



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ: ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

КАФЕДРА: КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

**О Т Ч Е Т**

по домашней работе № 3

Тема: Мультивибратор на операционном усилителе (Вариант №19)

Дисциплина: Электроника

Студент

ИУ6-42Б  
(Группа)

17.05.24

(Подпись, дата)

А. П. Плюitto

(И. О. Фамилия)

Преподаватель

17.05.24

(Подпись, дата)

В.А. Карпухин

(И. О. Фамилия)

Москва, 2024

## Содержание

1. Цель и задание .....	3
1.1. Цель работы .....	3
1.2. Задание .....	3
1.3. Задание по варианту .....	5
2. Выполнение работы .....	6
2.1. Часть 1: Расчет номиналов схемы .....	6
2.1.1. Выбор операционного усилителя .....	6
2.1.2. Расчет положительной обратной связи .....	8
2.1.3. Расчет отрицательной обратной связи .....	8
2.2. Часть 2: Анализ работы схемы .....	10
2.2.1. Параметры сигнала .....	11
2.2.2. Параметры быстродействия .....	11
2.3. Часть 3: Изменение емкости конденсатора .....	13
2.4. Часть 4: Изменение значения $K_{\text{ПОС}}$ .....	14
3. Вывод .....	16

# 1. Цель и задание

## 1.1. Цель работы

Определение номиналов элементов схемы мультивибратора на операционном усилителе, работающего на заданных длительностях полуволн выходного сигнала  $T_1$  и  $T_2$ , исследовании влияния параметров положительной и отрицательной обратных связей на параметры выходного сигнала: период колебаний  $T$ , длительность положительного импульсного напряжения  $T_1$ , длительность отрицательного импульсного напряжения  $T_2$ , амплитуду положительного импульса выходного сигнала  $U_{\max \text{ вых}}$ , амплитуду отрицательного импульса выходного сигнала  $U_{\min \text{ вых}}$ , амплитуду положительного импульса на неинвертирующем входе операционного усилителя  $U_{\max \text{ вх}}^+$ , амплитуду отрицательного импульса на неинвертирующем входе операционного усилителя  $U_{\min \text{ вх}}^+$ , длительность фронта нарастания  $t_{\text{фн}}$ , длительность фронта спада  $t_{\text{фс}}$ .

## 1.2. Задание

1. Выполнить расчет номиналов элементов (длительности  $T_1$ ,  $T_2$  заданы индивидуальным вариантом, коэффициент ПОС  $K_{\text{ПОС}} = 0,7$ ), привести полученные значения к ряду номиналов радиодеталей E24.
2. Составить электрическую принципиальную схему в программе схемотехнического моделирования Micro-Cap 12 согласно рис. 1 методических указаний с подстановкой рассчитанных номиналов (модель используемых диодов задана индивидуальным вариантом).
3. Выполнить временной анализ Transient и отметить на осциллограммах необходимые параметры выходного и входного сигналов (требования к скриншотам приведены во второй половине шаблона, обозначения указаны в соответствии с методическими указаниями), занести эти параметры в строку «модель» табл. 1. (Обратите внимание, что значения  $T_1$ ,  $T_2$ , полученные при моделировании работы схемы, должны отклоняться от значений, приведенных в индивидуальном варианте, не более чем на  $\pm 5\%$ !).

Табл. 1

	$T$	$T_1$	$T_2$	$U_{\max \text{ вых}}$	$U_{\min \text{ вых}}$	$U_{\max \text{ вх}}^+$	$U_{\min \text{ вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
Модель									
Теория									

4. Изменяя номинал  $C_1$  конденсатора  $C_1$  в Micro-Cap 12 измерить параметры сигналов на осциллограммах и занести в табл. 2.

Табл. 2

$C_1$	$T$	$T_1$	$T_2$	$U_{\text{max вых}}$	$U_{\text{min вых}}$	$U_{\text{max вх}}^+$	$U_{\text{min вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
$C_1$	Значения те же, что и в табл. 1 в строке «Модель»								
$0.75 \times C_1$									
$0.50 \times C_1$									
$0.25 \times C_1$									
$0.10 \times C_1$									

5. Изменяя значение коэффициента положительной обратной связи КПОС рассчитать и перенести на схему в программе Micro-Cap 12 номиналы  $R_3$  и  $R_4$  сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$  (номинал конденсатора  $C_1$  при этом необходимо держать постоянным, согласно первоначальному расчету), для каждого значения КПОС измерить параметры сигналов на осциллограммах и занести в табл. 3

