

Национальный исследовательский институт «МЭИ»
Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра ФОРС

Отчёт
по лабораторной работе №5
«Фазовая автоподстройка частоты»
по курсу «Формирование радиосигналов»

Группа: ЭР-11-21
Выполнил: Тимохин С.А.
Проверил: Плутешко А.В.
Дата: 16.03.2025
Оценка: _____

Москва 2025

ДОМАШНЯЯ ПОДГОТОВКА

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта ФАПЧ

$E_{\text{п}}, \text{В}$	$K_{\text{ГУН}}, \frac{\text{кГц}}{\text{В}}$
+5	200

Таблица 2 – Постоянные времени ФНЧ T_i

i	$T_i, \text{мкс}$
1	0.5
2	0.6
3	0.7
4	2.0

1. При скачке опорной частоты на +375 кГц, с $\varphi^+ = \frac{\pi}{8}$

$$\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{гуно}} = \text{скачок} = 375 \text{ кГц}$$

$$T_{\text{фапч}} = \frac{P}{2\pi K_{\text{гуи}} K_{\text{фд}}}$$

$$K_{\text{фд}} = \frac{E_{\text{п}}}{\pi}$$

При $P = 1$, $T_{\text{фапч}} = 0.5 \text{ мкс}$

$$\Delta = T_{\text{фапч}}(\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{гуно}})$$

$$\Delta = \frac{3\pi}{8} = \varphi'(0)$$

$$\varphi(0) = \frac{\pi}{8}$$

Уравнение переходного процесса при $T \rightarrow 0$

$$\frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta$$

$$\frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{7\pi}{8}$$

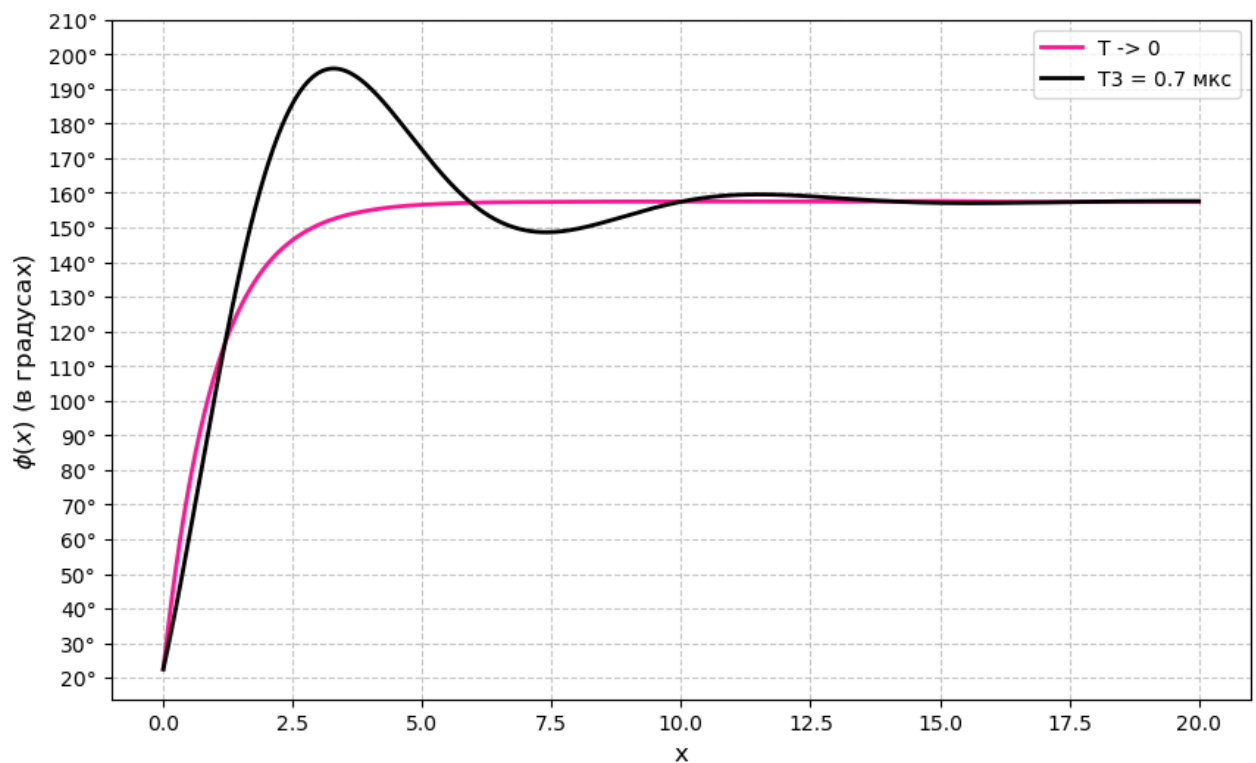
Уравнение переходного процесса при $T_3 = 0.7$ мкс

$$\tau = \frac{T_3}{T_{\text{фапч}}} = \frac{0.7 \text{ мкс}}{0.5 \text{ мкс}} = 1.4$$

$$\tau \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta$$

$$1.4 \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{7\pi}{8}$$

Дифференциальные уравнения были решены численно с помощью функции `solve_ivp()` из библиотеки SciPy.



