

—Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГИТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра формирования и обработки сигналов

Отчет по лабораторной работе № 1
«Фазовая автоподстройка частоты»

Дисциплина:
Формирование радиосигналов

Студент: Резепов Д.С.
Группа: Эрэ-18-21
Преподаватель: Плутешко А.В.

Москва 2025

Задание для подготовки к работе в лаборатории:

Таблица 3: Исходные данные для расчёта кольца ФАПЧ

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

При выполнении задания использовать уравнения из раздела 1, в первую очередь (11) и (10).

Таблица 4: Постоянные времени ФНЧ T_i

i	T_i , мкс
1	0,5
2	0,6
3	0,7
4	2,0

1. Построить переходные процессы $E_{\text{ФД}}(t)$ при скачке опорной частоты на +375 кГц из стационарного режима с $\varphi^+ = \frac{\pi}{8}$ (задача, аналогичная решённой на рисунке 6):

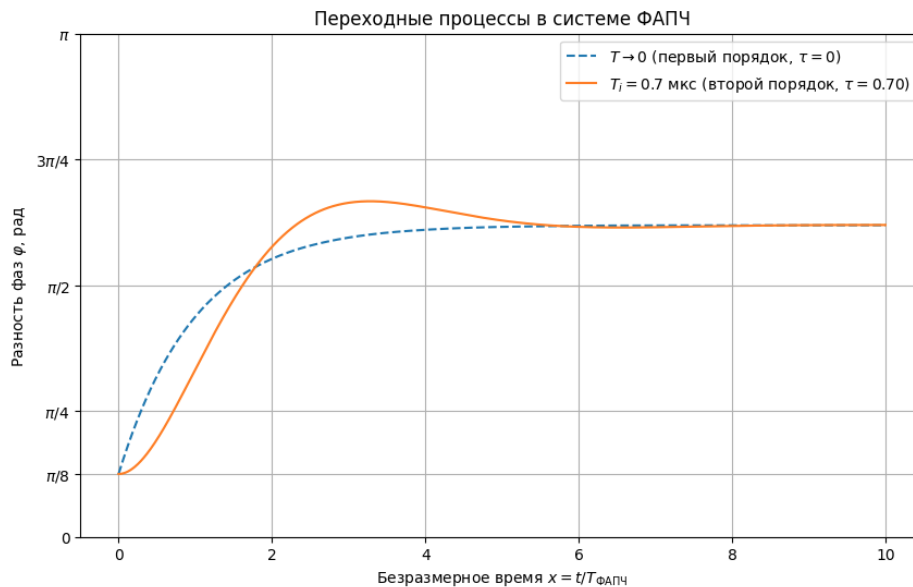
- для $T \rightarrow 0$;
- для любого T_i , $i = 1...3$ (выбирается студентами так, чтобы у собригадников T_i не совпадали).

$i = 3; T_i = 0.7$

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

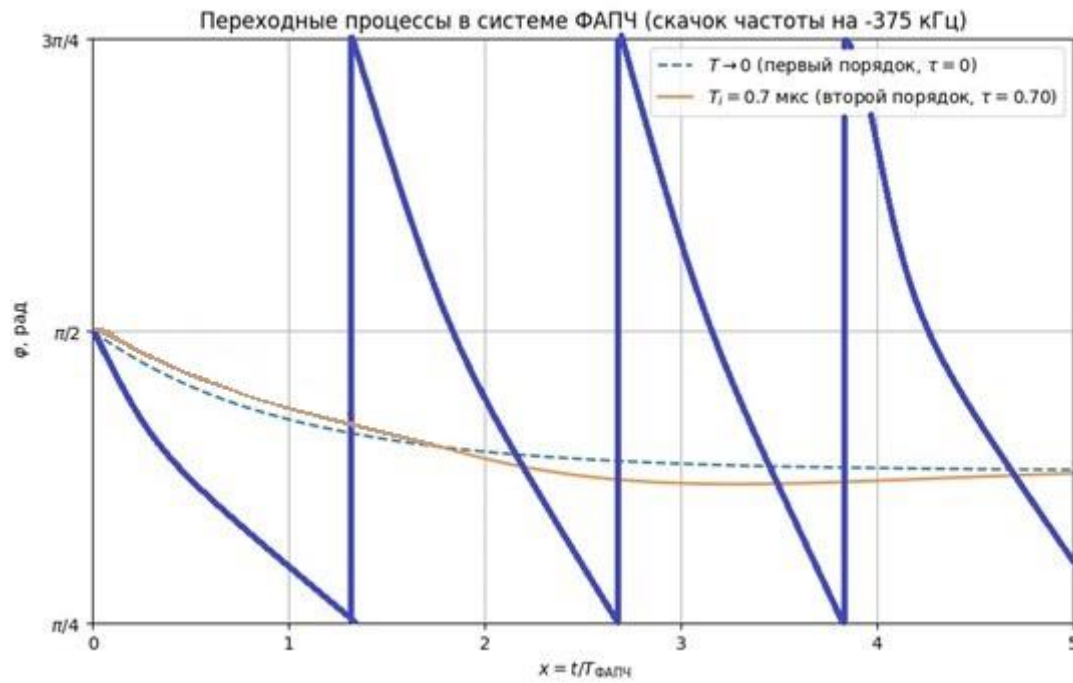
где $\tau = \frac{T}{T_{\text{ФАПЧ}}}$, $\Delta = T_{\text{ФАПЧ}} (\omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{ГУН0}})$, а (9) переходит в

$$\tau \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta, \quad \varphi > 0.$$



2. Построить переходные процессы $E_{\text{ФД}}(t)$ при скачке опорной частоты на -375 кГц из стационарного режима с $\varphi^+ = \frac{\pi}{2}$:

- для $T \rightarrow 0$;
- для любого T_i , $i = 1 \dots 3$ (выбирается студентами так, чтобы у собригадников T_i не совпадали);
- для T_4 .