Табл. 3

$K_{\text{пос}}$	$T$	$T_1$	$T_2$	$U_{\text{max вых}}$	$U_{\text{min вых}}$	$U_{\text{max вх}}^+$	$U_{\text{min вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
0.7	Значения те же, что и в табл. 1 в строке «Модель»								
0.6									
0.5									
0.4									

Помимо заполненных таблиц и построенных по табл. 2 и 3 графиков зависимостей\*\* изменяющихся параметров сигналов от номинала  $C_1$  конденсатора  $C_1$  (табл. 2) и коэффициента положительной обратной связи КПОС (табл. 3) для составления отчета вам необходимо сделать как минимум семь скриншотов окон рабочих программ:

- Скриншот 1: рабочая схема (с указанием номиналов элементов)
- Скриншот 2: сигналы на входах и выходе операционного усилителя\* с отмеченными параметрами  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\text{max вых}}$ ,  $U_{\text{min вых}}$ ,  $U_{\text{max вх}}^+$ ,  $U_{\text{min вх}}^+$  для строки « $C_1$ » табл. 2 (строка повторяет строку «модель» табл. 1)
- Скриншот 3: положительный фронт (фронт нарастания) сигнала на выходе с отмеченным параметром  $t_{\text{фн}}$  для строки « $C_1$ » табл. 2
- Скриншот 4: отрицательный фронт (фронт спада) сигнала на выходе с отмеченным параметром  $t_{\text{фс}}$  для строки « $C_1$ » табл. 2

- Скриншот 5: сигналы на входах и выходе операционного усилителя\* с отмеченными параметрами  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\text{max вых}}$ ,  $U_{\text{min вых}}$ ,  $U_{\text{max вх}}^+$ ,  $U_{\text{min вх}}^+$  для строки «0,  $10 \cdot C_1$ » табл. 2
- Скриншот 6: Время выхода операционного усилителя из насыщения (см. рис. 7 методических указаний) для строки «0,  $10 \cdot C_1$ » табл. 2
- Скриншот 7: Сигналы на входах и выходе операционного усилителя\* с отмеченными параметрами  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\text{max вых}}$ ,  $U_{\text{min вых}}$ ,  $U_{\text{max вх}}^+$ ,  $U_{\text{min вх}}^+$  для строки «0,4» табл. 3

\* для скриншотов 2, 5 и 7 приведите от двух до пяти периодов сигнала

\*\* построенные графики необходимо проанализировать, соотнеся теоретический принцип работы схемы с полученными результатами

### 1.3. Задание по варианту

$T_1$ , мс	$T_2$ , мс	Модель диодов
6.3	7.2	KD203B

## 2. Выполнение работы

### 2.1. Часть 1: Расчет номиналов схемы

Схема несимметричного мультивибратора на операционном усилителе состоит из трех основных частей: операционный усилитель (ОУ), отрицательная обратная связь (ООС), отвечающая за коэффициент усиления операционного усилителя, положительная обратная связь (ПОС), отвечающая за работу усилительного каскада в качестве автогенератора, воспроизводящего выходные колебания.

#### 2.1.1. Выбор операционного усилителя

ОУ для построения схемы выбирается из условия быстродействия: скорость изменения выходного сигнала должна быть согласована с техническими условиями.

Для выбора ОУ достаточно двух временных параметров: длительности положительного импульсного напряжения  $T_1 = 6.3$  мс и длительности отрицательного импульсного напряжения  $T_2 = 7.2$  мс выходного сигнала.

Несимметричный мультивибратор генерирует в качестве выходного сигнала периодические двуполярные импульсы. Напряжение в случае двуполярного импульса принимает либо максимальное положительное, либо максимальное по модулю отрицательное значение (в отличие от однополярного импульса, где одним из двух уровней является нулевое напряжение). ОУ выберем из серии LF..., модели этой серии широко распространены, и для каждого ОУ, входящего в серию, напряжение питания составляет стандартные  $E_{\pi} = \pm 15\text{В}$  (в SPICE-модели ОУ за напряжение питания отвечают параметры VCC и VEE, в общем случае они не одинаковы). Таким образом для упрощенных вычислений можно определить, что максимальный и минимальный уровни напряжения на выходе операционного усилителя на 1–2 В меньше напряжения питания и составляют  $U_{\text{max вых}} \approx 13\text{В}$  и  $U_{\text{min вых}} \approx -13\text{В}$  (в SPICE-модели ОУ за максимальное и минимальное напряжения на выходе отвечают параметры VPS и VNS, в общем случае они не одинаковы).

