

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт радиотехники электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра Формирования и обработки радиосигналов

ОТЧЕТ
по лабораторной работе №1
по курсу «Формирование радиосигналов»

Группа: ЭР-11-21
Бригада: №3
Студент: Бойко В.С.
Преподаватель: Плутешко А.В.
Дата: 09.03.2025

Москва 2025

1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

1.1 Измерение характеристики ФД

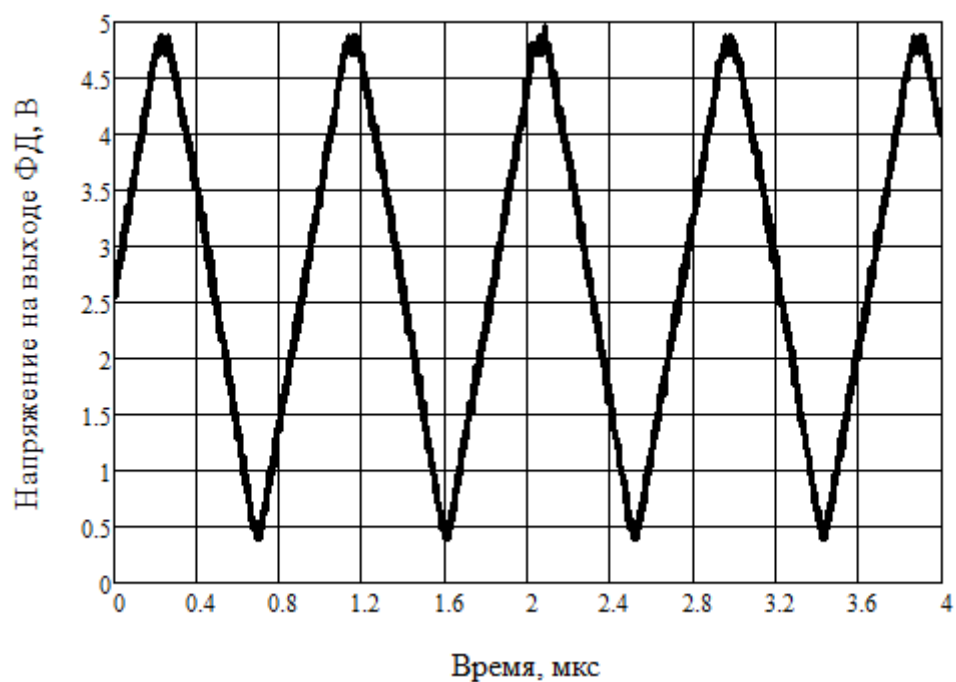


Рисунок 1 – Осциллограмма напряжения на выходе ФД $E_{\text{ФД}}(t)$

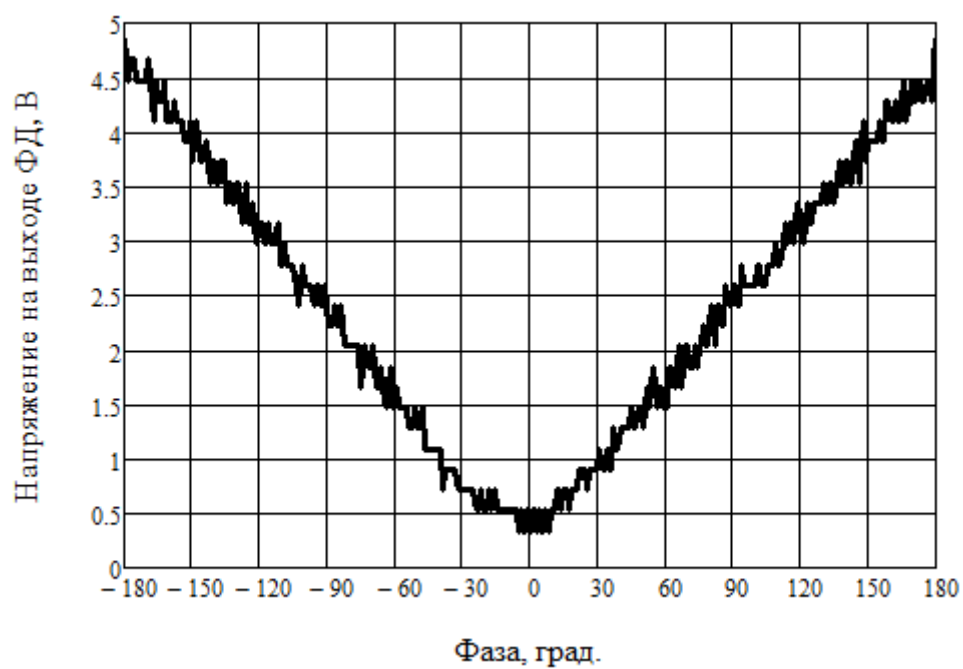


Рисунок 2 – Зависимость напряжения на выходе ФД от фазы $E_{\text{ФД}}(\varphi)$

1.2 Измерение характеристики ГУН

Расчет необходимых параметров и таблица приведены в приложении А.

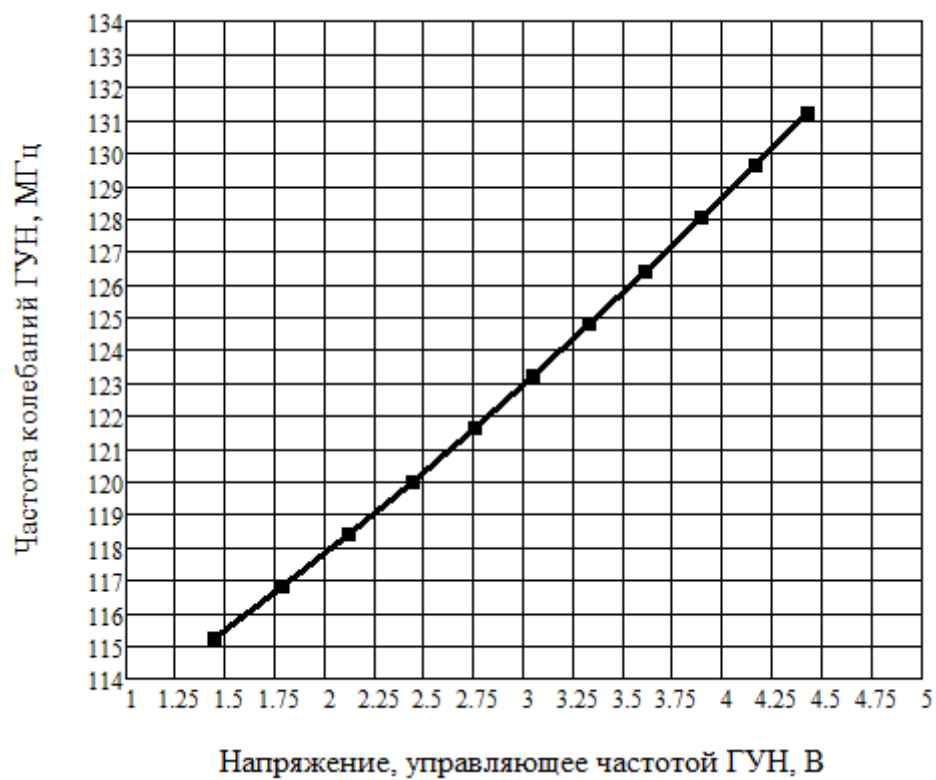


Рисунок 3 – Характеристика управления частотой ГУН $f_{\text{ГУН}}(E_{\text{упр}})$

1.3 Измерение полосы захвата

Расчет необходимых параметров и таблицы, относящиеся к этому разделу, находятся в приложении Б.