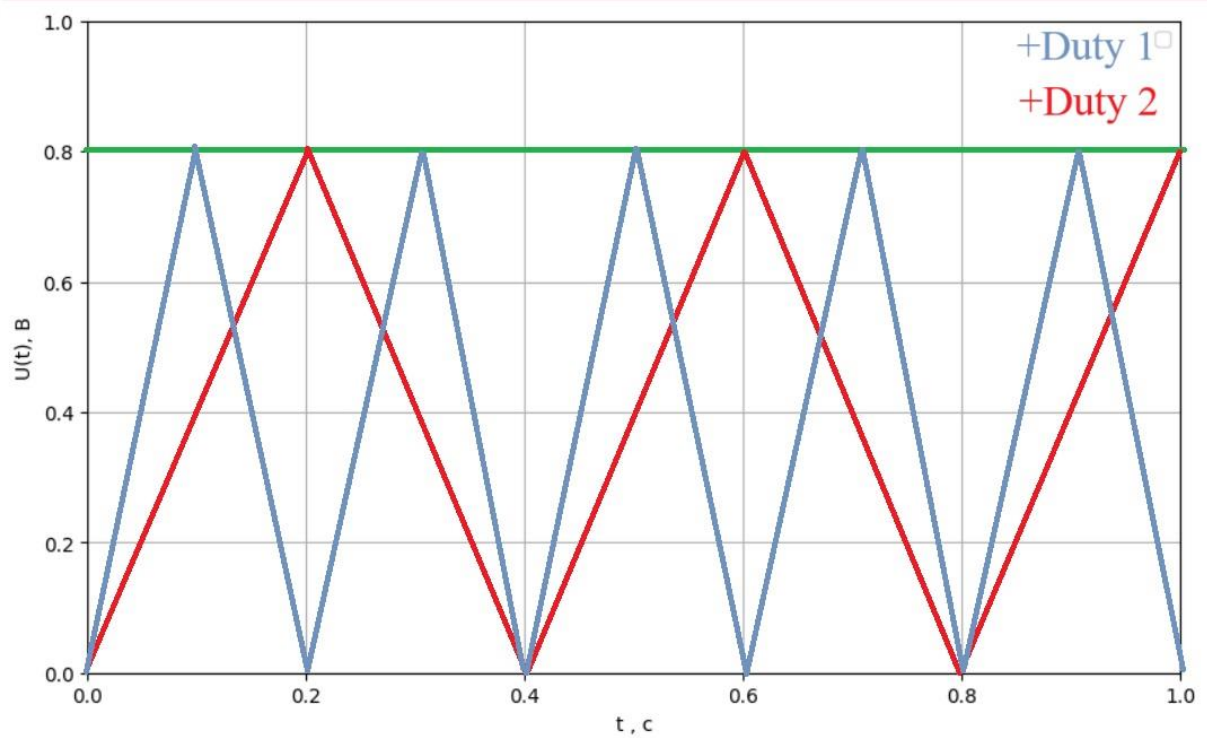


3. Изобразите осциллограммы, которые должны наблюдаться при выполнении п. 5.2.

Как они изменятся, если при внешнем параметре шаг в 2 раза не изменять величину Duty2, которая является величиной, обратной скважности?

Рассуждение:

- Например, если Duty2 = 50%, то скважность равна 2.
- Формула определения Duty2: $\text{Duty2} = \frac{t_{\text{имп}}}{T} \times 100\%$ где $t_{\text{имп}}$ — длительность импульса, а T — период.
- При Duty2 = 50% форма сигнала будет симметричной.
- Если T увеличивается в 2 раза, но Duty2 сохраняется, длительность импульса также увеличится в 2 раза.
- График представлен в виде треугольного сигнала, показывающего изменение напряжения во времени.



+Duty1 > +Duty2

4. Изобразите осциллограммы, которые должны наблюдаться при выполнении п. 5.4.

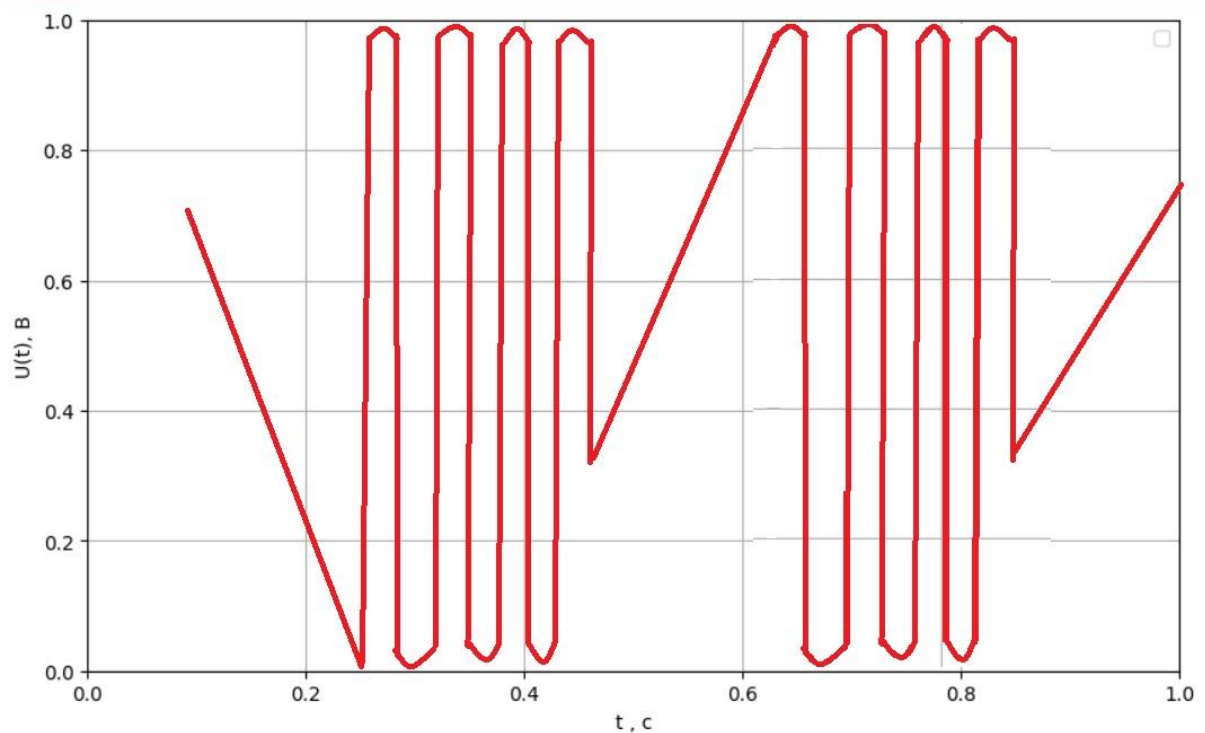
Исходные данные:

- $R_1 = 300 \text{ Ом}$
- Полосы частот:
 1. $R_1 \cdot C_2 = 300 \cdot 2.200 \times 10^{-12} = 660 \text{ нс} \rightarrow f \approx 340.6 \text{ кГц}$
 2. $R_1 \cdot C_6 = 300 \cdot 8600 \times 10^{-12} = 2.04 \text{ мкс} \rightarrow f \approx 148 \text{ кГц}$

Система ФАПЧ (Фазовая Автоматическая Подстройка Частоты) при воздействии шумов повторит форму сигнала. Значение полосы задержки определяется выражением: $\gamma = \frac{f_{\text{зад}}}{f_{\text{полн}}}$

Анализ зависимости γ от t :

- При уменьшении значения t видно, что f увеличивается.
- Следовательно, по отношению $f_{\text{зад}}$ к $f_{\text{полн}}$ начальная ширина уменьшается, что оставляет зону стабильной.
- Высшие гармоники становятся более выраженными.



ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ

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.

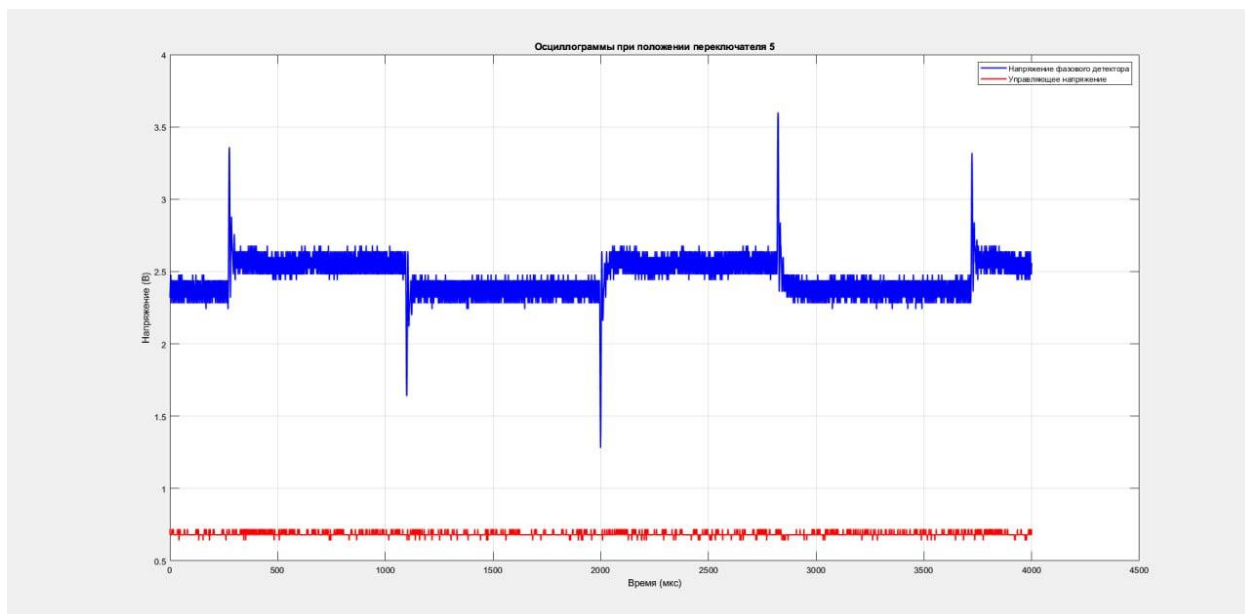


Рисунок 1 – Осциллограмма $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$ при положении переключателя 5

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУН

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

$f_{оп},$ МГц	6.8 min	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6
$f_{гун},$ МГц	6.4	6.5	6.59	6.7	6.8	6.87	6.96	7.06	7.15
$E_{упр}, В$	0.363	0.805	1.21	1.58	1.94	2.28	2.614	2.94	3.26

$f_{оп},$ МГц	7.7	7.8	7.9	8	8.1 max
$f_{гун},$ МГц	7.25	7.34	7.44	7.53	7.62
$E_{упр}, В$	3.57	3.87	4.15	4.45	4.74

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОСЫ ЗАХВАТА

Рассчитаем крутизну характеристики управления частотой:

$$K_{\text{ГУН}} = \frac{f_{\text{оп}} \cdot 16 - f_{\text{оп}} \cdot 16}{E_{\text{упр2}} - E_{\text{упр1}}} = \frac{7.4 \cdot 16 - 7.3 \cdot 16}{2.614 - 2.28} = 4.79 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$$

Меняя положение переключателя в поле RC-ФИЛЬТР, ознакомимся с изменением формы осциллограммы $E_{\text{ФД}}(t)$ при изменении постоянной времени фильтра.

