



**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: ЭР-11-21

Студент: Авдюшкин Г.А.

Преподаватель: Плутешко А.В.

Дата: 16.03.2025

Москва 2025

## 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 около 50 кГц.

#### Зависимость выходного напряжения фазового детектора от времени



Рис. 1 – График зависимости выходного напряжения ФД от времени, идеальная характеристика (желтый)

### 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  | 7.8  | 7.9    | 8      | 8.1    | 8.2 | 8.3    | 8.4    |
| $f_{гун}$ , МГц | 125  | 126.58 | 128.21 | 129.17 | 191 | 133.33 | 135.14 |
| $E_{упр}$ , В   | 2.85 | 3.16   | 3.47   | 3.78   | 4.1 | 4.4    | 4.7    |

Таблица 1 (Продолжение) – Характеристика управления частотой ГУН

|                    |      |            |      |      |            |            |        |
|--------------------|------|------------|------|------|------------|------------|--------|
| $f_{оп}$ ,<br>МГц  | 7.1  | 7.2        | 7.3  | 7.4  | 7.5        | 7.6        | 7.7    |
| $f_{гун}$ ,<br>МГц | 114  | 114.9<br>4 | 117  | 119  | 120.0<br>5 | 121.4<br>8 | 123.46 |
| $E_{упр}$ ,<br>В   | 0.46 | 0.87       | 1.23 | 1.56 | 1.89       | 2.214      | 2.53   |

По полученным данным таблицы 1 построим характеристику управления частотой ГУН.

