

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: Выскиль С.М.
Проверил: Плутешко А.В.
Дата: 16.03.2025
Оценка: _____

Москва 2025

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

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

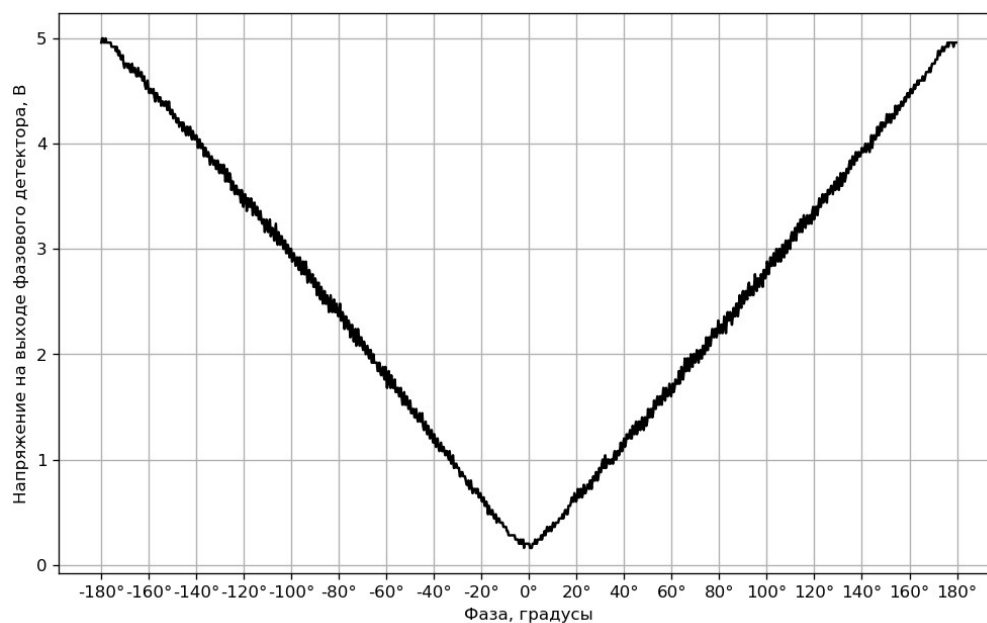


Рисунок 1 – График зависимости напряжения выходе фазового детектора от фазы

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

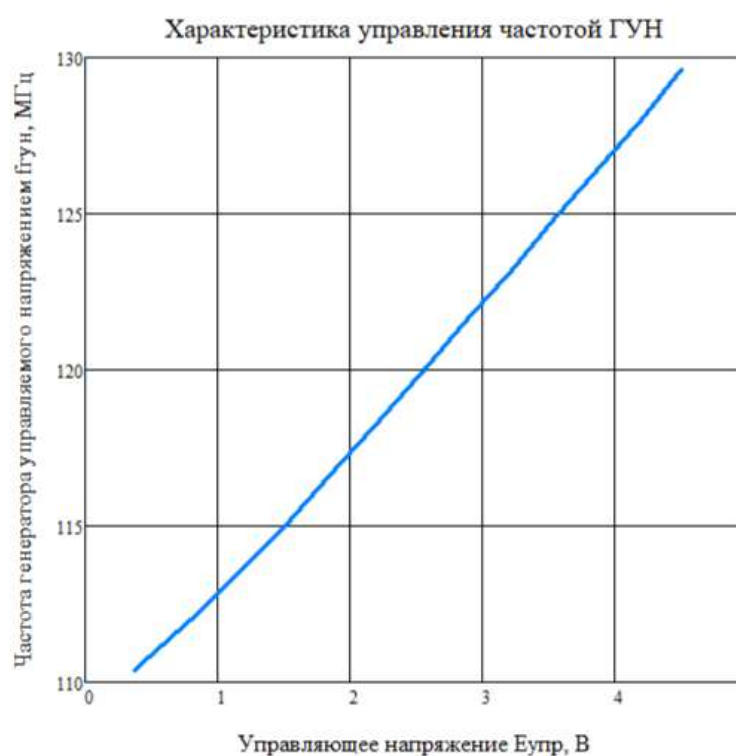


Рисунок 2 – Зависимость частоты генератора от управляющего напряжения

3. Заполнение таблицы № 4.