Меняя положение переключателя в поле RC -фильтр рассмотрим осциллограммы $E_{\text{ФД}}(t)$:

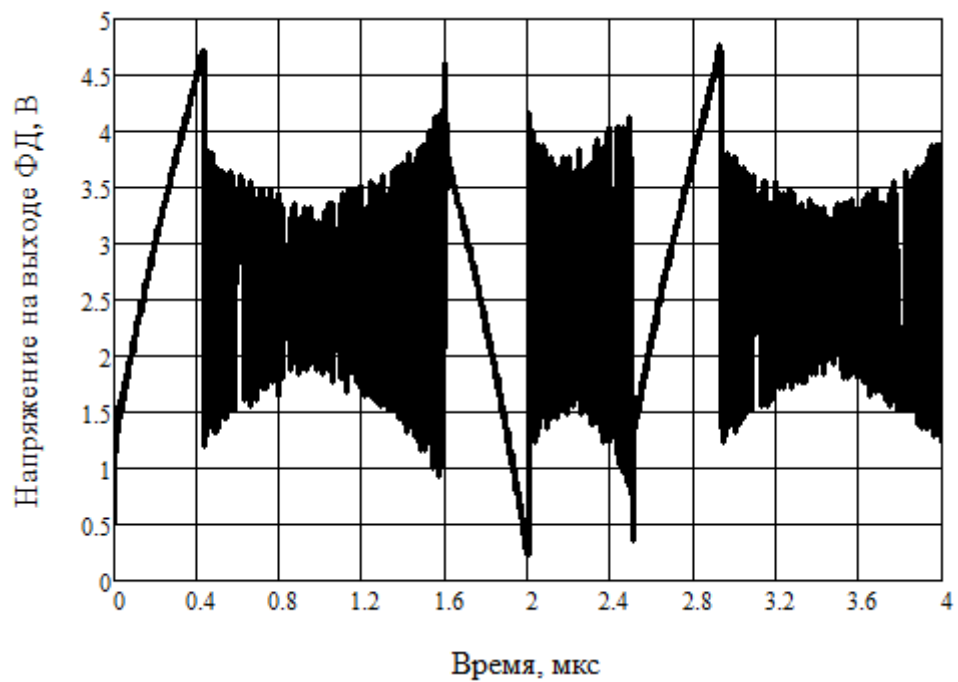


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения на выходе ФД $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 4

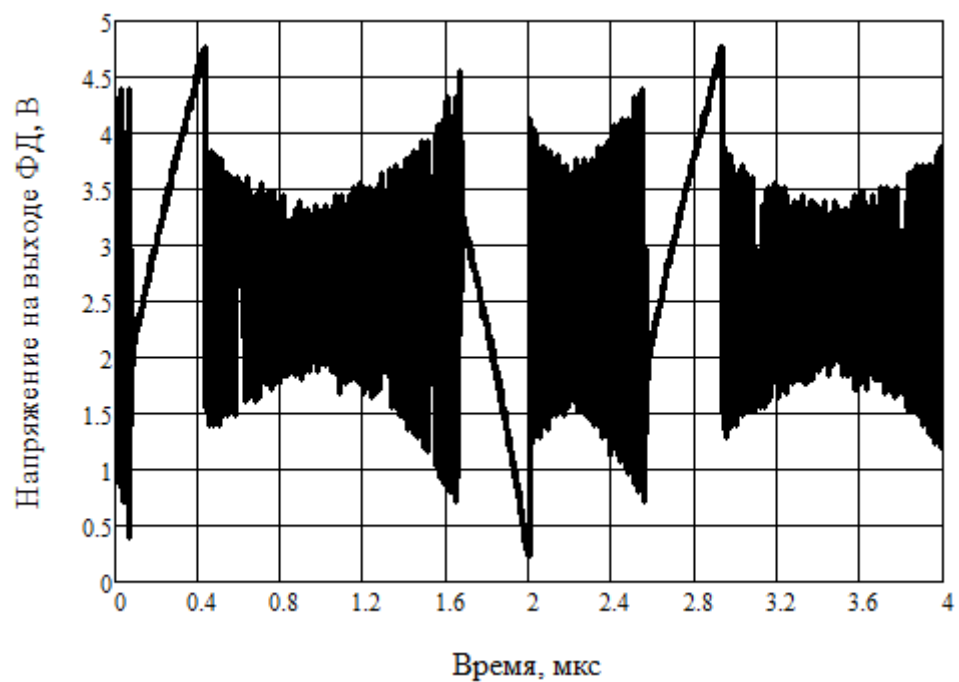


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения на выходе ФД $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 6

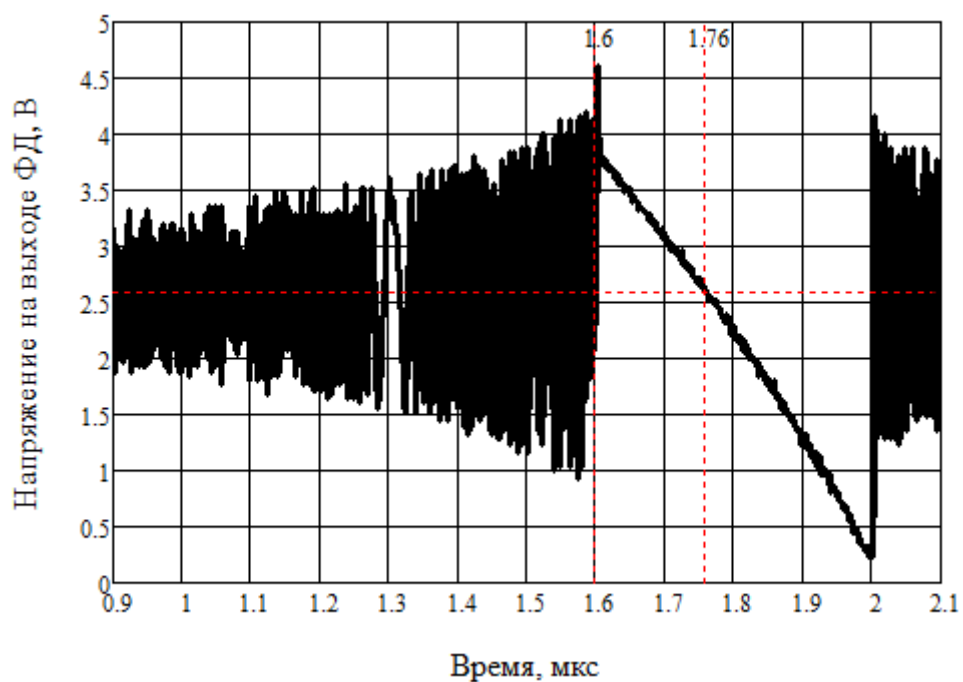


Рисунок 6 – Оценка величины γ по осциллограмме $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 4

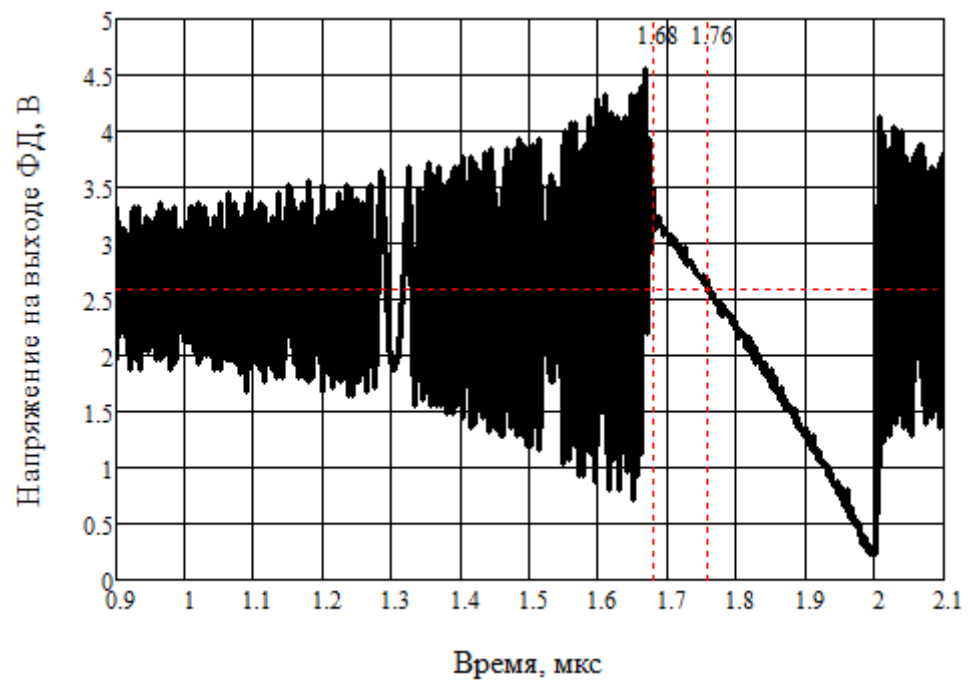


Рисунок 7 – Оценка величины γ по осциллограмме $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 6

Из рисунков 6 и 7 можем определить величину γ :

$$\gamma_4 = \frac{(1,76 - 1,6) \cdot 10^{-6}}{(2 - 1,76) \cdot 10^{-6}} = 0,67$$

$$\gamma_6 = \frac{(1,76 - 1,68) \cdot 10^{-6}}{(2 - 1,76) \cdot 10^{-6}} = 0,33$$

1.4 Измерение переходных процессов по частоте

Пояснения и необходимые расчеты к этому разделу приведены в приложении В.

