

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
Факультет систем управления и робототехники

Электроника и схемотехника  
Лабораторная работа №1  
Исследование полупроводникового диода  
Вариант 2

Выполнили студенты:  
Кирбаба Д.Д. R3338  
Курчавый В.В. R3338

Преподаватель:  
Николаев Н.А.

г. Санкт-Петербург  
2023

## Цель работы

- Исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода;
- Исследование работы однополупериодного выпрямителя;
- Исследование работы мостового выпрямителя.

## Ход работы

Вариант 2: диод ES1D.

### Описание

Выпрямители 1.0 Amp 200 Volt

### Технические параметры

Кол-во диодов в корпусе	1
Конфигурация диода	Одиночный
Максимальное постоянное обратное напряжение, $V_r$ (В)	200 в
Максимальный (средний) прямой ток на диод, $I_f(AV)$ (А)	1 А
Максимальное прямое напряжение при $T_j=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $V_f$ при $I_f$ (В)	920 мВ при 1 А
Время обратного восстановления, $T_{rr}$	25 нс
Максимальный обратный ток при $T_j=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $I_r$ при $V_r$ (мкА)	5 мкА при 200 В
Емкость, пФ	10 пФ при 4 В, 1 МГц
Рабочая температура PN-прехода ( $^{\circ}\text{C}$ )	-55...+150 С
Корпус	do-214ac/sma
Вес, г	0.25

Рис. 1: Характеристики диода.

### Исследование ВАХ полупроводникового диода

Построим прямую ветвь ВАХ полупроводникового диода ES1D (шаг напряжения 0.001А).

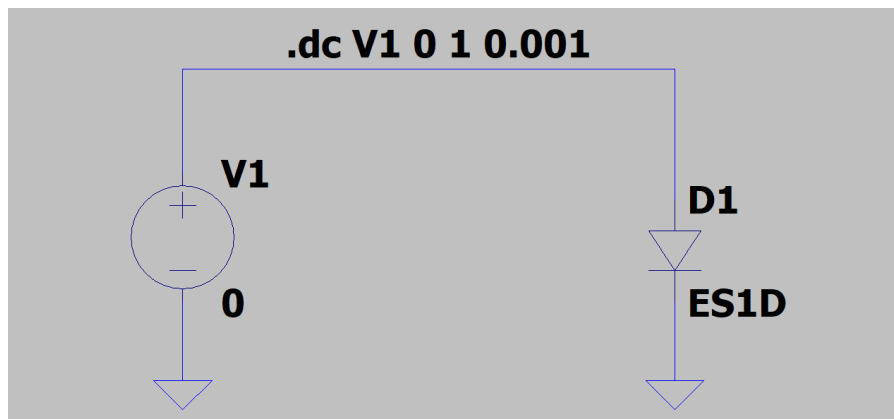


Рис. 2: Принципиальная схема для моделирования ВАХ диода.

