$ - операторный коэффициент передачи

ФНЧ, нормированный по его значению в режиме синхронизма;

$$\Omega_y = K(0) \cdot S_y \cdot E_φ - \text{наибольшая расстройка, которую}$$

может компенсировать цепь управления;

$$S_y - \text{крутизна модуляционной характеристики УЭ}$$

рад/В;

$$F(\varphi) = u_d / U_{дм} - \text{нормированная характеристика ФД.}$$

При стабилизации частоты ПГ эталонный генератор является монохроматическим с постоянной амплитудой напряжения. В этом случае $p \cdot \varphi_э(t) = \omega_э = \text{const}$. При медленном (квазистатическом) изменении дестабилизирующих факторов можно считать $\omega_{св} \approx \omega_{св0} = \text{const}$. В этом случае правая часть уравнения (П1.1) постоянна и возможен стационарный режим, в котором установившаяся разность фаз $\varphi(\infty) = \varphi_0 = \text{const}$, а $\varphi_0 = 0$. При этом получается точное равенство частот $\omega(\infty) = \omega_э$. Если $F(\varphi_0) = \text{const}$, то приходим к уравнению стационарно-

го режим ФАП

$$k(0) \cdot \Omega_y \cdot F(\varphi_0) = \omega_{св0} - \omega_э. \quad (\text{П.1.2})$$

Такой режим называется режимом синхронизма. Его физический смысл состоит в том, что в нем исходная расстройка $\omega_{св0} - \omega_э$ полностью скомпенсирована напряжением $E_\phi \cdot F(\varphi_0)$, образованным в ФД и прошедшим к УЭ через цепь управления ФНЧ с коэффициентом передачи $k(0)$.

Характеристики двух наиболее распространенных типов фазового детектора (кольцевого и балансного) приведены соответственно на рис. П.1.2а и рис. П.1.2б. По оси абсцисс отложена разность фаз $\varphi(t) = \varphi_r(t) - \varphi_э(t)$ напряжений ГУНа и эталонного генератора. Поскольку $F(\varphi) \leq 1$, в режиме синхронизма $|\omega_{св0} - \omega_э|$ не может превзойти величину $\Omega_y = K(0) \cdot S_y \cdot E_\phi$, которую называют полосой синхронизма ФАП или полосой удержания.

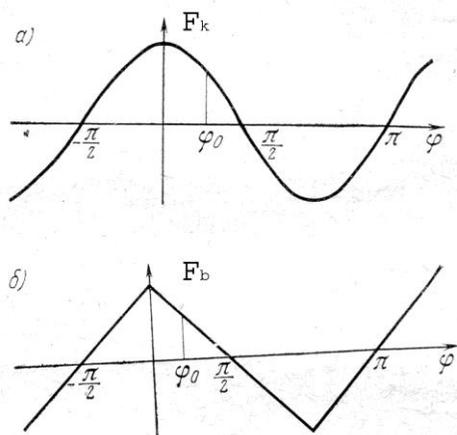


Рис. П.1.2 Характеристики детекторов F_k -кольцевого, F_b - балансного.

Как известно [4], значение фазы $\varphi = \varphi_0$, соответствующие отрицательной обратной связи в кольце ФАП и устойчивому состоянию равновесия, лежат на ветвях, имеющих отрицательную крутизну, в частности, в области $0 < \varphi < \pi$.

Уравнения обоих участков характеристики (рис. П.1.2)

имеют вид

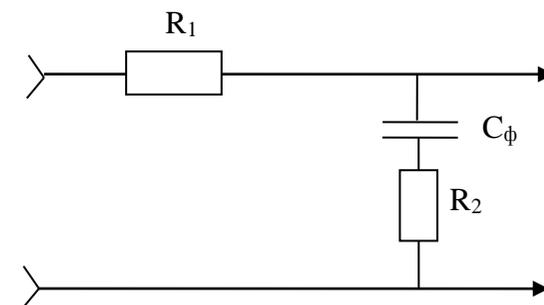
$$u_{дк} = U_{дк} \cos \varphi_0; \text{ при } 0 < \varphi_0 < \pi, \quad (\text{П.1.3})$$

где $U_{дк}$ – максимальное напряжение на выходе кольцевого ФД;

$$u_{дб} = U_{дб} \cdot (2/\pi) \cdot (\varphi_0 + \pi/2); \text{ при } 0 < \varphi_0 < \pi, \quad (\text{П.1.4})$$

где $U_{дб}$ – максимальное напряжение на выходе балансного ФД.