$$x = \frac{t}{T_{\text{фапч}}}$$

2. При скачке опорной частоты на -375 кГц, с $\varphi^+ = \frac{\pi}{2}$

$$\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{гун0}} = \text{скачок} = -375 \text{ кГц}$$

$$T_{\text{фапч}} = \frac{P}{2\pi K_{\text{гун}} K_{\text{ФД}}}$$

При $P = 1$, $T_{\text{фапч}} = 0.5$ мкс

$$\Delta = T_{\text{фапч}}(\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{гун0}})$$

$$\Delta = -\frac{3\pi}{8} = \varphi'(0)$$

$$\varphi(0) = \frac{\pi}{2}$$

Уравнение переходного процесса при $T \rightarrow 0$

$$\frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta$$

$$\frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{8}$$

Уравнение переходного процесса при $T_3 = 0.7$ мкс

$$\tau = \frac{T_3}{T_{\text{фапч}}} = \frac{0.7 \text{ мкс}}{0.5 \text{ мкс}} = 1.4$$

$$\tau \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta$$

$$1.4 \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{8}$$

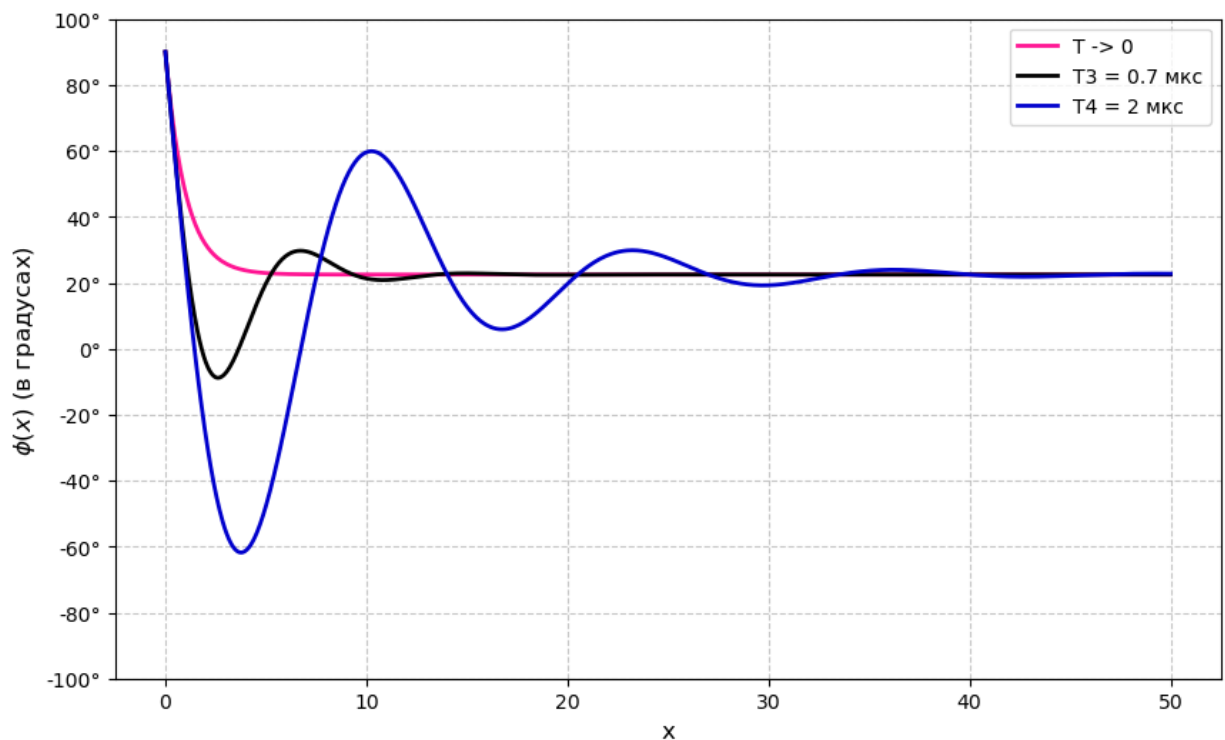
Уравнение переходного процесса при $T_4 = 2.0$ мкс