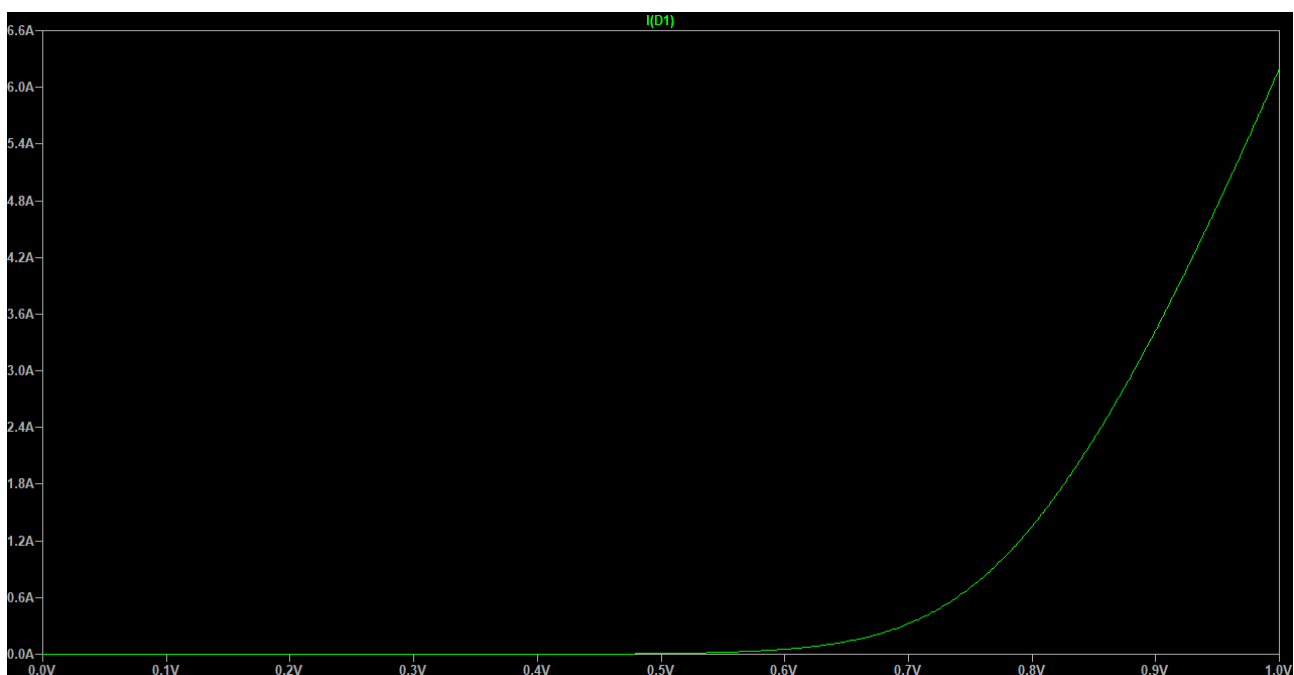


Рис. 3: Прямая ветвь ВАХ.

График похож на экспоненту, что логично, так как аналитически функция  $p$ - $n$  перехода определяется как:

$$I = I_0 \left( \exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right),$$

где  $U$  — приложенное к переходу внешнее напряжение соответствующего знака,  $I_0 = I_m$  — обратный ток,  $\varphi_T = \frac{kT}{q}$  — температурный потенциал.

Выберем две точки на графике функции для расчета экспериментального сопротивления диода:

№	$I_d$	$U_d$	$R_d$
1	5.55	0.978	0.176
2	1.55	0.812	0.524

Вычислим дифференциальное сопротивление смоделированного диода:

$$R_{diff} = \Delta U / \Delta I = 0.166 / 4 = 0.0415 \text{ Ом}$$

Паспортное значение сопротивления  $R_{true} = 0.025 \text{ Ом}$ . Разница между экспериментальным и паспортным значением обуславливается погрешностью и неоднозначностью выбора точек для расчета.

Напряжение изгиба  $U_{bend} = 0.78 \text{ В}$ .

Построим полную ВАХ диода:

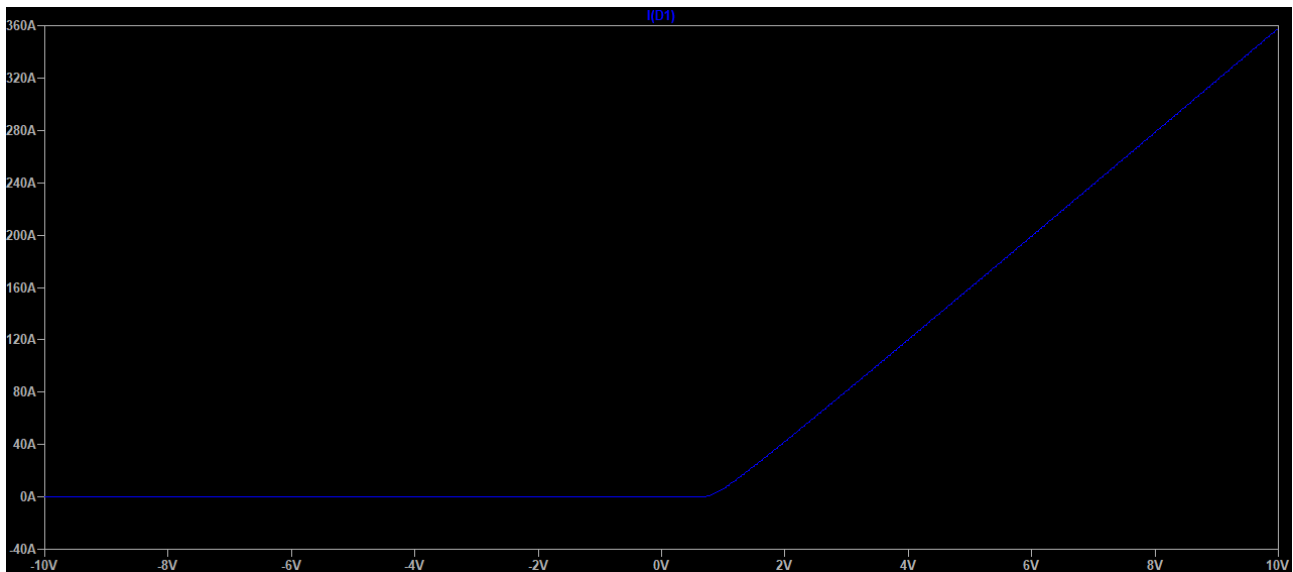


Рис. 4: Полная ветвь ВАХ.

При обратном напряжении сила тока мала (по техническим характеристикам максимальный обратный ток при  $T = 25^\circ\text{C}$  равен 5 мкА при максимально возможном обратном напряжении  $U = 200 \text{ В}$ ).

## Исследование работы однополупериодного полупроводникового выпрямителя

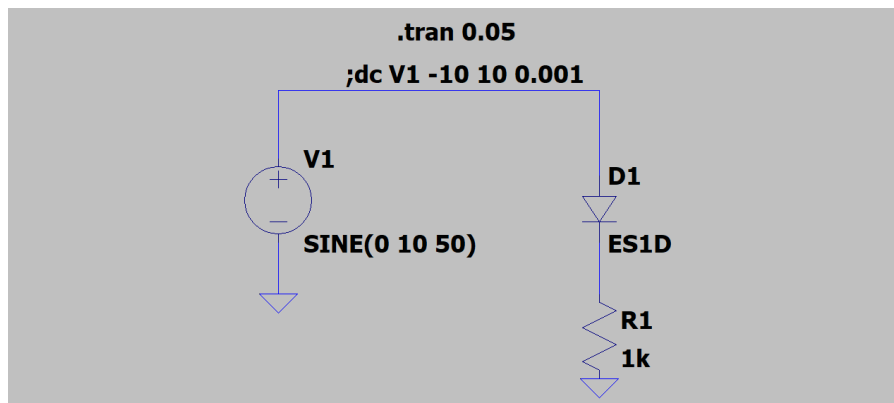


Рис. 5: Принципиальная схема для моделирования однофазного однополупериодного выпрямителя.