Быстродействие ОУ ограничено конечным значением максимальной скорости нарастания ОУ  $V_{\text{нар}}$  (в SPICE-модели ОУ за максимальную скорость нарастания отвечают параметры SRP и SRN (указаны в В/сек), в общем случае они не одинаковы).

Значит, переключение между максимальным значением напряжения и минимальным будет происходить за конечное время. Время, за которое в импульсном сигнале минимальное значение напряжения сменяется максималь-

ным, называется фронтом нарастания  $t_{\text{фн}}$ , а время перехода от максимального значения напряжения до минимального – фронтом спада  $t_{\text{фс}}$ . Обычно фронты импульсного сигнала оценивают по значению 90% от уровней напряжения, между которыми переключается сигнал.

Таким образом, длительности фронтов могут быть описаны следующей формулой:

$$t_{\text{ф}} = 0,9 \cdot \frac{U_{\text{max вых}} - U_{\text{min вых}}}{V_{\text{нар}}}$$

В качестве требования, описывающего минимальную скорость быстрого действия ОУ можно выдвинуть следующее соображение: при переключении полярности импульсов время этого переключения должно составлять не более 1 % от длительности положительного или отрицательного импульсного напряжения (возьмем самую малую длительность среди  $T_1$  и  $T_2$  и обозначим как  $T_{\text{min}} = 6.3$ ), или, если связать это условие с параметрами ОУ, получится условие:

$$0,9 \cdot \frac{VPS - VNS}{SRP} \leq 0,01 \times T_{\text{min}},$$

$$0,9 \cdot \frac{VPS - VNS}{SRN} \leq 0,01 \times T_{\text{min}}$$

Если оба условия выполняются, ОУ с использованными при расчете параметрами SPICE-модели может быть выбран для построения схемы.

Попробуем выбрать ОУ LF456, вот его параметры:

$$\begin{aligned} VPS &= 13\text{В} \\ VNS &= -13\text{В} \\ SRP &= 500 \frac{\text{кВ}}{\text{с}} \\ SRN &= 500 \frac{\text{кВ}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Подставим параметры в неравенства

$$0,9 \cdot \frac{13 - (-13)}{500000} \leq 0,01 \times 6.3,$$

$$0,9 \cdot \frac{13 - (-13)}{500000} \leq 0,01 \times 6.3$$

$$4.7 \cdot 10^{-5} \leq 6.3 \cdot 10^{-2},$$

$$4.7 \cdot 10^{-5} \leq 6.3 \cdot 10^{-2}$$

Видно, что неравенства выполняются, значит модель можно использовать.

### 2.1.2. Расчет положительной обратной связи

Работа ПОС заключается в том, чтобы возвращать часть выходного сигнала на неинвертирующий вход ОУ. Доля возвращаемого с выхода на вход напряжения характеризуется коэффициентом ПОС, который задан шаблоном для первой схемы как  $K_{\text{ПОС}} = 0,7$ .

В данной схеме ПОС построена на резистивном делителе, состоящем из резисторов  $R_3$  и  $R_4$  (рис. 1). Соответственно, коэффициент ПОС определяется коэффициентом деления делителя:

$$K_{\text{ПОС}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Для выбора порядка резисторов в цепи ПОС возьмем силу тока, протекающего через ПОС при фиксированном значении выходного напряжения  $U_{\text{max вых}}$  как  $I_{\text{max ПОС}} = 0.1$  мА, тогда

$$R_3 + R_4 = \frac{U_{\text{max вых}}}{I_{\text{max ПОС}}} = \frac{13}{0.0001} = 130 \text{ кОм}$$

$$R_3 = K_{\text{ПОС}}(R_3 + R_4) = 0.7 \cdot 130 \cdot 10^3 = 91 \text{ кОм}$$

$$R_4 = (130 - 91) \cdot 10^3 = 39 \text{ кОм}$$

Полученные номиналы соответствуют ряду E24.

Рассчитаем теоретические значения амплитуды положительного и отрицательного импульса на неинвертирующем входе ОУ:

$$U_{\text{max вх}}^+ = K_{\text{ПОС}} U_{\text{max вых}} = 0.7 \cdot 13 = 9.1 \text{ В}$$

$$U_{\text{min вх}}^+ = K_{\text{ПОС}} U_{\text{min вых}} = 0.7 \cdot -13 = -9.1 \text{ В}$$

### 2.1.3. Расчет отрицательной обратной связи

ООС в схеме обычного усилительного каскада на ОУ влияет на значение коэффициента усиления за счет того, что выходное напряжение попадает на инвертирующий вход через делитель напряжения. Однако если в цепи ООС присутствует реактивный элемент, например, конденсатор, то процессы в такой цепи становятся инерционными – сигнал на выходе цепи ООС (то есть на инвертирующем входе ОУ) реагируют на изменения сигнала на входе цепи



ООС (то есть на выходе ОУ) не мгновенно, а с временной задержкой. Эта временная задержка (или постоянная времени цепи) определяется соотношением номинала реактивного элемента и активного, и может быть использована для формирования импульсов необходимой длительности.