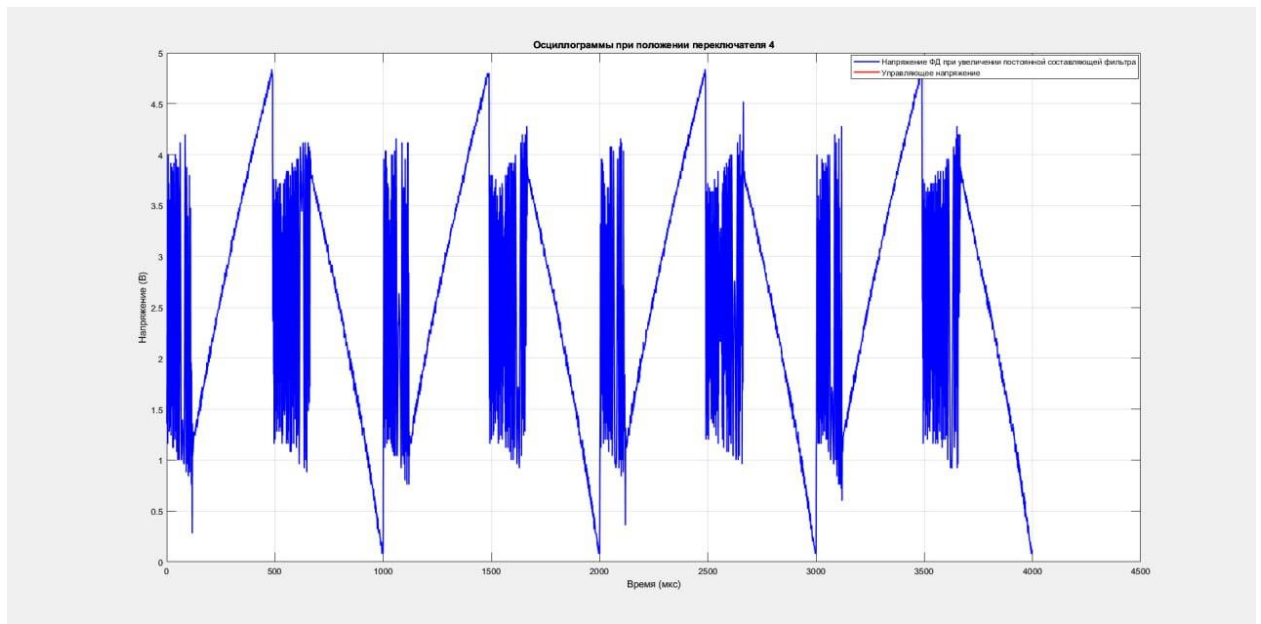


Рисунок 2 – Осциллограмма $E_{\text{ФД}}(t)$ при положении переключателя 4

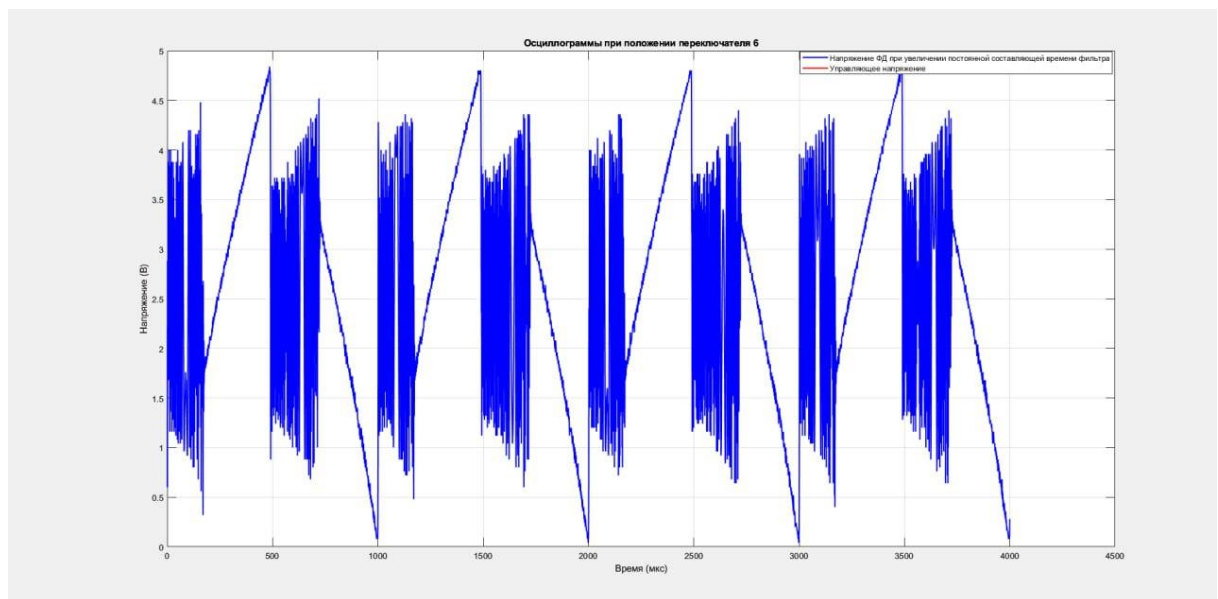


Рисунок 3 – Осциллограмма $E_{\text{ФД}}(t)$ при положении переключателя 6

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ЧАСТОТЕ

Настроим ЧМ модуляцию. Форма модуляции – меандр. Частота модуляции 5 кГц.

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

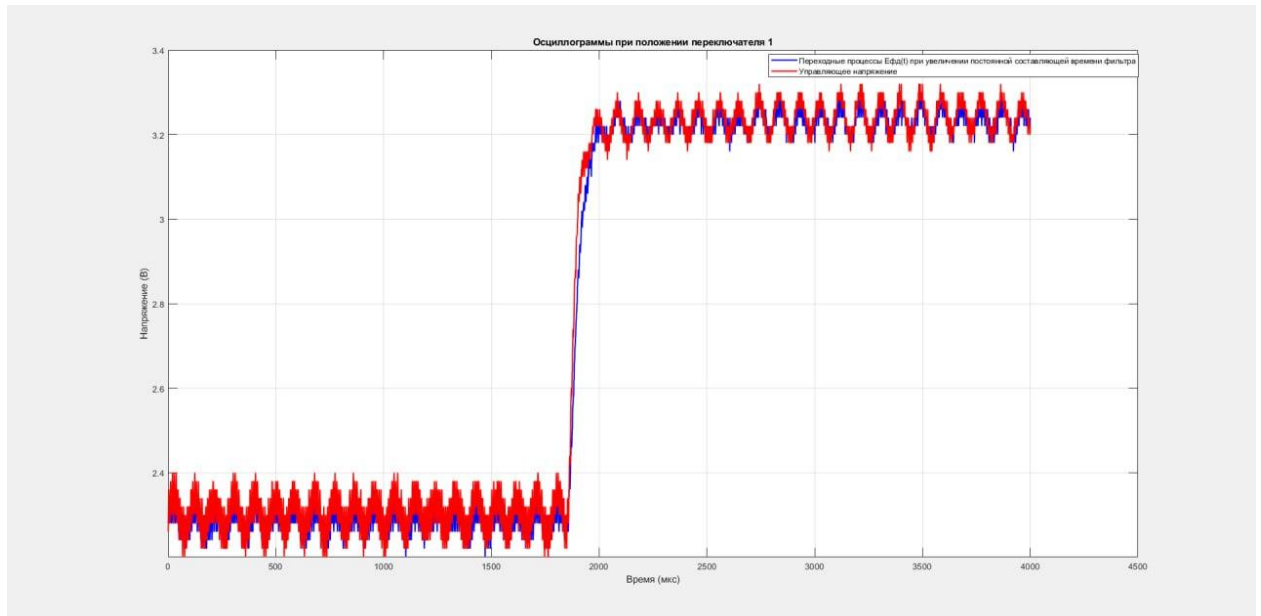


Рисунок 4 – Осциллограмма $E_{\text{ФД}}(t)$ и $E_{\text{упр}}(t)$ при положении переключателя 1

