



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Кафедра формирования и обработки радиосигналов

Дисциплина:

Формирование радиосигналов

**ОТЧЕТ**

По лабораторной работе №5

**«ФАЗОВАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ»**

Группа: ЭРэ-18-21

Студент: Юшин В.А.

Преподаватель: Плутешко А.В.

Дата: 25.02.2025

Москва 2025

## Содержание

Лабораторное задание .....	3
1. Измерение характеристики ФД .....	3
2. Измерение характеристики ГУН .....	3
3. Измерение полосы захвата .....	4
4. Измерение переходных процессов по частоте .....	5
5. Измерение переходных процессов по фазе .....	8
6. Обработка результатов измерений .....	10
Вывод .....	13
Домашняя подготовка .....	15

## Лабораторное задание

### 1. Измерение характеристики ФД

Подадим колебание от внешнего генератора на вход опорной частоты. Форма напряжения – синусоидальная. Частота 8 МГц. Средний уровень 1,6 В. Размах от минимума до максимума 3,0 В. Настроим средний уровень так, чтобы величина +Duty осциллограммы  $U_{оп}$  была  $50 \pm 2\%$ . Подберем  $f_{оп}$  так, чтобы частота биений на выходе ФД была в диапазоне от 40 до 60 кГц.

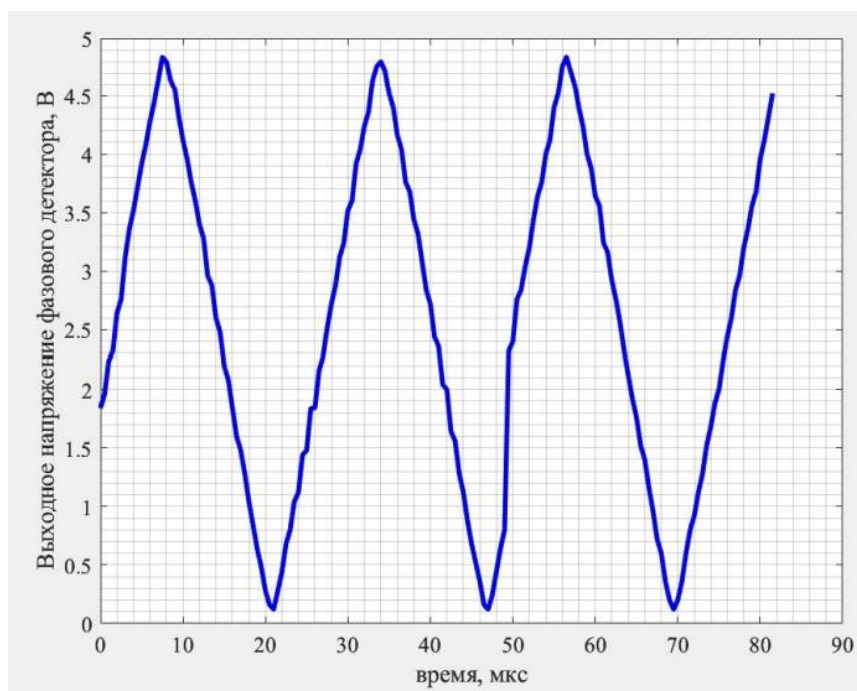


Рисунок 1 – График зависимости выходного напряжения ФД от времени (реальная характеристика)

### 2. Измерение характеристики ГУН

Установим частоту равной 8 МГц. Замкнем кольцо ФАПЧ. Изменяя опорную частоту с шагом  $\pm 100$  кГц, заполним таблицу 1. В таблицу будем вносить только значения, соответствующие режиму синхронизма.

Таблица 1 – Характеристика управления частотой ГУН

$f_{оп}$ , МГц	6.8	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4
$f_{гун}$ , МГц	108.8	110.4	112	113.6	115.2	116.8	118.4
$E_{упр}$ , В	0.363	0.805	1.21	1.58	1.94	2.28	2.614

Таблица 1 (Продолжение) – Характеристика управления частотой ГУН

$f_{оп}$ , МГц	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8	8.1
$f_{гун}$ , МГц	120	121.6	123.2	124.8	126.4	128	129.6
$E_{упр}$ , В	2.94	3.26	3.57	3.87	4.15	4.45	4.74

Для определения  $f_{гун}$  воспользуемся формулой:

$$f_{оп} = f_{д} = \frac{f_{гун}}{16} \rightarrow f_{гун} = f_{оп} \cdot 16$$

По полученным данным из таблицы 1 построим характеристику управления частотой ГУН.

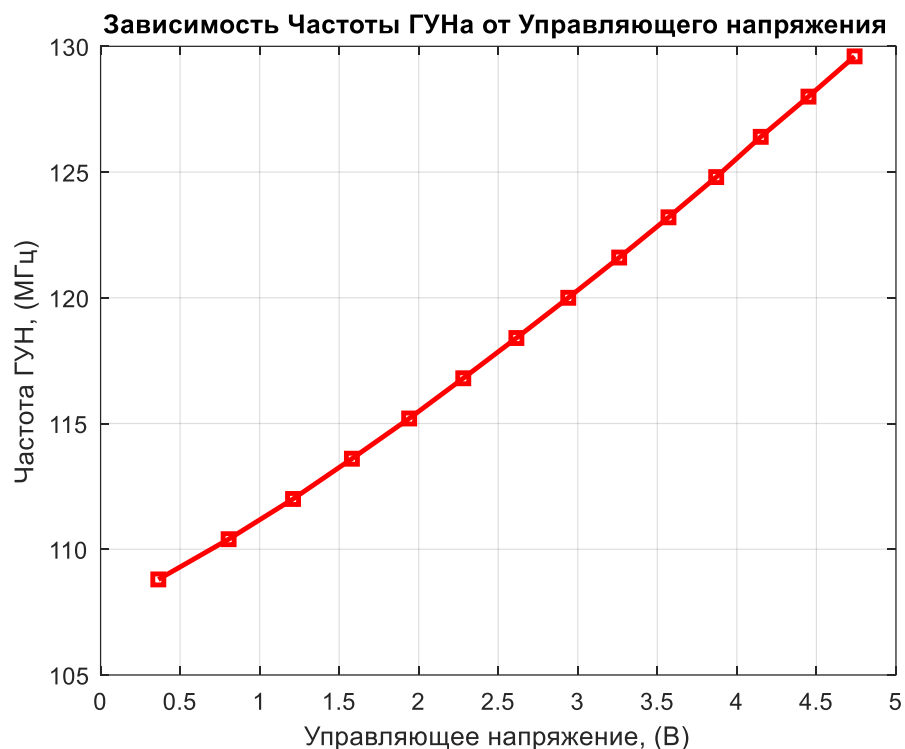


Рисунок 2 - Характеристику управления частотой ГУН

### 3. Измерение полосы захвата

Расчет  $K_{гун}$  по двум точкам характеристики в окрестности  $E_{упр} = 2,5$  В:

$$K_{гун} = \frac{f_{гун2} - f_{гун1}}{E_{упр2} - E_{упр1}}$$

$$K_{гун} = \frac{(118.4 - 116.8) \cdot 10^6}{2.614 - 2.28} = 4.79 \text{ МГц/В}$$

Включим ЧМ модуляцию. Форма модуляции – треугольная. Частота модуляции 500 Гц. Установим центральную частоту и девиацию так, чтобы частота менялась от  $F_1$  до  $F_2$ . Рассчитаем пределы изменения частоты.

$$f_1 = f_{\text{оп мин}} - (E_{\text{упр мин}} + 0.1) \cdot \frac{K_{\text{гун}}}{16} = 6.8 \cdot 10^6 - (0.363 + 0.1) \cdot \frac{4.79 \cdot 10^6}{16} \\ = 6.661 \text{ МГц}$$

$$f_2 = f_{\text{оп макс}} - (5.1 - E_{\text{упр макс}}) \cdot \frac{K_{\text{гун}}}{16} = 8.1 \cdot 10^6 - (5.1 - 4.76) \cdot \frac{4.79 \cdot 10^6}{16} \\ = 7.998 \text{ МГц}$$

Меняя положение переключателя в поле РС-ФИЛЬТР, ознакомимся с изменением формы осциллограммы  $E_{\text{фд}}$  при изменении постоянной времени фильтра.