Меняя положение переключателя в поле RC -фильтр рассмотрим формы переходных процессов $E_{\text{ФД}}(t)$ и $E_{\text{упр}}(t)$ при увеличении постоянной времени фильтра:

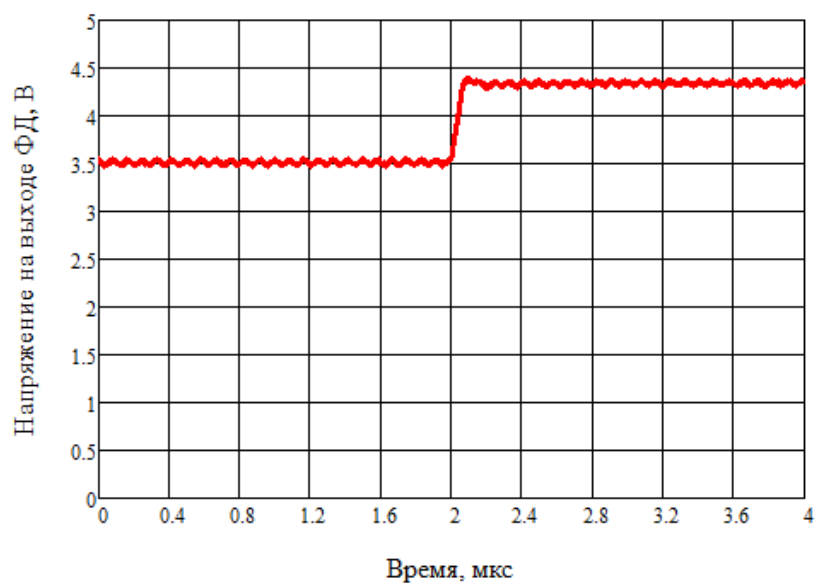


Рисунок 8 – Переходной процесс $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 2

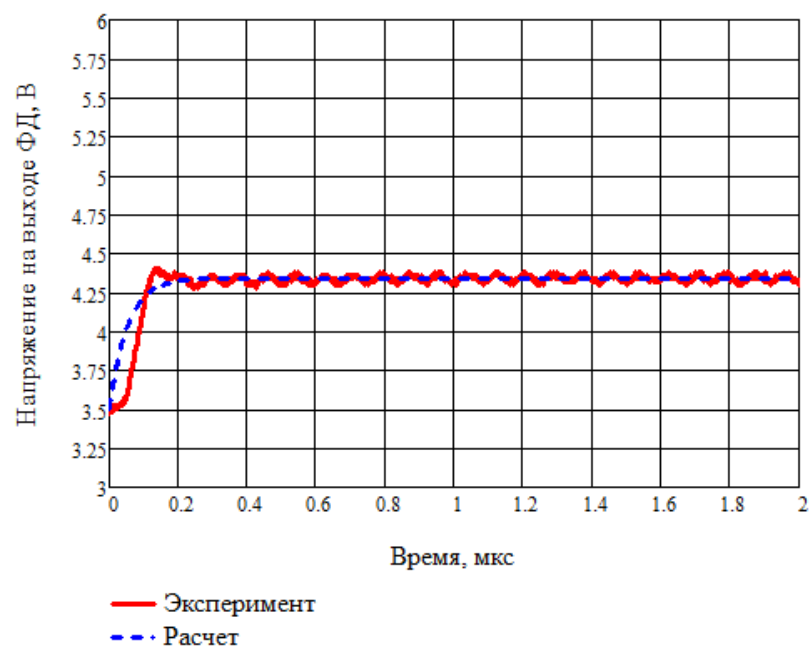


Рисунок 9 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{ФД}(t)$ для положения переключателя 2

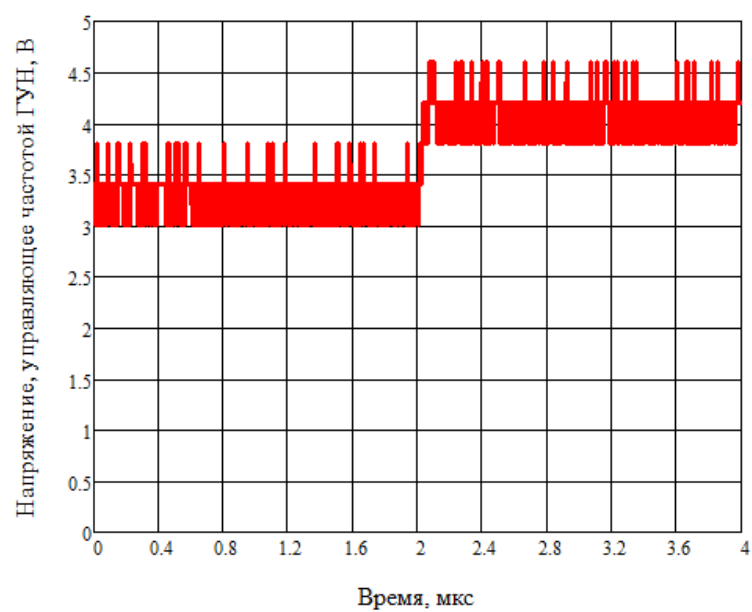


Рисунок 10 – Переходной процесс $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 2

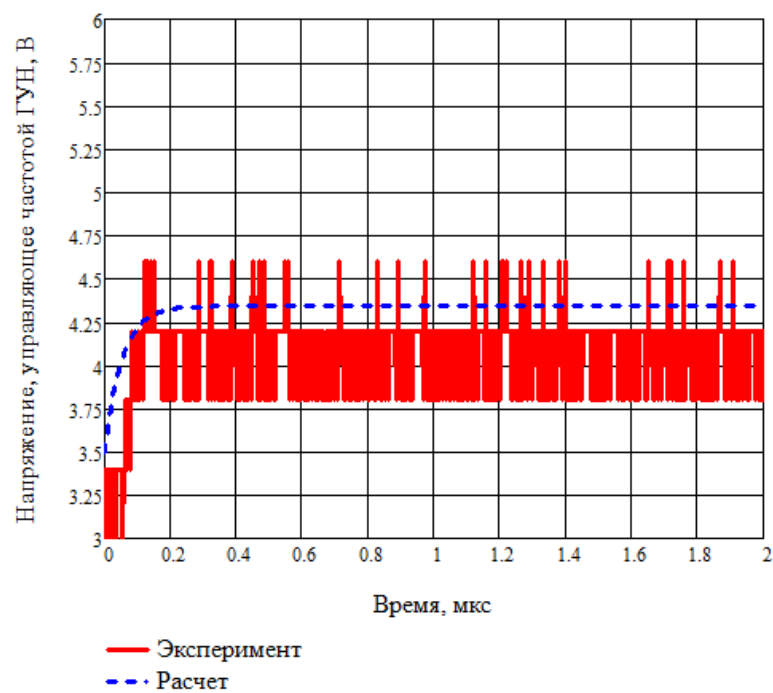


Рисунок 11 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{\text{упр}}(t)$ для положения переключателя 2

