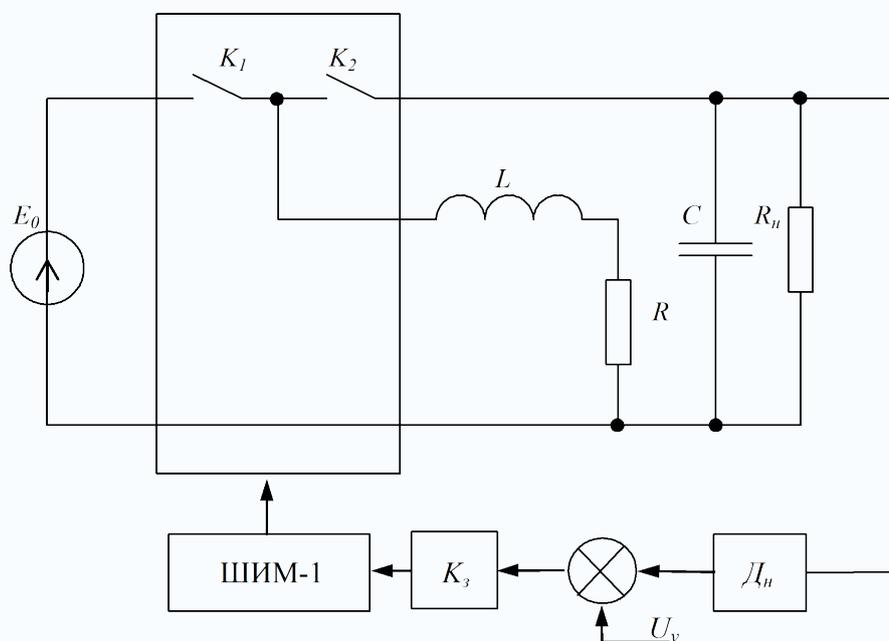


ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Ю.Н. Тановицкий

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Руководство к выполнению  
курсового проекта



ТОМСК — 2011

Федеральное агентство по образованию  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра промышленной электроники**

**Ю.Н. Тановицкий**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ  
СХЕМ**

**Руководство к выполнению  
курсового проекта  
для направления 210100  
«Электроника и микроэлектроника»**

**2011**

**Тановицкий Ю.Н.**

Системы автоматизированного проектирования электронных схем: Руководство к выполнению курсового проекта. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. — 35 с.

© Тановицкий Ю.Н., 2011

© ТУСУР, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Требования к выполнению курсового проекта .....	5
1.1 Содержание пояснительной записки.....	5
1.2 Требования к Техническому заданию .....	5
1.3 Требования к аннотации и введению .....	6
1.4 Требования к представлению математической модели .....	6
1.5 Требования к описанию методов анализа.....	7
1.6 Экспериментальная часть.....	7
1.7 Заключение .....	7
2 Положение о рейтинговой системе .....	7
Рекомендуемая литература .....	8
Приложение А. Задания на курсовое проектирование по направлению «Исследование динамики нелинейного устройства» .....	9
Приложение Б. Пример выполнения курсового проекта .....	19
Приложение В. Пример выполнения курсового проекта.....	28

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовое проектирование имеет цель — закрепление теоретического материала и формирование навыков работы с математическими моделями и специализированным программным обеспечением для проектирования электронных схем.

Студенту предоставляется выбор из трех возможных путей работы над курсовым проектом:

1. Типовое задание на исследование нелинейной динамики. Примеры типовых заданий находятся в Приложении А.

2. Создание и моделирование электронной схемы, связанное с направлением исследований магистерской диссертации, работой над групповым проектом, или с направлением работ по месту будущего распределения.

3. Проведение исследования с целью создания методики моделирования определенных классов устройств или изучения возможностей программных пакетов.

Независимо от выбранного пути работа над проектом начинается с составления и утверждения Технического задания на проектирование, в котором обозначены цели проектирования, технические характеристики устройства, а также индивидуальный календарный план работы над проектом. Математическое или компьютерное моделирование с представлением результатов, кратким описанием используемых методов, выводами и перечнем использованных источников являются обязательными составными частями пояснительной записки.

# **1 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

## **1.1 Содержание пояснительной записки**

Пояснительная записка должна отвечать требованиям образовательного стандарта вуза ОС ТУСУР 6.1 «РАБОТЫ СТУДЕНЧЕСКИЕ УЧЕБНЫЕ И ВЫПУСКНЫЕ КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ».

Курсовой проект оформляется в виде пояснительной записки и должен содержать следующие необходимые разделы:

1. Титульный лист.
2. Утвержденное Техническое задание на курсовое проектирование.
3. Содержание.
4. Аннотация или введение.
5. Обзор существующих решений
6. Математическая модель.
7. Методы анализа.
8. Заключение или Выводы.
9. Список использованных источников.
10. Приложения (схемы, листинги, таблицы...).

## **1.2 Требования к Техническому заданию**

Обычно техническое задание (ТЗ) является неотъемлемой частью договора на выполнение определенных работ, предоставления услуг или поставку товаров. Договора заключаются между сторонами (обычно Исполнителем и Заказчиком) и используются для четкого обозначения, какие именно — услуги, работы или товары — обязуется предоставить Исполнитель, а также условий, при которых наступают те или иные юридические последствия, например, обязанность у Заказчика оплаты работ Исполнителя. Договора могут заключаться как между юридическими или физическими лицами, так и внутри предприятий между подразделениями и даже отдельными работниками. Технические задания составляются в соответствии с национальными и международными

ми стандартами. Работы над ТЗ могут занимать существенную часть времени от всей продолжительности работы над проектом и обычно их стоимость составляет от 5 % до 20 % от общей стоимости проекта. Ниже приводятся разделы ТЗ, которые необходимо отразить в пояснительной записке

- назначение и область применения создаваемого устройства;
- схема использования устройства;
- технико-экономическое обоснование проекта;
- общая структура предполагаемого технического решения;
- перечень параметров.

К техническому заданию также в случае работы над индивидуальным или групповым проектом необходим Календарный план работ.

### **1.3 Требования к аннотации и введению**

Аннотация содержит краткое (обычно менее 1000 печатных символов) описание ключевых составляющих проекта. Аннотации могут публиковаться отдельно от работ, например на библиотечных карточках, в реферативных журналах или в сети Интернет и дают возможность читателю понять содержит ли работа действительно необходимую для него в текущий момент информации, поскольку только из названия это зачастую неясно.

Введение (обычно до 10 страниц печатного текста) можно рассматривать, как «развернутую» аннотацию, кроме того, во введении также, обычно, содержится обзор существующих решений, из которого понятны взгляды автора на направление дальнейших работ.

Если студент выбирает вместо введения аннотацию, то раздел «Обзор существующих решений» становится обязательным разделом пояснительной записки.

### **1.4 Требования к представлению математической модели**

Математическую модель следует представлять в одной из следующих форм или в виде комбинации из этих форм:

- системы уравнений, с описанием вывода этих уравнений;

- схемы, с описанием элементов схем достаточным для воспроизведения модели, при этом допускается использовать ссылки на используемые источники;
- в виде алгоритмов на формальных языках программирования или моделирования (Matcad, C++ и т.п.), при этом листинги программного кода желательно выносить в приложение.

## 1.5 Требования к описанию методов анализа

Описания метода анализа должно содержать:

- название метода анализа;
- ссылка на источник;
- краткое описание принципов работы этого метода;
- описание параметров метода.

## 1.6 Экспериментальная часть

Экспериментальная часть должна содержать:

- цели эксперимента;
- схему эксперимента;
- результаты в виде графиков или таблиц;
- необходимые пояснения.

## 1.7 Заключение

В разделе «Заключение» следует отразить достигнуты ли обозначенные в задании цели проектирования, и видимые автором направления совершенствования устройства, алгоритмов и т.п.

## 2 ПОЛОЖЕНИЕ О РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЕ

Таблица 2.1 Рейтинговая оценка (Курсовой проект)

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Получение задания на курсовой проект	4			4
Подбор и обзор литературы	12			12

Выполнение необходимых исследований по проекту		18	12	40
Полное оформление работы			12	12
Компонент своевременности	4	4	4	12
<b>Итого максимум за период:</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>70</b>
Защита проекта/работы (максимум)				-
<b>Нарастающим итогом</b>	<b>20</b>	<b>44</b>	<b>70</b>	<b>100</b>

За несвоевременное выполнение индивидуального задания снимается 2 балла; за несвоевременное выполнение контрольных, самостоятельных работ снимается по 1 баллу соответственно.