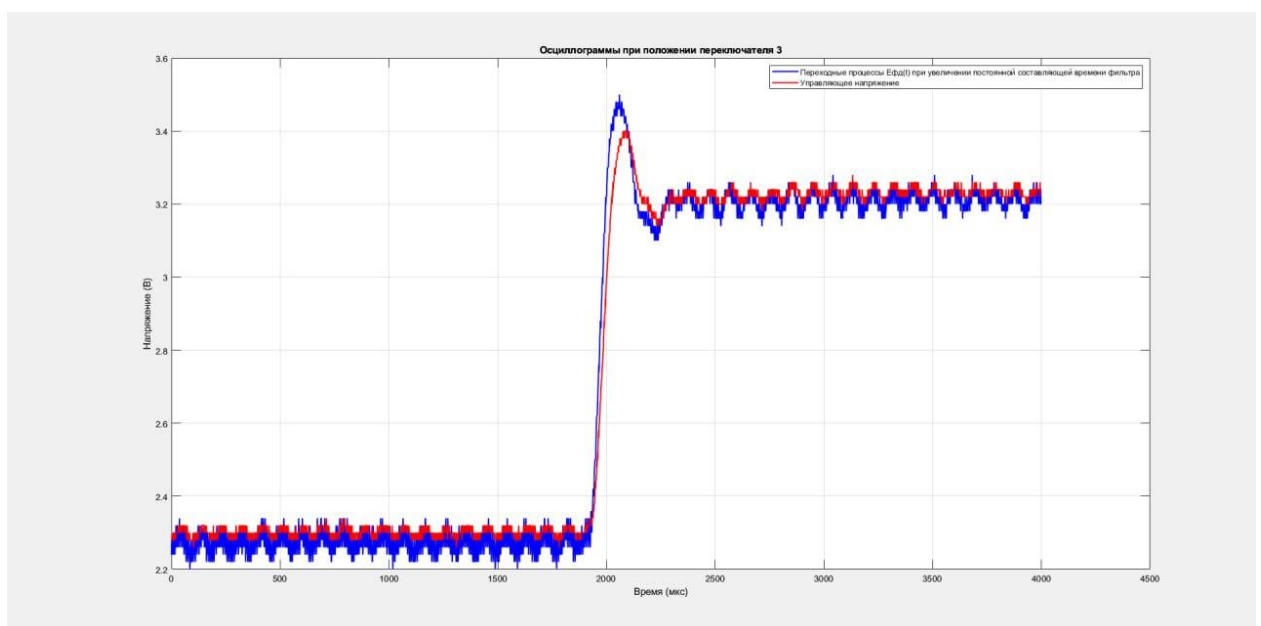


Рисунок 5 – Осциллограмма $E_{\text{ФД}}(t)$ и $E_{\text{упр}}(t)$ при положении переключателя 3

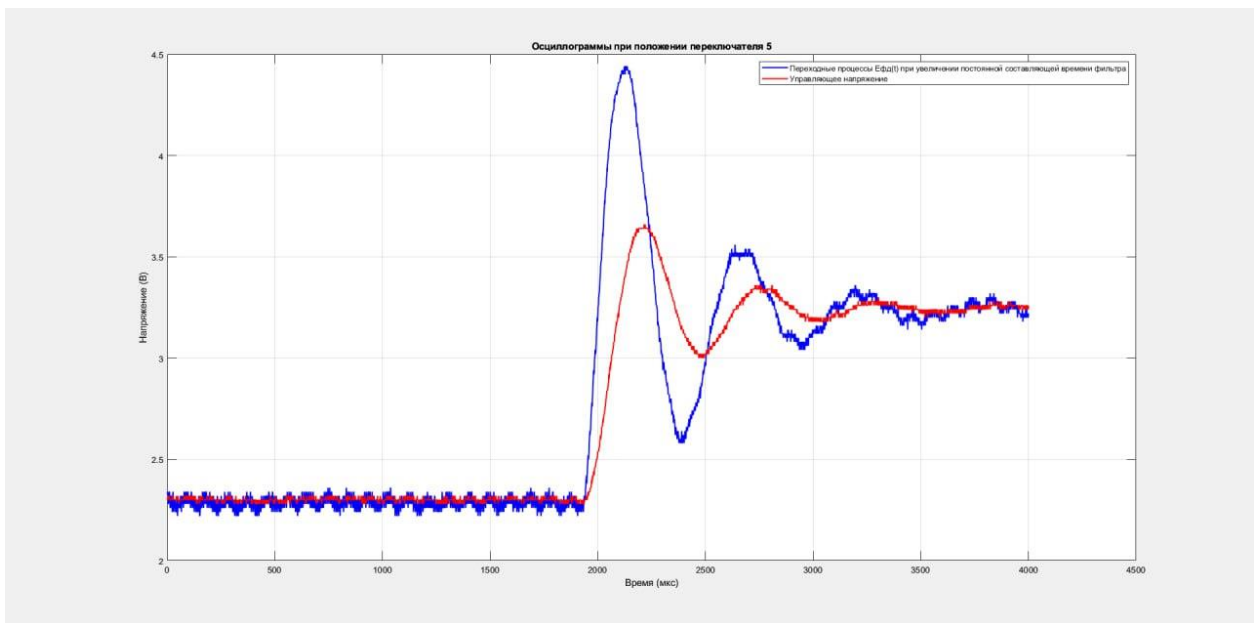


Рисунок 6 – Осциллограмма $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$ при положении переключателя 5

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.