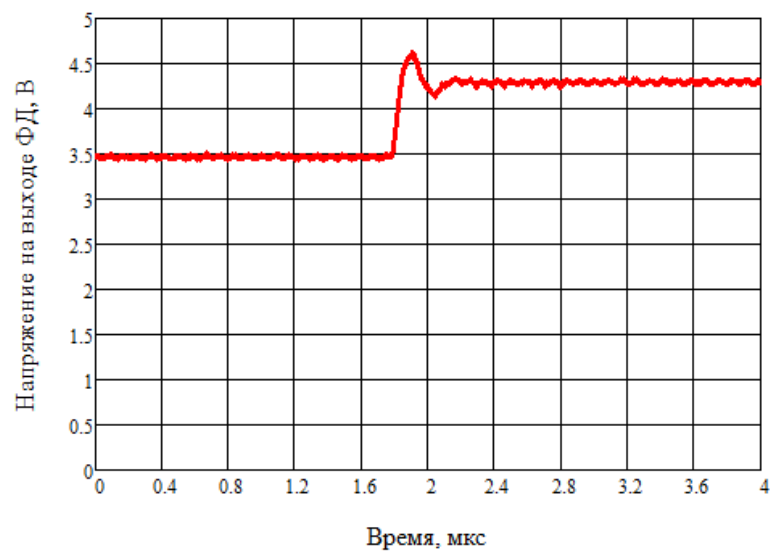


Рисунок 12 – Переходной процесс $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 3

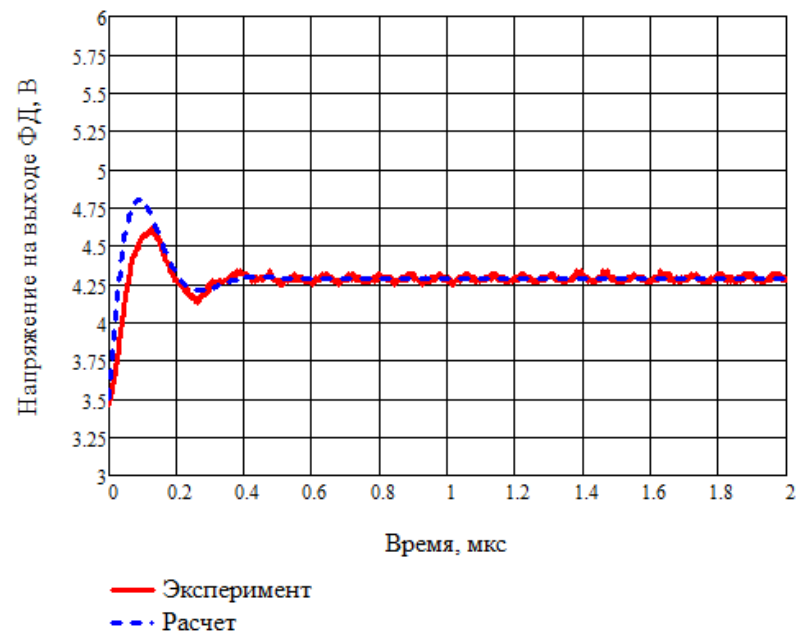


Рисунок 13 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{ФД}(t)$ для положения переключателя 3

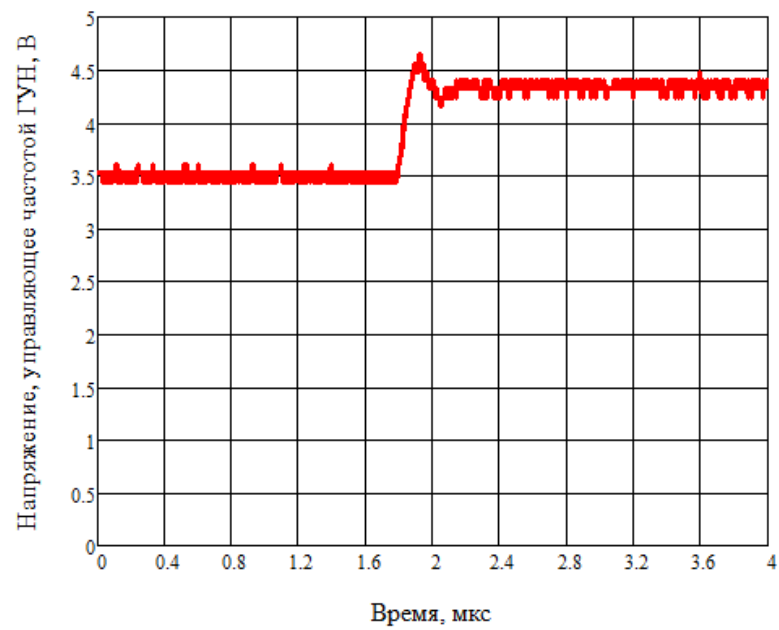


Рисунок 14 – Переходной процесс $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 3

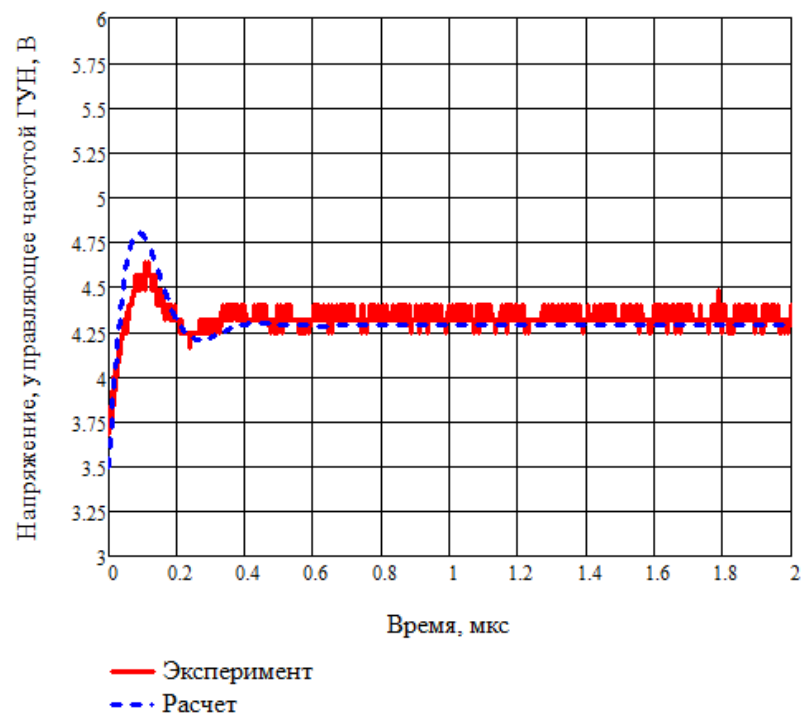


Рисунок 15 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 3

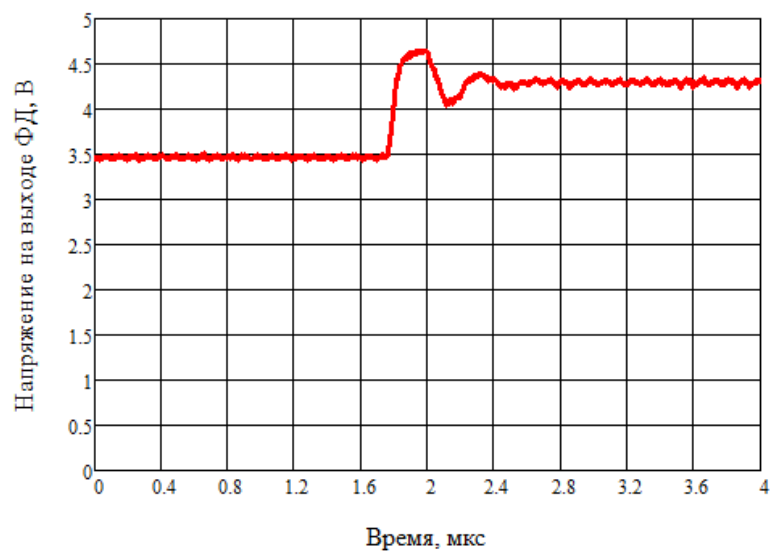


Рисунок 16 – Переходной процесс $E_{ФД}(t)$ для положения переключателя 4

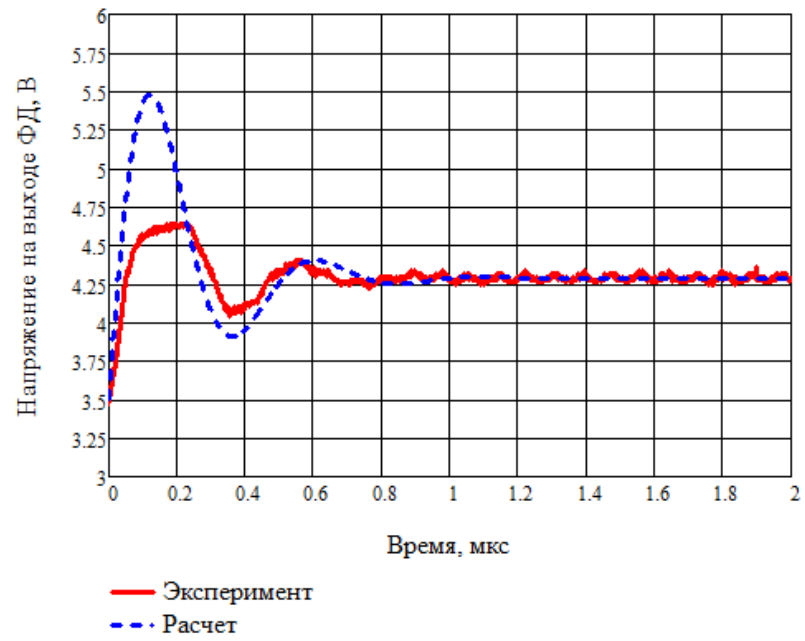


Рисунок 17 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{\text{ФД}}(t)$ для положения переключателя 4