**Таблица 2.2. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки**

<i>Баллы на дату контрольной точки</i>	<i>1КТ</i>	<i>2КТ</i>	<i>2КТ-конец семестра</i>	<i>Оценка</i>
<i>≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ</i>	<i>≥ 37</i>	<i>≥ 28</i>	<i>≥ 25</i>	<i>5</i>
<i>От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ</i>	<i>28-36</i>	<i>22-27</i>	<i>20-24</i>	<i>4</i>
<i>От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ</i>	<i>25-27</i>	<i>18-21</i>	<i>17-19</i>	<i>3</i>
<i>&lt; 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ</i>	<i>&lt; 25</i>	<i>&lt; 43</i>	<i>&lt; 60</i>	<i>2</i>

**Таблица 2.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку**

<b>Оценка (ГОС)</b>	<b>Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен</b>	<b>Оценка (ECTS)</b>
5 (отлично) (зачтено)	90 - 100	A (отлично)
4 (хорошо) (зачтено)	85 – 89	B (очень хорошо)
	75 – 84	C (хорошо)
	70 - 74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно) (зачтено)	65 – 69	
2 (неудовлетворительно), (не зачтено)	60 - 64	E (посредственно)
	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / Под ред. О.В. Алексеева. — М.: Высшая школа, 2000 (33 экз. в библиотеке).

2. Баушев В.С. Математическое моделирование и автоматизация проектирования электронных схем: Учебное пособие. — Томск: ТУСУР, 2007. — 91 с.

3. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. — М.: Радио и связь, 1988. — 560 с.

4. Чуа Леон О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем: (Алгоритмы и вычисл. методы). — М.: Энергия, 1980. — 638 с.: ил.

5. Разевиг В.Д. Система P-CAD 8.5—8.7: Руководство пользователя. — М.: Солон-Р, 1999.

6. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Вып.1, 4. — М.: Радио и связь, 1992.

7. ОС ТАСУР 6.1-97. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Задания на курсовое проектирование по направлению «Исследование динамики нелинейного устройства»

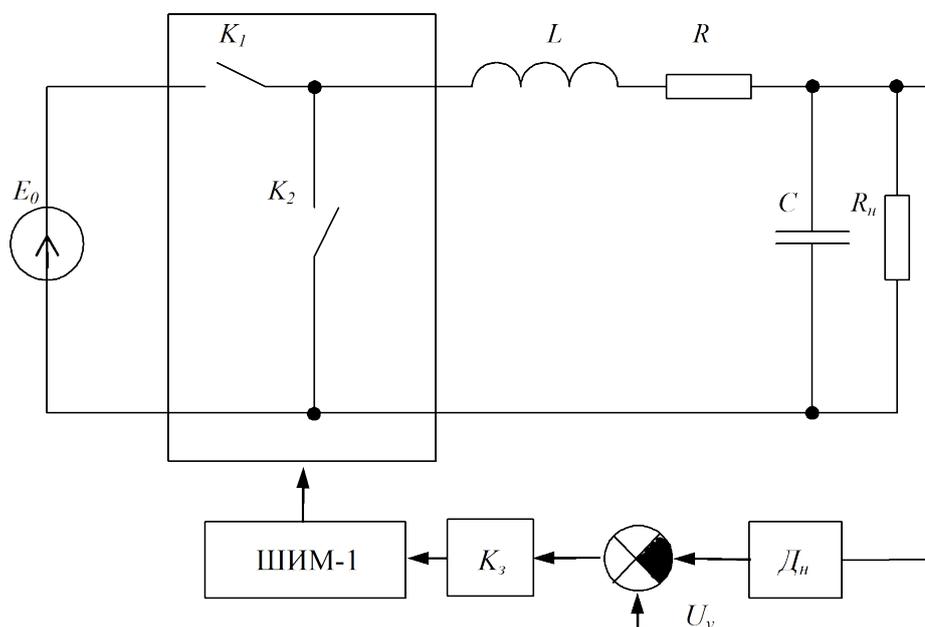
Предлагается определить тип структуры (нормальная или аномальная) заданного согласно варианту устройства.

Определение типа структуры предполагает:

1. Формирование математической модели.
2. Создание алгоритма для поиска стационарного решения  $X_c(t)$ .
3. Проведение оптимизации с использованием показателей качества определяемых на стационарных движениях.
4. Исследование свойств множеств  $\Pi_k$

### Вариант 1

#### Стабилизатор понижающего типа



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{65 \leq E_0 \leq 180 \hat{A}\}$ .

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, U_y > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_{\hat{A}}^{ext} = (E_0 = 104 \hat{A}).$$

Целевая функция:

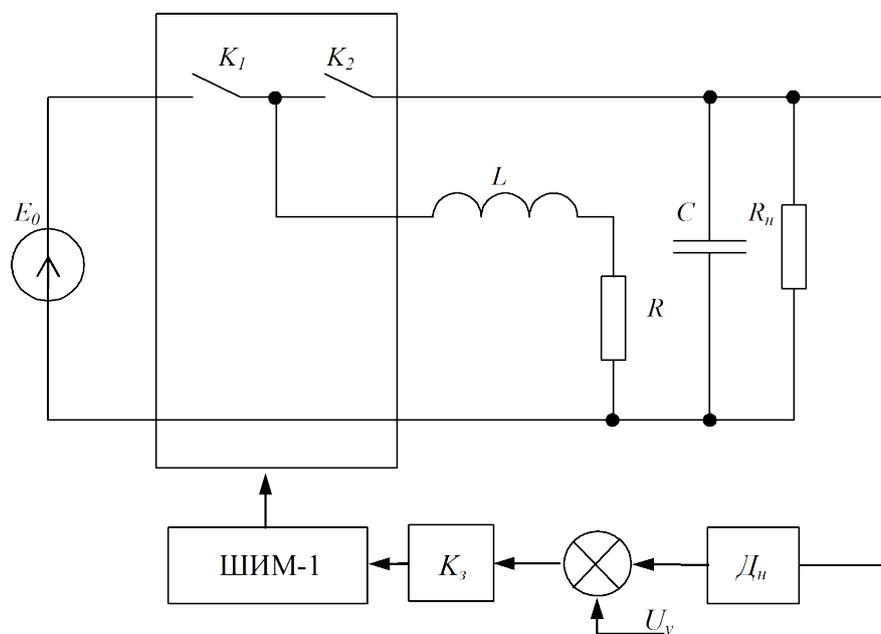
$$W(P^{int}) = \mu_1 \max_t |U_i - U_{\zeta \dot{a} \ddot{a}}| + \mu_2 \tau; \mu_1 \gg \mu_2.$$

Остальные параметры модели:  $L = 0,01$  Гн,  $C = 0,1$  мкФ,  $R = 10,6$  Ом,  $R_n = 100$  Ом,  $U_{зад} = 50$  В,  $U_p = 10$  В,  $a = 10^{-5}$  с — длительность тактового интервала.

Ключи работают противофазно — когда К1 открыт К2 закрыт, когда К1 закрыт К2 открыт.

## Вариант 2

### Стабилизатор постоянного напряжения инвертирующего типа



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{65 \leq E_0 \leq 180 \hat{A}\}$

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, U_y > 0\}$

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_{\Lambda}^{ext} = (E_0 = 104 \hat{A}).$$

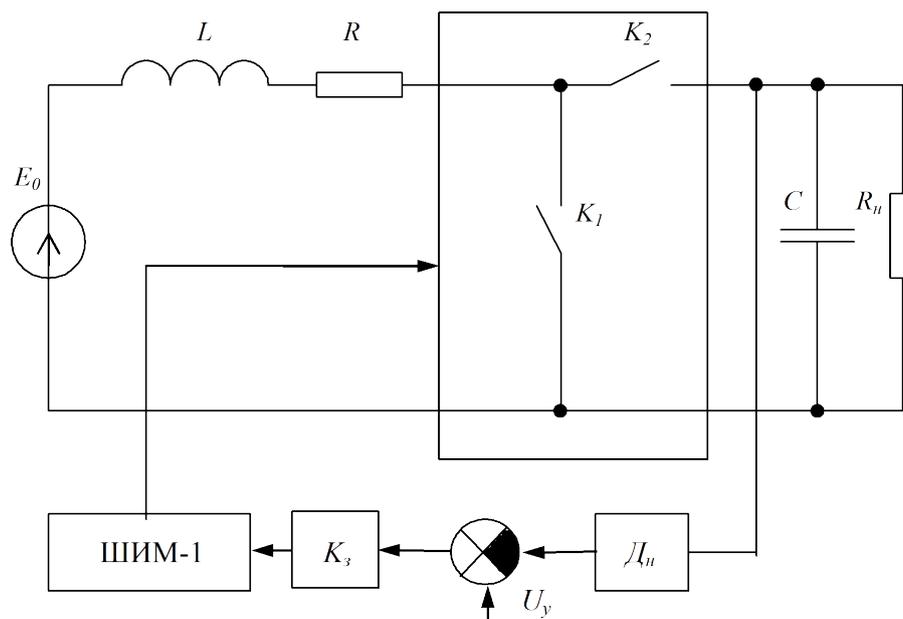
Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 \max_t |U_i - U_{\zeta \dot{a} \ddot{a}}| + \mu_2 \tau; \mu_1 \gg \mu_2.$

Остальные параметры модели:  $L = 0,01$  Гн,  $C = 0,1$  мкФ,  $R = 10,6$  Ом,  $R_n = 100$  Ом,  $U_{зад} = 50$  В,  $U_p = 10$  В,  $a = 10^{-5}$  с — длительность тактового интервала.