Добавление в цепь ООС диодов влияет на схему следующим образом. Если потенциал напряжения на выходе ОУ положительный ( $U_{\max \text{ вых}}$ ), ток в цепи ООС протекает от выхода ОУ на землю через резистор  $R_1$ , диод  $D_1$  и конденсатор  $C_1$ . Диод  $D_2$  закрыт для такого направления течения тока, а значит через него и через резистор  $R_2$  ток практически не течет. Если потенциал напряжения на выходе ОУ отрицательный ( $U_{\min \text{ вых}}$ ), ток в цепи ООС протекает от земли через конденсатор  $C_1$ , диод  $D_2$  и резистор  $R_2$ . Диод  $D_1$  закрыт, а значит, через него и через резистор  $R_1$  ток практически не течет.

Получается, что для положительной полярности выходного напряжения конденсатор  $C_1$  заряжается током, определяемым через выходное напряжение и номинал резистора  $R_1$ , а при отрицательной полярности – заряд конденсатора происходит за счет тока, определяемого через выходное напряжение и номинал резистора  $R_2$ . Поскольку амплитуды положительного и отрицательного импульса выходного сигнала скорее всего близки по модулю, а конденсатор  $C_1$  в обоих случаях один и тот же, значит соотношение времени заряда конденсатора на одну и ту же величину при положительном и отрицательном импульсе выходного напряжения полностью определяется соотношением номиналов резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

Выберем значение силы тока  $I_{\max \text{ ООС}} = 0.2 \text{ мА}$ . Тогда можно определить номиналы резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

$$R_2 = \frac{2U_{\max \text{ вых}}}{I_{\max \text{ ООС}}} = \frac{2 \cdot 13}{0.0002} = 130 \text{ кОм}$$

$$R_1 = \frac{T_1}{T_2} \cdot R_2 = 113.75 \text{ кОм} \simeq 110 \text{ кОм}$$

Полученные номиналы соответствуют ряду E24.

Рассчитаем длительности фронтов нарастания и спада  $t_\phi$ :

$$t_\phi = 0,9 \cdot \frac{U_{\max \text{ вых}} - U_{\min \text{ вых}}}{V_{\text{нар}}} = 0,9 \cdot \frac{26}{500000} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

Параметр ТТ (время переноса зарядов) у диода, заданного в задании равен  $9,09 \cdot 10^{-7}$ , что меньше значения  $t_\phi$ , значит мы можем использовать данный диод.

Емкость конденсатора рассчитаем по формуле

$$C_1 = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{T_1}{\ln\left(\frac{1+K_{\text{пос}}}{1-K_{\text{пос}}}\right)} = \frac{1}{110000} \cdot \frac{6.3}{\ln\left(\frac{1+0.7}{1-0.7}\right)} =$$

$$= 9.09 \cdot 10^{-6} \cdot 3.63 \simeq 3.3 \cdot 10^{-6} = 33 \text{ нФ}$$

Полученная емкость соответствует ряду E24.

Сопротивление нагрузки возьмем равным  $R_n = 10 \text{ кОм}$

## 2.2. Часть 2: Анализ работы схемы

Построим схему несимметричного мультивибратора на ОУ. При выборе номиналов и моделей элементов схемы будем основываться на соображениях, приведенных в предыдущих разделах.