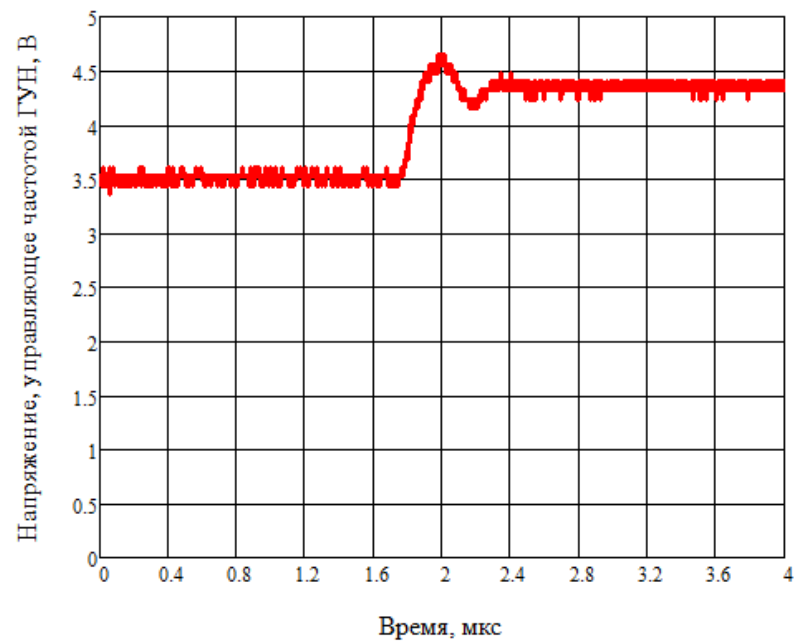


Рисунок 18 – Переходной процесс $E_{\text{упр}}(t)$ для положения переключателя 4

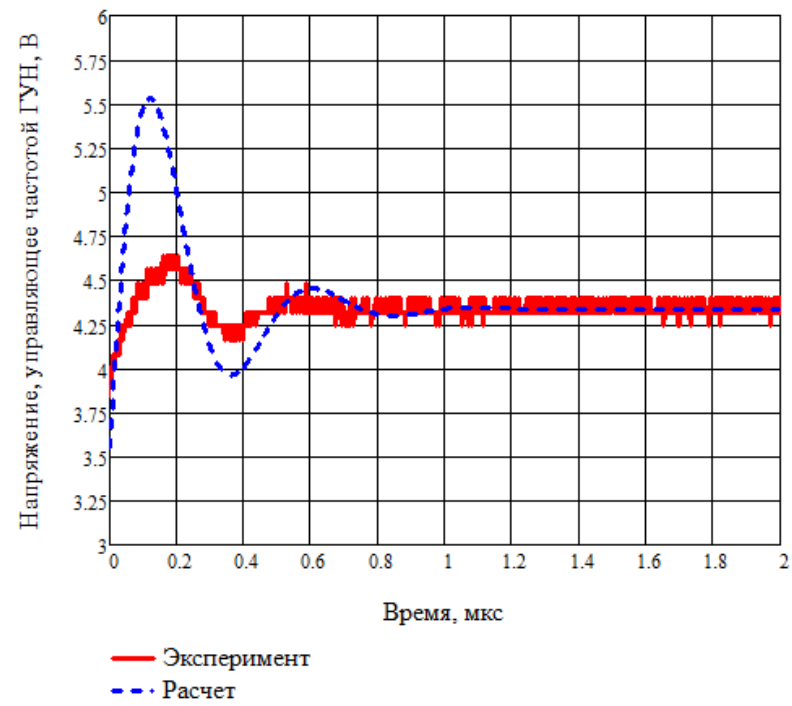


Рисунок 19 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 4

1.5 Измерение переходных процессов по фазе

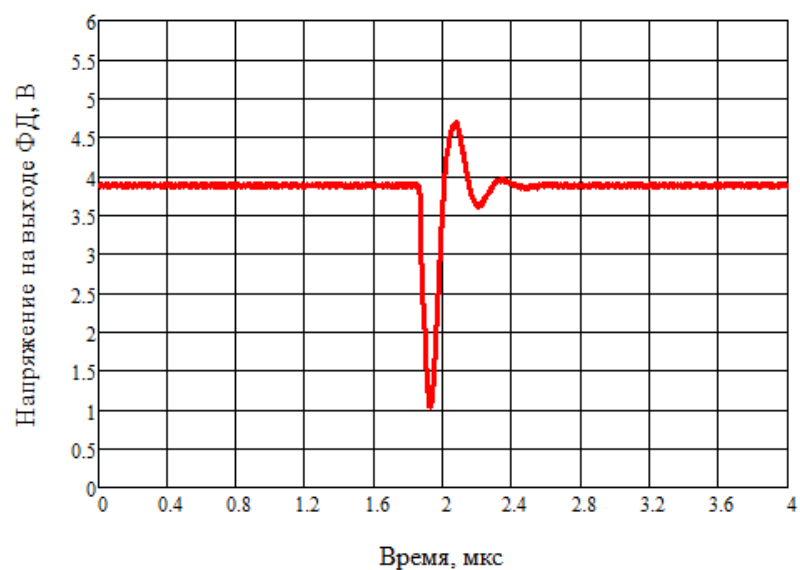


Рисунок 20 – Переходной процесс $E_{ФД}(t)$ для положения переключателя 3

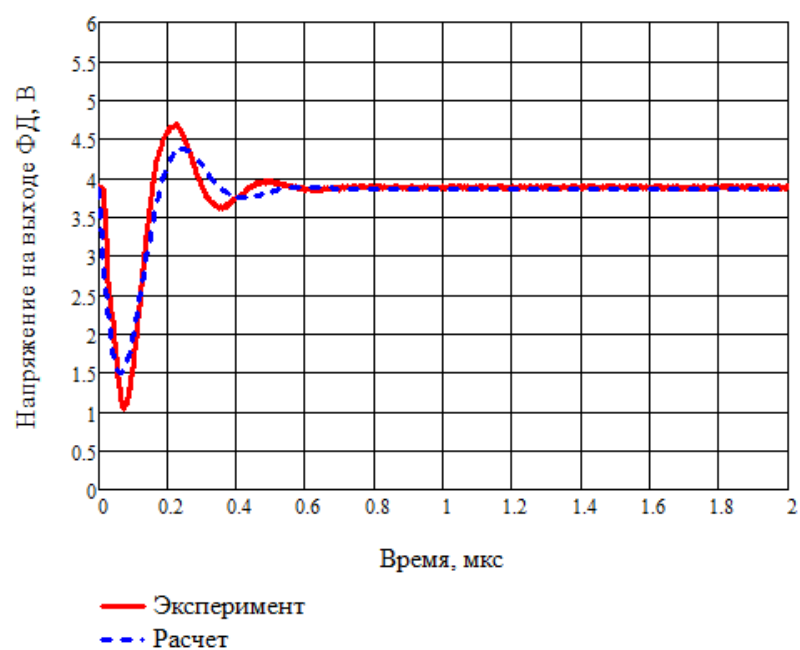


Рисунок 21 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{ФД}(t)$ для положения переключателя 3