Ключи работают противофазно — когда К1 открыт К2 закрыт, когда К1 закрыт К2 открыт.

### Вариант 3

#### Стабилизатор постоянного напряжения повышающего типа



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{65 \leq E_0 \leq 180 \text{ \AA}\}$ .

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, U_y > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_A^{ext} = (E_0 = 104 \text{ \AA}).$$

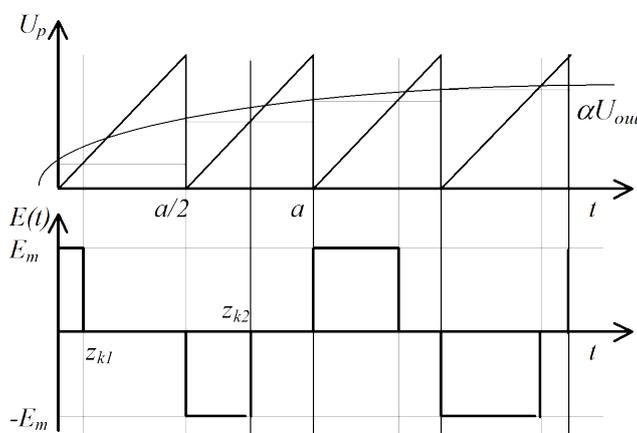
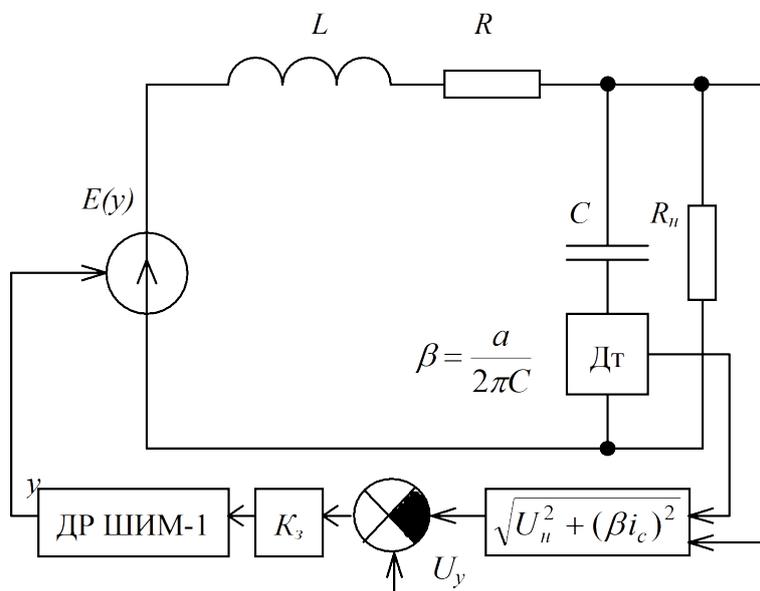
Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 \max_t |U_i - U_{\text{зад}}| + \mu_2 \tau$ ;  $\mu_1 \gg \mu_2$ .

Остальные параметры модели:  $L = 0,01$  Гн,  $C = 0,1$  мкФ,  $R = 10,6$  Ом,  $R_n = 150$  Ом,  $U_{\text{зад}} = 200$  В,  $a = 10^{-5}$  с,  $U_p = 10$  В — длительность тактового интервала.

Ключи работают противофазно — когда К1 открыт К2 закрыт, когда К1 закрыт К2 открыт.

## Вариант 4

### Стабилизатор переменного напряжения понижающего типа



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{65 \leq E_m \leq 180 \hat{A}\}$ .

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, U_y > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_{\hat{A}}^{ext} = (E_0 = 104 \hat{A}).$$

Целевая функция:

$$W(P^{int}) = \mu_1 \max_t |U_i - U_{\text{зад}}| + \mu_2 \tau; \mu_1 \gg \mu_2.$$

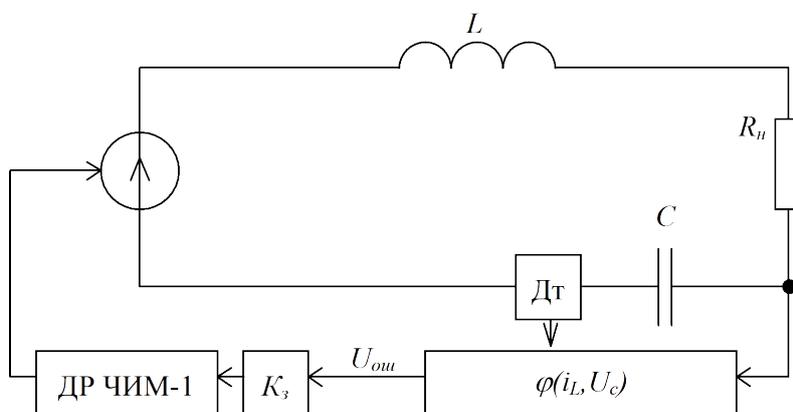
$$\tilde{U}_u = \sqrt{\int_0^1 U_u^2 dz} \quad \text{— среднеквадратичное значение выходного}$$

напряжения.

Остальные параметры модели:  $L = 20$  мкГн,  $C = 0,5$  мкФ,  $R = 1$  Ом,  $R_u = 10$  Ом,  $U_{зад} = 50$  В,  $U_p = 10$  В,  $a = 2 \cdot 10^{-5}$  с — длительность тактового интервала.

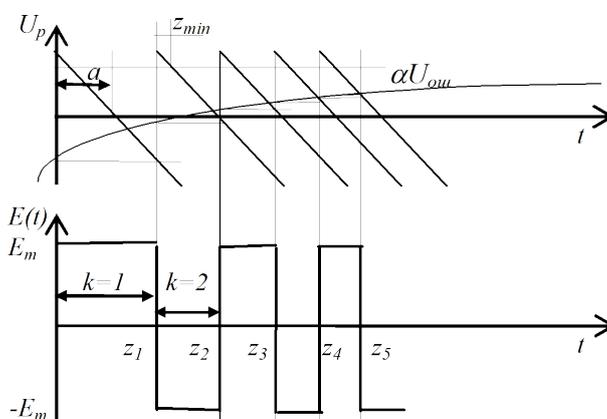
## Вариант 5

### Преобразователь с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ)



$$\varphi = \begin{cases} \arcsin(i_L / A_m), & k = 1, 3, 5, \dots \\ -\arcsin(i_L / A_m), & k = 2, 4, 6, \dots \end{cases};$$

$$A_m = \sqrt{(2\pi C U_c / a)^2 + i_L^2}.$$



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{10 \leq L \leq 40 \text{ мкГн}\}$ .

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, C > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

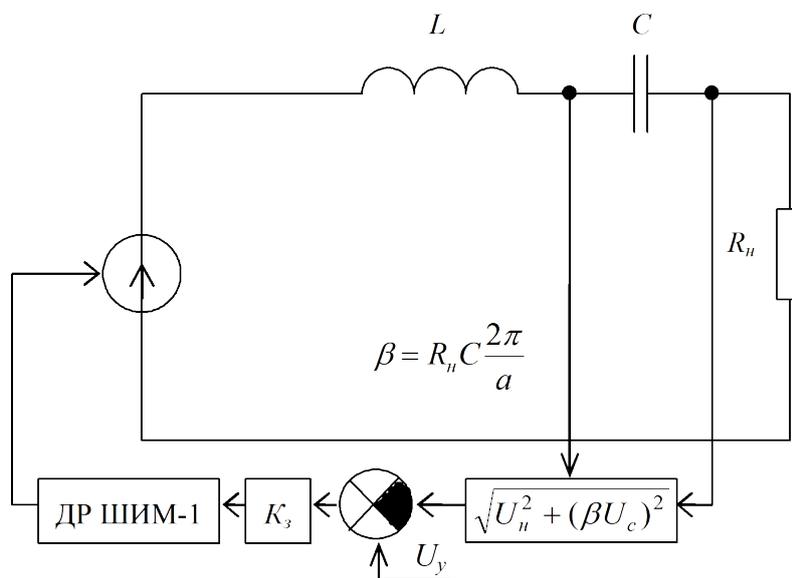
$$P_B^{ext} = (L = 20 \text{ мкГн}).$$

Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 |a - 2z_c| + \mu_2 \tau$ ;  $\mu_1 \gg \mu_2$ .