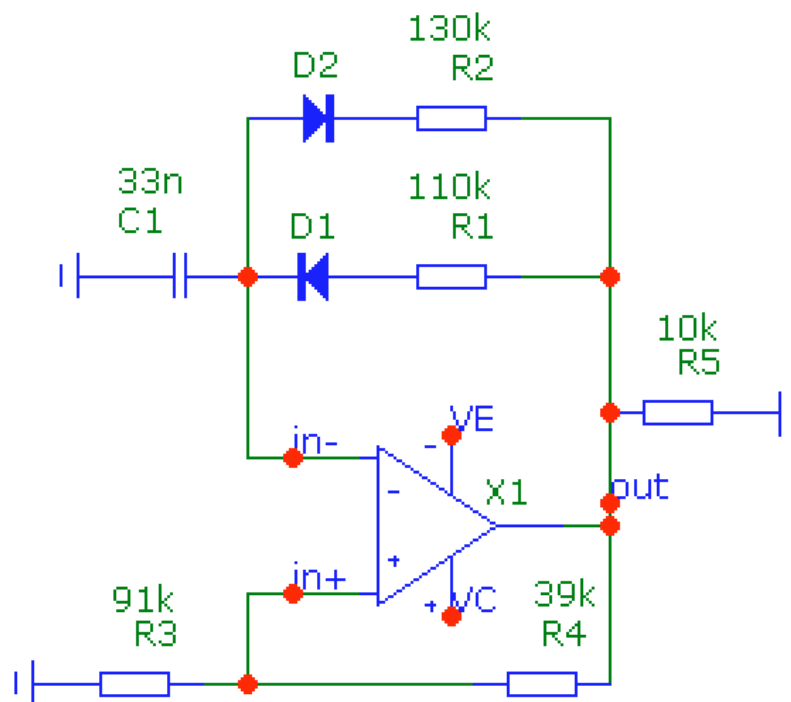


Рисунок 1 — Рабочая схема

### 2.2.1. Параметры сигнала

Проанализируем временные характеристики. Параметры зададим следующим образом:

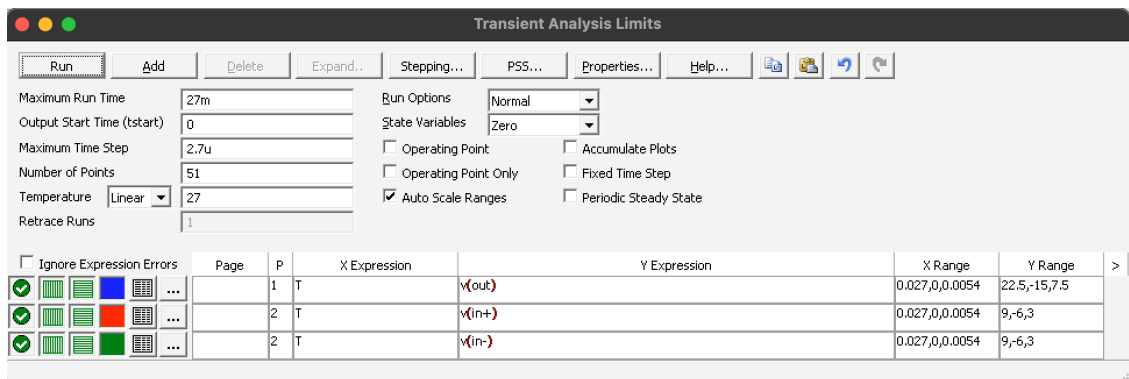


Рисунок 2 — Параметры для Transient analysis

Maximum runtime задан, исходя из соображений просмотра 2 периодов, один период равен

$$T = T_1 + T_2 = 6.3 + 7.2 = 13.5 \text{ мс}$$

Приведем сигналы на входах и выходе операционного усилителя с отмеченными параметрами  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$