Сохраним осциллограмму  $E_{\text{фд}}$  для положений переключателя 4 и 6 (рисунок 10 - 11).

#### 4. Измерение переходных процессов по частоте

Настроим ЧМ модуляцию. Форма модуляции – меандр. Частота модуляции 5 кГц. Девиацию частоты выберем, воспользовавшись следующей формулой:

$$\frac{K_{\text{гун}}}{16} \cdot 0.5 = \frac{4.79 \cdot 10^6}{16} \cdot 0.5 = 0.15 \text{ МГц}$$

Центральную частоту генератора оставим такой же, как и в предыдущем пункте.

Меняя положение переключателя в поле РС-ФИЛЬТР, ознакомимся с изменением формы переходных процессов  $E_{\text{фд}}(t)$  при увеличении постоянной времени фильтра.

Сохраним осциллограммы  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  для нескольких положений переключателей.

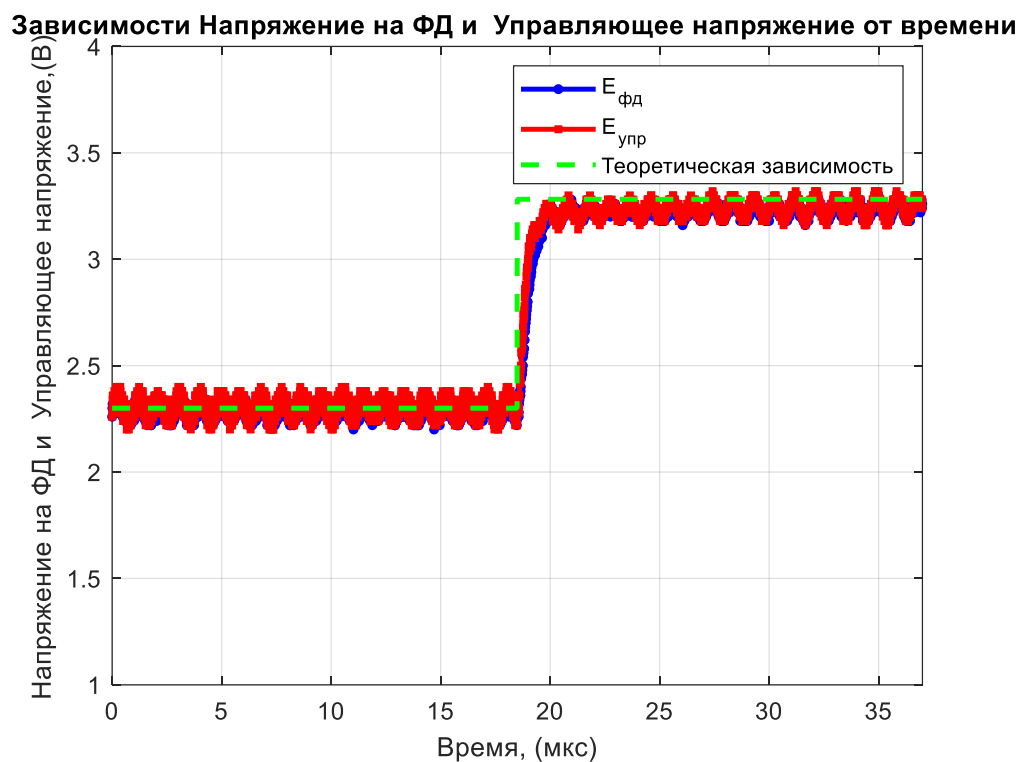


Рисунок 3 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{фд}(t)$  и  $E_{упр}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение (красный), напряжение на выходе ФД (синий), теоретическая зависимость (зеленый)

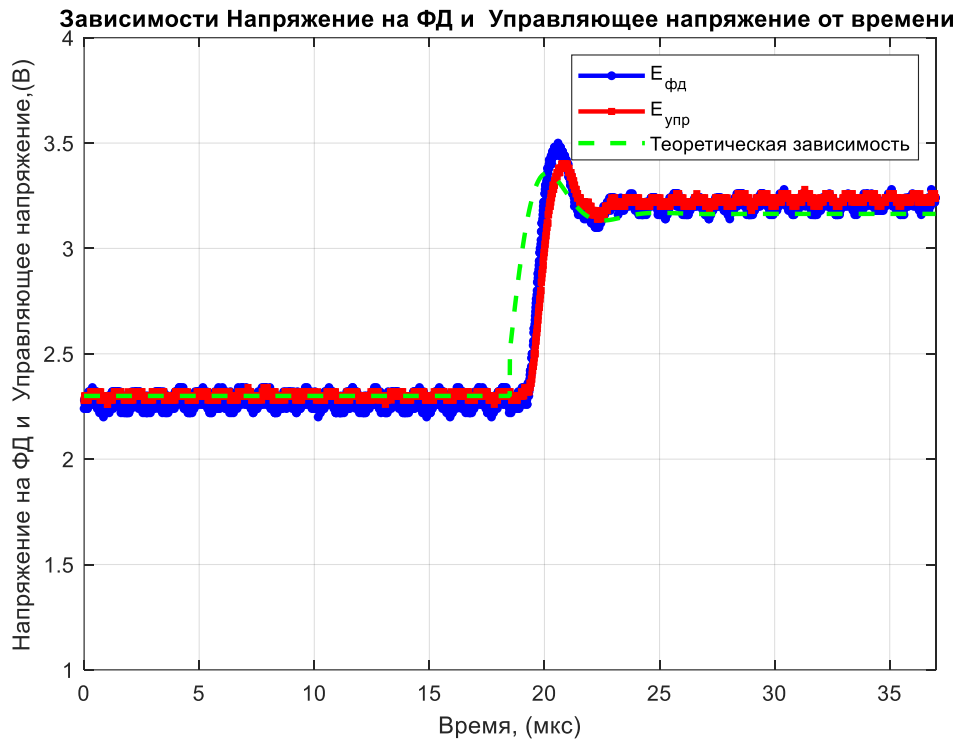


Рисунок 4 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{\text{ФД}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 3, управляющее напряжение (красный), напряжение на выходе ФД (синий), теоретическая зависимость (зеленый)