$$\tau = \frac{T_4}{T_{\text{фапч}}} = \frac{2.0 \text{ мкс}}{0.5 \text{ мкс}} = 4$$

$$\tau \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta$$

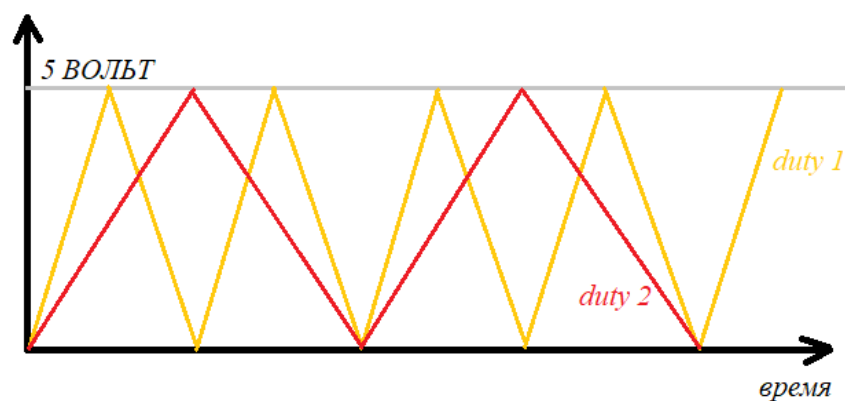
$$4 \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{8}$$

Дифференциальные уравнения были также решены численно с помощью функции `solve_ivp()` из библиотеки SciPy.

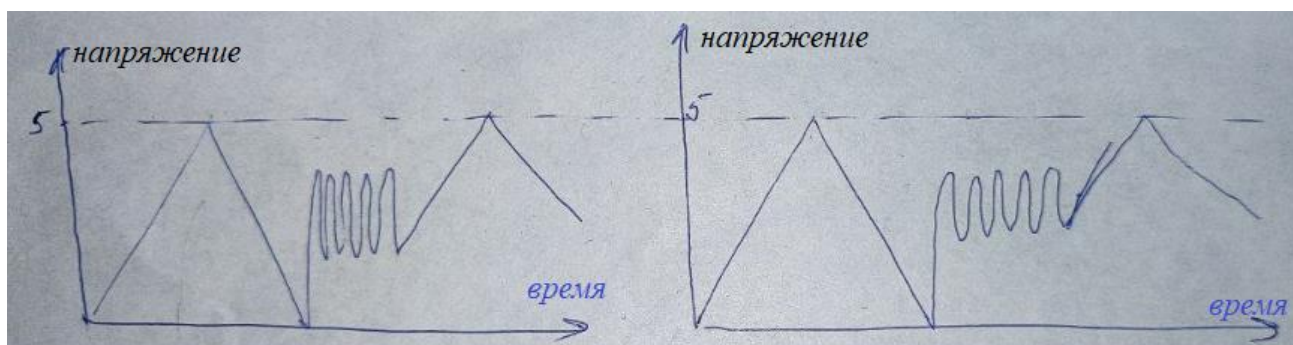


$$x = \frac{t}{T_{\text{флпч}}}$$

3. Ожидаемые осциллограммы в п. 5.2



4. Ожидаемые осциллограммы в п. 5.4



ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Построение характеристики ФД $E_{\text{ФД}}(\varphi)$