Остальные параметры модели:  $C = 0,5 \text{ мкФ}$ ,  $R_H = 10 \text{ Ом}$ ,  
 $U_{зад} = 50 \text{ В}$ ,  $U_{pm} = 10 \text{ В}$  — амплитуда пилообразного напряжения,  
 $a = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ,  $z_{min} = 0,2 \cdot a$ .

## Вариант 6

### Понижающий стабилизатор переменного напряжения



Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{65 \leq E_m \leq 180 \text{ В}\}$ .

Внутренние параметры  $\Pi_{int} = \{\alpha > 0, U_y > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_B^{ext} = (E_0 = 104 \text{ В}).$$

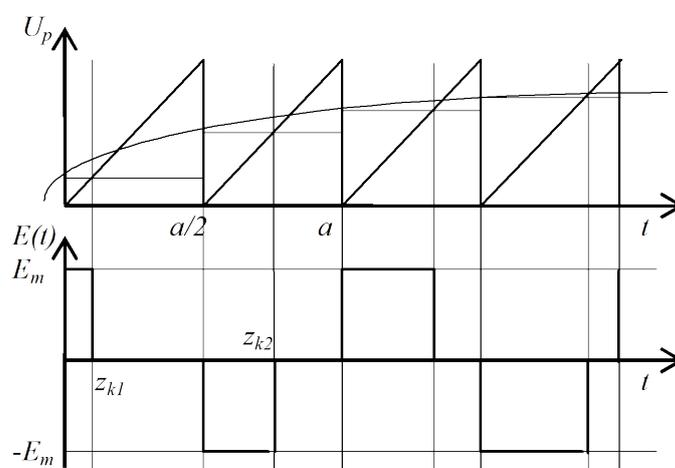
Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 \max_t |\tilde{U}_H - U_{зад}| + \mu_2 \tau$ ;  $\mu_1 \gg \mu_2$ .

$\tilde{U}_H = \sqrt{\int_0^1 U_H^2 dz}$  — среднеквадратичное значение выходного напряжения.

Остальные параметры модели:  $L = 20$  мкГн,  $C = 0,5$  мкФ,  $R_n = 10$  Ом,  $U_{зад} = 50$  В,  $a = 2 \cdot 10^{-5}$  с — длительность тактового интервала.

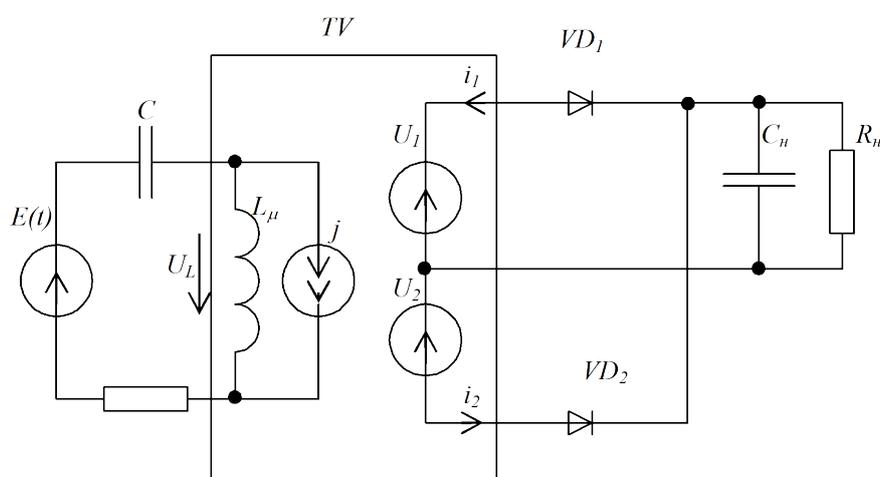
Определение типа структуры предполагает:

1. Формирование математической модели.
2. Создание алгоритма для поиска стационарного решения  $X_c(t)$ .
3. Проведение оптимизации с использованием показателей качества определяемых на стационарных движениях.
4. Исследование свойств множеств  $\Pi_k$ .



## Вариант 7

### Выпрямитель



$$E(t) = \begin{cases} E_m, & z \leq 0,5 \\ -E_m, & z > 0,5 \end{cases}$$

$$U_{L_\mu} = \frac{d\psi(i)}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dt}; \quad l_\mu(i) = \frac{\partial\psi}{\partial i};$$

$$l_\mu(i) = \frac{\mu_0 w^2 S_c}{l_c} \left( 1 + \frac{\mu_M}{1 + (\chi_{lg} w / l_c)^2 \cdot i^2} \right),$$

где  $w$  — число витков трансформатора;  $S_c = 45,5 \text{ мм}^2$  — площадь сечения сердечника;  $l_c = 7,85 \text{ см}$  — средняя длина магнитной линии. Для феррита марки 2500НМС-1 принять  $\chi_{lg} = 0,0186846 \text{ м/А}$ ;  $\mu_M = 4974$ .

Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{6,5 \leq R_n \leq 180 \text{ Ом}\}$ .

Внутренние параметры:  $\Pi_{int} = \{w > 0, C > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_B^{ext} = (E_0 = 104 \text{ В}).$$

Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 |E_m - \tilde{U}_n| + \mu_2 w$ ;  $\mu_1 \gg \mu_2$ .

$\tilde{U}_n = \sqrt{\int_0^1 U_n^2 dz}$  — среднеквадратичное значение выходного на-

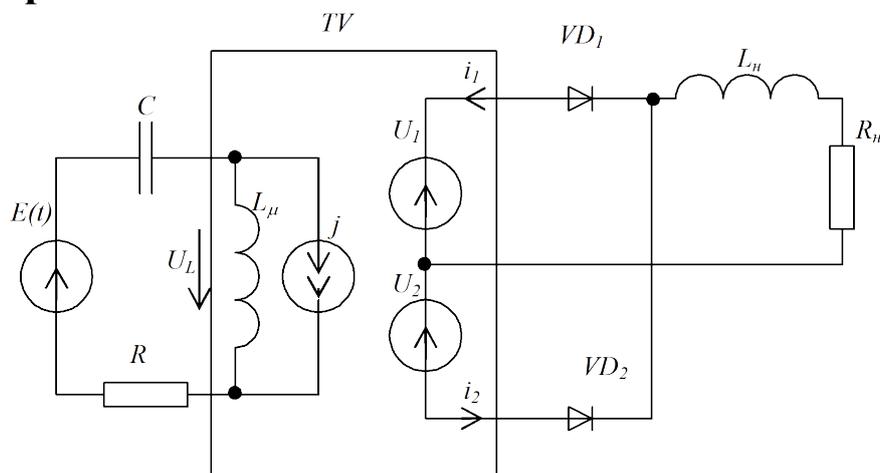
пряжения.

Остальные параметры модели:  $C_n = 10 \text{ мкФ}$ ,  $R = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_n = 10 \text{ Ом}$ ,  $a = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  — период  $E(t)$ ,  $E_m = 100 \text{ В}$ .

При формировании модели трансформатора TV считать  $U_1$  и  $U_2$  источниками напряжения, управляемыми напряжением  $U_1 = U_2 = U_L$ , а  $j$  — источником тока управляемым током  $j = i_1 + i_2$ .

## Вариант 8

### Выпрямитель



$$E(t) = \begin{cases} E_m, & z \leq 0,5 \\ -E_m, & z > 0,5 \end{cases};$$

$$U_{L_\mu} = \frac{d\psi(i)}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dt}; \quad l_\mu(i) = \frac{\partial\psi}{\partial i};$$

$$l_\mu(i) = \frac{\mu_0 w^2 S_c}{l_c} \left( 1 + \frac{\mu_m}{1 + (\chi_{lg} w / l_c)^2 \cdot i^2} \right),$$

где  $w$  — число витков трансформатора;  $S_c=45,5$  мм<sup>2</sup> — площадь сечения сердечника;  $l_c=7,85$  см — средняя длина магнитной линии. Для феррита марки 2500НМС-1 принять  $\chi_{lg} = 0,0186846$  м / А;  $\mu_m = 4974$ .

Внешние параметры:  $\Pi_{ext} = \{6,5 \leq R_n \leq 180 \text{ Ом}\}$ .

Внутренние параметры:  $\Pi_{int} = \{w > 0, C > 0\}$ .

Базовая точка пространства внешних параметров

$$P_B^{ext} = (E_0 = 104 \text{ В}).$$

Целевая функция:  $W(P^{int}) = \mu_1 |E_m - \tilde{U}_n| + \mu_2 w$ ;  $\mu_1 \gg \mu_2$ .

$$\tilde{U}_n = \sqrt{\int_0^1 U_n^2 dz} \text{ — среднеквадратичное значение выходного на-}$$

пряжения.