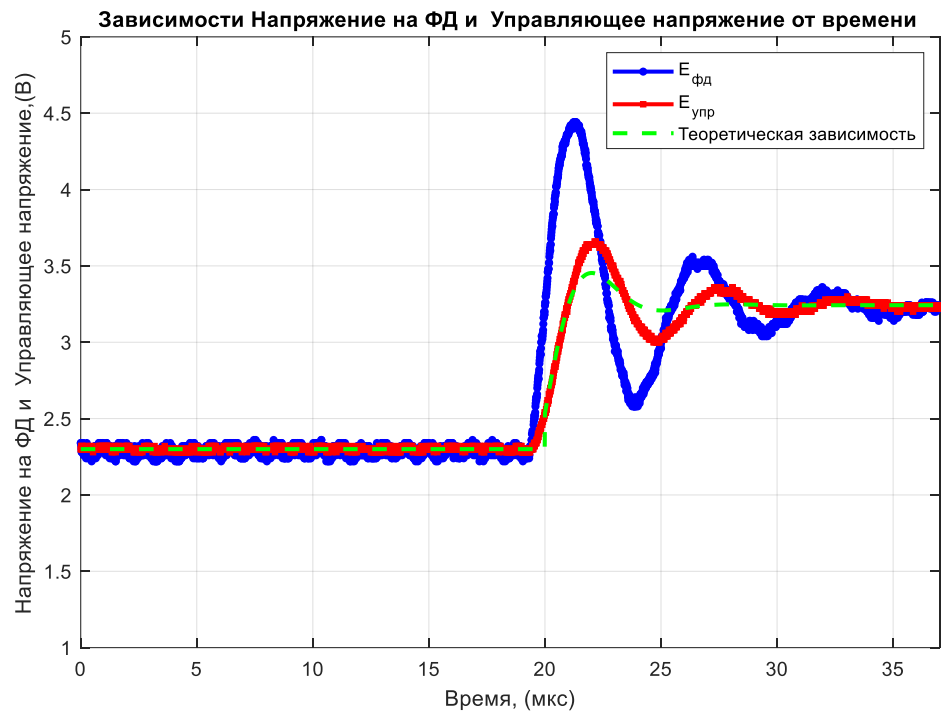


Рисунок 5 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{\text{ФД}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 5, управляющее напряжение (красный), напряжение на выходе ФД (синий), теоретическая зависимость (зеленый)

## 5. Измерение переходных процессов по фазе

Выключим выход внешнего генератора и выключим модуляцию. Настроим внешний генератор. Форма напряжения – меандр. Частота 5 кГц. Средний уровень 1,75 В. Размах от минимума до максимума 3,5 В. Выберем в качестве опорного колебание от внутреннего опорного генератора 8МГц. Включим выход внешнего генератора.

Меняя положение переключателя в поле РС-ФИЛЬТР, ознакомимся с изменением формы переходных процессов  $E_{\text{фд}}(t)$  при увеличении постоянной времени фильтра. Сохраним осциллограммы  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  для нескольких положений переключателей.

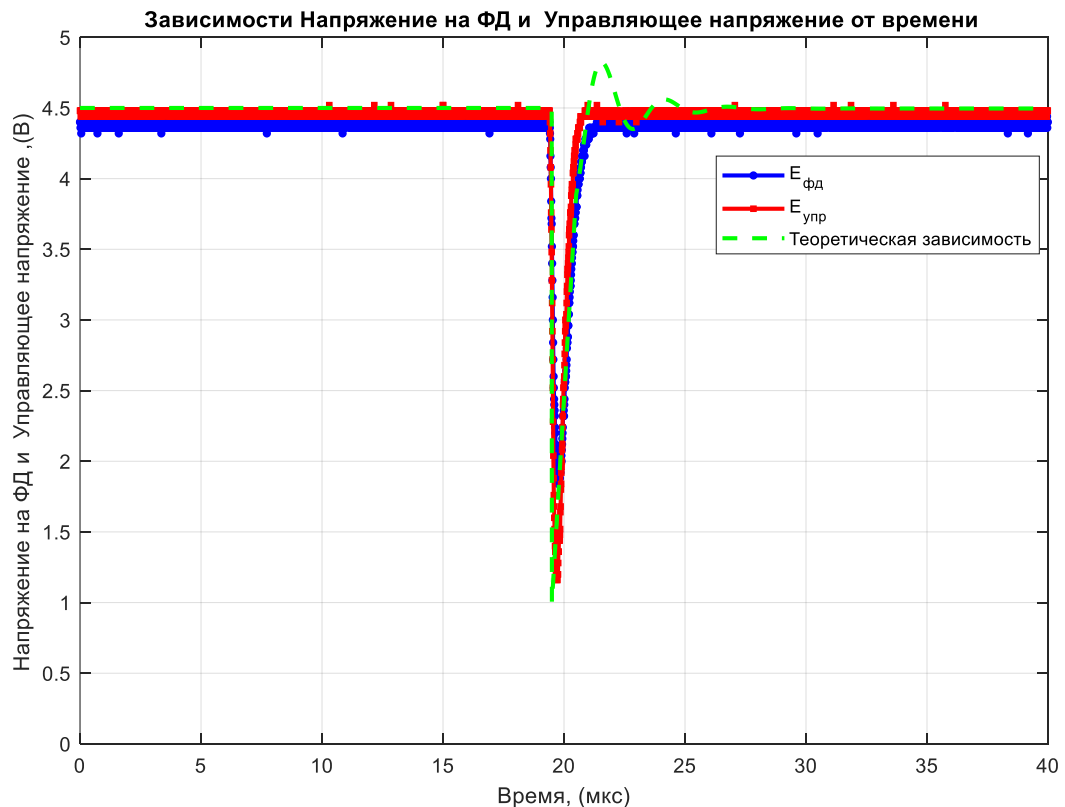


Рисунок. 6 – Осциллограмма переходного процесса по фазе  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение (красный), напряжение на выходе ФД (синий), теоретический сигнал (зеленый)



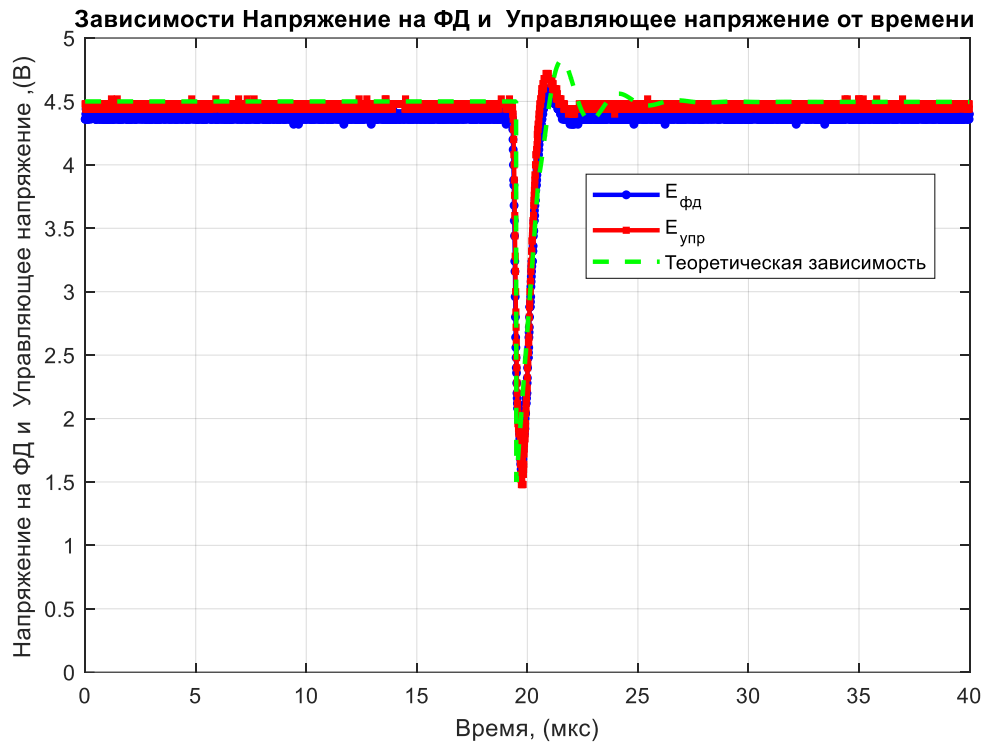


Рисунок 7 – Осциллограмма переходного процесса по фазе  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение (красный), напряжение на выходе ФД (синий), теоретический (зеленый)