Система ФАП может находиться и других режимах. Возможен и такой режим работы, при котором в среднем разность частот, вырабатываемая генератором сигналов, равна нулю, а разность фаз периодически изменяется. Этот режим называется режимом квазисинхронизма. Обычно систему проектируют так, чтобы этот режим не возникал.



Третий режим работы системы ФАП - режим биений. Его характерной особенностью является непрерывное нарастание в среднем разности фаз ПГ и ЭГ. Этот режим наблюдается в тех случаях, когда начальная расстройка ПГ относительно ЭГ больше полосы удержания. Иногда он возможен при начальной расстройке, меньшей полосы удержания. В режиме биений среднее значение частоты ПГ отличается от ча-

стоты эталонного генератора.

Переходное состояние системы, при котором режим биений со временем переходит в режим удержания или квазисинхронизма, называется режимом захвата. Режим захвата характеризует устойчивое состояние системы в «большом».

Под полосой захвата Ω_3 понимается область начальных расстроек ПГ и ЭГ, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим удержания (или квазисинхронизма).

Обычно в момент включения в системе ФАП устанавливается режим биений. При этом, если начальная расстройка не выходит за пределы полосы захвата, в системе возникает режим удержания. Если начальная расстройка превышает полосу захвата, то постоянная составляющая напряжения на выходе ФД недостаточна для ее полной компенсации и в системе наблюдается режим биений.

Соотношение между Ω_y и Ω_3 определяется инерционностью цепи управления системы. Так, если ФНЧ (рис. П 1.1) из системы исключен (цепь управления безинерционна), то $\Omega_y = \Omega_3$.

Но в этом случае фильтрующая способность ФАП оказывается низкой, поскольку помехи, действующие на выходе ФД, непосредственно воздействуют на частоту подстраиваемого генератора, вызывая паразитную фазовую модуляцию.

Возможны различные варианты построения схем ФД. Часто используют балансную и кольцевую схемы, обеспечивающие компенсацию многих составляющих продуктов нелинейного преобразования.

Выходной сигнал ФД определяется разностью фаз колебаний, подаваемых на его входы. Уровень постоянной со-

Рис. П 1.2. Схема фильтра

ставляющей на выходе ФД определяется следующим выражением

$$E_\phi = A \cos \varphi_0, \quad (\text{П } 1.3)$$

где $A = K_\phi \cdot U_\varepsilon \cdot U_{\text{ПГ}}$;

K_ϕ - коэффициент, зависящий от параметров схемы ФД;

$U_\varepsilon, U_{\text{ПГ}}$ - амплитуды напряжений эталонного и перестраиваемого генераторов, воздействующих на нелинейные элементы (диоды) схемы ФД.

Рассмотрим фильтрующие свойства системы ФАП.

При наличии ФНЧ уровень помехи, поступающей на УЭ, уменьшается и, соответственно, уменьшается уровень паразитной фазовой модуляции частоты ω_r . Однако при наличии фильтра в кольце ФАП появляется дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный его инерционностью. При этом полоса захвата становится меньше полосы удержания.

Увеличение инерционности ФНЧ, необходимое для подавления внешних помех, приводит в нелинейной ФАП к гистерезисным явлениям при вхождении в синхронизм. Они проявляются в том,

что полоса захвата в этом случае становится меньше полосы удержания.

Вычислить полосу захвата трудно из-за существенной нелинейности дифференциального уравнения ФАП (П 1.1). Методы нахождения полосы захвата изложены в специальной литературе.

В качестве ФНЧ используются различные сочетания R, L, C - элементов. Причем, чем выше требования к уровню паразитной фазовой модуляции управляемого генератора, тем порядок фильтра выше.

Ограничимся рассмотрением системы ФАП с синусоидальной нормированной характеристикой ФД вида $F(\varphi) = \sin \varphi$ и пропорционально-интегрирующим ФНЧ с параметрами $m = R_2/(R_1 + R_2)$ и $T = (R_1 + R_2) \cdot C_\phi$ (рис. П 1.2).

Полоса захвата системы ФАП должна быть больше максимально возможных расстроек, т.е. $\Omega_3 > \overline{\Delta\omega_n}$ ($\Delta\omega_n$ - начальная расстройка по частоте).