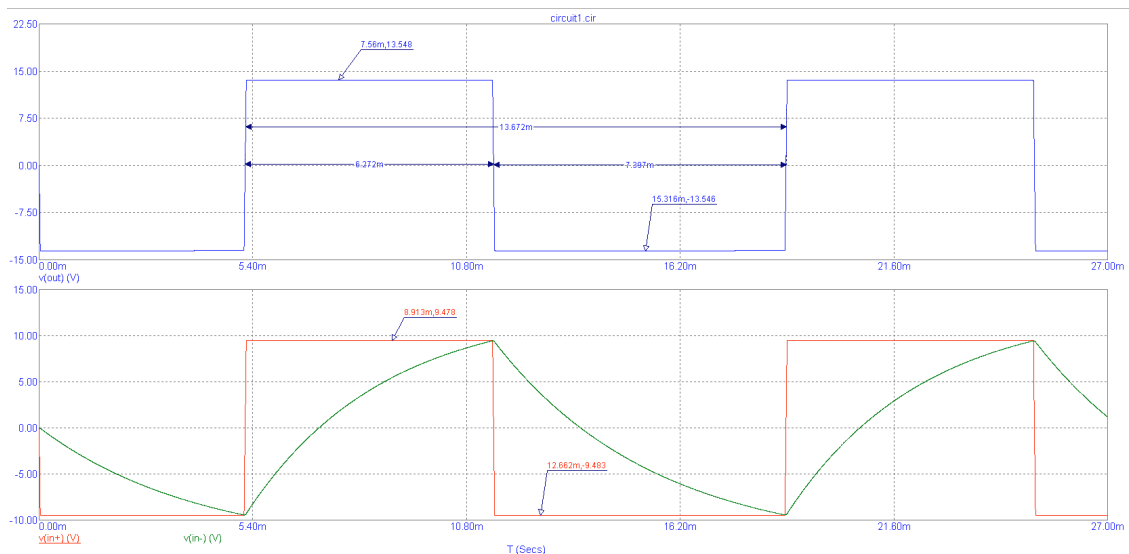


Рисунок 3 — Сигналы на входах и выходе операционного усилителя

### 2.2.2. Параметры быстродействия

Проанализируем параметры быстродействия, для этого приблизим зоны нарастания и спада на 1 графике и найдем  $t_{\text{фн}}$  и  $t_{\text{фс}}$ .



Рисунок 4 — Зона нарастания



Рисунок 5 — Зона спада

После того, как были найдены все параметры занесем их в таблицу:

	$T$	$T_1$	$T_2$	$U_{\max \text{ Вых}}$	$U_{\min \text{ Вых}}$	$U_{\max \text{ вх}}^+$	$U_{\min \text{ вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
Мо- дель	13.6 мс	6.2 мс	7.4 мс	13.5 В	-13.5 В	9.5 В	-9.5 В	53 мкс	52 мкс
Теория	13.5 мс	6.3 мс	7.2 мс	13 В	-13 В	9.1 В	-9.1 В	47 мкс	47 мкс
По- греш- ность	0.7%	1.6%	1.3%	3.8%	3.8%	4.3%	4.3%	12.7%	10.6%

Как видим погрешности для  $T_1$  и  $T_2$  составили меньше 2%, а максимально не совпали с теоретическими расчётами длительности фронтов нарастания и спада.

## 2.3. Часть 3: Изменение емкости конденсатора

Изменяя емкость конденсатора, не меняя остальных параметров схемы исследуем как меняются  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ Вых}}$ ,  $U_{\min \text{ Вых}}$ ,  $U_{\max \text{ Вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ Вх}}^+$ .

$C_1$	$T$ , мс	$T_1$ , мс	$T_2$ , мс	$U_{\max \text{ Вых}}$	$U_{\min \text{ Вых}}$	$U_{\max \text{ Вх}}^+$	$U_{\min \text{ Вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
330 нФ	13.6	6.2	7.4	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	53 мкс	52 мкс
248 нФ	10.3	4.7	5.6	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	53 мкс	51 мкс
165 нФ	6.8	3.1	3.7	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	52 мкс	51 мкс
83 нФ	3.5	1.6	1.8	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	52 мкс	51 мкс
33 нФ	1.4	0.7	0.8	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	52 мкс	51 мкс

Как видно из таблицы, длительности полувольт выходного сигнала меняются при каждом изменении емкости. Это происходит линейно, с убыванием емкости убывает и период сигнала. Так как период убывает, при емкости в 10 раз меньше он станет тоже в 10 раз меньше, а значит, что в параметрах для transient analyses необходимо выставить новое значение в графе maximum runtime – 2.7m.