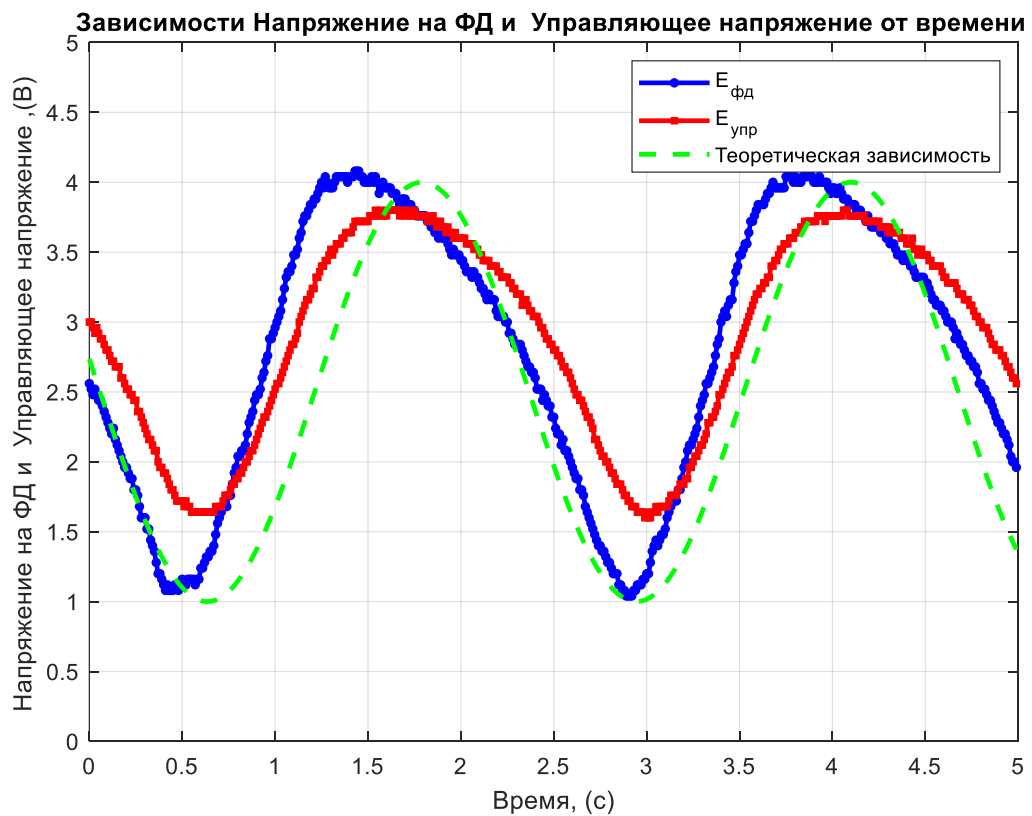


Рисунок 8 – Осциллограмма  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 3

## 6. Обработка результатов измерений

Построим характеристику ФД:

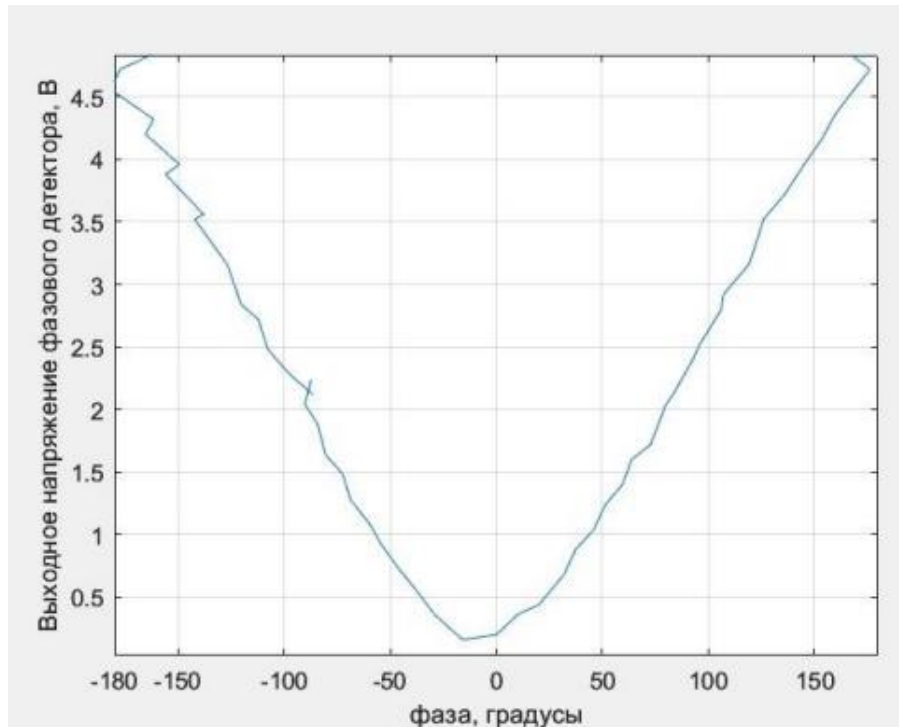


Рисунок 9 – Характеристика ФД

Заполним таблицу, используя для расчета дифференциальные параметры характеристик в точках, соответствующих  $E_{фд}=E_{упр}=2.5$  В.

Таблица 2 – Величины, определяющие поведение кольца ФАПЧ

$K_{фд}$ , В/рад	$K_{гун}$ , МГц/В	$T_{фапч}$ , мкс
1.59	4.79	0.334

Значение  $K_{фд}$  и  $T_{фапч}$  определим по следующим формулам:

$$K_{фд} = \frac{E_{п}}{\pi} = \frac{5}{\pi} = 1.59 \text{ В/рад}$$

$$T_{фапч} = \frac{P}{2\pi \cdot K_{гун} \cdot K_{фд}} = \frac{16}{2\pi \cdot 4.79 \cdot 10^6 \cdot 1.59} = 0.334 \text{ мкс}$$

Осциллограммы  $E_{фд}(t)$  были сняты при увеличении постоянной времени фильтра для положений 4 и 6. Рассчитаем значения постоянной времени цепи для этих положений и сведем их в таблицу 3:

$$\tau_{фнч} = R_1 \cdot C_1$$

Таблица 3 – Номиналы элементов RC-фильтра и рассчитанные значения постоянной времени ФНЧ  $\tau$ .