В свою очередь начальная расстройка в кольце ФАП определяется двумя основными факторами:

неточностью грубой (предварительной) установки частоты $\Delta\omega_{ГР}$ управляемого генератора;

абсолютной нестабильностью частоты управляемого генератора.

$$\Delta\omega_{Г\varepsilon} = \varepsilon \cdot \omega_{Г} , \quad (\text{П } 1.4)$$

где $\varepsilon = \Delta\omega_{Г} / \omega_{Г}$ - относительная долговременная нестабильность частоты управляемого генератора ($\varepsilon = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ для LC-автогенераторов).

Точность предварительной установки частоты ПГ составляет несколько десятых долей процента.

С учетом изложенного

$$\Delta\omega_{Н} = \Delta\omega_{ГР} = \Delta\omega_{Г\varepsilon} . \quad (\text{П } 1.5)$$

Чем больше полоса захвата Ω_3 превышает расстройку $\Delta\omega_{Н}$, тем меньше длительность переходных процессов в системе ФАП.

Длительность переходных процессов в аналоговой ФАП с ПИФ приближенно можно оценить с использованием следующих соотношений [3]

$$\tau = \tau_{\omega} + \tau_{\varphi} , \quad (\text{П } 1.6)$$

$$\text{где } \tau_{\omega} \approx 0,1 \cdot \frac{\Delta\omega_{Н}^2}{B_{Ш}^2} , \quad (\text{П } 1.7)$$

$$B_{Ш} = \frac{\omega_{П}}{2} \left(1 + \frac{1}{4\xi} \right) - \text{шумовая полоса системы ФАП;}$$

$$\omega_{П} = \sqrt{\frac{\Omega_y}{T}} - \text{полоса пропускания системы ФАП;}$$

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{T \cdot \Omega_y}} \cdot (1 + m \cdot T \cdot \Omega_y);$$

$$\tau_{\varphi} = \frac{2}{\Omega_y \cdot \cos \xi_{уст}} \cdot \ln \frac{2}{\delta} , \quad (\text{П } 1.8)$$

$$\text{где } \xi_{уст} = \arcsin \frac{\Delta\omega_{Н}}{\Omega_y};$$

$\delta = 0,05 \dots 0,1$ - коэффициент, характеризующий допустимое отклонение от $\xi_{уст}$, определяющее окончание переходного процесса по фазе.

Расчет длительности переходных процессов с некоторыми другими типами ФНЧ можно найти в специальной литературе. Переходные процессы в дискретных ФАП с произвольными $F(\varphi)$ рассчитывается обычно с помощью ЭВМ.

Полосу захвата системы ФАП при выбранных параметрах ФНЧ можно определить с помощью зависимостей, приведенных на рис. П 1.3.

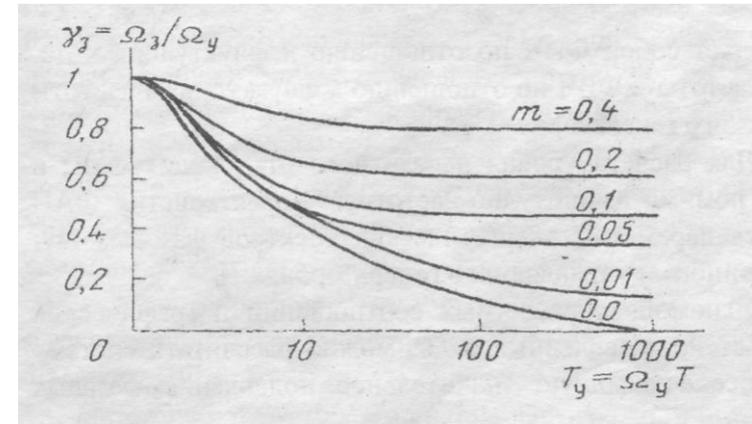


Рис. П 1.3. Зависимость полосы захвата от постоянной времени фильтра

В большинстве практических случаев параметры m и T выбирают так, чтобы нормированная постоянная времени $T_y = T \cdot \Omega_y = 10 \dots 500$. При меньших T_y система ФАП вырожда-

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ
ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка выполнена по типовой структурной схеме ФАП, приведенной на рис. П 2.1.