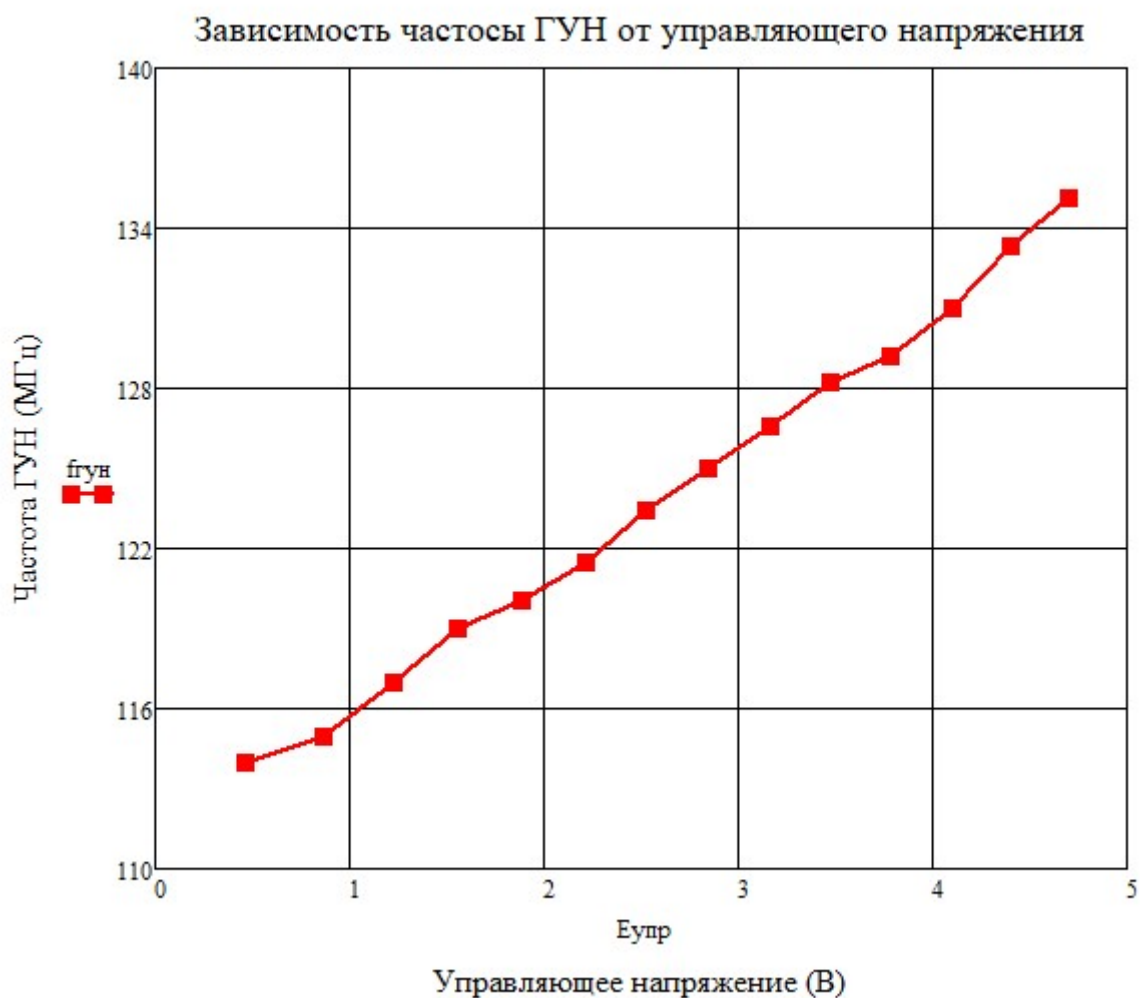


Рис. 2 - Характеристику управления частотой ГУН

### 3. Измерение полосы захвата

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

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

$$K_{гун} = \frac{(123.46 - 121.48) \cdot 10^6}{2.53 - 2.214} = 6.26 \left[ \frac{\text{МГц}}{\text{В}} \right]$$

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.

$$f_1 = f_{оп\ мин} - (E_{упр\ мин} + 0.1) \cdot \frac{K_{гун}}{16}$$

$$f_1 = 7.1 \cdot 10^6 - (0.46 + 0.1) \cdot \frac{6.26 \cdot 10^6}{16} = 6.88 \text{ [МГц]}$$

$$f_2 = f_{оп\ макс} - (5.1 - E_{упр\ макс}) \cdot \frac{K_{гун}}{16}$$

$$f_2 = 8.4 \cdot 10^6 - (5.1 - 4.7) \cdot \frac{6.26 \cdot 10^6}{16} = 8.55 \text{ [МГц]}$$

Меняя положение переключателя в поле РС-ФИЛЬТР, ознакомимся с изменением формы осциллограммы Ефд при изменении постоянной времени фильтра.

Сохраним осциллограмму Ефд для положений переключателя 4 и 6.

**Зависимость выходного напряжения фазового детектора от времени**

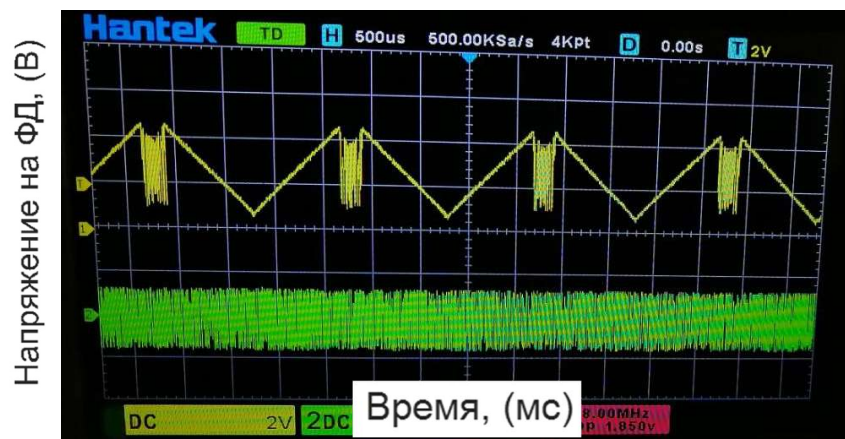


Рис. 3 – График зависимости  $E_{\text{фд}}(t)$  при положении переключателя 4, идеальная характеристика ФД без срыва слежения(желтый)