Таблица 3 – Величины, определяющие поведение кольца ФАПЧ

| $K_{ФД}, \frac{\text{В}}{\text{рад}}$ | $K_{Гун}, \frac{\text{МГц}}{\text{В}}$ | $T_{ФАПЧ}, \text{мкс}$ |
|---------------------------------------|--|------------------------|
| 1.59 | 3.9 | 0.41 |

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

Таблица 4 – Сравнение рассчитанных и теоретических значений γ

| Номер положения переключателя, i | Рассчитанное значение γ | Теоретическое значение γ |
|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 4 | 0.25 | 0.64 |
| 6 | 0.35 | 0.39 |

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

а) Измеренные:

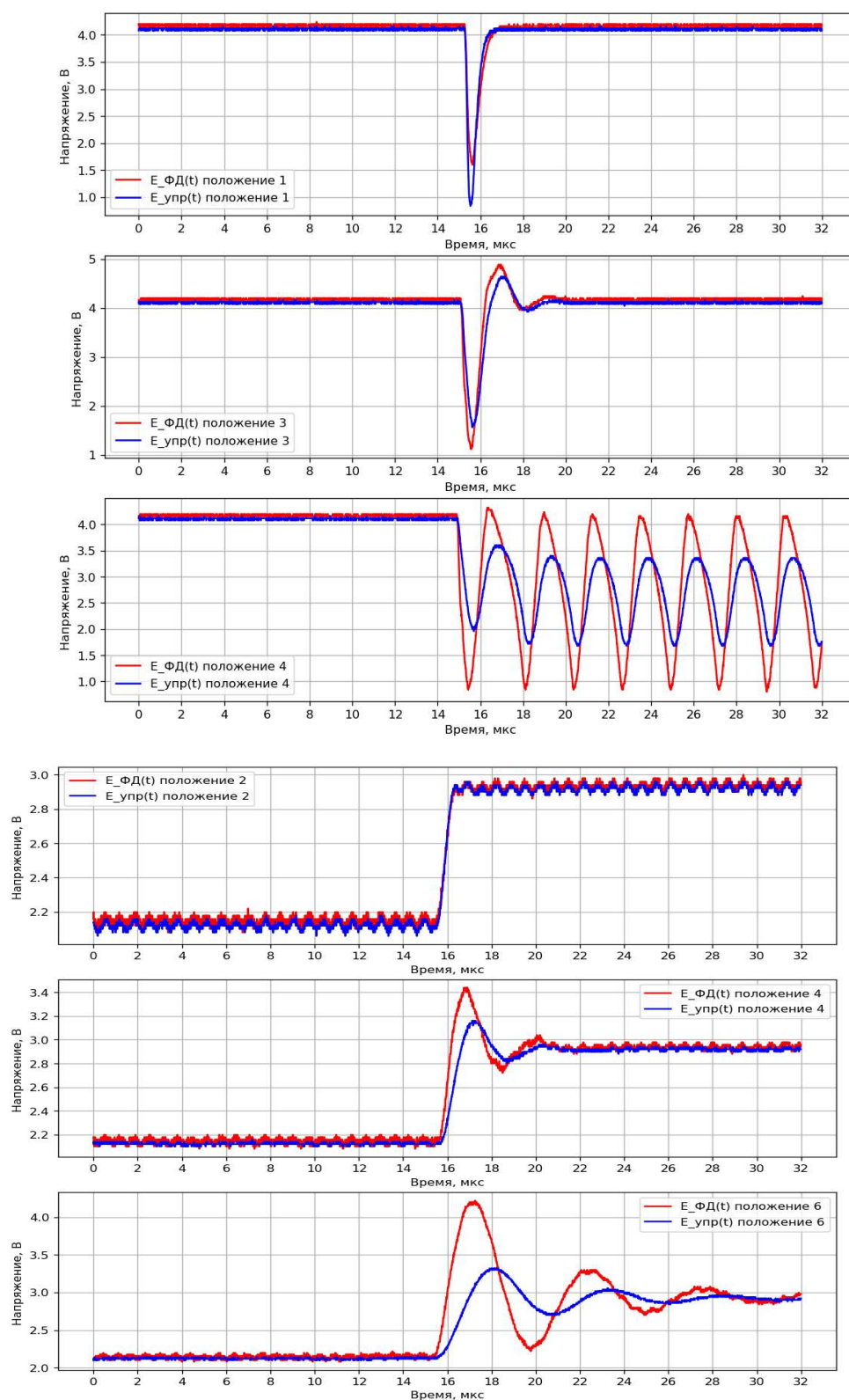


Рисунок 3 – Осциллограммы $E_{\text{ФД}}(t)$ и $E_{\text{упр}}(t)$ для переходных процессов по частоте для п.5.4, 5.5, 5.6.

б) Рассчитанные по дифференциальным уравнениям и данным в таблицах:

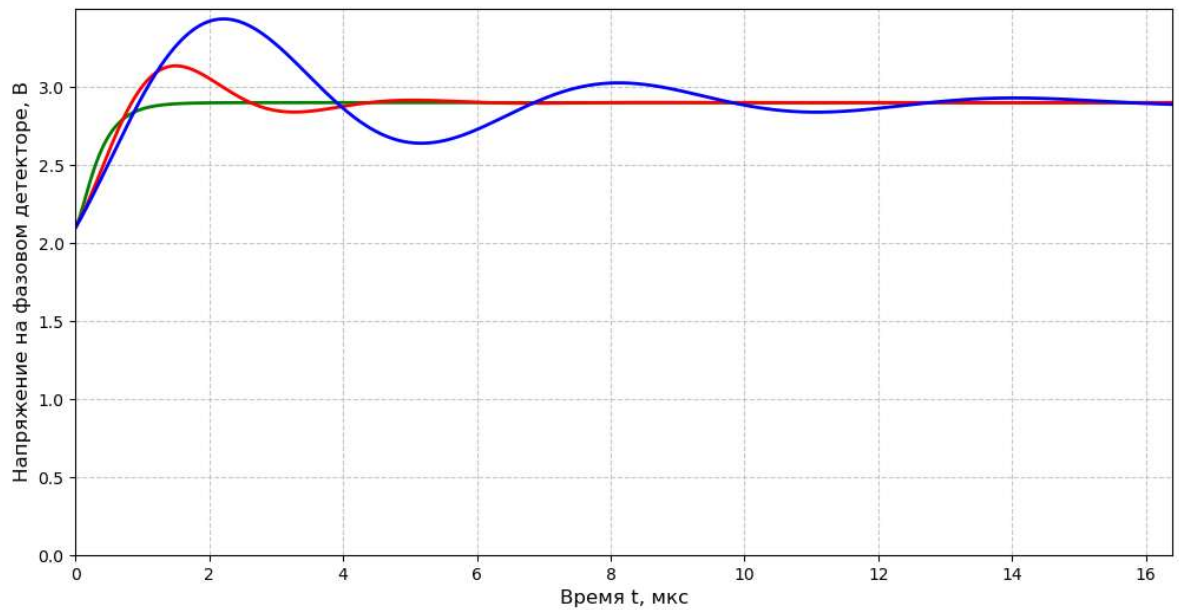


Рисунок 4 – Переходные процессы $E_{\phi}(t)$ для обновлённых условий в дифф. ур-ях
а) $\tau_{ay} = 0.198$ – зеленый; б) $\tau_{ay} = 1.6$ – красный; в) $\tau_{ay} = 5$ – синий.

6. Выводы:

- По теории зависимость частоты $f_{гун}$ от напряжения $E_{унр}$ должна быть линейной, но на деле она имеет некую нелинейность в начале. Её можно списать на ручной съём измерений при помощи мультиметра, путем приложения щупа к контактной площадке.
- При определении расчётного значения коэффициента полосы захвата мы столкнулись с расхождениями с теорией. Для переключателя 6 значения приблизительно похожи, однако для переключателя 4 рассчитанное почти в 3 раза меньше теоретического. Стоит отметить, что теоретические значения тоже нельзя назвать как таковыми в силу того, что они определялись с помощью τ_4 и τ_6 , которые рассчитывались через $T_{фалч}$, а та в свою очередь через $K_{гун}$, а тот был получен в ходе эксперимента.
- Графики, построенные по дифф. уравнениям с обновленными условиями, своим видом напоминают осциллограммы, полученные в ходе эксперимента.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ДОМАШНЯЯ ПОДГОТОВКА:

Задано:

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 |

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

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

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

$$x = \frac{t}{T_{\text{фапч}}}$$

$$T_{\text{фапч}} = \frac{P}{2\pi \cdot K_{\text{гун}} \cdot K_{\text{ФД}}} = (\text{для } P = 1) = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot \frac{5}{\pi}} = 0.5 \text{ мкс}$$

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

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

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

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 $T_2 = 0.6$ мкс

$$\tau = \frac{T_2}{T_{\text{флпч}}} = \frac{0.6 \text{ мкс}}{0.5 \text{ мкс}} = 1.2$$

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

$$\Rightarrow 1.2 \frac{d^2}{dx^2} \varphi + \frac{d}{dx} \varphi + \varphi = \frac{7\pi}{8}$$

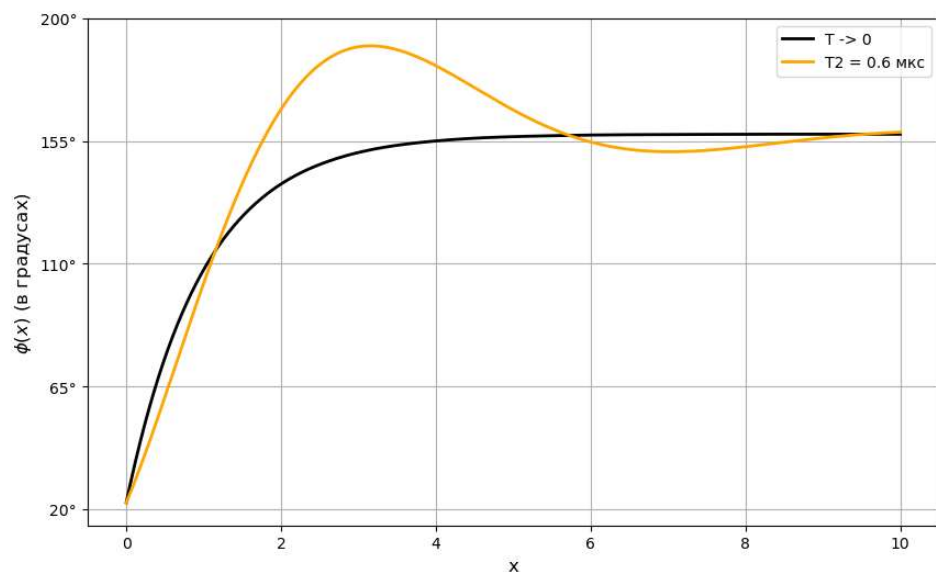


Рисунок 5 – Переходные процессы $E_{\phi}(t)$ при скачке на +375 кГц

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

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

$$T_{\text{флпч}} = \frac{P}{2\pi K_{\text{гун}} K_{\text{ФД}}} = 0.5 \text{ мкс (см. пункт 1)}$$

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

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

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

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 $T_2 = 0.6$ мкс

$$\tau = \frac{T_2}{T_{\text{ф апч}}} = \frac{0.6 \text{ мкс}}{0.5 \text{ мкс}} = 1.4$$

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

$$\Rightarrow 1.2 \frac{d^2}{dx^2}\varphi + \frac{d}{dx}\varphi + \varphi = \frac{\pi}{8}$$