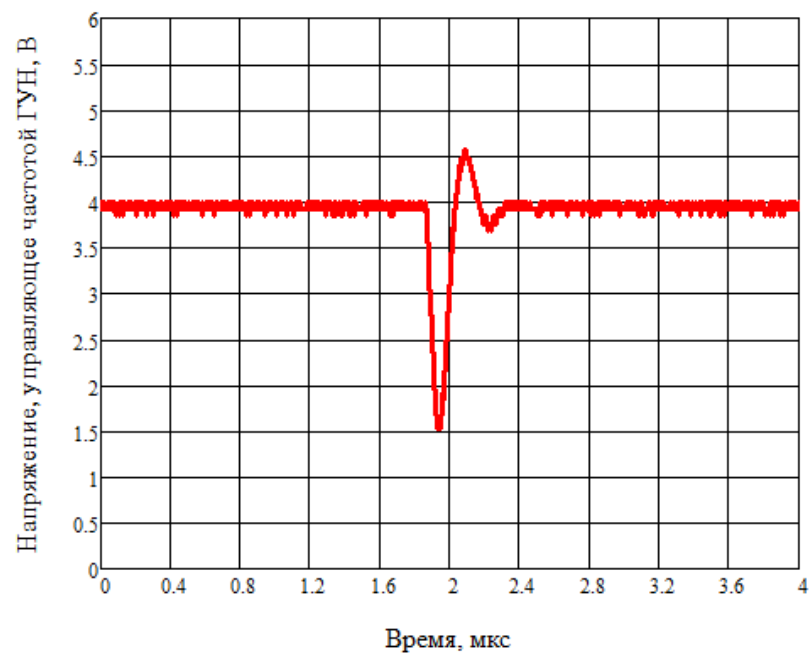


Рисунок 22 – Переходной процесс $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 3

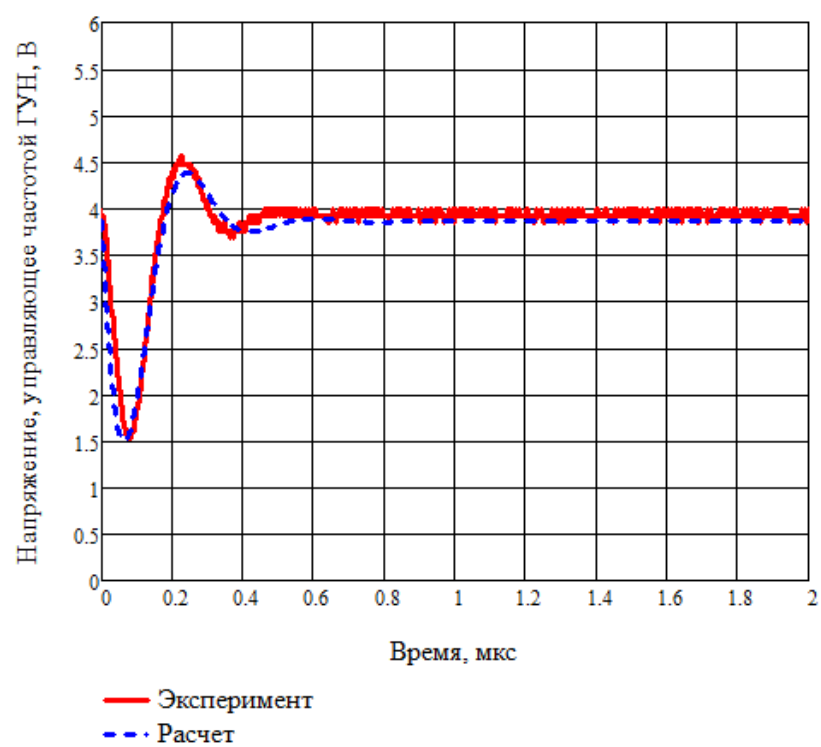


Рисунок 23 – Измеренный и рассчитанный переходные процессы $E_{упр}(t)$ для положения переключателя 3

2 ВЫВОД

1. Рассчитанные переходные процессы являются идеализированной математической моделью, поэтому по тем или иным причинам мы не можем добиться точного соответствия расчетных и экспериментальных графиков. Также при расчете переходных процессов начальные условия для решения дифференциальных уравнений и установившийся режим определялись с погрешностью $\Delta E_{\text{ФД}} \approx 0,05 \text{ В}$ ($\Delta E_{\text{упр}} \approx 0,05 \text{ В}$), что также могло привести к недостаточно точному соответствию расчета и эксперимента.

2. При определении расчетного значения величины γ была использована зависимость $\gamma(\tau)$, при расчете τ 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 $E_{\text{упр}} = 2,5 \text{ В}$ 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 τ по которому определялось значение величины γ .

3. При определении экспериментального значения величины γ были использованы маркеры, которые могли быть установлены недостаточно точно на осциллограммах $E_{\text{ФД}}(t)$, что может являться причиной несоответствия расчета и эксперимента.

4. Также вследствие нагревания элементов платы при проведении лабораторной работы, получаемые результаты измерений могут отличаться от ожидаемых.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Частота колебаний ГУН $f_{\text{ГУН}}$ определяется в соответствии с выражением:

$$f_{\text{ГУН}} = 16f_{\text{оп}}$$

Для $f_{\text{оп}} = 7,2 \text{ МГц}$:

$$f_{\text{ГУН}} = 16 \cdot 7,2 \cdot 10^6 = 115,2 \text{ МГц}$$

Таблица А.1 – Характеристики управления частотой ГУН

$f_{\text{оп}}, \text{ МГц}$	$f_{\text{ГУН}}, \text{ МГц}$	$E_{\text{упр}}, \text{ В}$
7,2	115,2	1,44
7,3	116,8	1,79
7,4	118,4	2,12
7,5	120	2,44
7,6	121,6	2,75
7,7	123,2	3,05
7,8	124,8	3,33
7,9	126,4	3,61
8	128	3,89
8,1	129,6	4,16
8,2	131,2	4,43

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Крутизну характеристики управления частотой ГУН $K_{\text{ГУН}}$ определим по двум точкам характеристики в окрестности $E_{\text{упр}} = 2,5 \text{ В}$:

$$K_{\text{ГУН}} = \frac{f_{\text{ГУН}2} - f_{\text{ГУН}1}}{E_{\text{упр}2} - E_{\text{упр}1}} = \frac{(121,6 - 118,4) \cdot 10^6}{2,75 - 2,12} = 5,08 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$$

Включим ЧМ модуляцию, зададим треугольную форму модуляции, частоту модуляции равной 500 Гц и установим центральную частоту и девиацию таким образом, чтобы частота менялась от f_{\min} до f_{\max} :

$$f_{\min} = f_{\text{оп } \min} - (E_{\text{упр } \min} + 0,1) \frac{K_{\text{ГУН}}}{16}$$

$$f_{\max} = f_{\text{оп } \max} + (5,1 - E_{\text{упр } \max}) \frac{K_{\text{ГУН}}}{16}$$

$$f_{\min} = 7,2 \cdot 10^6 - (1,44 + 0,1) \cdot \frac{5,08 \cdot 10^6}{16} = 6,71 \text{ МГц}$$

$$f_{\max} = 8,2 \cdot 10^6 + (5,1 - 4,43) \cdot \frac{5,08 \cdot 10^6}{16} = 8,41 \text{ МГц}$$

Крутизна характеристики ФД $K_{\text{ФД}}$:

$$K_{\text{ФД}} = \frac{E_{\text{п}}}{\pi} = \frac{5}{\pi} = 1,59 \frac{\text{В}}{\text{рад}}$$

Постоянная времени системы ФАПЧ первого порядка $T_{\text{ФАПЧ}}$:

$$T_{\text{ФАПЧ}} = \frac{P}{2\pi K_{\text{ФД}} K_{\text{ГУН}}} = \frac{16}{2\pi \cdot 1,59 \cdot 5,08 \cdot 10^6} = 0,315 \text{ мкс}$$

Таблица Б.1 – Величины, определяющие поведение кольца ФАПЧ

$K_{ФД}, \frac{В}{рад}$	$K_{ГУН}, \frac{МГц}{В}$	$T_{ФАПЧ}, мкс$
1,59	5,08	0,315

Оценим величину γ для положений переключателей 4 и 6 и сравним с теоретическими значениями.