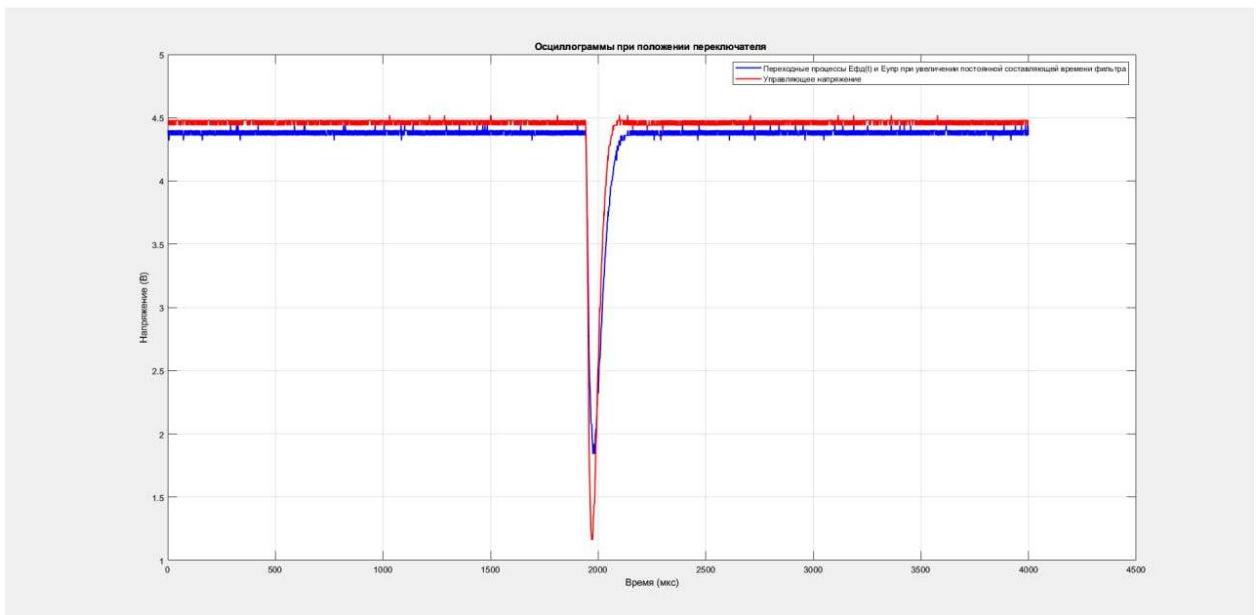


Рисунок 7 – Осциллограмма $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$ при положении переключателя 1

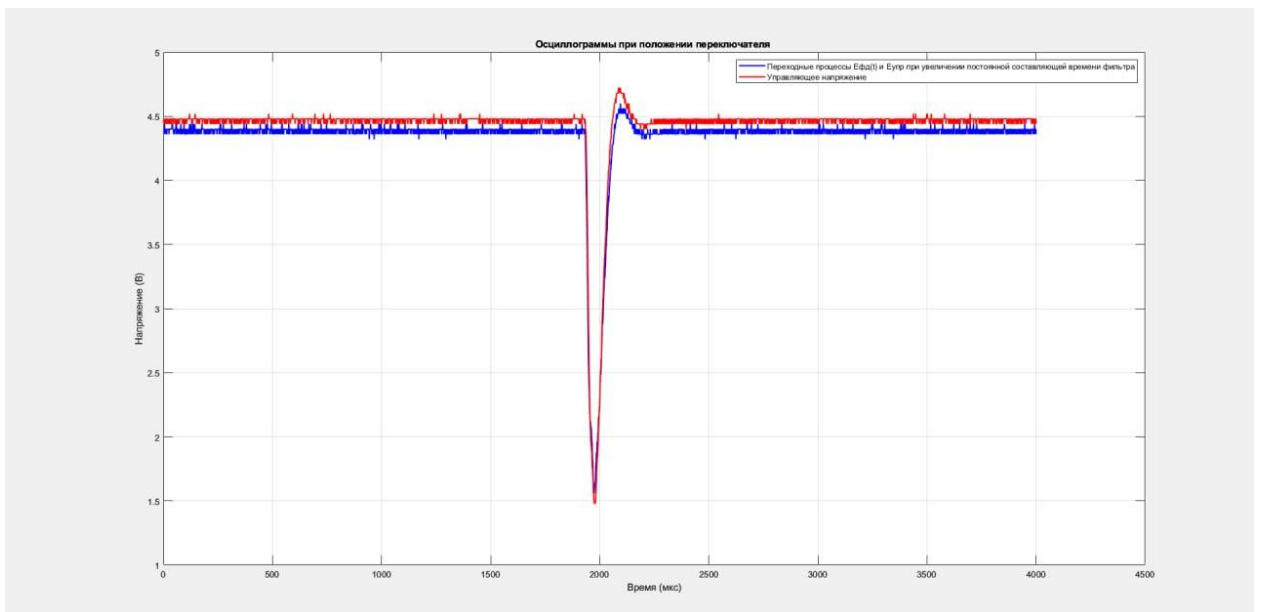


Рисунок 8 – Осциллограмма $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$ при положении переключателя

3

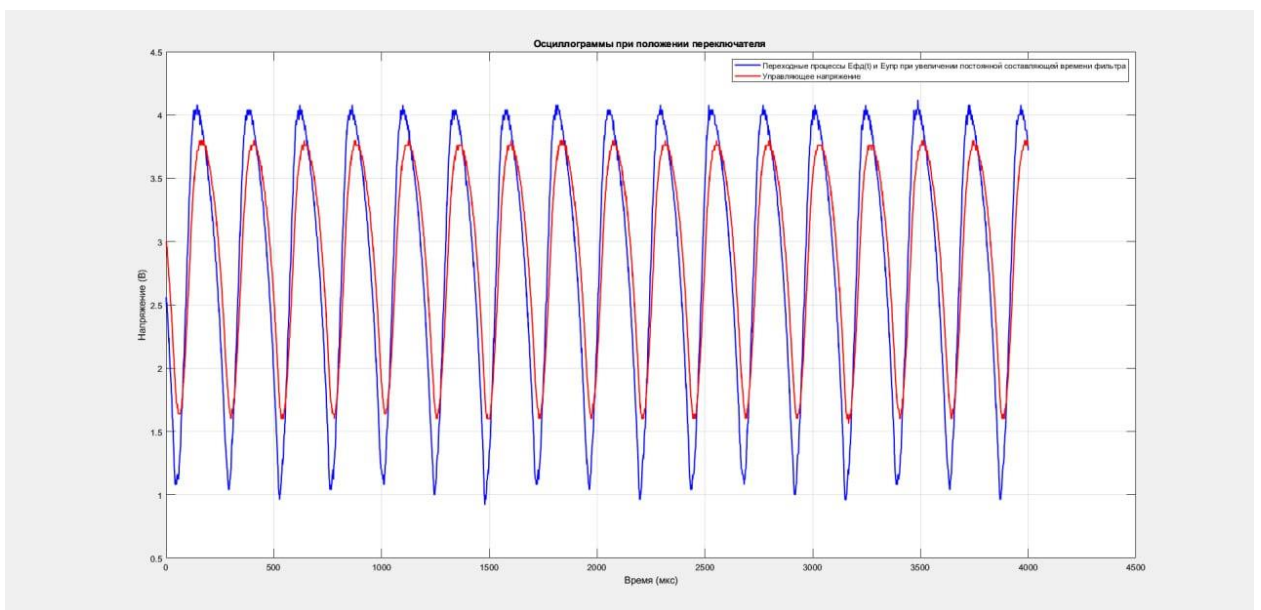


Рисунок 9 – Осциллограмма $E_{ФД}(t)$ и $E_{упр}(t)$

Обработка результатов измерений:

$$K_{\text{ГУН}} = \frac{f_{\text{оп}} \cdot 16 - f_{\text{оп}} \cdot 16}{E_{\text{упр2}} - E_{\text{упр1}}} = \frac{7.4 \cdot 16 - 7.3 \cdot 16}{2.614 - 2.28} = 4.79 \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$$