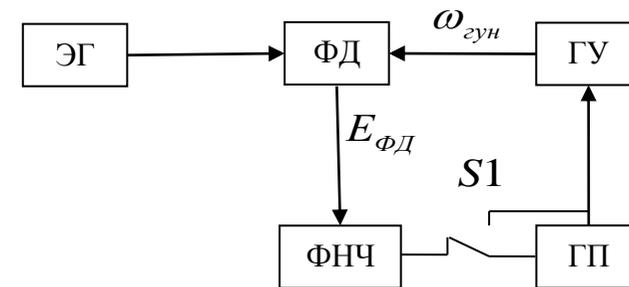


Рис. П 2.1. Структурная схема лабораторной установки

Ее отличие от типовой схемы ФАП (рис. П 1.1) состоит в том, что с помощью генератора поиска (ГП) автоматически осуществляется автопоиск по частоте в режиме, когда расстройка ГУН относительно частоты ЭГ превышает полосу захвата. Включение режима автопоиска осуществляется тумблером S1. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. П 2.2.

Эталонный генератор

В качестве эталонного генератора используется кварцевый автогенератор, генерирующий частоту $f_3 \approx 8175$ кГц. Генератор выполнен на транзисторе VT1 по схеме с заземленным коллектором и резонатором ZQ1 в контуре. Заземление коллектора по РЧ осуществляется с помощью блокировочного конденсатора С6 и емкостью стабилитрона VD3. Элементы LI,

ется практически в безфильтровую систему, а при больших происходит увеличение длительности переходных процессов по частоте, а ослабление высокочастотных помех при этом не увеличивается.

Параметр m обычно выбирают от тысячных до нескольких десятых долей единицы.

В случае ФНЧ в виде простейшей интегрирующей RC - цепочки ($m = 0$) и при $\Omega_y \cdot T > 3$ ($T = RC$ - постоянная времени фильтра) соотношение между полосами захвата и удержания определяется следующей зависимостью

$$\frac{\Omega_3}{\Omega_y} = \frac{1,27}{\sqrt{T \cdot \Omega_y}} \quad (\text{П 1.9})$$

Одним из основных параметров системы ФАП является уровень паразитного отклонения фазы (частоты) ее выходного сигнала. Известно [1, 4], что система ФАП представляет собой ФНЧ по отношению к флуктуациям эталонной частоты и ФВЧ по отношению к флуктуациям частоты управляемого генератора.

Для расчета уровня паразитного отклонения фазы и частоты помимо амплитудно-частотных характеристик ФАП требуются параметры энергетических спектров фазовых шумов эталонного и управляемого генераторов.

С помощью расчетных соотношений и графических зависимостей, приведенных в [3], можно рассчитать систему ФАП, обеспечивающую значительное подавление фазовых шумов.

C2 и C3 образуют колебательный контур LC- автогенератора. Для изменения частоты ЭГ в пределах от $f_{ЭН} = 8174,8$ кГц до $f_{ЭВ} = 8175,5$ кГц последовательно с резонатором включены два встречно-последовательно соединенные варикапа VD1 и VD2.