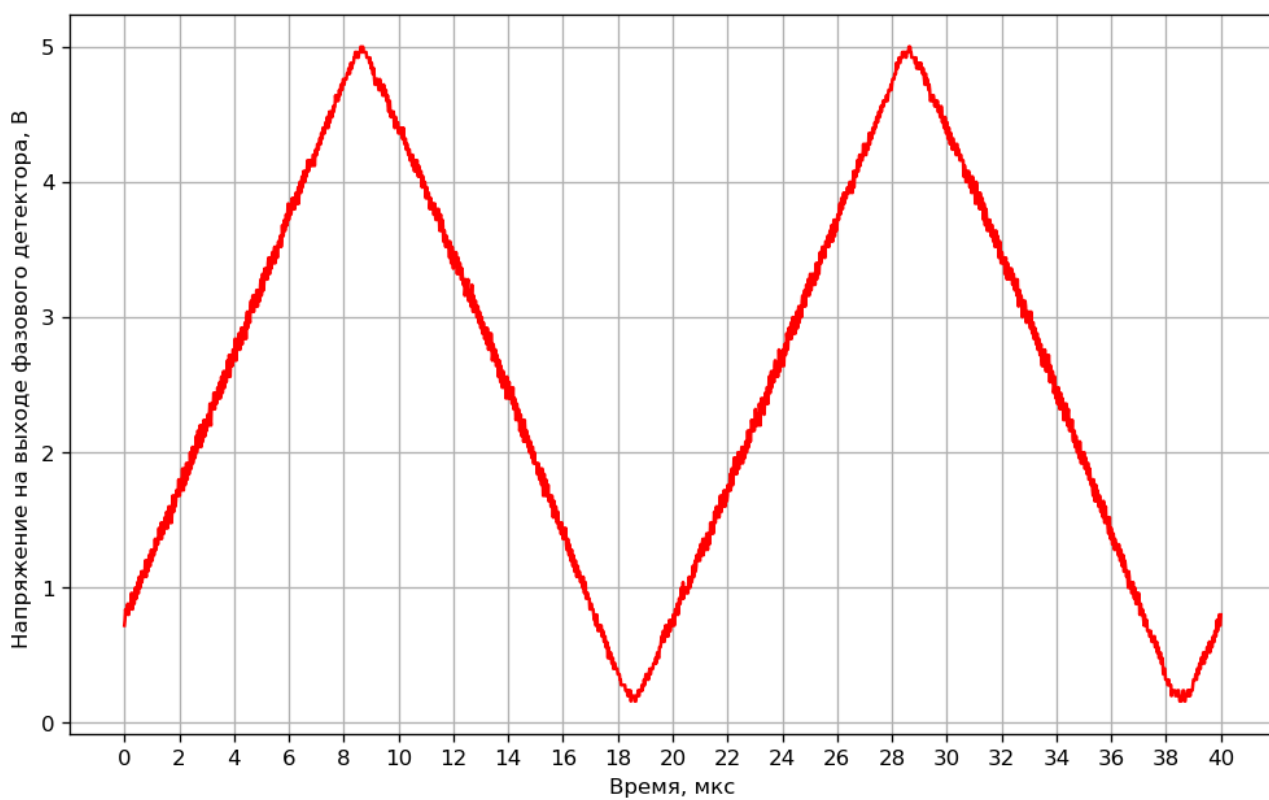
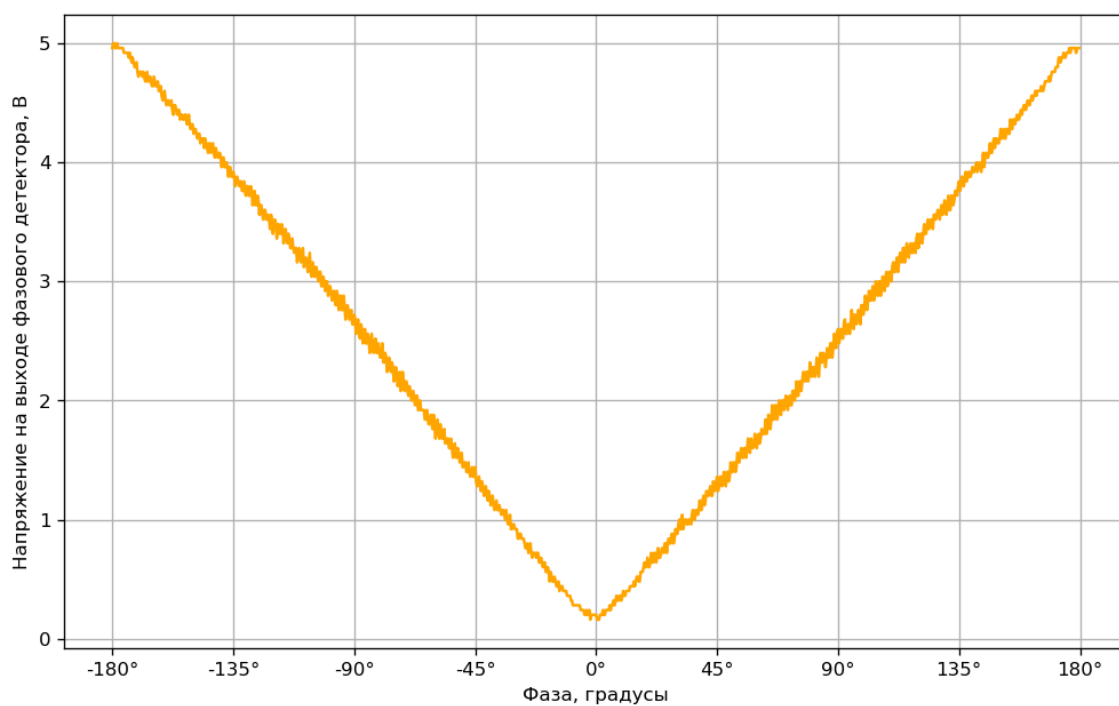