Номер переключателя	$R_1$ , Ом	$C_1$ , пФ	$\tau_{\text{ФНЧ}}$ , мкс
4	300	2200	0.66
6	300	6800	2.04

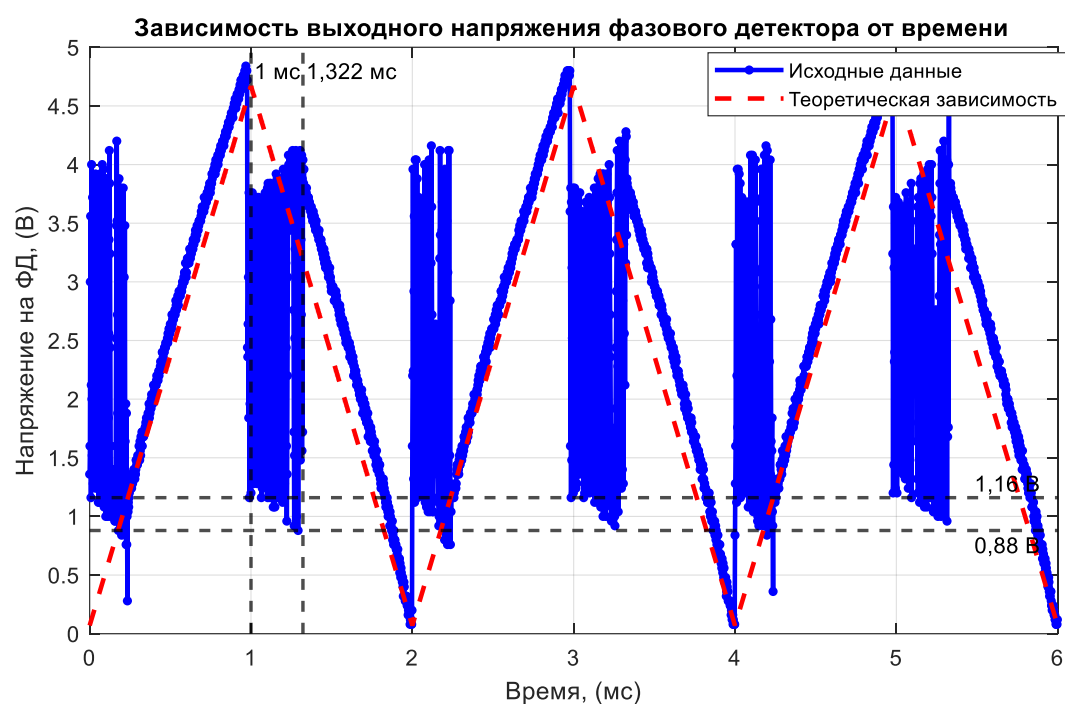


Рисунок 10 – График зависимости  $E_{\text{ФД}}(t)$  при положении переключателя 4

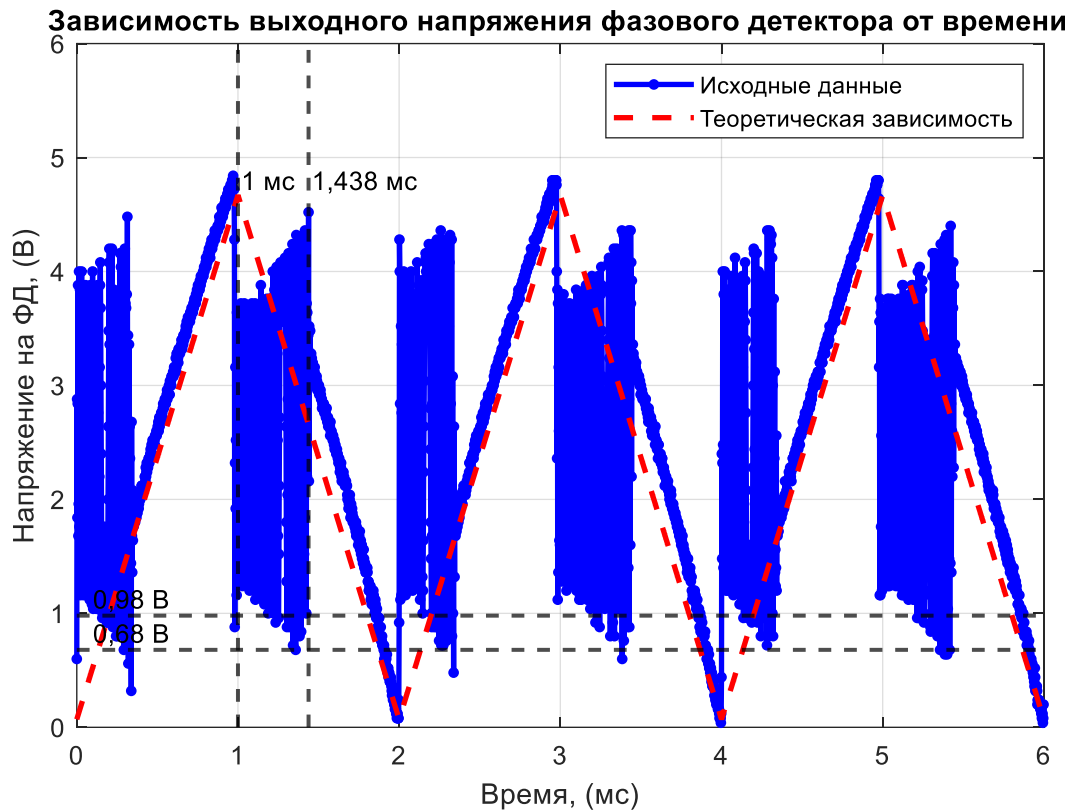


Рисунок 11 – График зависимости  $E_{\text{фд}}(t)$  при положении переключателя 6

По приведенным графикам на рисунках 10 и 11 определим значения полосы захвата и полосы синхронизма для положений переключателей 4 и 6 соответственно:

$$\gamma = \frac{P_{\text{зах}}}{P_{\text{синх}}} = \frac{0,678}{1} = 0,678$$

$$\gamma = \frac{P_{\text{зах}}}{P_{\text{синх}}} = \frac{0,562}{1} = 0,562$$

Для определения теоретического значения  $\gamma$  по графику зависимости нормированной полосы захвата  $\gamma$  от нормированной постоянной времени ФНЧ  $\tau$ , приведенному в описании данной лабораторной работы, рассчитаем значение  $\tau$  по следующей формуле для положений 4 и 6 соответственно:

$$\tau = \frac{\tau_{\text{ФНЧ4}}}{T_{\text{ФАПЧ}}} = \frac{0,66 \cdot 10^{-6}}{0,334 \cdot 10^{-6}} = 1,98$$

$$\tau = \frac{\tau_{\text{ФНЧ6}}}{T_{\text{ФАПЧ}}} = \frac{2,04 \cdot 10^{-6}}{0,334 \cdot 10^{-6}} = 6,11$$

Полученным значениям  $\tau$  по графику соответствуют значения  $\gamma$  равные 0,58 и 0,35 для 4 и 6 положений. Полученные данные сведем в таблицу.

Таблица 4 – Сравнение рассчитанных и теоретических значений  $\gamma$

Номер положения переключателя	Рассчитанное значение $\gamma$	Теоретическое значение $\gamma$
4	0,58	0,678
6	0,35	0,562

### Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы были обнаружены расхождения между результатами, полученными в процессе теоретических расчетов на этапе домашней подготовки, и данными, полученными во время эксперимента. Однако, несмотря на наличие различий, можно отметить, что характер и форма процессов в обоих случаях схожи. Выскажем предположения о причинах отличия результатов измерений и моделирования.

Первой возможной причиной отличия результатов может являться тот факт, что при построении временных зависимостей переходных процессов, рассчитанных по дифференциальным уравнениям, мы имели дело с математической моделью процесса, приближенной к идеальным параметрам и результатам, а построение измеренных процессов является практической частью данной работы, проводимой в лаборатории. В результате, расхождения между рассчитанной математической моделью и реальным экспериментом играют существенную роль в наличии расхождений.