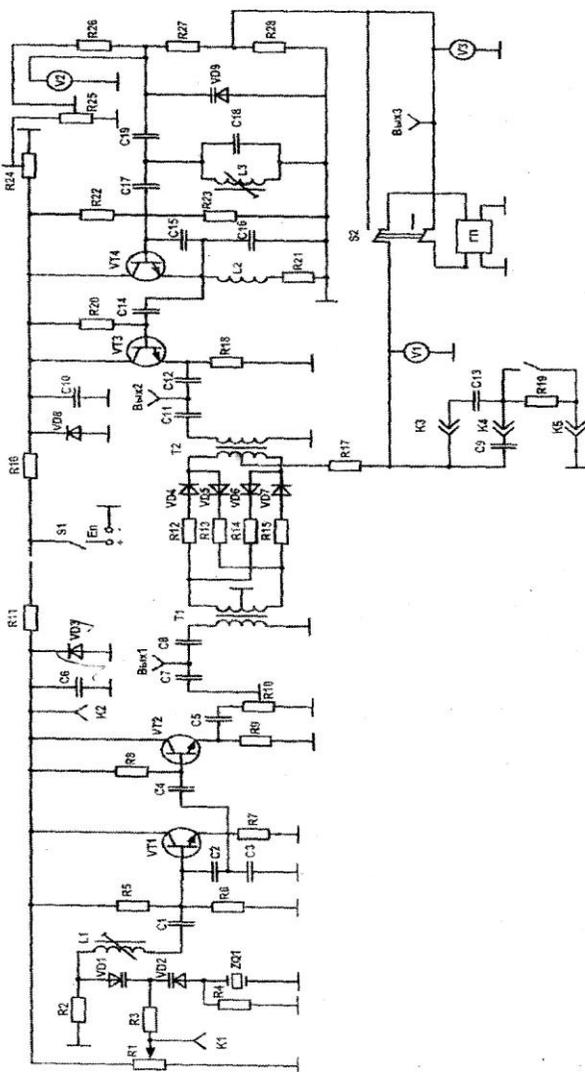


Рис. П. 2.2 Принципиальная схема лабораторной установки

Регулирование частоты ЭГ осуществляется путем изменения напряжения смещения на этих варикапах с помощью потенциометра R1. Резистор R4 служит для срыва паразитных колебаний, которые могут возникать в схеме за счет статической емкости резонатора. Одновременно резистор R4 подключает варикап VD2 к общей точке устройства, что создает на нем требуемую величину напряжения смещения. Аналогичную функцию выполняет резистор R2 в цепи смещения варикапа VD1.

Усилительный каскад, выполненный на транзисторе VT2 по схеме с общим коллектором, выполняет роль буфера. На выходе буферного каскада с помощью потенциометра R10 осуществляется регулирование амплитуды напряжения эталонного генератора, поступающего на первый вход ФД. Для измерения уровня этого напряжения имеется гнездо Вых1.

Генератор управляемый напряжением

ГУН собран на транзисторах VT3 и VT4. На VT4, собственно, выполнен автогенератор по схеме с емкостной обратной связью и заземленным коллектором. Заземление коллектора VT4 по РЧ осуществляется конденсатором C10 и емкостью стабилитрона VD8. Колебательный контур автогенератора выполнен на элементах C15 (конденсатор обратной связи), C16, C17 (дополнительный конденсатор), L3 и C18. Для перестройки частоты используется варикап VD9, подключенный к параллельному контуру L3 и C18 через конденсатор связи C19. Смещение на варикапе VD9 создается резисторами R24...R28. При этом резисторы R24 и R25 является потенциометрами, с помощью которых регулируется напряжение смещения на варикапе VD9.

На транзисторе VT3 реализован буферный каскад по схеме с общим коллектором. С выхода этого каскада сигнал поступает на второй вход ФД. Для измерения уровня этого сигнала служит гнездо Вых 2.

Фазовый дискриминатор

Фазовый дискриминатор (детектор) является основным элементом ФАП. В схеме лабораторной установки ФД выполнен по кольцевой схеме на диодах VD4...VD7, что позволяет уменьшить уровень продуктов преобразования на его выходе. С целью улучшения симметрии схемы последовательно с диодами VD4...VD7 включены, соответственно, резисторы R12, R13, R14 и R15. Этим достигается дополнительное снижение уровня продуктов нелинейного преобразования на выходе ФД. Трансформаторы T1 и T2 являются согласующими. С их помощью обеспечивается оптимальный режим работы диодов VD4... VD7 (устанавливается требуемый уровень ВЧ сигнала). Выходной сигнал с ФД снимается со средней точки трансформатора T2 и передается на варикап VD9, создавая дополнительное напряжение смещения, которое осуществляет регулирование частоты ГУН. Уровень напряжения смещения на варикапе VD9 измеряется стрелочным вольтметром V2.

Для визуального наблюдения переходного процесса в кольце ФАП используется гнездо Вых 3.

Генератор поиска

ГП осуществляет автоматическое изменение частоты ГУН при его подключении тумблером S2 в схему. На панели стенда этот тумблер имеет надпись "Схема поиска". При включенном тумблере S2 и при условии, что начальная расстройка ГУН относительно ЭГ превышает полосу захвата, автоматически включается генератор поиска, вырабатывающий пилообразное напряжение низкой частоты. Это напряжение создает изменяющееся напряжение смещения на варикапе VD9. В результате этого частота ГУН изменяется до тех пор, пока разность частот ГУН и ЭГ окажется меньше полосы захвата. В этом случае в кольце ФАП начинает устанавливаться режим синхронизма, и на выходе ФД появляется постоянное напряжение Eф, которое переводит

ГП в режим усиления постоянного тока.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Органы управления и индикации лабораторной установки

В качестве лабораторной установки используется стенд, в который вмонтирован макет устройства, выполненный по структурной и принципиальной схемам, приведенным соответственно на рис. П2.1 и рис. П2.2 приложения 2.