Рисунок 1 – Зависимость напряжение на выходе ФД от времени



□

Рисунок 2 – Зависимость напряжение на выходе ФД от фазы

2. Построение характеристики управления частотой ГУН $f_{\text{ГУН}}(E_{\text{упр}})$

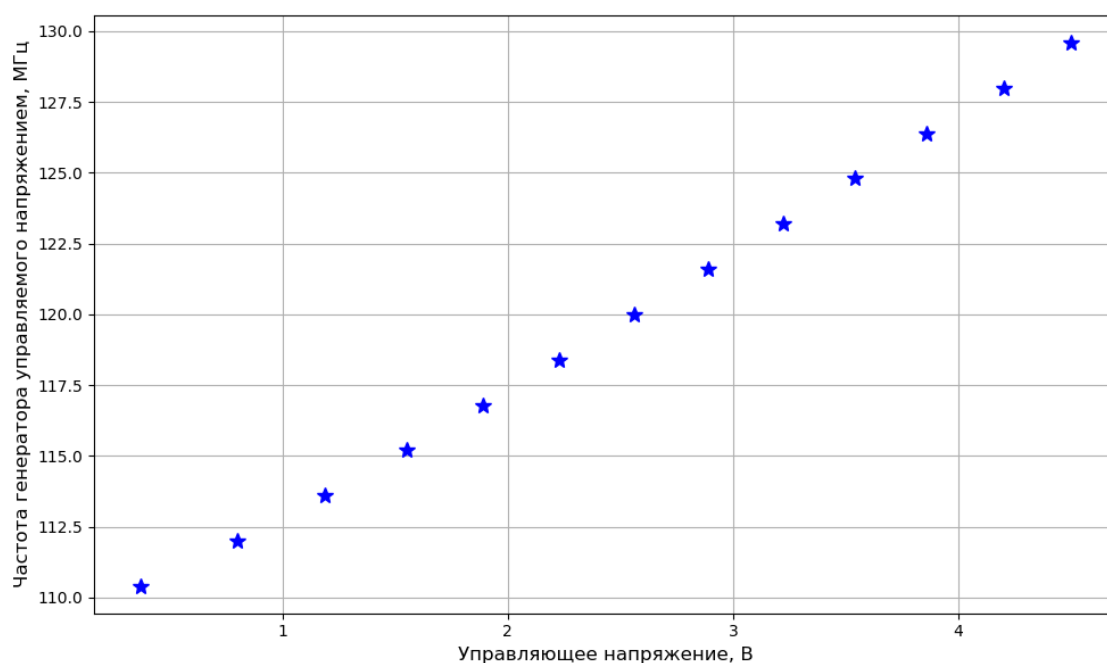


Рисунок 3 – Зависимость частоты генератора от управляющего напряжения

3. Заполнение таблицы № 6.

Таблица 6 – Величины, определяющие поведение кольца ФАПЧ

$K_{ФД}, \frac{В}{рад}$	$K_{ГУН}, \frac{МГц}{В}$	$T_{ФАПЧ}, мкс$
1.59	3.9	0.41

4. Оценка величины γ для конфигураций кольца ФАПЧ и сравнение с теоретическими значениями.

Таблица 3 – Рассчитанное и теоретическое значение γ

Номер переключателя	Рассчитанное значение γ	Теоретическое значение γ
4	0.24	0.65
6	0.36	0.38

5. Построение временных зависимостей переходных процессов $E_{\text{ФД}}(t)$, $E_{\text{упр}}(t)$

а) Измеренные:

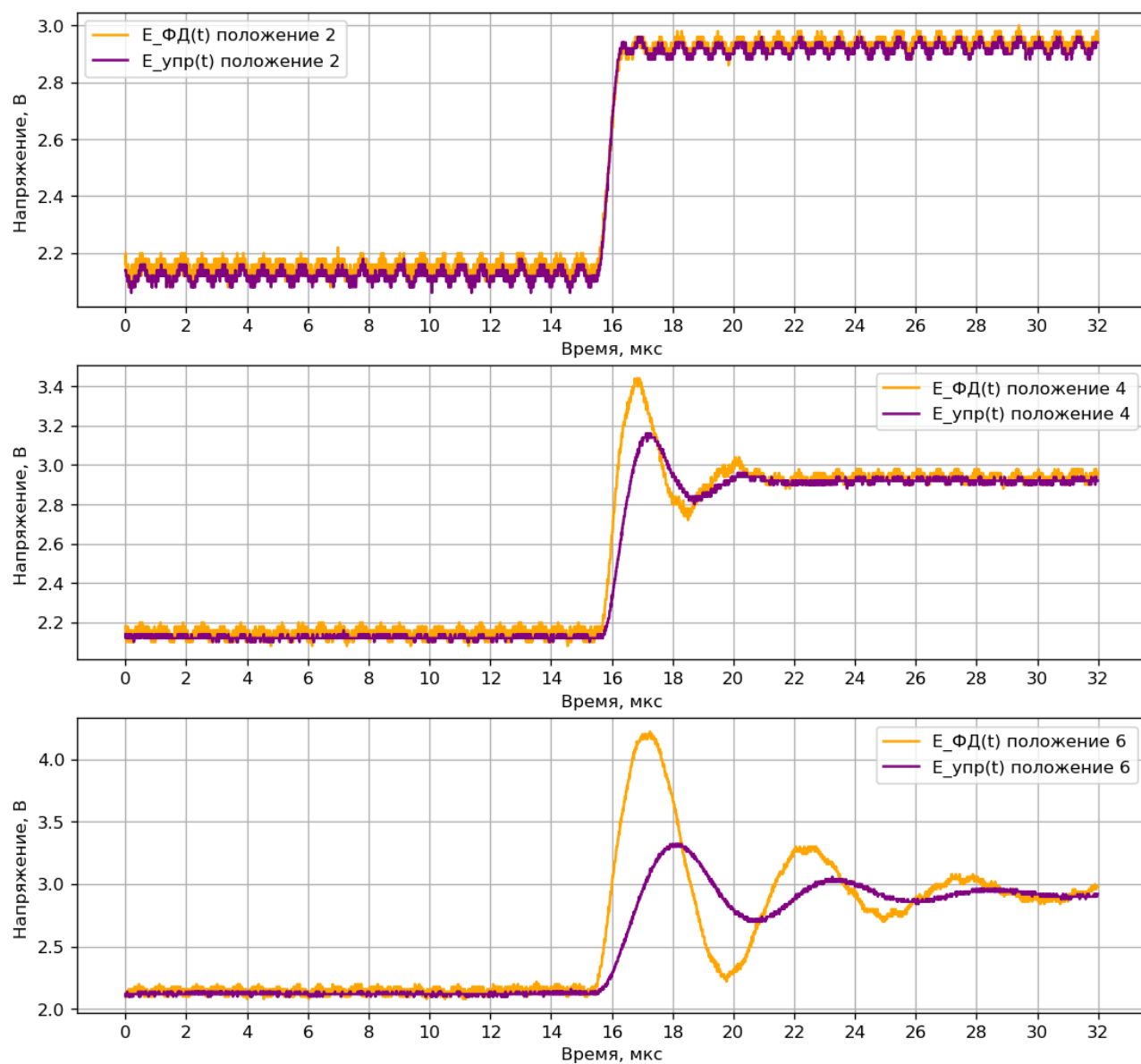


Рисунок 4 – Осциллограммы $E_{\text{ФД}}(t)$ и $E_{\text{упр}}(t)$ для переходных процессов по частоте при разном положении переключателя