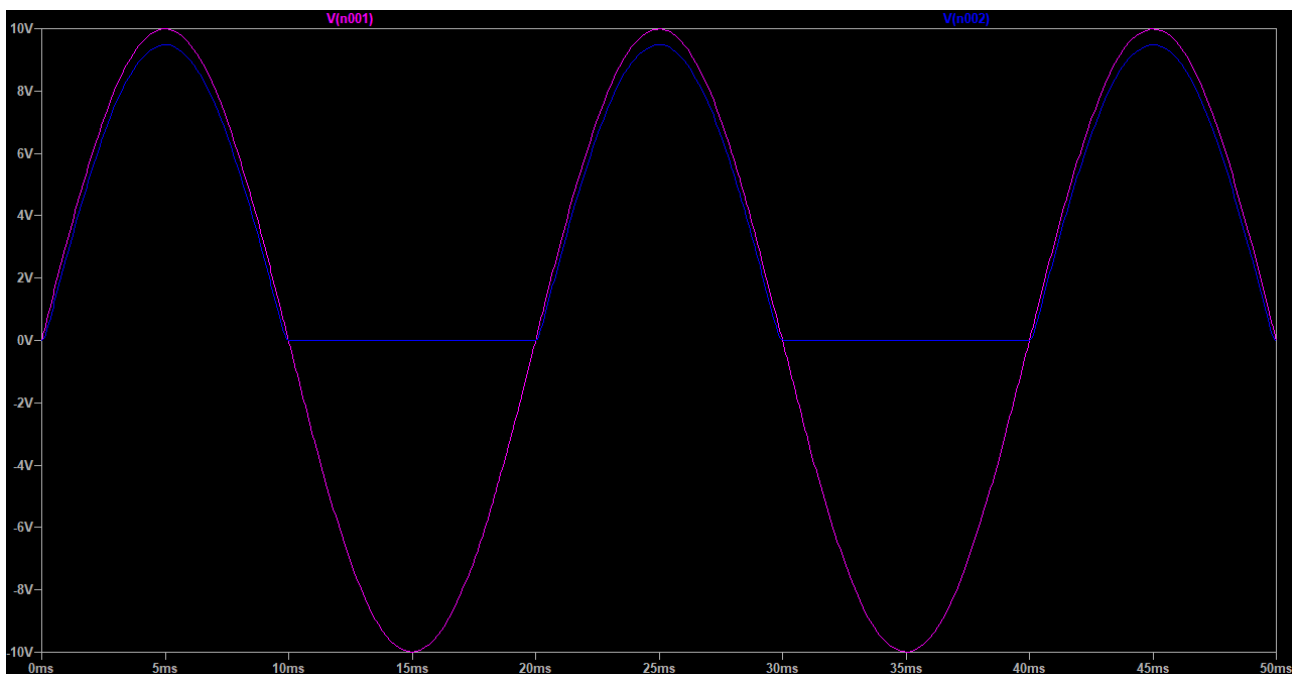


Рис. 6: Графики входного и выходного напряжений.

Как видно по графику на четных полупериодах напряжение на нагрузке нулевое из-за того, что диод не пропускает ток в обратном направлении. А при нечетных полупериодах направление и ток на нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала.

Также, можем наблюдать потери энергии при прохождении через диод, а именно пик напряжения на нагрузочном резисторе меньше пика входного напряжения.

Максимальное мгновенное значение напряжения на выходе выпрямителя, определенное по осциллограмме  $U_{out_{max}} = 9.46$  В.

Средневывпрямленное значение напряжения на выходе диода:

$$U_{out_{mean}} = U_{out_{max}} / \pi = 3.011 \text{ В.}$$

Максимальное обратное напряжение на диоде  $-500$  мкВ.

Коэффициент пульсации однофазного однополупериодного выпрямителя  $k = \frac{\pi}{2}$ .

Сигнал на выходе выпрямителя имеет тот же период, что и входной сигнал, однако напряжение отсутствует на половине фазы, следовательно данный выпрямитель неэффективен.

### Исследование работы однофазного мостового выпрямителя

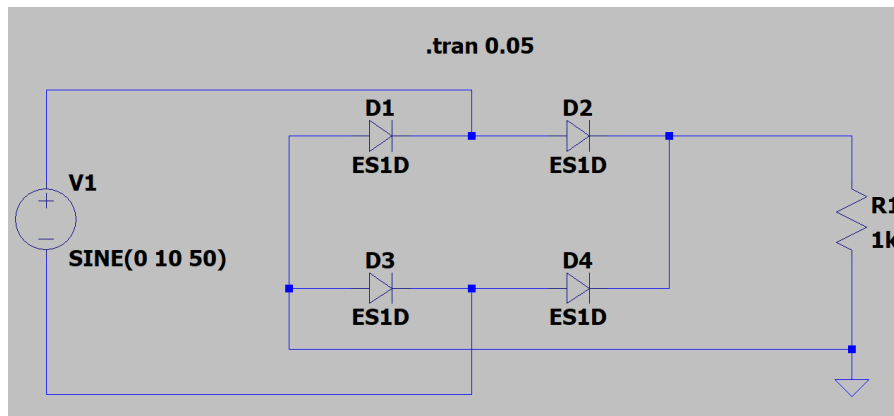


Рис. 7: Принципиальная схема для моделирования однофазного мостового выпрямителя.