На передней панели стенда имеются следующие органы управления, гнезда для подключения измерительными приборами и индикаторы*:

S1- тумблер для подачи напряжения сети 50 Гц к макету;

S2 (СХЕМА ПОИСКА) - тумблер для включения режима автопоиска;

ВЫХ 1 - для измерения амплитуды и частоты эталонного генератора;

ВЫХ 2 - для измерения амплитуды и частоты управляемого генератора;

ВЫХ 3 - выход фазового дискриминатора. Используется для определения режима работы кольца ФАП.

K1 - для измерения напряжения смещения на варикапах эталонного генератора;

K2 - для измерения напряжения питания;

K3... K5 - для подключения фильтра нижних частот;

ручка потенциометра R10 (крайняя слева) - для регулировки амплитуды напряжения эталонного генератора (напряжения Eф);

*все обозначения органов управления соответствуют обозначениям на схеме рис. П2.2.ручка потенциометра R25 (крайняя справа) с надписью ЧАСТОТА - для регулировки напряжения смещения на варикапе ГУН;

ручка потенциометра R1 (вторая слева) - для регулировки частоты эталонного генератора;

ручка Kб (потенциометра R24) - для регулирования напряжения смещения на варикапе управляемого генератора, в

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОМЕХ НА СИСТЕМУ ФАП

процессе работы целесообразно поставить в крайнее правое положение;

индикатор VI (стрелочный вольтметр справа) - для определения уровня управляющего напряжения на выходе ФД;

индикатор V2 (стрелочный вольтметр слева) - для определения величины управляющего напряжения на варикапе ГУН;

индикатор V3 (стрелочный вольтметр в центре лицевой панели) - для определения уровня управляющего напряжения в режиме автопоиска.

Тумблер АВТОПОИСК/УПТ служит для переключения режима работы генератора поиска.

Воздействие помех на различные элементы схемы ФАП приводят к паразитной фазовой и амплитудной модуляции выходного напряжения [4]. Амплитудная модуляция обычно не играет существенной роли, поскольку она может быть устранена путем ограничения воздействующего напряжения. Но воздействие паразитной фазовой модуляции приводит к помехам двух видов.

Помехи первого рода создают паразитную фазовую модуляцию принятого сигнала. Максимальная частота модуляции, приводящая к подобному роду помех, не превышает по ширине полуширины спектра принимаемого сигнала. Такие помехи называются низкочастотными, в следствие малых значений частот модуляции, или внутриполосными, поскольку их частоты находятся в полосе полезных частот. Особенно вредные воздействия рассматриваемого вида помех проявляются при приеме сигналов с относительной фазовой телеграфией (ОФТ) и при других видах дискретной модуляции.

Другого рода помехи связаны с воздействием на вход радиоприемного устройства мощного мешающего сигнала. Если разность частот между мешающим и полезным сигналами такая же как между основной и побочной составляющими гетеродина, то

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие указания по работе	2
2. Домашнее задание.....	2
3. Методические указания по выполнению домашнего задания	2
4. Лабораторное задание	3
5. Содержание отчета.....	6
6. Контрольные вопросы	6
Приложение 1. Принцип работы системы ФАП	8
Приложение 2. Описание принципиальной схемы лабораторной установки.....	12
Генератор поиска	14
Приложение 3. Органы управления и индикации лаборатор- ной установки	14
Приложение 4. Воздействие помех на систему ФАП.....	14
Библиографический список	16

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов: учеб. пособие/ Кулешов В.Н., Удалов Н.Н., Богачев В.М. и др.; под ред. В.Н. Кулешова и Н.Н. Удалова.-М.: Издательский дом МЭИ, 2008.- 416с.
2. Радиопередающие устройства: учебник для вузов /Шахгильдян В.В., Козырев В.Б., Ляховкин А.А. и др ; 'под. ред. В. В.Шахгильдяна.- М.: Радио и связь, 2003.- 560 с.
3. Проектирование радиопередатчиков: учеб. пособие для вузов /Шахгильдян В.В., Шумилин М.С., Козырев В.Б. и др.; под. ред. В.В. Шахгильдяна. -М.: Радио и связь, 2000.- 656 с.
4. Артым А.Д. Частотные методы анализа и синтеза систем ФАП/ А.Д. Артым, С.В. Трифонов - М.: Связь, 1976.-160 с.

ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

Составитель: Бочаров Михаил Иванович

В авторской редакции

Подписано в печать 10.03.2012.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов

Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,0, Тираж 69 экз. "С" 121.

Зак. №