При определении расчетного значения величины  $\gamma$  была использована зависимость  $\gamma(\tau)$ , при расчете  $\tau$  были использованы значения сопротивления  $R$  и емкости  $C$  для соответствующего положения переключателя и величина  $T_{\text{ФАПЧ}}$ , которая была определена с учетом крутизны  $K_{\text{гун}}$ . Поскольку крутизна

$K_{\text{гун}}$  определялась в окрестности  $E_{\text{упр}} = 2.5$  В по двум значениям  $f_{\text{гун}}$  и  $E_{\text{упр}}$ , то значение крутизны  $K_{\text{гун}}$  может быть недостаточно точным, а следовательно, и значение величины  $\tau$  по которому определялось значение величины  $\gamma$ .

Помимо этого, можно отметить тот факт, что при обработке результатов измерений в формуле 1 был учтен делитель частоты в кольце ФАПЧ, равный 16.

$$\tau \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi - \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta, \quad \varphi < 0. \quad (1)$$

## Домашняя подготовка

### Домашняя подготовка

#### 4.1. Исходные данные

Косинус ФАПЧ с ФД на выходе усилителя или, иначе говоря, треугольную хар-ку с крутизной  $k_{ФД} = \frac{E_D}{\pi}$

Таблица 3 - Исходные данные

$E_D, В$	$k_{ФД}, \frac{В}{с}$
+5	200

Таблица 4 - Поступившие вращающиеся ФАПЧ,  $T_i$

$i$	$T_i, мкс$
1	0,5
2	0,6
3	0,7
4	2,0

#### 4.2. Расчетное задание

1. Построить переходные процессы  $E_{ФД}(t)$  при смене опорной частоты на +30 кГц из стационарного решения с  $f = \frac{\pi}{8}$ 
  - для  $T \rightarrow 0$
  - для любого  $T_i, i = 1 \dots 3$

1.1 для  $T \rightarrow 0$

Дифф. уравнение:  $\frac{d}{dx} f + f = \frac{\pi}{2}$  Начальные условия:  $\begin{cases} f(0) = \frac{\pi}{8} \\ f'(0) = \frac{3\pi}{8} \end{cases}$

Общее решение  $f(x)$  - сумма  $f_{\text{part}}(x) + f_{\text{hom}}(x)$

$f(x) = f_2(x) + f_{\text{hom}}(x)$ , где  $f_2(x) = \pi/2$

Вид  $f_{\text{hom}}(x)$  зависит от решения характерист. уравнения  $\lambda + 1 = 0 \Rightarrow \lambda = -1$   
 $\Rightarrow f_{\text{hom}} = A \cdot e^{-x}$

Общее решение уравнения:  $f(x) = \frac{\pi}{2} + A e^{-x}$   
 $\frac{d}{dx} f(x) = -A e^{-x}$

Подставим  $x=0$ :  $\begin{cases} \frac{\pi}{2} + A = \frac{\pi}{8} \\ -A = \frac{3\pi}{8} \end{cases} \rightarrow A = -\frac{3\pi}{8}$

Решение для  $T \rightarrow 0$ :  $f(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{8} \cdot e^{-x}$ , где  $x = \frac{t}{T_{ФАПЧ}}$

1.2 где  $T_1 = 0.5$  где  $i = 1$ ,  $\tau = \frac{T_1}{T_{\text{период}}}$ ,  $t > 0$

Начальное условие соответствует  $t^+ = \frac{\pi}{8} = \frac{\pi}{2} + \Delta = \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{8}$ , т.е. состояние синхронизации при  $\alpha = -\frac{3\pi}{8}$ , начальное условие  $f'(0) = \frac{3\pi}{8}$  соответствует начальной разности частот в момент времени  $x = 0 \Rightarrow T_{\text{период}}(\omega_{\text{н}} - \omega_{\text{м}}(0)) = \frac{3\pi}{8} \Rightarrow T_{\text{период}} = 0.5 \text{ мкс}$

Аналогично  $n \pm 1$  диф. уравнение  $\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d t}{dx} + t = \frac{\pi}{2}$   
 нач. условия:  $\begin{cases} t(0) = \frac{\pi}{8} \\ t'(0) = \frac{3\pi}{8} \end{cases}$

$t(x) = t_2(x) + t_0(x)$ , где  $t_0(x) = T/x$

Характер. ур-ие:  $\lambda^2 + \lambda + 1 = 0$

$\lambda_1 = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$   $\lambda_2 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i \Rightarrow t_0 = A e^{\lambda_1 x} + B e^{\lambda_2 x}$

Общее решение ур-ия:

$t(x) = \frac{\pi}{2} + A e^{-\frac{1}{2}x} \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x + B e^{-\frac{1}{2}x} \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x$

$\frac{d}{dx} t(x) = -\frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}x} (A \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x + B \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x) + \frac{\sqrt{3}}{2} e^{-\frac{1}{2}x} (-A \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x + B \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x)$

Подставим  $x=0$

$\begin{cases} \pi/2 + A = \pi/8 \\ -\frac{1}{2}A + \frac{\sqrt{3}}{2}B = \frac{3\pi}{8} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -3\pi/8 \\ B = \frac{\sqrt{3}\pi}{8} \end{cases}$

Решение для  $T \rightarrow 0$ :  $t(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{8} e^{-\frac{1}{2}x} (\cos \frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x)$ , где  $x = \frac{t}{T_{\text{период}}}$