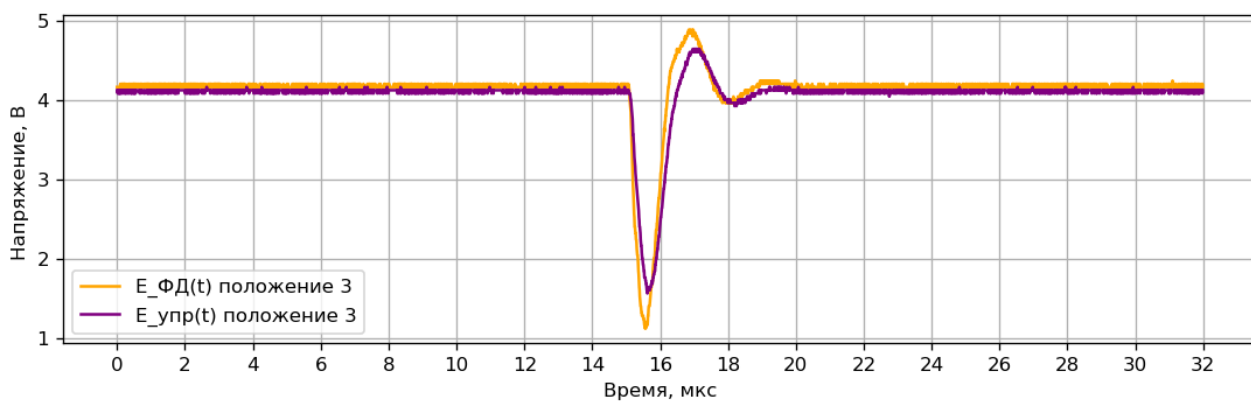


Рисунок 5 – Осциллограммы $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$ для переходных процессов по фазе при разном положении переключателя

б) Рассчитанные по дифференциальным уравнениям и данным в таблицах 2 и 6:

$$T_{\text{ФАПЧ}} = 0.41 \text{ мкс}$$

Таблица 4 – номиналы элементов RC фильтра

Номер положения переключателя	$R_2, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$R_1, \text{Ом}$	$\tau_{\text{фнч}}, \text{мкс}$
2	0	270	300	0.081
4	0	2200	300	0.66
6	0	6800	300	2.04
3	0	1000	300	0.3

$$\tau_2 = \frac{0.081 \text{ мкс}}{0.41 \text{ мкс}} = 0.198$$

$$\tau_4 = \frac{0.66 \text{ мкс}}{0.41 \text{ мкс}} = 1.6$$

$$\tau_6 = \frac{2.04 \text{ мкс}}{0.41 \text{ мкс}} = 5$$

$$\tau_3 = \frac{0.3 \text{ мкс}}{0.41 \text{ мкс}} = 0.73$$

Предположу, что $\varphi'(0) = 0.41 \text{ мкс} * 2 * \pi * \text{девиация}$, девиация = 735 кГц

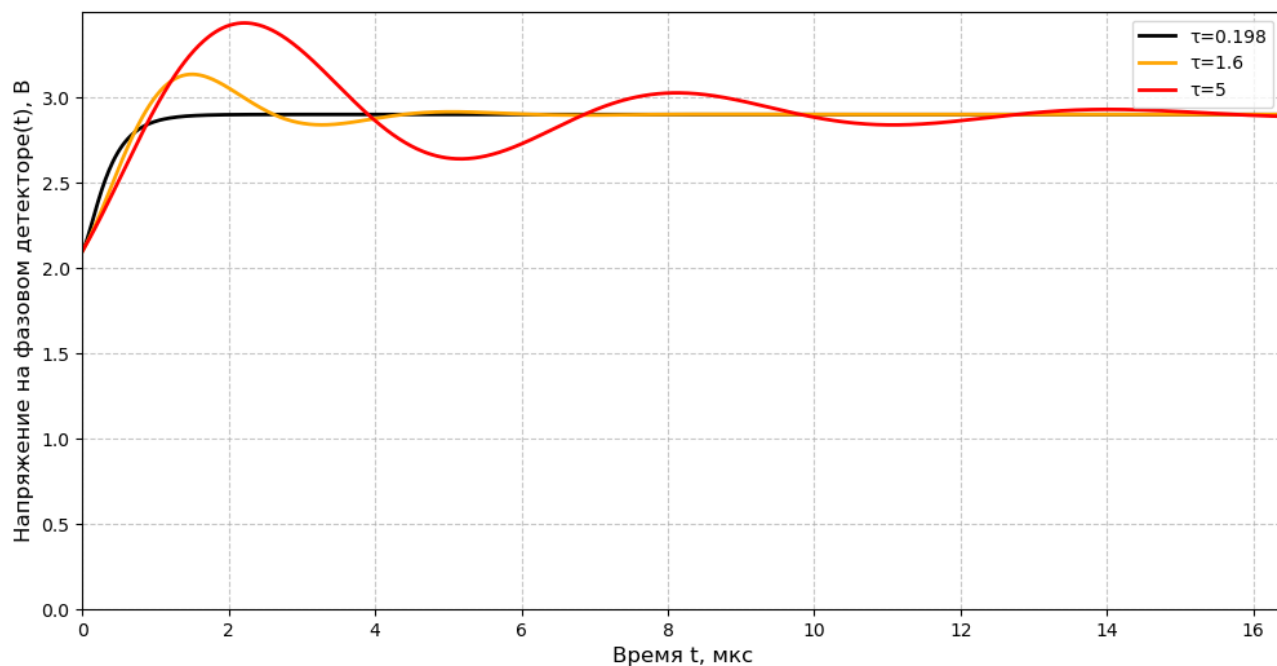


Рисунок 6 – Временные зависимости переходных процессов по частоте с учётом данных из таблиц