Остальные параметры модели:  $L_n=10$  мкГн,  $R=1$  Ом,  $R_n=10$  Ом,  $a=2 \cdot 10^{-5}$  с — период  $E(t)$ ,  $E_m=100$  В.

При формировании модели трансформатора ТВ считать  $U_1$  и  $U_2$  источниками напряжения, управляемыми напряжением  $U_1 = U_2 = U_L$ , а  $j$  — источником тока управляемым током  $j = i_1 + i_2$ .

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Пример выполнения курсового проекта**

**Титульный лист**

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**Моделирование основных функциональных блоков  
программируемого делителя частоты в диапазоне  
частот от 0.4 до 2.2 ГГц**

Пояснительная записка к курсовой работе  
по дисциплине «Системы автоматизированного  
проектирования электронных схем»

ФЭТКР.7.372.001.ПЗ

Выполнил:  
Студент гр. 372М  
Медведев Д.С.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Проверил:  
Доцент каф. ПрЭ  
Тановицкий Ю.Н.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Томск 20\_\_

Федеральное агентство по образованию РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ПрЭ, д.т.н.,  
профессор

\_\_\_\_\_ А.В. Кобзев

### ЗАДАНИЕ

на курсовой проект студенту Медведеву Дмитрию Сергеевичу  
\_\_\_\_\_ группа 372 факультет ЭТ\_\_\_\_\_

1. Тема работы: Моделирование основных функциональных блоков программируемого делителя частоты в диапазоне частот от 0.4 до 2.2 ГГц (утверждена приказом по ВУЗу от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_)
2. Срок сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_ 18 июня 20\_\_ г. \_\_\_\_\_
3. Назначение и область применения системы (устройства)
- Устройство предназначено для деления частоты входного сигнала в заданное количество раз;
- Устройство предназначено для использования в синтезаторах частот.

### ТРЕБОВАНИЯ К РАБОТЕ

4.1. Технические параметры:

Напряжение питания	5В
Диапазон рабочих частот	от 0.4 до 2.2 ГГц
Типовая ширина канала транзистора	5 мкм
Длина затвора транзистора	0.5—1 мкм
4.2. Конструкторские параметры:	не определены
4.3. Условия эксплуатации:	не определены
4.4. Дополнительные условия:	не определены

### 5. ПЕРЕЧЕНЬ РАЗДЕЛОВ ПОДЛЕЖАЩИХ РАЗРАБОТКЕ

1. Моделирование импульсного формирователя противофазных токов.
2. Моделирование балансного переключающего каскада.
3. Моделирование триггера типа Master - Slave в счетном режиме на основе балансных переключателей.
4. Моделирование элемента «исключающее или» на основе балансных переключателей.
5. Моделирование мультиплексора 2х1 на основе балансных переключателей.
6. Моделирование каскада синхронного счетчика.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	
1 Моделирование импульсного формирователя противофазных токов.....	
2 Моделирование балансного переключательного каскада.....	
3 Моделирование триггера типа Master-Slave в счетном режиме на основе балансных переключателей.....	
4 Моделирование элемента «исключающее или» на основе балансных переключателей.....	
5 Моделирование мультиплексора 2x1 на основе балансных переключателей.....	
7 Моделирование каскада синхронного счетчика.....	
Заключение.....	
Литература.....	

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является построение модели одного каскада синхронного счетчика-делителя частоты с переменным коэффициентом деления (ДЧПКД). Последний должен представлять из себя монолитную интегральную арсенид-галиевую схему, работающую в диапазоне частот от 400 МГц до 2.2 ГГц. В настоящее время отечественные аналоги данного устройства отсутствуют, однако существует зарубежный аналог — НМС394LP4 фирмы Hittite Microwave Corporation[1]. Поэтому требуется создать российский аналог этой микросхемы с целью импортозамещения.

Микросхемы делителей частоты широко применяются в изделиях военной техники, таких как синтезаторы частот и др. Синтезатор — это устройство, способное формировать из опорной частоты на выходе требуемую частоту или набор частот, согласно управляющим сигналам.

В качестве базового элемента при построении модели принципиальной схемы ДЧПКД использовался арсенид-галиевый MeП-транзистор (униполярный транзистор с металлическим барьером Шоттки). Именно эти транзисторы, прежде всего, используются в логических интегральных схемах и в СВЧ-приборах, хотя с помощью этой технологии могут быть изготовлены и активные кремниевые приборы. Однако подобными структурами на кремнии предпочитают не пользоваться, так как на такие приборы, работающие с обогащением, если стремиться избегать больших токов затвора, можно подавать только небольшие значения открывающего напряжения (меньшие, чем величина встроенного потенциала)[2]. С другой стороны, отсутствие в случае арсенида галлия жизнеспособной технологии, основанной на использовании окисла, заставило разработчиков обратиться к структурам типа MeП или с p-n переходом. Во всяком случае, основным типом приборов, используемых в СВЧ ИС, являются арсенид галлиевые MeП-транзисторы.

Ниже приведена функциональная схема прототипа делителя частоты — микросхемы НМС394LP4.

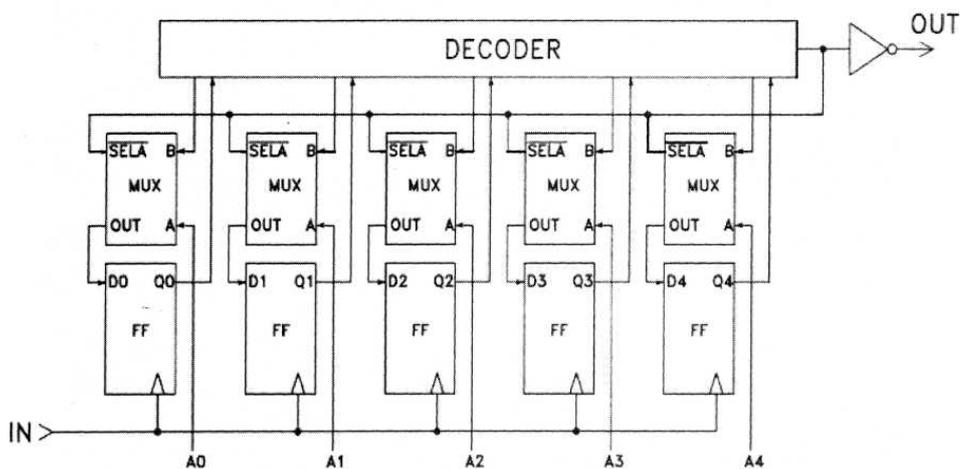


Рисунок 1 — Функциональная схема делителя частоты НМС394LP4

Здесь:

MUX — мультиплексор 2x1;

FF — триггер;

DECODER — дешифратор состояний и формирователь выходного импульса;

A0, A1, A2, A3, A4 — адресные выходы.

Принцип работы делителя частоты заключается в следующем. На вход делителя подается сигнал постоянной частоты синусоидальной формы. Так как счетчик синхронный, то сигнал подается одновременно на все триггеры. Счетчик, собранный на MS-триггерах, загружает число с адресных входов A0...A4. Затем он декрементирует загруженное число до тех пор, пока оно не станет равным нулю. В этот момент декодер формирует импульс фиксированной длительности, и в это же время подает сигнал загрузки числа с адресных входов. Далее процесс повторяется. Время загрузки кода с адресных входов получается в N раз больше, чем период входного сигнала, где N — это коэффициент деления.

Таким образом, частота входного сигнала может быть поделена в 2...32 раз.

Моделирование проводилось с помощью пакета программ Orcad Family Release 9.2 фирмы Cadence[3],[4],[5].

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ПРОТИВОФАЗНЫХ ТОКОВ

Одним из ключевых блоков проектируемого устройства является импульсный формирователь противофазных токов[5], построенный на двух транзисторах, один из которых включен по схеме с общим истоком, другой — по схеме с общим затвором.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.1.