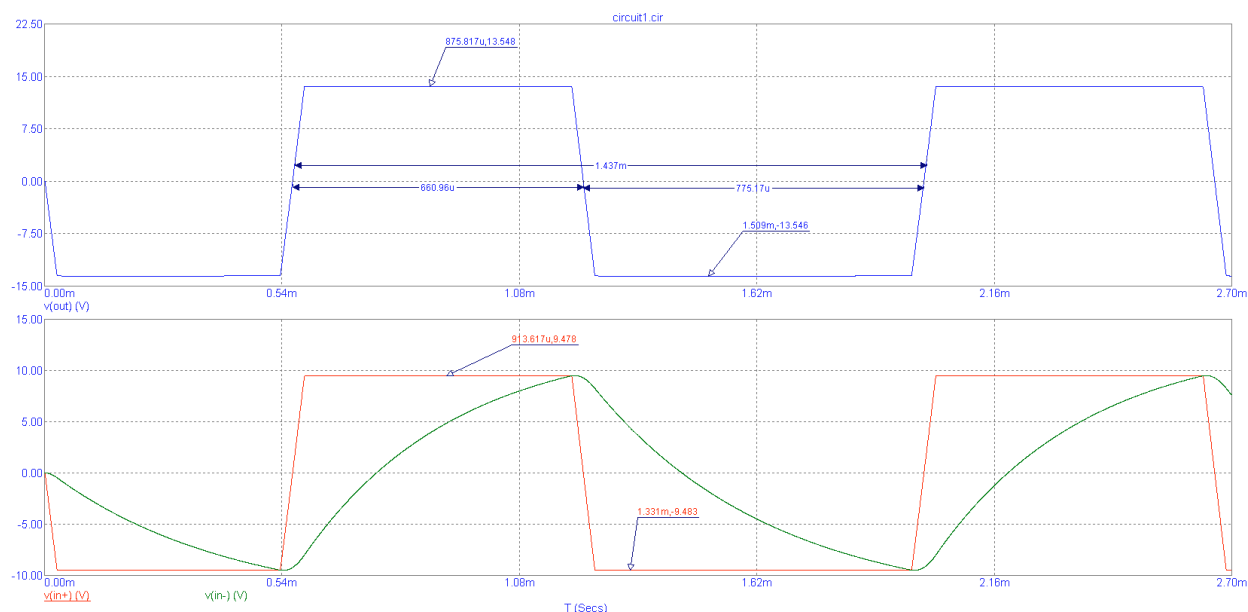


Рисунок 6 — Сигналы на входах и выходе операционного усилителя при  $C_1 = 33$  нФ

Измерим для  $C_1 = 33$  нФ время выхода операционного усилителя из насыщения.

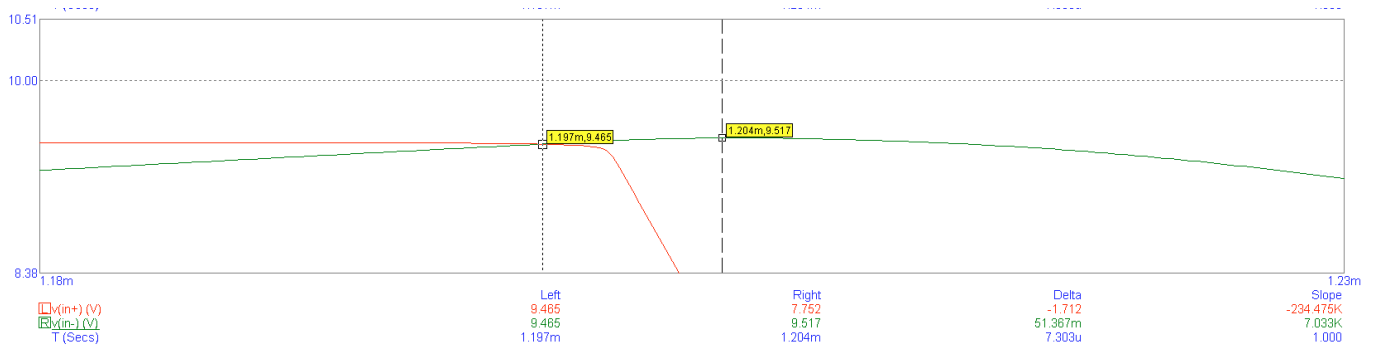


Рисунок 7 — Время выхода операционного усилителя из насыщения

Как видно из графиков время выхода из насыщения составило  $t_{\text{нас}} = 0.7$  мс, что сопоставимо с длительностью фронтов.

## 2.4. Часть 4: Изменение значения $K_{\text{ПОС}}$

Вернем значение емкости конденсатора на прежнее, теперь будем изменять  $R_3$  и  $R_4$ , которые зависят от  $K_{\text{ПОС}}$ . Получаемые значения будем записывать в таблицу:

$K_{\text{ПОС}}$	$T$ , мс	$T_1$ , мс	$T_2$ , мс	$U_{\text{max вых}}$	$U_{\text{min вых}}$	$U_{\text{max вх}}^+$	$U_{\text{min вх}}^+$	$t_{\text{фн}}$	$t_{\text{фс}}$
0.7	13.6	6.2	7.4	13.5 В	-13.5В	9.5В	-9.5В	53мкс	52мкс
0.6	10.8	4.9	5.9	13.5 В	-13.5В	8.1В	-8.1В	53мкс	52мкс
0.5	8.5	3.9	4.6	13.5 В	-13.5В	6.8В	-6.8В	52мкс	52мкс
0.4	6.6	3	3.6	13.5 В	-13.5В	5.4В	-5.4В	52мкс	52мкс

Как видно из таблицы, длительности полуволн так же меняются, как и в прошлом примере, причем эта зависимость тоже линейна. Так же изменяются амплитуды положительного и отрицательного импульсов на неинвертирующем входе ОУ. Причем можно утверждать, что зависимость тоже линейная.