**Зависимость выходного напряжения фазового детектора от времени**

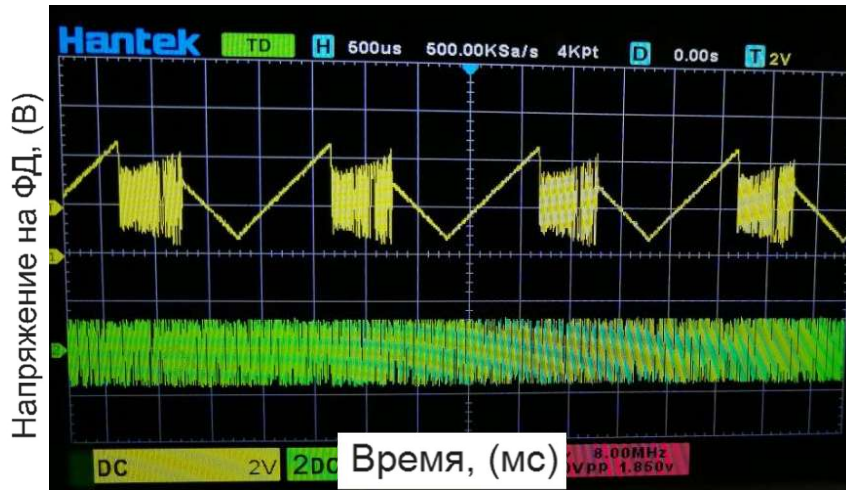


Рис. 4 – График зависимости  $E_{\text{фд}}(t)$  при положении переключателя 6, идеальная характеристика ФД без срыва слежения(желтый)

#### 4. Измерение переходных процессов по частоте

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

$$\frac{K_{\text{гун}}}{16} \cdot 0.5 = \frac{6.26 \cdot 10^6}{16} \cdot 0.5 = 195 \text{ [КГц]}$$

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.

**Зависимости Напряжение на ФД и Управляющее напряжение от времени**



Рис. 5 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{фд}(t)$  и  $E_{упр}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение (желтый), напряжение на выходе ФД (зеленый)

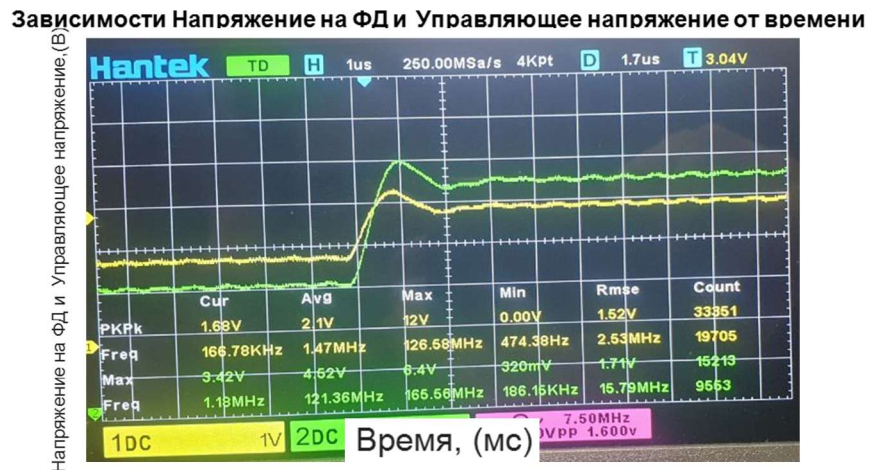


Рис. 6 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{фд}(t)$  и  $E_{упр}(t)$  при положении переключателя 3, управляющее напряжение (желтый), напряжение на выходе ФД (зеленый)



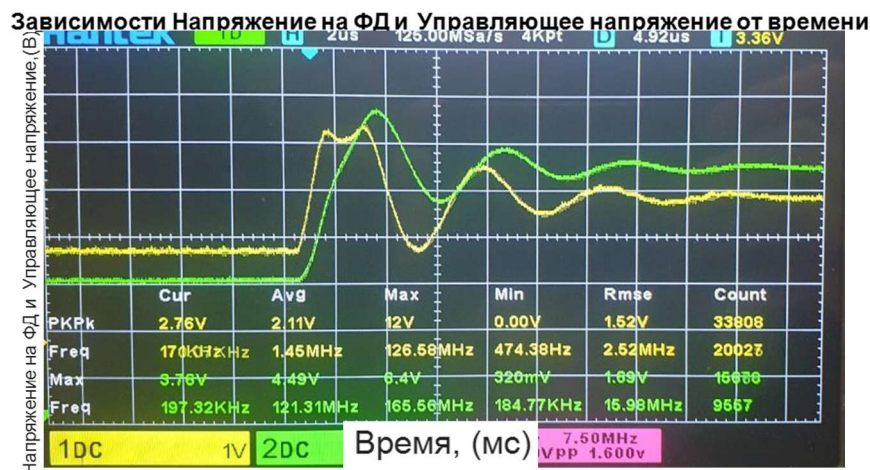


Рис. 7 – Осциллограмма переходных процессов по частоте  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 5, управляющее напряжение (желтый), напряжение на выходе ФД (зеленый)