Нормированная постоянная времени ФНЧ τ :

$$\tau = \frac{T}{T_{ФАПЧ}}$$

Постоянная времени ФНЧ T :

$$T = RC$$

Для положений переключателей 4 и 6:

$$T_4 = 300 \cdot 2200 \cdot 10^{-12} = 0,66 \text{ мкс}$$

$$T_6 = 300 \cdot 6800 \cdot 10^{-12} = 2,04 \text{ мкс}$$

$$\tau_4 = \frac{T_4}{T_{ФАПЧ}} = \frac{0,66 \cdot 10^{-6}}{0,315 \cdot 10^{-6}} = 2,095$$

$$\tau_6 = \frac{T_6}{T_{ФАПЧ}} = \frac{2,04 \cdot 10^{-6}}{0,315 \cdot 10^{-6}} = 6,476$$

Тогда величина γ :

$$\gamma_4 \approx 0,57$$

$$\gamma_6 \approx 0,34$$

Таблица Б.2 – Экспериментальные и теоретические значения величины γ

Положение переключателя	Экспериментальное значение γ	Теоретическое значение γ
4	0,67	0,57
6	0,33	0,34

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Включим ЧМ модуляцию, зададим форму модуляции: меандр, частоту модуляции равной 5 кГц, а девиацию зададим равной:

$$\frac{K_{\text{ГУН}}}{16} \cdot 0,5 = 159 \text{ кГц}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

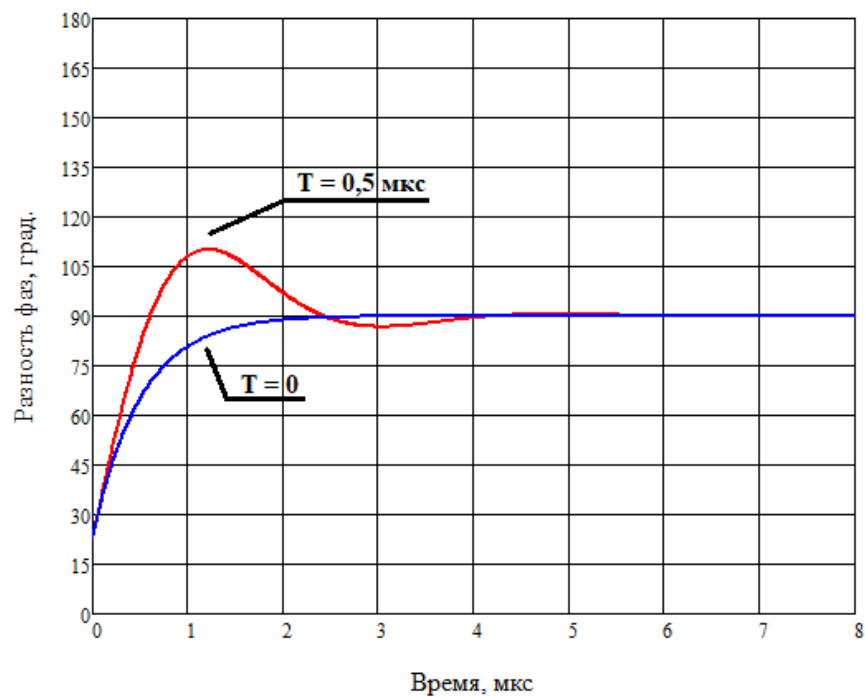


Рисунок Г.1 – Переходные процессы при скачке опорной частоты на +375 кГц

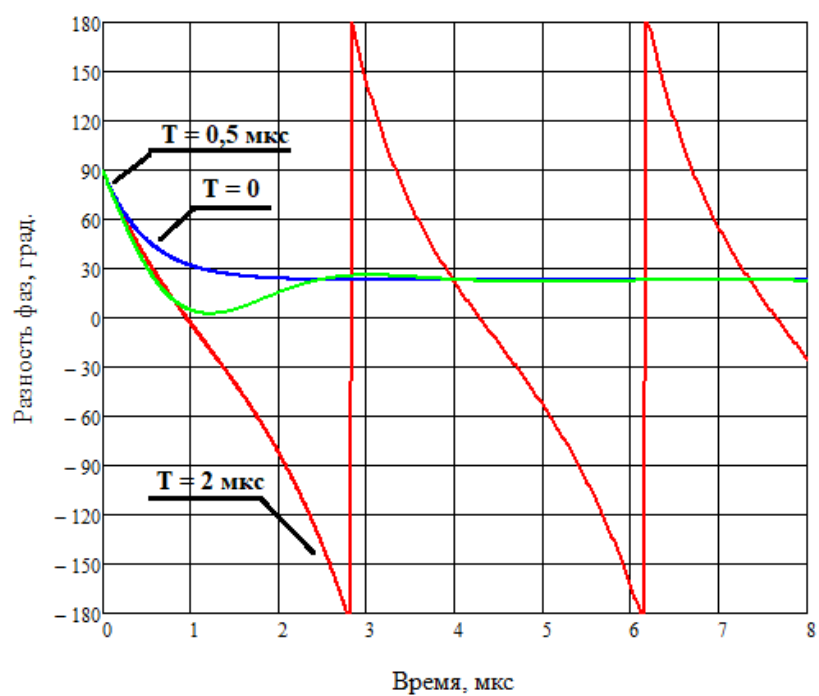


Рисунок Г.2 – Переходные процессы при скачке опорной частоты на -375 кГц

Домашняя подготовка

Круговая характеристика ФЧД:

$$K_{ФЧД} = \frac{E_{П}}{\omega} = \frac{5}{\omega} = 1,592$$

Постоянная времени сис-мы ФАПЧ 1-го порядка:

$$T_{ФАПЧ} = \frac{1}{2\pi K_{гун} K_{ФЧД}} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1,592} = 500 \text{ нс}$$

1) Построить переходные процессы $E_{ФЧД}(t)$ при скачке опорной частоты на $+375 \text{ кГц}$ из стационарного режима с $\varphi^* = \frac{\pi}{8}$:

1.1) При $T \rightarrow 0$

У при $\varphi > 0$ имеет вид:

$$\varphi' + \varphi = \frac{\pi}{2} \quad \begin{cases} \varphi(0) = \frac{\pi}{8} \\ \varphi'(0) = \frac{3\pi}{8} \end{cases}$$

$$\varphi_{0.н.} = \varphi_{ч.н.} + \varphi_{0.0}, \quad \varphi_{ч.н.} = \frac{\pi}{2}$$

Хар. ур-е для однородного ур-я:

$$\lambda + 1 = 0 \Rightarrow \lambda = -1$$

$$\varphi_{0.0} = C_1 e^{-x} \quad \varphi_{0.0}(0) = C_1 = -\frac{\pi}{8} \quad \varphi_{0.н.}(0) = \frac{\pi}{2} + C_1 = \frac{\pi}{8} \Rightarrow C_1 = -\frac{3\pi}{8}$$

$$\varphi_{0.н.} = \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{8} e^{-x}, \quad \text{где } x = \frac{t}{T_{ФАПЧ}}$$

1.2) При $T_1 = 0,5 \text{ мкс}$

У имеет вид:

$$\tau \varphi'' + \varphi' + \varphi = \frac{\pi}{2}, \quad \text{где } \tau = \frac{T_1}{T_{ФАПЧ}} = 1 \quad \begin{cases} \varphi(0) = \frac{\pi}{8} \\ \varphi'(0) = \frac{3\pi}{8} \end{cases}$$

Хар. ур-е для однородного ур-я:

$$\lambda^2 + \lambda + 1 = 0 \quad D = 1 - 4 = -3 \quad \lambda_{1,2} = \frac{-1 \pm i\sqrt{3}}{2} = -0,5 \pm i \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\varphi_{0,0} = e^{-0,5x} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

$$\varphi_{0,H} = \frac{\sqrt{2}}{2} + e^{-0,5x} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

$$\varphi'_{0,H} = -0,5 e^{-0,5x} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} e^{-0,5x} \left(-C_1 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

$$\begin{cases} \varphi_{0,H}(0) = \frac{\sqrt{2}}{2} + C_1 = \frac{\sqrt{2}}{8} \\ \varphi'_{0,H}(0) = -0,5 C_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} C_2 = \frac{3\sqrt{2}}{8} \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 = -\frac{3\sqrt{2}}{8} \\ C_2 = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2}}{8} \end{cases}$$

$$\varphi_{0,H} = \frac{\sqrt{2}}{2} + e^{-0,5x} \left(-\frac{3\sqrt{2}}{8} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + \frac{\sqrt{3}\sqrt{2}}{8} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