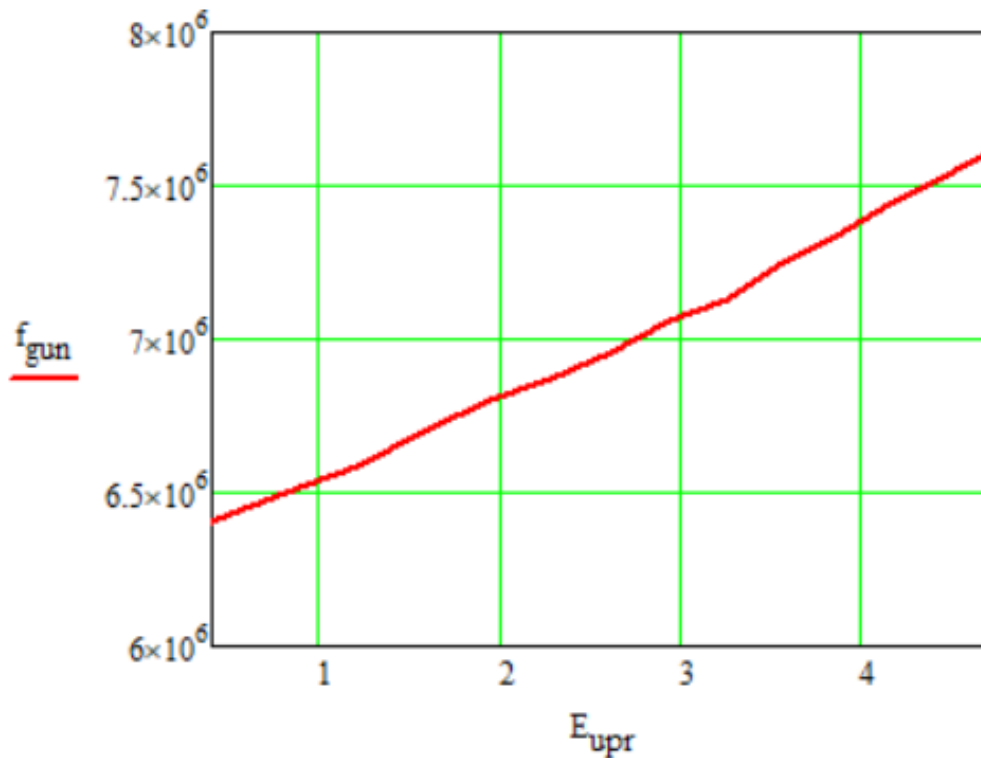


Рисунок 10 – Характеристика управления частотой ГУН $f_{\text{ГУН}}(E_{\text{упр}})$

Значение $K_{\text{ФД}}$ и $T_{\text{ФАПЧ}}$ определим по следующим формулам:

$$K_{\text{ФД}} = \frac{E_{\text{П}}}{\pi} = \frac{4.75}{\pi} = 1.51 \text{ В/рад}$$

$$T_{\text{ФАПЧ}} = \frac{P}{2\pi \cdot K_{\text{ГУН}} \cdot K_{\text{ФД}}} = \frac{16}{2 \cdot \pi \cdot 4.79 \cdot 10^6 \cdot 1.51} = 0.352 \text{ мкс}$$

Пункт №4. Определим величину γ для конфигураций кольца ФАПЧ, использованных в разделе «ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОСЫ ЗАХВАТА», и сравним с теоретическими значениями из графика зависимости нормированной полосы захвата γ от нормированной постоянной времени ФНЧ τ . Результат представим в виде таблицы

i	$R_1, \text{Ом}$	$C_i, \text{пФ}$	$\tau_{\text{фнч}}, \text{мкс}$
4	300	2200	0.66
6	300	6800	2.04