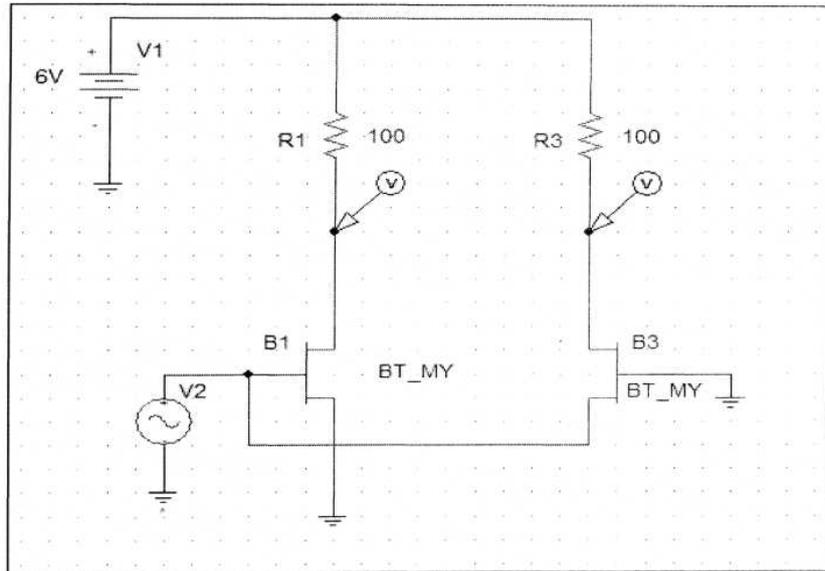


Рисунок 2.1 — Применение формирователя противофазных токов

На вход схемы на рис. 2.1 подается гармонический сигнал без постоянной составляющей, частотой 1 ГГц, амплитудой 0.5 В. Напряжение источника синусоидального напряжения в положительный полупериод открывает транзистор В1, падение напряжения на нем уменьшается, следовательно, напряжение на его стоке тоже уменьшается (нижняя диаграмма на рис. 2.2). В это же время под действием входного напряжения закрывается транзистор В3. Подача положительного напряжения на его исток при заземленном затворе эквивалентно тому, что на затвор подается отрицательное напряжение относительно заземленного истока. Кривая напряжения на стоке транзистора В3 показана на рис. 2.2 (верхняя диаграмма). Когда входное напряжение меняет свою фазу, все процессы происходят с точностью до наоборот: на стоке транзистора В1 напряжение увеличивается, а на транзисторе В3 уменьшается.

...

...

...

## 7 МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДА СИНХРОННОГО СЧЕТЧИКА

На рис. 7.1 приведена функциональная схема одного каскада синхронного счетчика.

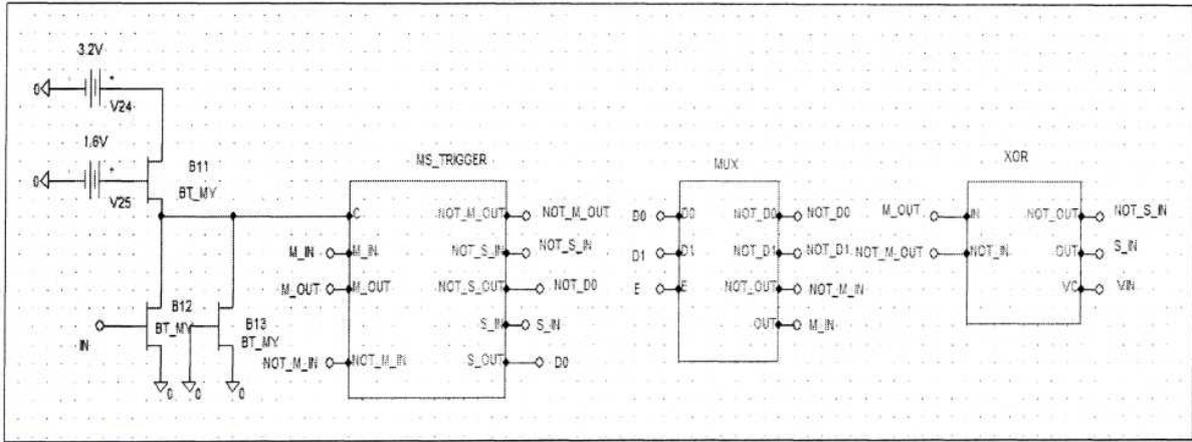


Рисунок 7.1 — Функциональная схема каскада синхронного счетчика-делителя частоты

На схеме (рис. 7.1) изображены три основных блока счетчика: входной каскад, MS-триггер, мультиплексор и элемент «исключающее или». Первый предназначен для задания положительного смещения на 1.6 В синусоидального сигнала, подаваемого на затвор транзистора B12. Все блоки в схеме объединены с помощью портов в соответствии со структурной схемой на рис. 7.1.

Ниже перечислены управляющие сигналы делителя:

VIN — сигнал управления элементом «исключающее или»;

D1 — сигнал предустановки (прямой);

NOTD1 — сигнал предустановки (инверсный);

E — разрешение загрузки со входов предустановки.

Напряжение на входе D1 = 2.3 В, на входе NOTJD1 = 0.9 В.

На рис. 7.2 представлены совмещенные временные диаграммы работы блока синхронного счетчика.

Когда разрешающее напряжение равно нулю (диаграмма d)), счетчик работает в штатном режиме — делит частоту входного сигнала в два раза. Когда напряжение E становится равным 2.3 В, на выходе «мастера» (выход M OUT MS-триггера) наблюдается уровень логической «единицы» (диаграмма с)), что соответствует состоянию порта D1 (вход предустановки). Переход счетчика в стационарное состояние происходит с задержкой, поскольку тактовый сигнал поступает на вход триггера на четверть периода позже.

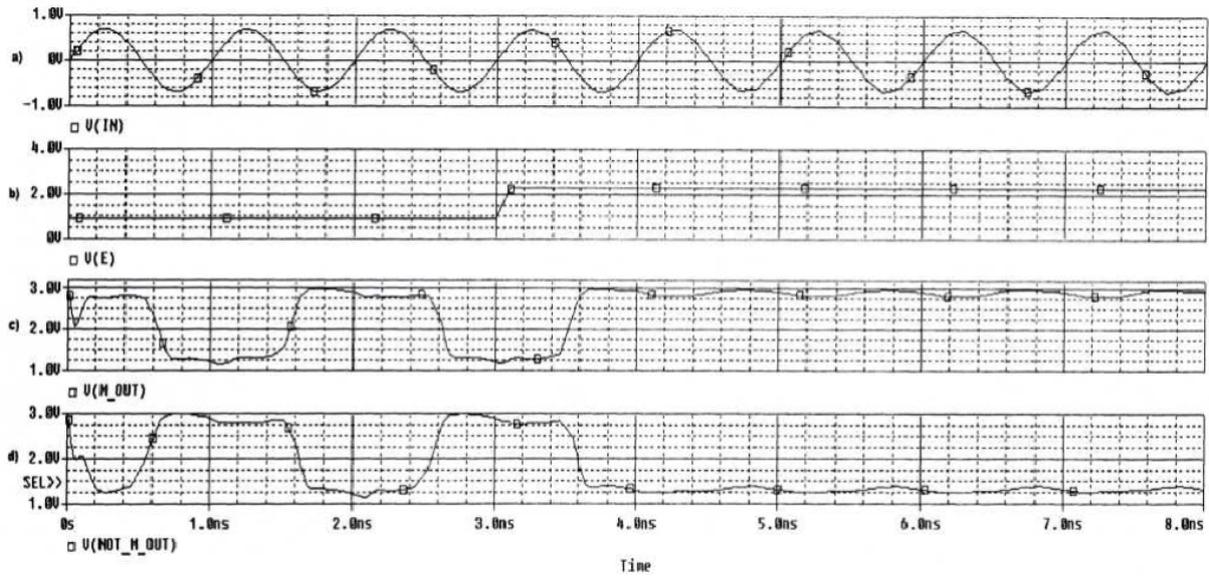


Рисунок 7.2 — Временные диаграммы работы блока синхронного счетчика при изменении напряжения E

Можно сделать вывод о том, что делитель считывает данные со входов предустановки.

На рис. 7.3 представлены диаграммы работы счетчика при различных частотах входного сигнала.

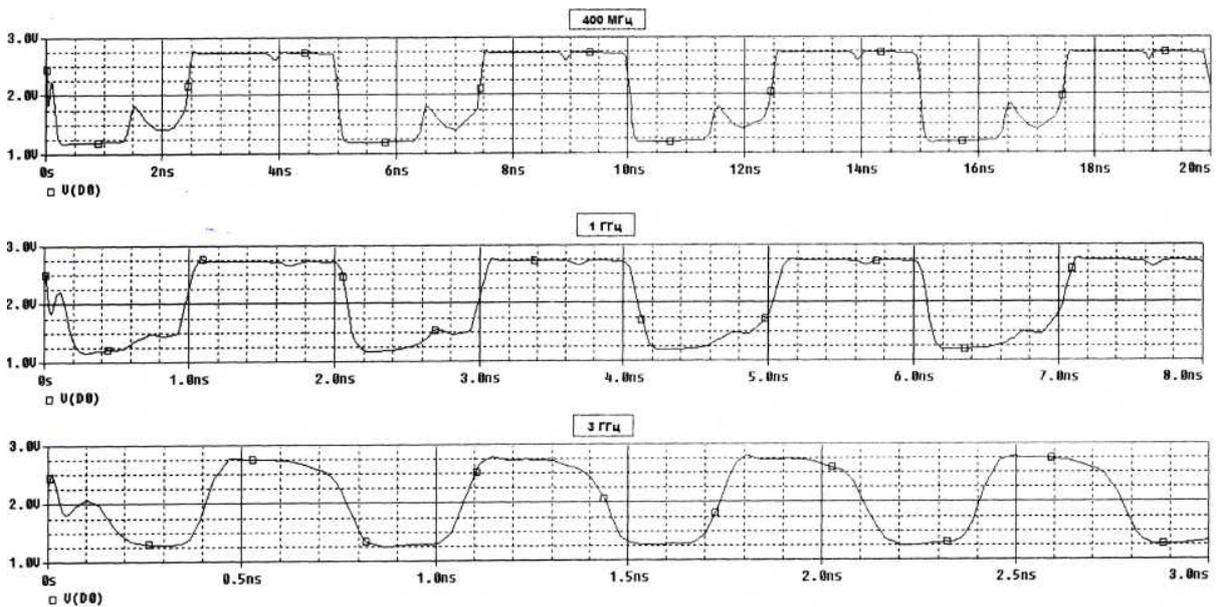


Рисунок 7.3 — Временные диаграммы работы счетчика различных частотах входного сигнала