Приведем сигналы на входах и выходе операционного усилителя с отмеченными параметрами  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\text{max вых}}$ ,  $U_{\text{min вых}}$ ,  $U_{\text{max вх}}^+$ ,  $U_{\text{min вх}}^+$  для  $K_{\text{ПОС}} = 0.4$

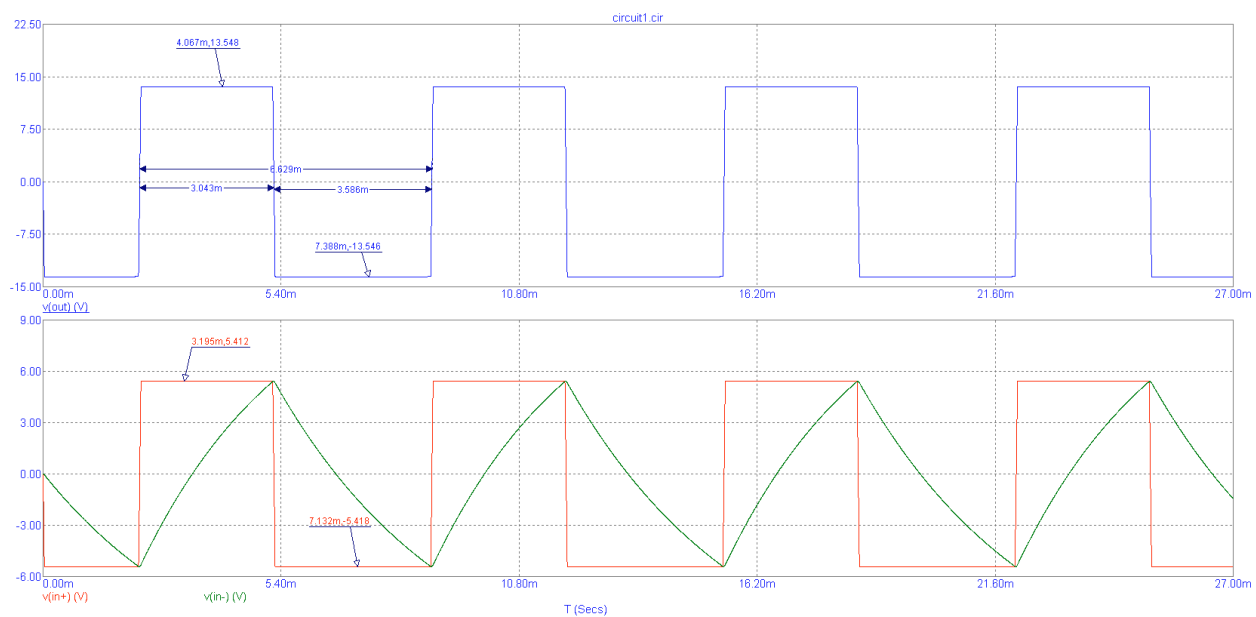


Рисунок 8 — Сигналы на входах и выходе операционного усилителя при  $K_{\text{ПОС}} = 0.4$

### 3. Вывод

В процессе выполнения работы была построена схема мультивибратора на операционном усилителе.

В части 1 работы был выбран операционный усилитель, который подходит под заданные параметры. Были определены номиналы элементов схемы для заданных длительностей полуволн  $T_1$  и  $T_2$ .

В части 2 была проанализирована работа схемы, а именно параметры  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$ . Они с небольшой погрешностью совпали с параметрами, полученными при теоретических вычислениях, сделанных в части 1. Так как параметры, полученные в ходе анализа совпали с теоретическими, можно утверждать, что части работы 1-2 выполнены правильно.

В части 3, исследовалась зависимость параметров  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$  от емкости конденсатора  $C_1$ . Можно утверждать, что параметры  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$  не зависят от емкости конденсатора, а параметры  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  зависят линейно. Так же можно утверждать, что частота сигнала тоже зависит от емкости, но обратно пропорционально. Так же было найдено время выхода из насыщения, сопоставимое с длительностью фронтов.

В части 4, исследовалась зависимость параметров  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$  от номиналов резисторов  $R_3$  и  $R_4$  (их сумма оставалась неизменной, изменялся коэффициент  $K_{\text{ПОС}}$ , от которого зависит  $R_3$ ). Можно утверждать, что параметры  $U_{\max \text{ вых}}$ ,  $U_{\min \text{ вых}}$  не зависят от емкости конденсатора, а параметры  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $U_{\max \text{ вх}}^+$ ,  $U_{\min \text{ вх}}^+$  зависят линейно. Так же можно утверждать, что частота сигнала тоже зависит от номиналов данных резисторов, но обратно пропорционально.