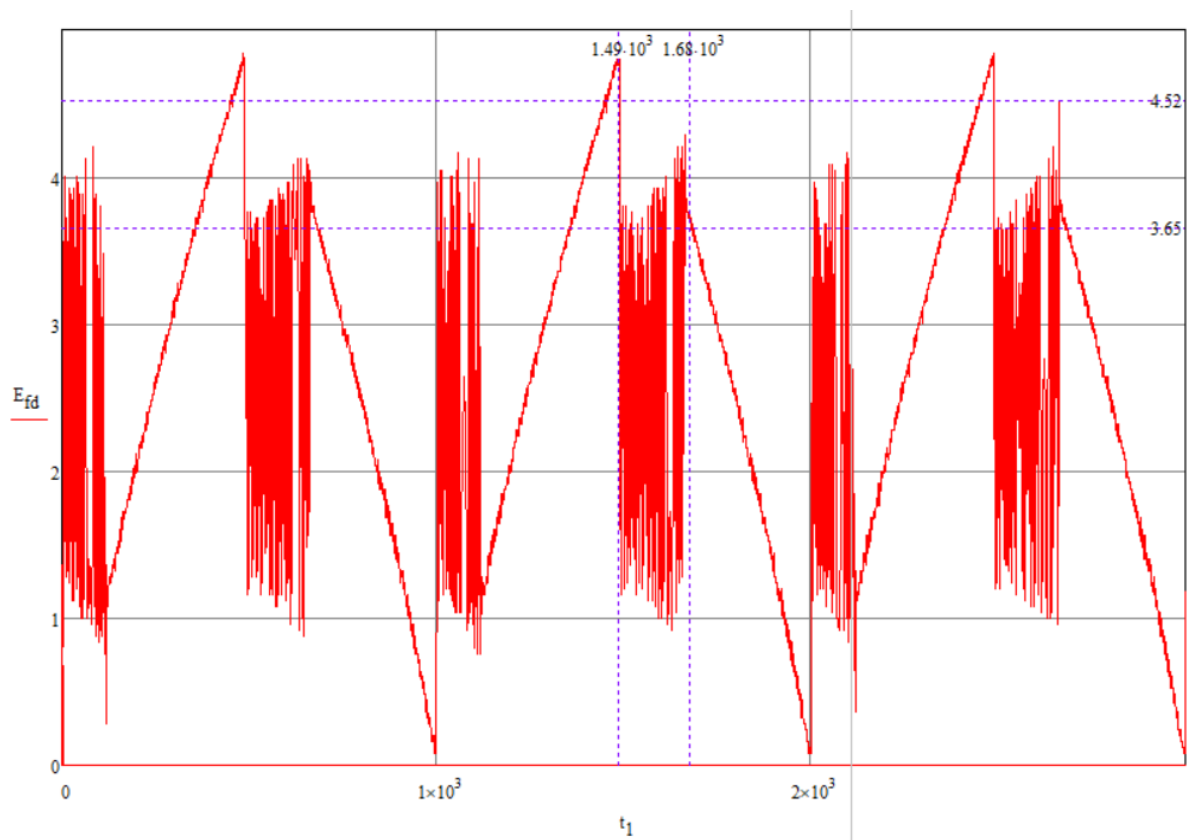


Рисунок 11 – графический расчёт $E_{fd}(t)$ при положении переключателя 4;
 $t = t/10^3 \text{ мс}$ – время на графике.

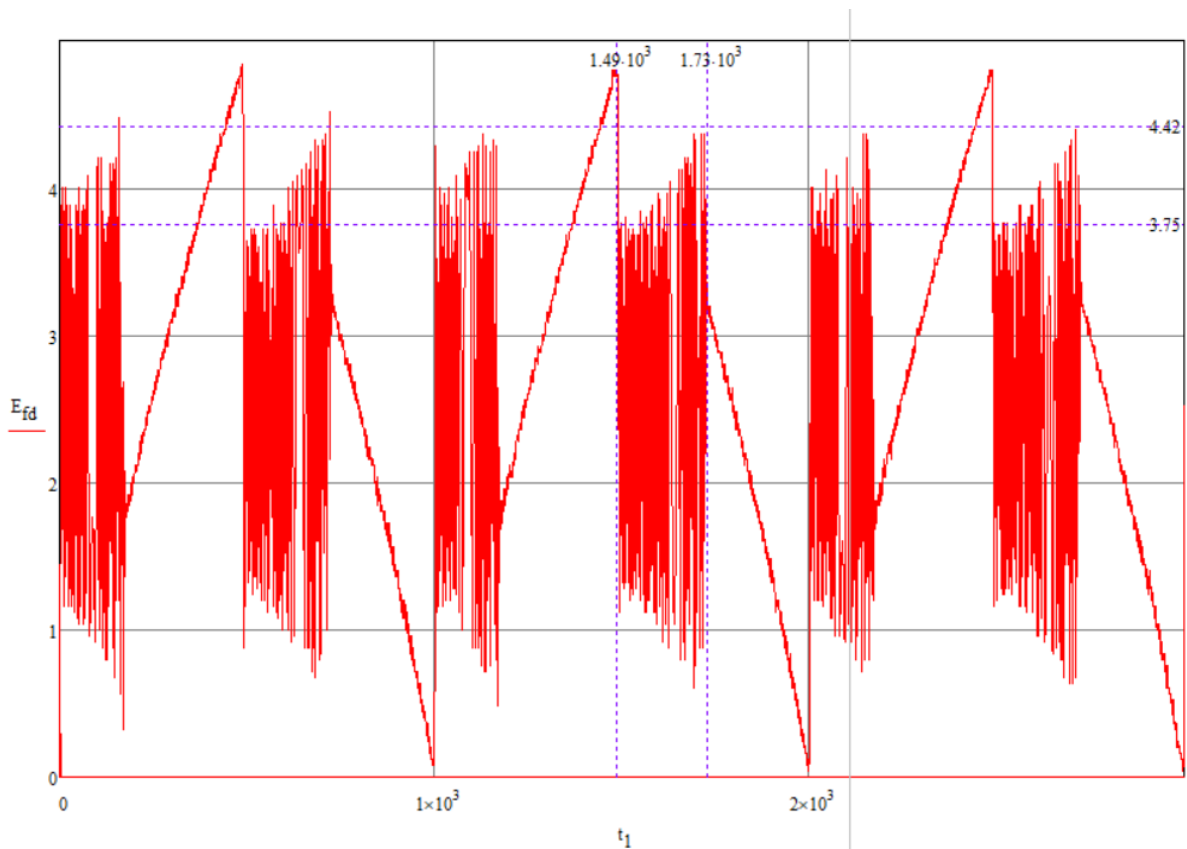


Рисунок 12 – графический расчёт $E_{fd}(t)$ при положении переключателя 6

$t = t/10^3 \text{ мс}$ – время на графике

определим значения полосы захвата и полосы синхронизма для положений переключателей 4 и 6 соответственно:

$$\gamma = \frac{P_{\text{захвата}}}{P_{\text{синхронизма}}} = \frac{0.24}{1} = 0.24$$

$$\gamma = \frac{P_{\text{захвата}}}{P_{\text{синхронизма}}} = \frac{0.19}{1} = 0.19$$

Для определения теоретического значения γ по графику зависимости нормированной полосы захвата γ от нормированной постоянной времени ФНЧ τ , найдём значение τ по следующей формуле для положений 4 и 6 соответственно:

$$\tau_4 = \frac{\tau_{4\text{ФНЧ}}}{T_{\text{фАПЧ}}} = \frac{0.66 \cdot 10^{-6}}{0.352 \cdot 10^{-6}} = 1.875$$

$$\tau_6 = \frac{\tau_{6\text{ФНЧ}}}{T_{\text{фАПЧ}}} = \frac{2.04 \cdot 10^{-6}}{0.352 \cdot 10^{-6}} = 5.795$$

i	Теор. γ	Расчёт γ
4	0.5	0.24
6	0.3	0.19

Вывод: Различия между экспериментальными данными и результатами моделирования могут быть объяснены несколькими факторами. Во-первых, начальные условия, заданные для моделирования, отличались от реальных условий эксперимента. Во-вторых, при построении временных зависимостей переходных процессов на основе дифференциальных уравнений использовалась математическая модель, которая, несмотря на свою точность, не может полностью учесть все нюансы реального физического процесса, наблюдаемого в лабораторных условиях. Кроме того, при обработке экспериментальных данных был учтен делитель частоты в кольце ФАПЧ, равный 16, что также могло повлиять на расхождения.