## 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.

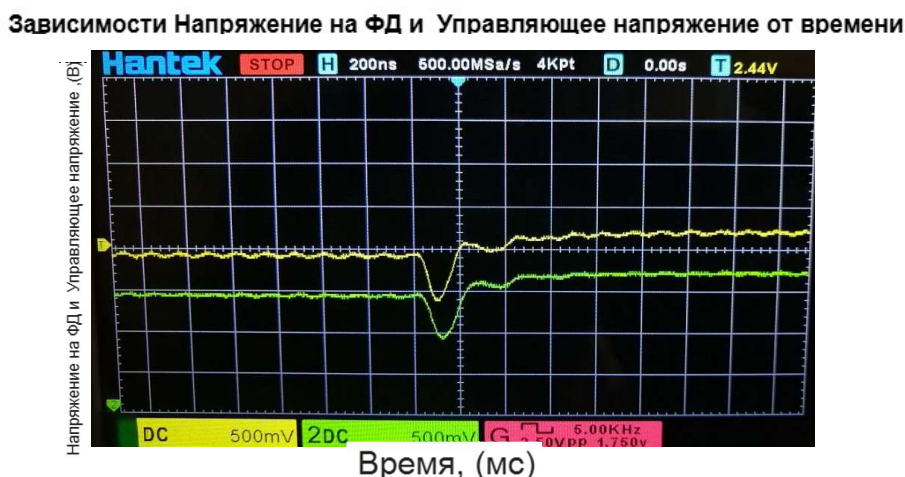


Рис. 8 – Осциллограмма переходного процесса по фазе  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение, напряжение на выходе ФД

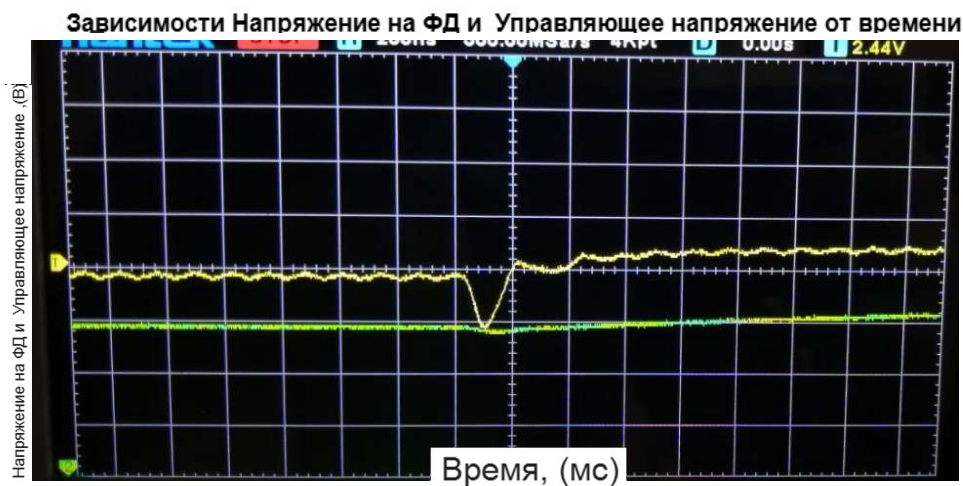


Рис. 9 – Осциллограмма переходного процесса по фазе  $E_{\text{фд}}(t)$  и  $E_{\text{упр}}(t)$  при положении переключателя 1, управляющее напряжение, напряжение на выходе ФД

Построим характеристику ФД:

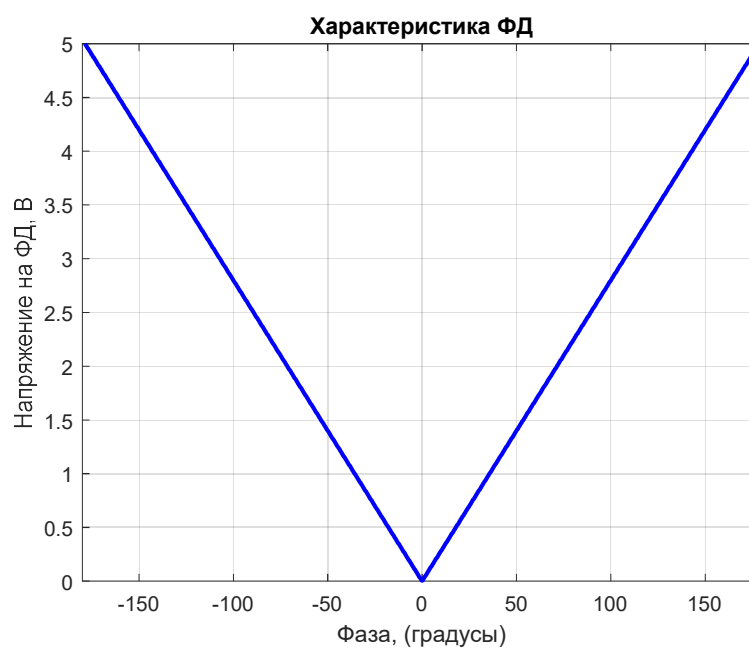


Рис. 11 – характеристика ФД



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

Таблица 2 – Величины, определяющие поведение кольца ФАПЧ

| Кфд, В/рад | Кгун, МГц/В | Тфапч, мкс |
|------------|-------------|------------|
| 1.59       | 6.26        | 0.255      |

Значение Кфд и Тфапч определим по следующим формулам:

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

$$T_{\text{фапч}} = \frac{P}{2\pi \cdot K_{\text{гун}} \cdot K_{\text{фд}}} = \frac{16}{2\pi \cdot 6.26 \cdot 10^6 \cdot 1.59} = 0.255 \text{ мкс}$$

Осциллограммы  $E_{\text{фд}}(t)$  были сняты при увеличении постоянной времени фильтра для положений 4 и 6. Рассчитаем значения постоянной времени цепи для этих положений по следующей формуле (12) и сведем их в таблицу 3:

$$\tau_{\text{фнч}} = R_1 \cdot C_1$$

где  $i$  – номер положения переключателя

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

| $i$ | $R_1, \text{ Ом}$ | $C_1, \text{ пФ}$ | $\tau_{\text{фнч}}, \text{ мкс}$ |
|-----|-------------------|-------------------|----------------------------------|
| 4   | 300               | 2200              | 0.66                             |
| 6   | 300               | 6800              | 2.04                             |