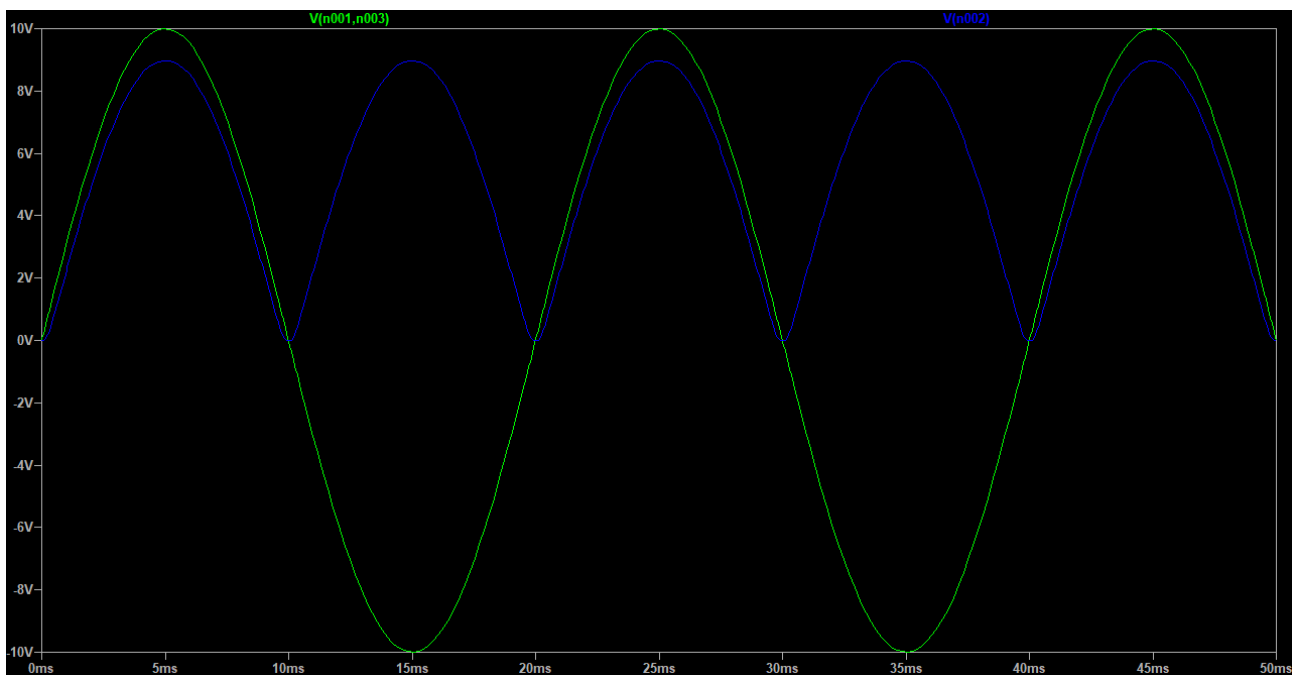


Рис. 8: Графики входного и выходного напряжений.

Максимальное мгновенное значение напряжения на выходе выпрямителя, определенное по осциллограмме  $U_{out_{max}} = 8.973$  В.

Заметим, что данное значение меньше аналогичного значения для однополупериодного выпрямителя из прошлого пункта, причиной вероятно служат бОльшие потери энергии

из-за прохождения через большее число диодов в цепи.

Средневыпрямленное значение напряжения на выходе выпрямителя:

$$U_{out_{mean}} = 2U_{out_{max}}/\pi = 5.712 \text{ В.}$$

Коэффициент пульсации однофазного однополупериодного выпрямителя  $k = \frac{2}{3}$ .

Мостовой выпрямитель эффективнее более чем в 2 раза, чем однополупериодный выпрямитель (исходя из значений коэффициента пульсации).

Период сигнала на выходе в 2 раза меньше, чем на входе.

Однако цель выпрямителя в целом - перевод переменного тока в постоянный, а на осциллограмме мы наблюдаем достаточно сильную пульсацию при смене фаз - это сильный недостаток мостового выпрямителя.

### Исследование работы однофазного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром

Сглаживающий фильтр способен уменьшить пульсации при смене фаз. Он должен пропускать постоянную составляющую выпрямленного напряжения и ослаблять его гармонические составляющие. Для этого используется параллельно подключенный относительно сопротивлению нагрузки конденсатор  $C_f$ .

Величину емкости конденсатора необходимо выбрать таким образом, чтобы выполнялось следующее соотношение (при заданном сопротивлении нагрузки):

$$\omega \cdot R_{load} \cdot C_f = 2\pi \cdot f \cdot R_{load} \cdot C_f > 1$$

В нашем случае:

$$2\pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot C_f > 1 \Rightarrow C_f > \frac{1}{100000\pi} \text{ Ф} \Rightarrow C_f > 3.183 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Итак, выберем значение  $C_f = 10 \text{ мкФ}$ .