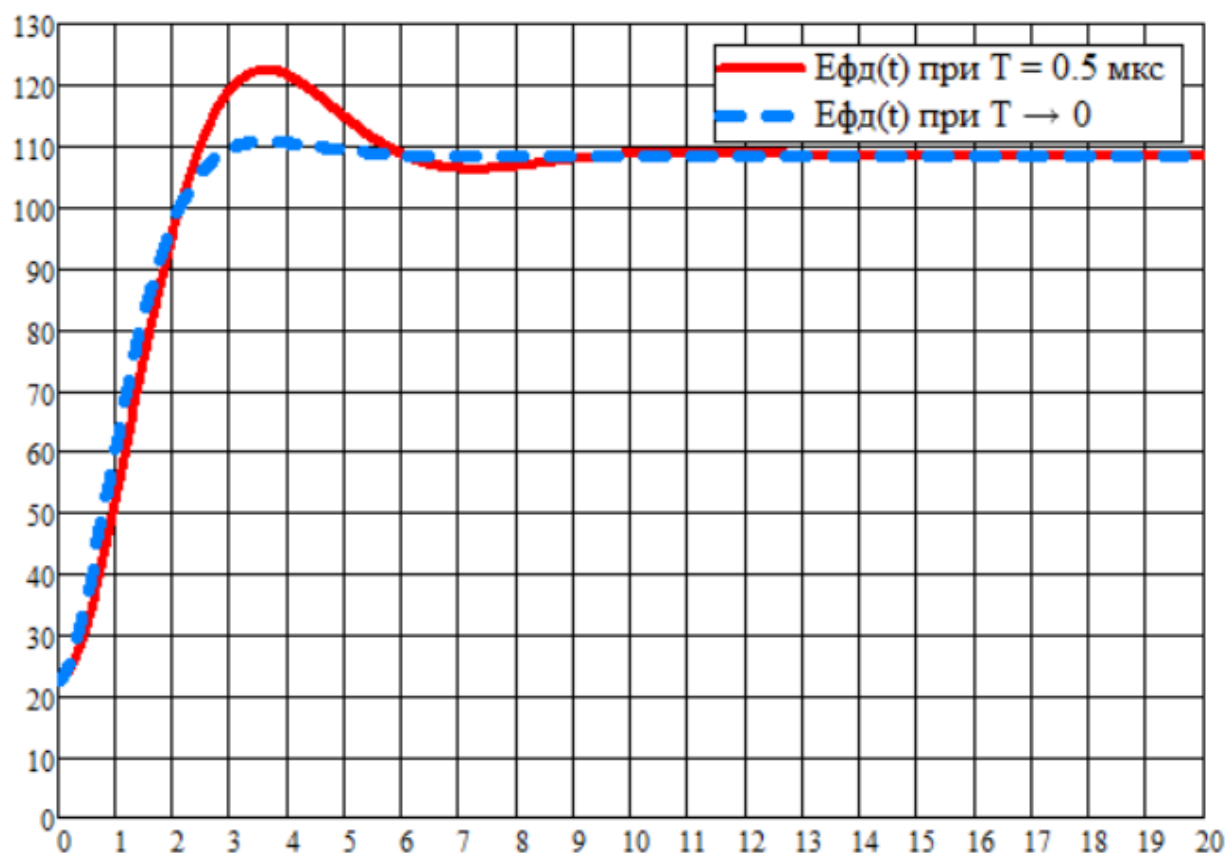


Рисунок 1 – Переходные процессы  $E_{\phi\delta}(t)$  при скачке с  $\phi^+ = \pi/8$

2. Построить переходные процессы  $f_{\text{нп}}(t)$  при смене опорной частоты на  $\omega = 375 \text{ кГц}$  из специального режима с  $f^+ = \frac{\pi}{2}$

2.1 Для  $T \rightarrow 0$

Диф. уравнение:  $\frac{d}{dx} f + f = \frac{\pi}{8}$  Начальные условия:  $\begin{cases} f(0) = \frac{\pi}{2} \\ f'(0) = -\frac{3\pi}{8} \end{cases}$

$f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ , где  $f_1(x) = \frac{\pi}{8}$

Характеристическое уравнение:  $\lambda + 1 = 0$   
 $\lambda = -1$

$f_2 = A \cdot e^{\lambda x}$

Общее решение уравнения:  $f(x) = \frac{\pi}{8} + A e^{\lambda x}$

$\frac{d}{dx} f(x) = \lambda A e^{\lambda x}$

Подставим  $x=0$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{8} + A = \frac{\pi}{2} \\ \lambda A = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \Rightarrow A = +\frac{3\pi}{8}$$

Получим для  $T \rightarrow 0$ :  $f(x) = \frac{\pi}{8} + \frac{3\pi}{8} e^{-x}$ , где  $x = \frac{t}{T_{\text{ФАПЧ}}}$

2.2. Для любого  $T_i, i=1 \dots 3$

$T_i = 0,5$ , где  $i=1$ ,  $\tau = \frac{T_i}{T_{\text{ФАПЧ}}}$ ,  $t > 0$

Начальное условие соответствует установившемуся значению  $f^+ = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x=0$   
 Получим  $T_{\text{ФАПЧ}} (\omega_{\text{нп}} - \omega_{\text{оп}}(0)) = -\frac{3\pi}{8} \Rightarrow T_{\text{ФАПЧ}} = 0,5 \text{ мкс}$

Диф. уравнение:  $\frac{d^2}{dx^2} f + \frac{d}{dx} f + f = \frac{\pi}{8}$

Нач. условия:  $\begin{cases} f(0) = \frac{\pi}{2} \\ f'(0) = -\frac{3\pi}{8} \end{cases}$

$f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ , где  $f_1(x) = \frac{\pi}{8}$

Характеристическое уравнение:  $\lambda^2 + \lambda + 1 = 0$   
 $\lambda_1 = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$   $\lambda_2 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$

$f_2 = A e^{\lambda_1 x} + B e^{\lambda_2 x}$

Общее решение:  $f(x) = \frac{\pi}{8} + A e^{-\frac{1}{2}x} \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x + B e^{-\frac{1}{2}x} \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x$

$\frac{d}{dx} f(x) = -\frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}x} (A \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x + B \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x) + \frac{\sqrt{3}}{2} e^{-\frac{1}{2}x} (-A \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x + B \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x)$

Подставим  $x=0$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{8} + A = \frac{\pi}{2} \\ -\frac{1}{2}A + \frac{\sqrt{3}}{2}B = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = +\frac{3\pi}{8} \\ B = -\frac{\sqrt{3}\pi}{8} \end{cases}$$

Решение для  $T \rightarrow 0$ :  $f(x) = \frac{\pi}{8} + \frac{3\pi}{8} e^{-\frac{1}{2}x} \left( \cos \frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \frac{\sqrt{3}}{2}x \right)$ , где  $x = \frac{t}{T_{\text{ФАПЧ}}}$

2.3. Для  $T_0$

Нач. условие соответствует детанд. значению  $f' = -\frac{\pi}{2}$ , соответствующ. начальной

$$x=0 \rightarrow T_{\text{ФАПЧ}} (\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{пл}}(0)) = -\frac{3\pi}{8} \Rightarrow T_{\text{ФАПЧ}} = 0,5 \text{ мкс}$$

Зап. уравнение  $4 \frac{d^2}{dx^2} f + \frac{d}{dx} f + f = \frac{\pi}{8}$

Нач. условия:  $\begin{cases} f(0) = \frac{\pi}{2} \\ f'(0) = -\frac{3\pi}{8} \end{cases}$

$f(x) = f_0(x) + f_1(x)$ , где  $f_0(x) = \frac{\pi}{8}$

Характерист. уравнение  $4\lambda^2 + \lambda + 1 = 0$

$$\lambda_1 = -\frac{1}{8} + \frac{\sqrt{15}}{8}i \quad \lambda_2 = -\frac{1}{8} - \frac{\sqrt{15}}{8}i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_1 = A e^{\lambda_1 x} + B e^{\lambda_2 x}$$

Общ. решение уравнения:  $f(x) = \frac{\pi}{8} + A e^{-\frac{1}{8}x} \cos \frac{\sqrt{15}}{8}x + B e^{-\frac{1}{8}x} \sin \frac{\sqrt{15}}{8}x$

$$\frac{d}{dx} f(x) = -\frac{1}{8} e^{-\frac{1}{8}x} \left( A \cos \frac{\sqrt{15}}{8}x + B \sin \frac{\sqrt{15}}{8}x \right) + \frac{\sqrt{15}}{8} e^{-\frac{1}{8}x} \left( -A \sin \frac{\sqrt{15}}{8}x + B \cos \frac{\sqrt{15}}{8}x \right)$$

Подставим  $x=0$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{8} + A = \frac{\pi}{2} \\ -\frac{1}{8}A + \frac{\sqrt{15}}{8}B = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = +\frac{3\pi}{8} \\ B = -\frac{7\sqrt{15}\pi}{40} \end{cases}$$

Решение для  $T \rightarrow 0$ :  $f(x) = \frac{\pi}{8} + \frac{3\pi}{8} e^{-\frac{1}{8}x} \left( \cos \frac{\sqrt{15}}{8}x - \frac{7\sqrt{15}}{15} \sin \frac{\sqrt{15}}{8}x \right)$ , где  $x = \frac{t}{T_{\text{ФАПЧ}}}$