**Зависимость выходного напряжения фазового детектора от времени**

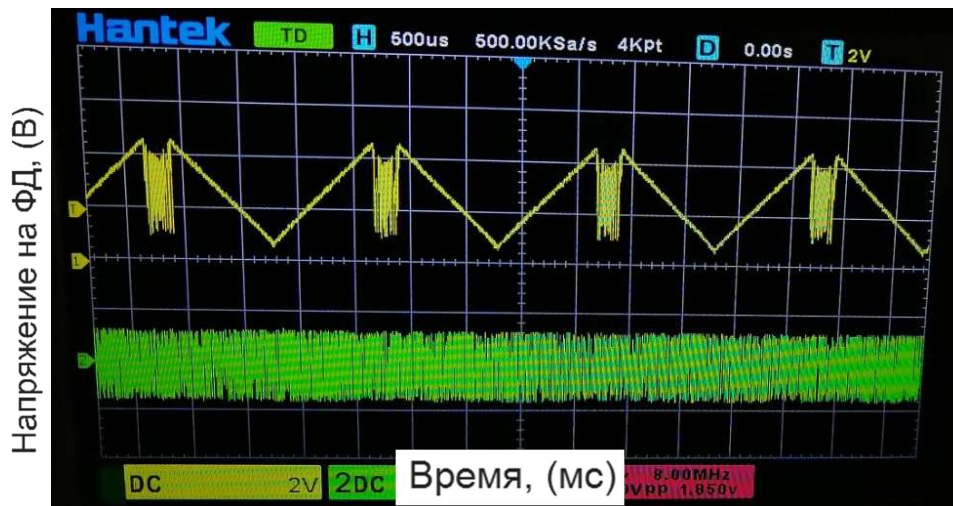


Рис. 12 – График зависимости  $E_{\text{фд}}(t)$  при положении переключателя 4

Зависимость выходного напряжения фазового детектора от времени

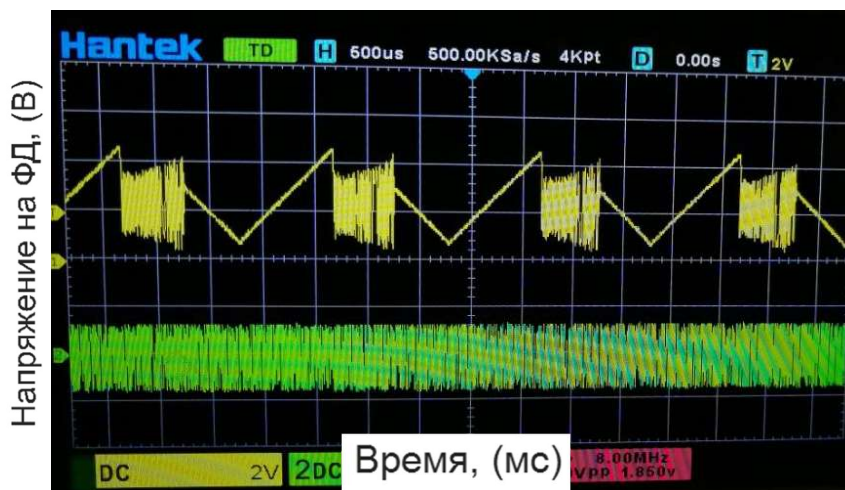


Рис. 13 – График зависимости  $E_{\text{фд}}(t)$  при положении переключателя 6

По приведенным графикам на рисунках 12 и 13 определим значения полосы захвата и полосы синхронизма для положений переключателей 4 и 6 соответственно:

$$\gamma = \frac{P_{\text{зах}}}{P_{\text{синх}}} = \frac{0,73}{1} = 0,73$$

$$\gamma = \frac{P_{\text{зах}}}{P_{\text{синх}}} = \frac{0,58}{1} = 0,58$$

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:

$$\tau = \frac{\tau_{\text{ФНЧ4}}}{T_{\text{ФАПЧ}}} = \frac{0,87 \cdot 10^{-6}}{0,255 \cdot 10^{-6}} = 3,41$$

$$\tau = \frac{\tau_{\text{ФНЧ6}}}{T_{\text{ФАПЧ}}} = \frac{1,04 \cdot 10^{-6}}{0,255 \cdot 10^{-6}} = 4,078$$

Полученным значениям  $\tau$  по графику соответствуют значения  $\gamma$  равные 0,73 и 0,58 для 4 и 6 положений. Полученные данные сведем в таблицу. Таблица 4 – Сравнение рассчитанных и теоретических значений  $\gamma$

| Номер положения переключателя, i | Рассчитанное значение $\gamma$ | Теоретическое значение $\gamma$ |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 4                                | 0,73                           | 0,71                            |
| 6                                | 0,58                           | 0,552                           |

## ВЫВОД

Возможной причиной различия расчетных результатов измерений от экспериментальных также может быть то, что при построении временных зависимостей переходных процессов, рассчитанных на основе дифференциальных уравнений, мы работали с математической моделью процесса, в то время как построение измеренных процессов представляет собой практическую часть исследования, выполняемую в лабораторных условиях.

Также из-за нагрева элементов при проведении лабораторной работы, получаемые результаты измерений отличаются от экспериментальных.

Несмотря на все высказанные причины отличий между экспериментально построенными зависимостями и рассчитанными по дифференциальным уравнениям, можно заметить, что форма их процессов совпадает.