Уравнение переходного процесса при $T_4 = 2.0$ мкс

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

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

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

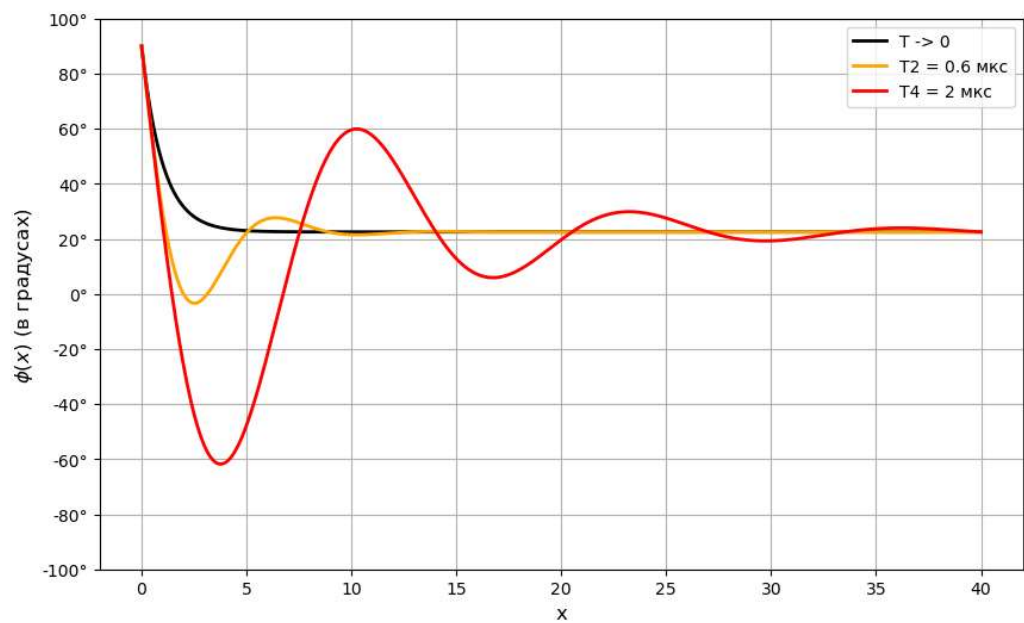
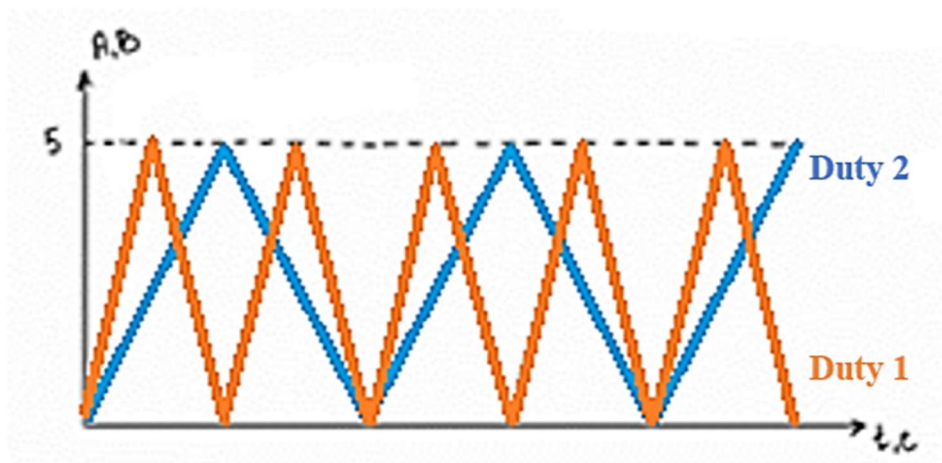
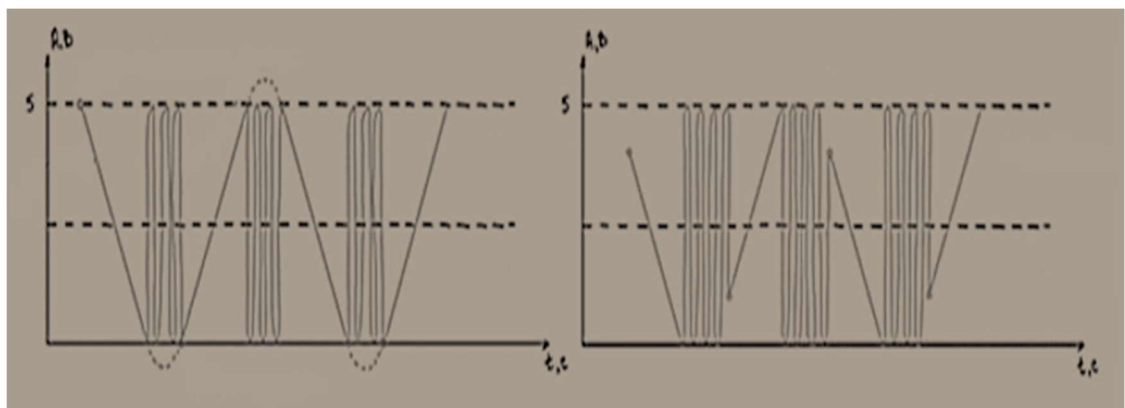