② Построить переходные процессы $E_{\text{фг}}(t)$ при скачке опорной частоты на $-37,5 \text{ кГц}$ из стационарного режима с $\varphi^+ = \frac{\pi}{2}$

2.1 При $T \rightarrow 0$

φ имеет вид:

$$\varphi' + \varphi = \frac{\pi}{8} \quad \begin{cases} \varphi(0) = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \varphi'(0) = -\frac{3\sqrt{2}}{8} \end{cases}$$

$$\varphi_{0,H} = \varphi_{\text{ч.н.}} + \varphi_{0,0}, \text{ где } \varphi_{\text{ч.н.}} = \frac{\pi}{8}$$

Хар. ур-ие для однородного ур-ия:

$$\lambda + 1 = 0 \Rightarrow \lambda = -1$$

$$\varphi_{0,H} = \frac{\pi}{8} + C_1 e^{-x} \quad \varphi_{0,H}(0) = \frac{\pi}{8} + C_1 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow C_1 = \frac{3\pi}{8}$$

$$\varphi_{0,H} = \frac{\pi}{8} + \frac{3\pi}{8} e^{-x}$$

2.2 При $T_1 = 0,5 \text{ мкс}$

φ имеет вид:

$$\varphi'' + \varphi' + \varphi = \frac{\sqrt{2}}{8} \quad \begin{cases} \varphi(0) = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \varphi'(0) = -\frac{3\sqrt{2}}{8} \end{cases}$$

Хар. ур-ие для однородного ур-ия:

$$\lambda^2 + \lambda + 1 = 0 \quad \lambda_{1,2} = -0,5 \pm i\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\varphi_{0.H.} = \frac{\pi}{8} + e^{-0,5x} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

$$\varphi'_{0.H.} = -0,5 e^{-0,5x} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} e^{-0,5x} \left(-C_1 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

$$\begin{cases} \varphi_{0.H.}(0) = \frac{\pi}{8} + C_1 = \frac{\pi}{2} \\ \varphi'_{0.H.}(0) = -0,5 C_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} C_2 = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 = \frac{3\pi}{8} \\ C_2 = -\frac{\sqrt{3}\pi}{8} \end{cases}$$

$$\varphi_{0.H.} = \frac{\pi}{8} + e^{-0,5x} \left(\frac{3\pi}{8} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) - \frac{\sqrt{3}\pi}{8} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x\right) \right)$$

2.3) $T_y = 2 \text{ мкс}$

ДУ при $\varphi > 0$ имеет вид:

$$4\varphi'' + \varphi' + \varphi = \frac{\pi}{8} \quad \begin{cases} \varphi(0) = \frac{\pi}{2} \\ \varphi'(0) = -\frac{3\pi}{8} \end{cases}$$

Кар. ур-ие для однородного ур-ия:

$$4\lambda^2 + \lambda + 1 = \frac{\pi}{8} \quad D = 1 - 16 = -15 \quad \lambda_{1,2} = \frac{-1 \pm i\sqrt{15}}{8} = -\frac{1}{8} \pm i\frac{\sqrt{15}}{8}$$

$$\varphi_{0.H.} = \frac{\pi}{8} + e^{-\frac{x}{8}} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) \right)$$

$$\varphi'_{0.H.} = -\frac{1}{8} e^{-x/8} \left(C_1 \cos\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) \right) + \frac{\sqrt{15}}{8} e^{-x/8} \left(-C_1 \sin\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) \right)$$

$$\begin{cases} \varphi_{0.H.}(0) = \frac{\pi}{8} + C_1 = \frac{\pi}{2} \\ \varphi'_{0.H.}(0) = -\frac{1}{8} C_1 + \frac{\sqrt{15}}{8} C_2 = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 = \frac{3\pi}{8} \\ C_2 = -\frac{7\sqrt{15}\pi}{40} \end{cases}$$

$$\varphi_{0.H.} = \frac{\pi}{8} + e^{-\frac{x}{8}} \left(\frac{3\pi}{8} \cos\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) - \frac{7\sqrt{15}\pi}{40} \sin\left(\frac{\sqrt{15}}{8}x\right) \right)$$

ДУ при $\varphi < 0$ имеет вид:

$$4\varphi'' + \varphi' - \varphi = \frac{\pi}{8}$$

Кар. ур-ие для однородного ур-ия:

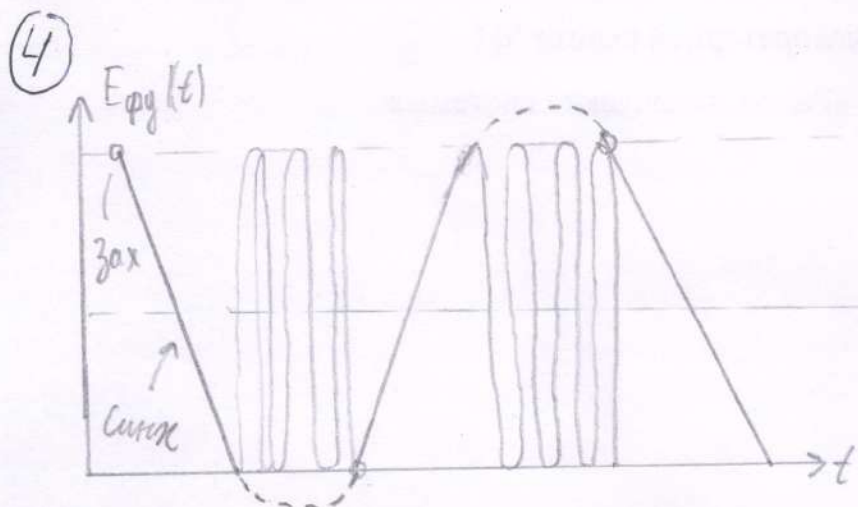
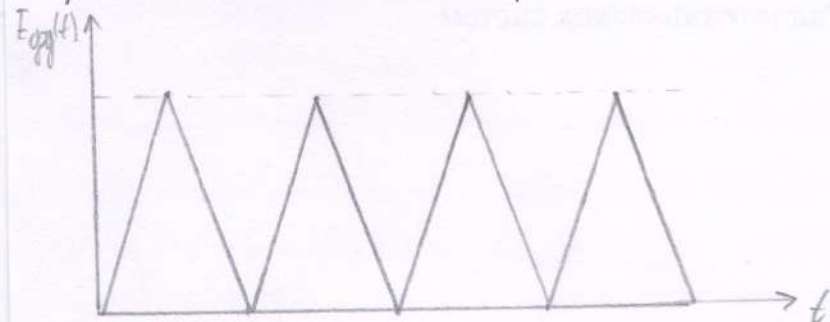
$$4\lambda^2 + \lambda - 1 = 0 \quad D = 1 + 16 = 17 \quad \lambda_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{17}}{8} \quad \lambda_1 = 0,39 \quad \lambda_2 = -0,64$$

$$\varphi_{0.H.} = \frac{\pi}{8} + C_1 e^{0,39x} + C_2 e^{-0,64x} \quad \varphi'_{0.H.} = 0,39 C_1 e^{0,39x} - 0,64 C_2 e^{-0,64x}$$

$$\begin{cases} \varphi_{0.H.}(0) = \frac{\pi}{8} + C_1 + C_2 = \frac{\pi}{2} \\ \varphi'_{0.H.}(0) = 0,39 C_1 - 0,64 C_2 = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 + C_2 = \frac{3\pi}{8} \\ 0,39 C_1 - 0,64 C_2 = -\frac{3\pi}{8} \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 = -0,41 \\ C_2 = 1,59 \end{cases}$$

$$\varphi_{0.н.} = \frac{\sigma T}{8} - 0,41e^{0,39x} + 1,59e^{-0,64x}$$

- ③ Duty - коэффициент заполнения, $Duty = \frac{T_{in}}{T}$, поэтому при измерении Duty измеряют соотношение длительности импульса T_{in} и периода T .



Величина γ :

$$\gamma = \frac{\pi_{зах}}{\pi_{син}}$$

При $\pi_{зах} < \pi_{син}$ и $T \uparrow$, где $T = RC$