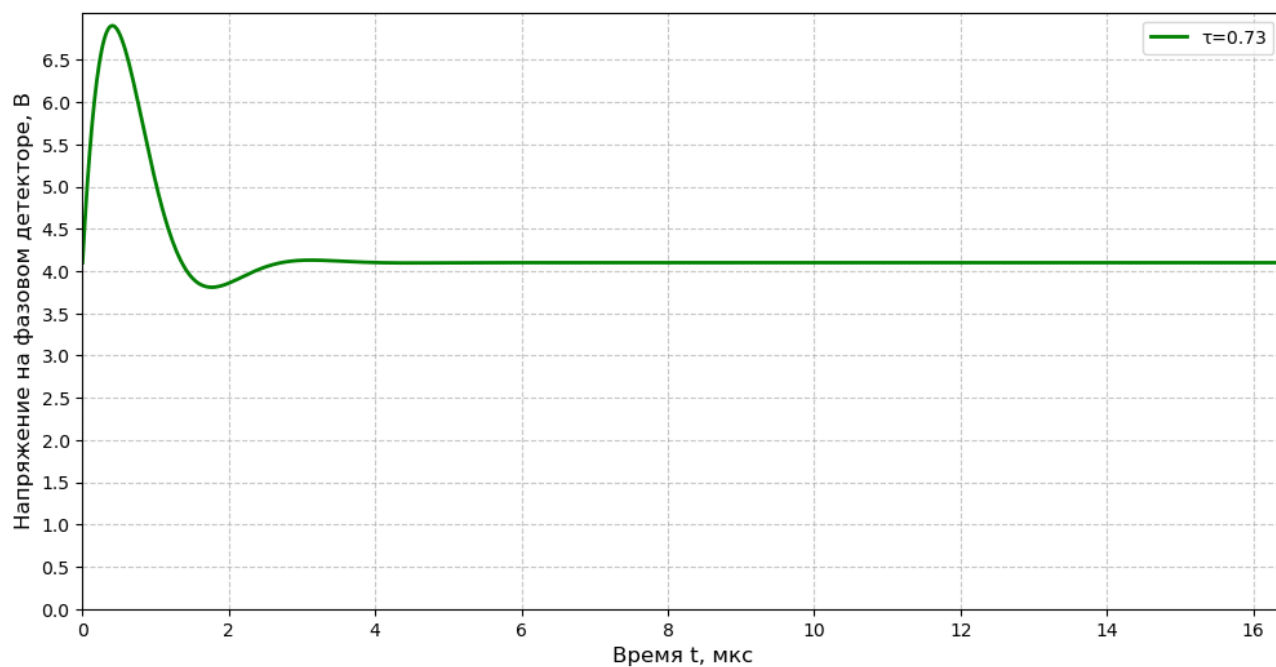


Рисунок 7 – Временная зависимость переходного процесса по фазе с учётом данных из таблиц

6. Вывод

- Полученные графики решения дифференциальных уравнений переходных процессов по фазе и частоте по форме похожи на экспериментальные, но есть ощутимые расхождения, потому что математическая модель не учитывает всех влияющих факторов.
- Экспериментальное значение γ не всегда совпадает с теоретическим.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пункт 3. Заполнение таблицы № 4.

$$K_{\Phi Д} = \frac{E_{\Pi}}{\pi} = \frac{5}{\pi} = 1.59 \frac{\text{В}}{\text{рад}}$$

$$K_{\text{гун}} = \frac{(121 - 118.4) \cdot 10^6}{0.66} = 3.9 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$$

Так как $P = 16$, то:

$$T_{\text{ФАПЧ}} = \frac{16}{2\pi \cdot 3.9 \cdot 10^6 \cdot 1.59} = 0.41 \text{ мкс}$$

Таблица 3 – Характеристика управления частотой ГУН

Параметр	Значения												
$f_{\text{оп}}, \text{МГц}$	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1
$f_{\text{ГУН}}, \text{МГц}$	110.4	112	113.6	115.2	116.8	118.4	120	121.6	123.2	124.8	126.4	128	129.6
$E_{\text{упр}}, \text{В}$	0.37	0.8	1.19	1.55	1.89	2.23	2.56	2.89	3.22	3.54	3.86	4.2	4.5