Представленные на рис. 7.3 диаграммы демонстрируют работу одного каскада счетчика в режиме счета (коэффициент деления равен двум) на частотах 400 МГц, 1 ГГц и 3 ГГц. В ходе моделирования подавались частоты ниже 400 МГц, однако в этом случае выходные импульсы имели провалы, которые недопустимы в данной схеме. Эти провалы обусловлены недо-

статком крутизны входного сигнала (скорость нарастания сигнала в момент перехода через ноль). Верхняя частота работы счетчика достигала 5 ГГц. На более высоких частотах уже сказывались паразитные параметры транзистора, такие как емкость затвор-исток, которая в модели равна 1.4 фФ, и емкость затвор-сток, равная 0.35 фФ. Эти емкости, а также другие параметры транзистора, определяются возможностями технологии производства полевых транзисторов конкретного предприятия.

## 8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе моделирования была продемонстрирована работа синхронного счетчика-делителя частоты сначала поблочно, а затем все блоки были объединены в замкнутую систему. При моделировании отдельных блоков с помощью временных диаграмм была показана работоспособность всех схем, составляющих основу блоков. При подаче управляющих сигналов на счетчик были получены правдоподобные результаты, причем проследить это можно было в динамике.

Также была проверена работоспособность схемы при различных частотах входного сигнала. Оказалось, что схема имеет запас по частоте сверху (максимальная частота равна 5 ГГц).

## ЛИТЕРАТУРА

1. HMC394LP4. GaAs HBT PROGRAMMABLE 5-BIT COUNTER, DC 2.2 GHz. Техническое описание микросхемы HMC394LP4 фирмы Hittite Microwave Corporation. 5 стр., ил.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 327 с.: ил.
3. PSpice Schematics. User's Guide. Cadence Design Systems. Second online edition, 2000.
4. PSpice. User's Guide. Cadence Design Systems. Second online edition, 2000.
5. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). — М.: СК Пресс, 1996. — 272 с.: ил.
6. Тимонтеев В.Н., Величко Л.М., Ткаченко В.А. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. — М: Радио и связь, 1982. — 112 с.: ил.

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**Пример выполнения курсового проекта**

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**Исследование фазового  
и частотно-фазового детекторов**

Пояснительная записка к курсовой работе  
по дисциплине «Системы автоматического  
проектирования электронных схем»

ФЭТКР.7.372.001.ПЗ

Выполнила:  
студентка каф. ПрЭ  
Голикова Т.А.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Руководитель проекта:  
доц. каф. ПрЭ  
Тановицкий Ю.Н.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Томск 20\_\_

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИ-  
СТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

### ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине  
«Системы автоматического проектирования электронных схем»

студентке Голиковой Т.А.  
группа № 372м факультет электронной техники

Тема работы: Моделирование фазового и частотно-фазового детекторов

Перечень подлежащих разработке вопросов:

1. Моделирование фазового детектора на основе аналогового перемножителя в средах MathCAD 11.0a и OrCAD Family Release 9.2 и исследование его свойств.
2. Моделирование частотно-фазового детектора по принципу опережения — отставания в среде OrCAD Family Release 9.2 и исследование его свойств.
3. Сравнительная характеристика ФД на основе аналогового перемножителя и ЧФД по принципу опережения-отставания.

Дата выдачи задания: 15.04.20\_\_ г.

Руководитель проекта \_\_\_\_\_ Тановицкий Ю.Н.

Задание приняла к исполнению \_\_\_\_\_ Голикова Т.А.

Томск 20\_\_

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	
1 Исследование фазового детектора на основе аналогового перемножителя .....	
2 Исследование частотно-фазового детектора по принципу опережения отставания.....	
Заключение.....	
Использованная литература.....	

## ВВЕДЕНИЕ

В детекторе осуществляется выделение сообщения из сигнала и устранение несущего высокочастотного колебания, являющегося переносчиком сообщения. В соответствии с видом модуляции различают детектирование сигналов, модулированных по амплитуде, фазе и частоте. Эти функции выполняют соответственно амплитудные, фазовые и частотные детекторы. В данной работе рассматривается два вида детектора — фазовый детектор на основе аналогового перемножителя и частотно-фазовый детектор по принципу опережения-отставания.

Основой для любого детектора является его детекторная характеристика, представляющая собой статическую зависимость выходного эффекта (обычно напряжения) от информационного параметра входного сигнала. Поэтому в данной работе в ходе моделирования устройств будут получены их детекторные, т.е. амплитудно-фазовые, характеристики.

....  
.....

## 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛОГОВОГО ПЕРЕМНОЖИТЕЛЯ

Для детектирования фазомодулированных сигналов используют устройства, которые называются фазовыми детекторами. В радиовещательных приемниках фазовые детекторы входят в состав частотно-фазовых детекторов и используются в фазовой автоматической подстройке частоты гетеродина.

В настоящее время известно большое разнообразие схем фазовых детекторов. В самом общем случае фазовый детектор представляет собой шестиполосник, на две пары полюсов которого поступают входные гармонические сигналы  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , а третья пара полюсов является выходной.

В основу работы фазового детектора положен тот факт, что векторная (геометрическая) сумма гармонических сигналов зависит от фазовых соотношений между ними. В схеме фазового детектора происходит преобразование фазовых соотношений в амплитудные, которые и определяют выходное напряжение.

При заданных и неизменных значениях амплитуд сигналов  $U_1$  и  $U_2$ , подаваемых на фазовый детектор, выходное напряжение является функцией их разности фаз:

....

Фазовый детектор можно представить в виде перемножителя, дополненного фильтром нижних частот (ФНЧ). Такое представление фазового детектора является основой для реализации его на микросхемах. В качестве перемножителя находят применение микросхемы аналоговых перемножителей и балансных модуляторов, а также микросхемы различных усилителей с регулируемым коэффициентом усиления.

В данной работе моделирование фазового детектора в силу простоты реализации принципа его работы изначально проводилось в среде MathCAD 11.0a. Для сравнения было также проведено моделирование в среде OrCAD Family Release 9.2. Результаты приведены ниже.

Исходные данные: перемножаются два сигнала с амплитудами 5 В, частотами 1 МГц и 0,9 МГц и с переменной разностью фаз. Графики сигнала на выходе перемножителя для различных значений разности фаз приводятся на рисунке 1.1.

....

....

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА ПО ПРИНЦИПУ ОПЕРЕЖЕНИЯ-ОТСТАВАНИЯ

Схема ЧФД, собранная в OrCAD, приведена на рисунке 2.1. Принцип действия данного устройства заключается в следующем.