Рисунок 6 – Переходные процессы $E_{\phi\theta}(t)$ при скачке на -375 кГц

Пункт 3. Ожидаемые осциллограммы в п. 5.2



Пункт 4. Ожидаемые осциллограммы в п. 5.4



К обработке результатов:

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 |

Пункт 4. Заполнение таблицы № 4:

Таблица 6 – Номиналы элементов ФНЧ и рассчитанные значения постоянной времени $\tau_{\text{ФНЧ}}$

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

$$\tau_4 = \frac{0.66}{0.41} = 1.61$$

$$\tau_6 = \frac{2.04}{0.41} = 4.97$$

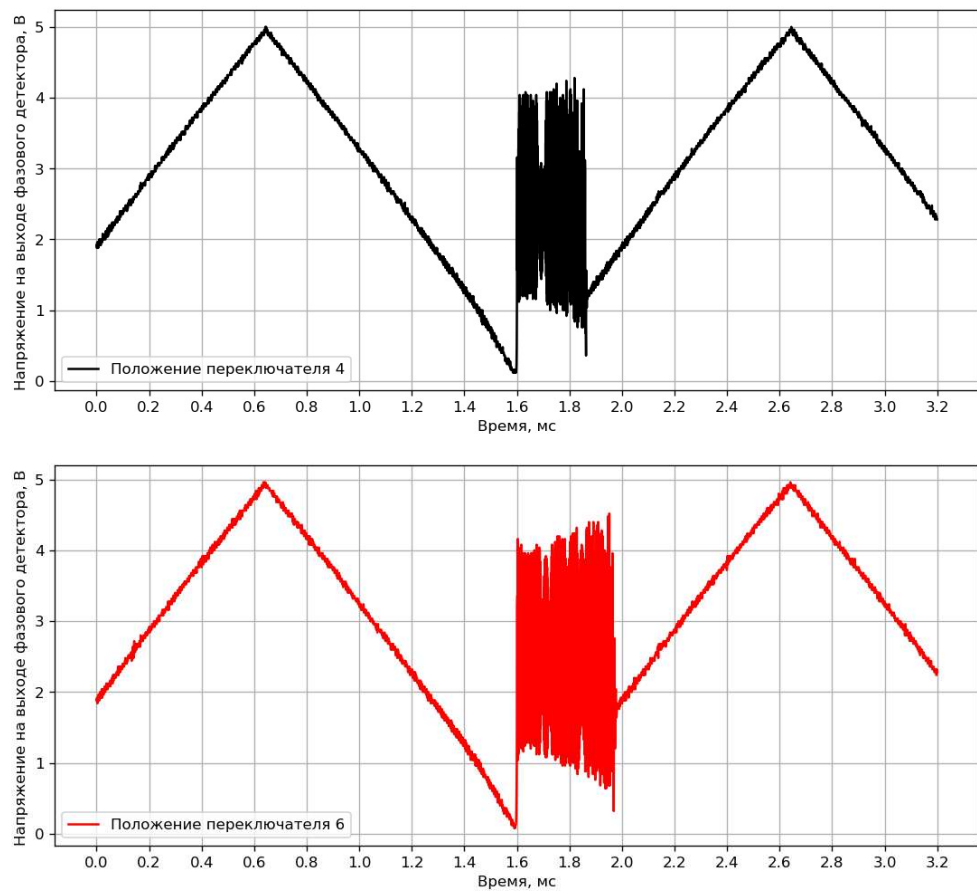


Рисунок 7 – Осциллограммы напряжения на выходе фазового детектора для положений переключателя 4 и 6 (в случае измерения полосы захвата)