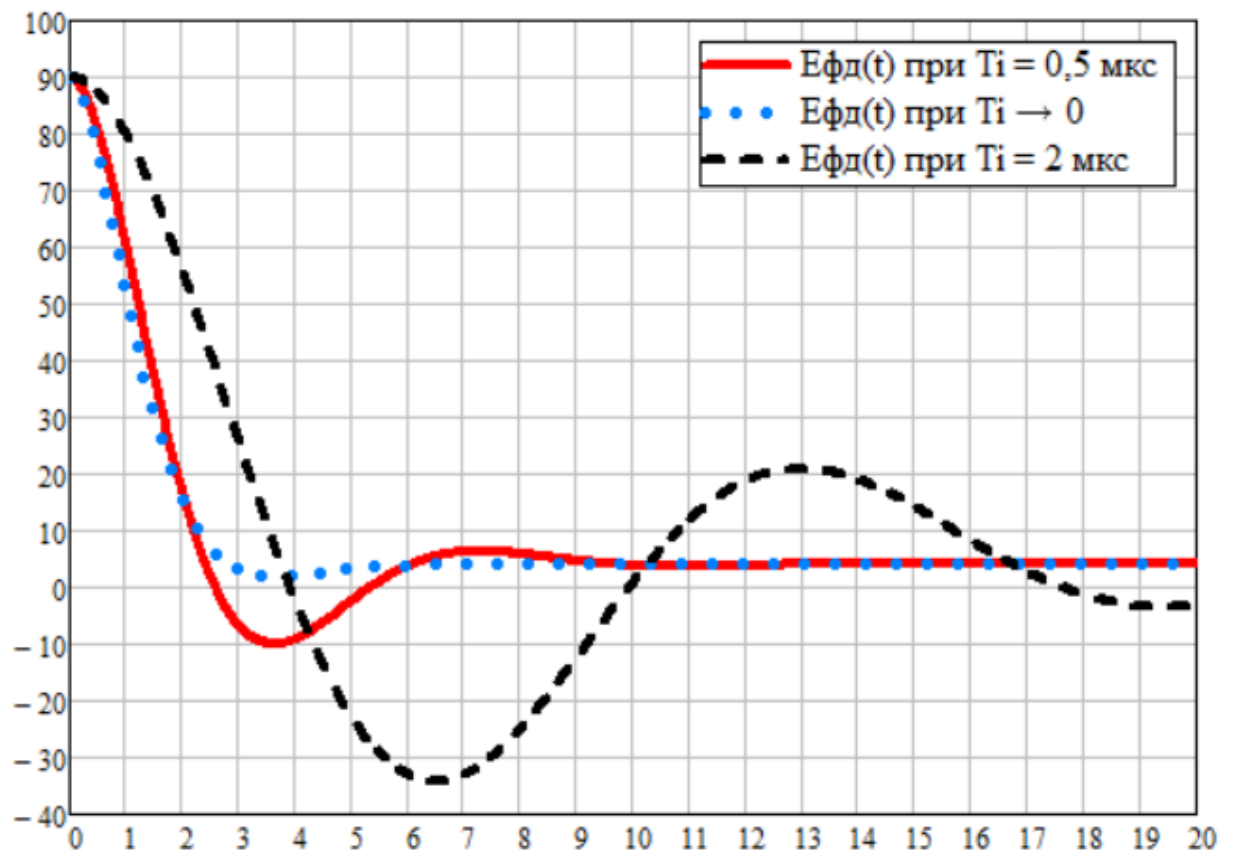
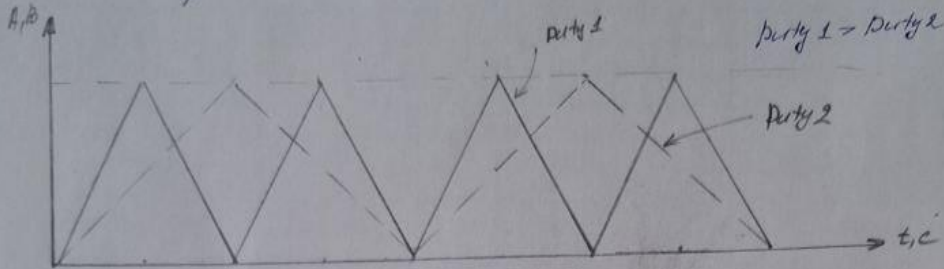


Рисунок 2 – переходные процессы  $E_{\phi}(t)$  при скачке с  $\varphi^+ = \pi/2$

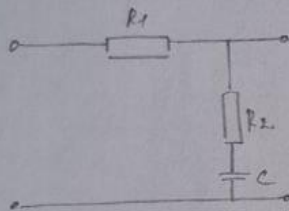


4. Изобразить осциллограммы, которые должны наблюдаться при включении п. 5.2 как излагается, если при включении пропускается шаг 2, т.е. не настроивается + duty, который должен быть равен, обратной скорости. Например, + duty = 50% соответствует скорости, равной 2

(duty)  $P = \frac{t}{T} \cdot 100\%$ , при  $D = 50\%$ ,  $T$  будет в 2 раза  $\uparrow t$



4. Изобразить осциллограммы, которые должны наблюдаться при включении п. 5.4

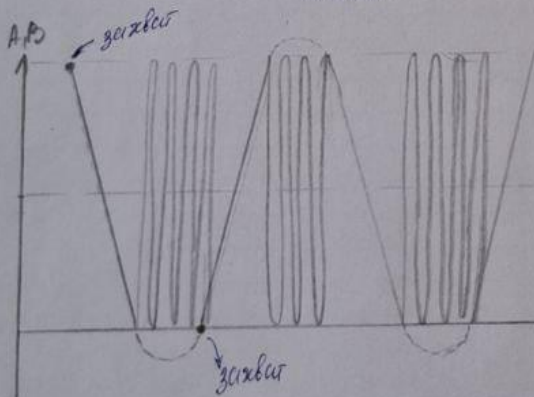


$$R_1 = 300 \text{ Ом}$$

$$\text{Помощник №4: } \tau_H = R_1 C_4 = 300 \cdot 2200 \cdot 10^{-12} = 660 \text{ нс} \Rightarrow f = 240 \text{ кГц}$$

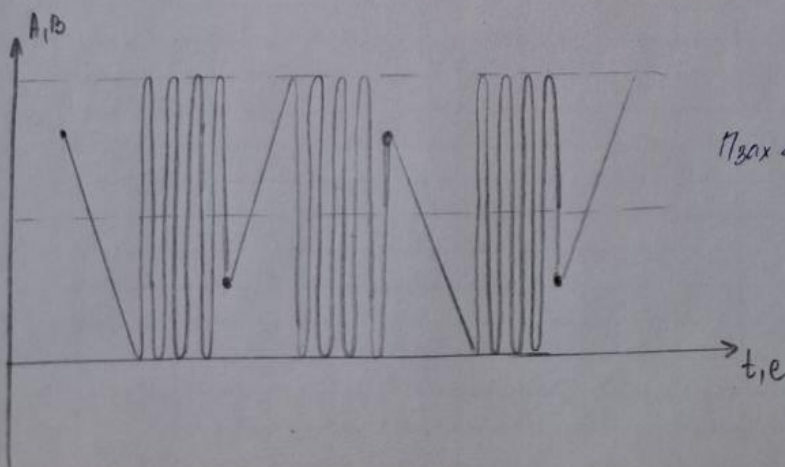
$$\text{Помощник №6: } \tau_6 = R_1 C_6 = 300 \cdot 6800 \cdot 10^{-12} = 2,04 \text{ мс} \Rightarrow f = 78 \text{ кГц}$$

Плюс захвата:  $\gamma = \frac{P_{\text{захв}}}{P_{\text{сим}}}$



$$\text{При } 1 \text{ и } \gamma \downarrow \Rightarrow \frac{P_{\text{захв}}}{P_{\text{сим}}}$$

система становится менее устойчивой.



$$P_{\text{захв}} < P_{\text{сим}}$$