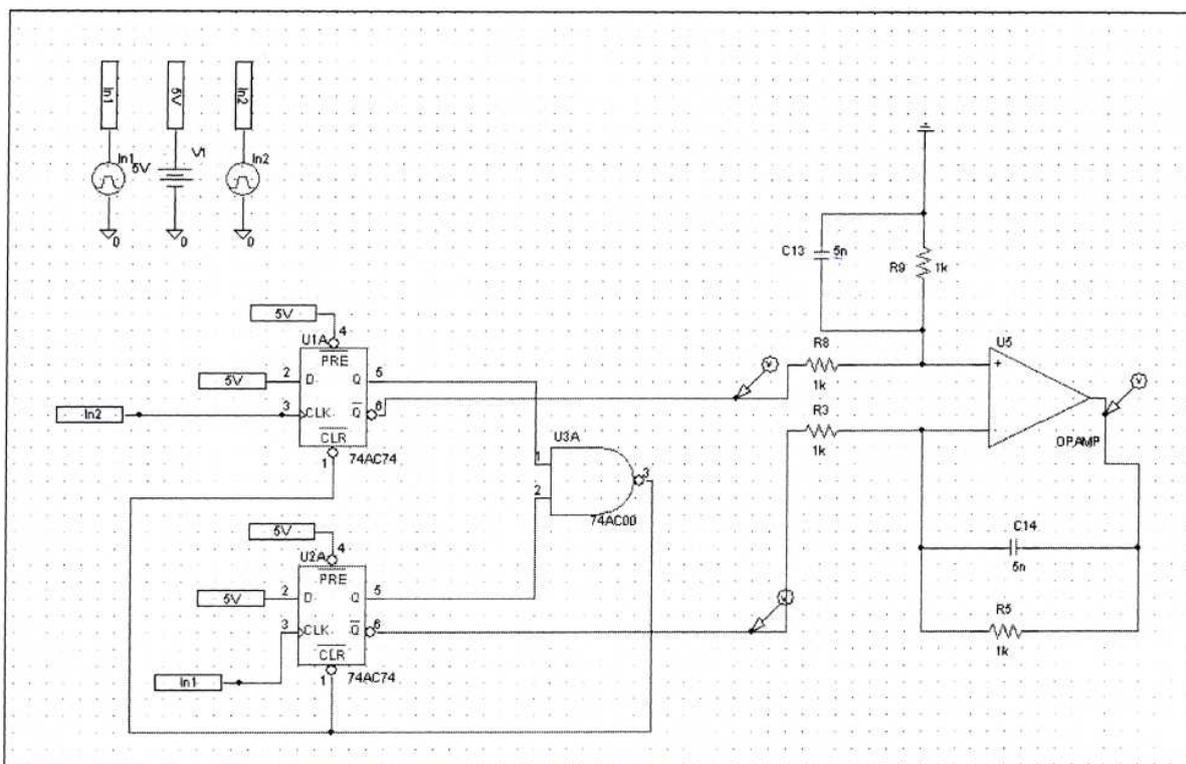


Рисунок 2.1 — Схема для моделирования частотно-фазового детектора

Сигналы, отличающиеся по частоте, подаются на триггеры. Импульсы с триггеров подаются на элемент «ИЛИ-НЕ» 74АС00, откуда при совпадении их уровней на входы сброса триггеров подаются управляющие импульсы.

....

Импульсы с выходов  $Q$  подаются на вход ФНЧ, выполненного на операционном усилителе. Фильтр является интегратором, поэтому на выходе получается зависимость амплитуды от разности фаз входных сигналов, т.е. амплитудно-фазовая характеристика. Данная зависимость приведена на рисунке 2.3.

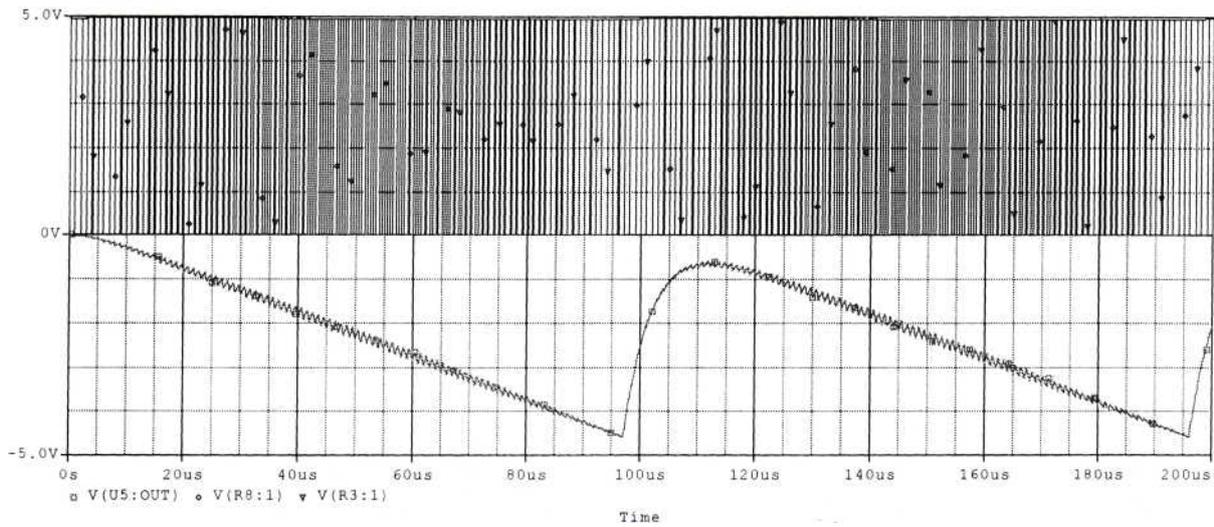


Рисунок 2.3 — Входные сигналы интегратора и амплитудно-фазовая характеристика на его выходе по опережению

Если сигнал гетеродина отстает, амплитудно-фазовая характеристика располагается в положительной области, как это показано на рисунке 2.4.

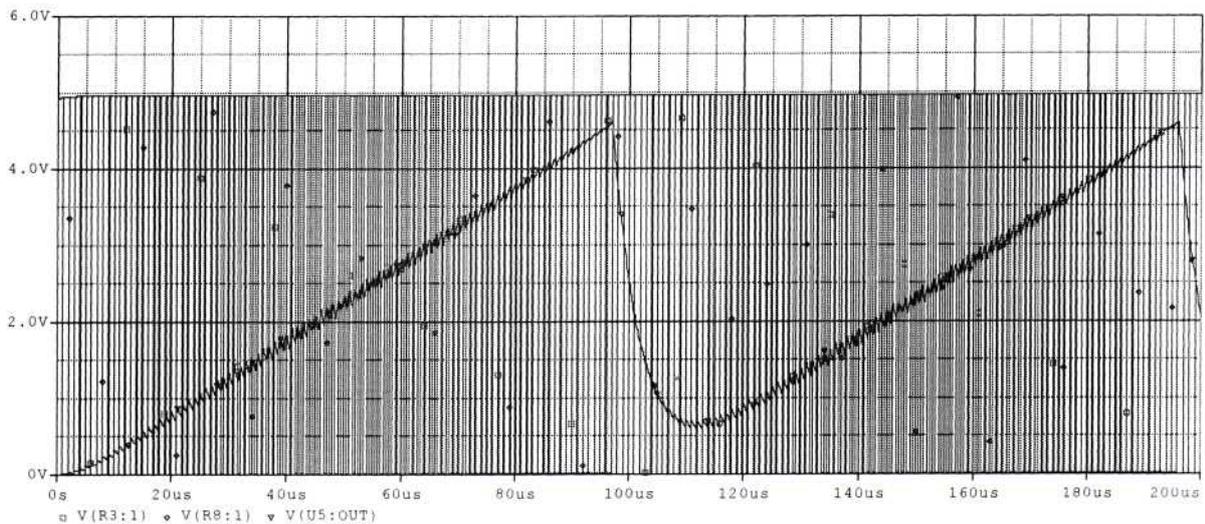


Рисунок 2.4 — Входные сигналы интегратора и амплитудно-фазовая характеристика на его выходе по отставанию

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При моделировании устройств были изучены их принципы работы и исследованы их основные характеристики. В результате были сделаны следующие выводы:

1. Фазовый детектор — это устройство, у которого амплитуда и знак выходного напряжения определяются сдвигом фаз между двумя колебаниями. Амплитудно-фазовая характеристика является периодической функцией, поэтому она имеет бесчисленное множество состояний равновесия, отличающихся на угол  $\pm 2\pi$ . Работа детектора не зависит от того, на какие входы подается опорный сигнал и выходной сигнал, на выходе всегда будет одна и та же характеристика. Поэтому при использовании данной схемы, мы не можем определить, опережает или отстает от опорного сигнала выходной сигнал.

2. Смоделированная схема частотно-фазового детектора, в отличие от фазового детектора на основе аналогового перемножителя, позволяет определить не только разность фаз между входными сигналами, но и отстает или опережает сигнал гетеродина. При опережении сигнала выходная характеристика находится в отрицательной области, при отставании, соответственно, — в положительной.

3. Частотно-фазовый детектор по принципу опережения-отставания является более информативным, поэтому его применение предпочтительно. Работа данной схемы совершенно не зависит от скважности входных сигналов. Еще одно преимущество заключается в полном отсутствии выходного сигнала в случае, когда входные сигналы находятся в синхронизме. Это означает, что на выходе отсутствуют «пульсации», из-за которых может происходить периодическая фазовая модуляция.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Ю.Т. и др., Радиоприемные устройства, учебное издание. — М.: Высшая школа, 1989.
2. Якушевич Г.Н., Радиоавтоматика: Учеб. пособие. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2005. — 228 с.
3. Вендров В.В., Нилов В.И. Дiodные фазовые детекторы / Под. ред. доц., канд. техн. наук М.Э. Теплицкого. — Харьков, 1965.