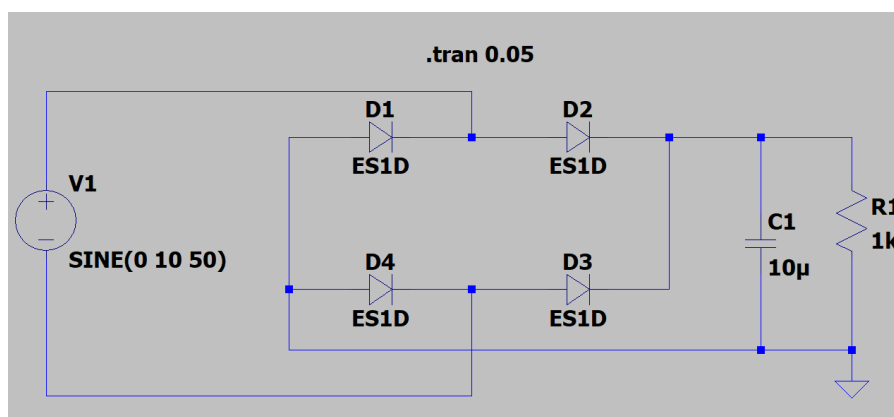


Рис. 9: Принципиальная схема для моделирования однофазного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром.

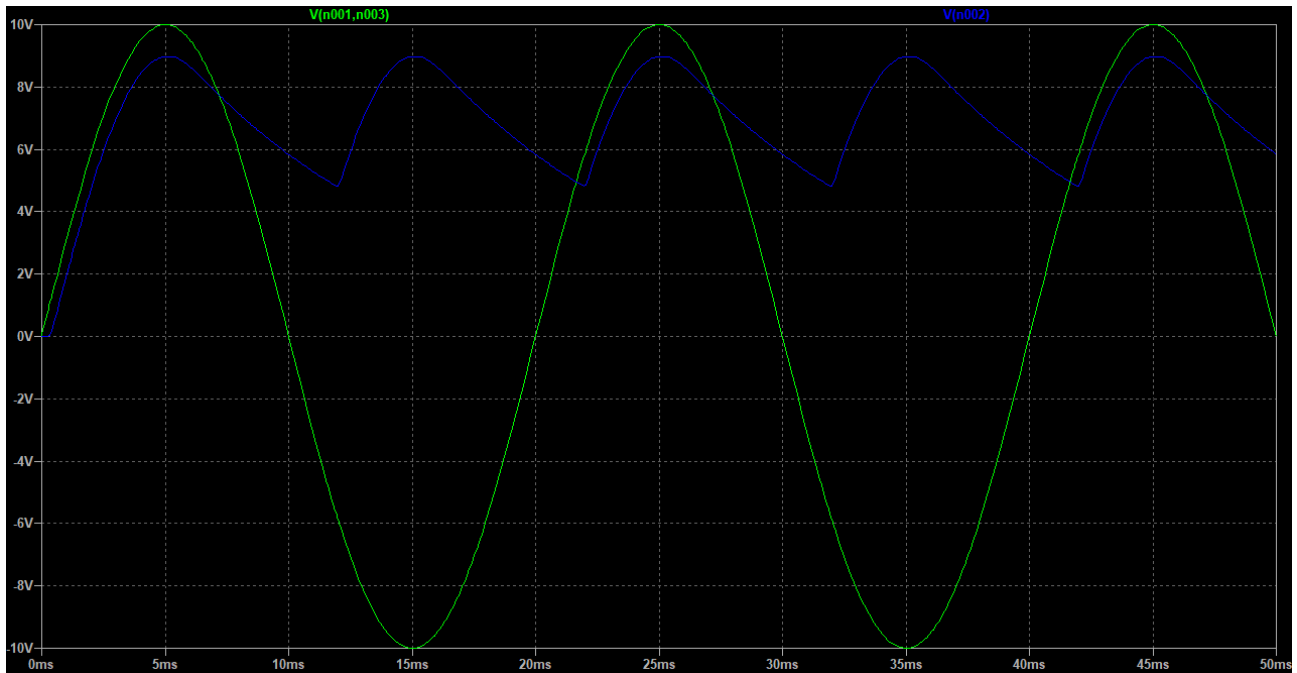


Рис. 10: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя.

Как видим, за счет присутствия конденсатора в схеме выпрямителя пульсации действительно сгладились (это происходит из-за периодического поддержания напряжения на нагрузке зарядом, накопившемся на конденсаторе до этого момента).

Максимальное и минимальное мгновенные значения напряжения на выходе выпрямителя, определенные по осциллограмме:

$$U_{out_{max}} = 8.980 \text{ В}, \quad U_{out_{min}} = 4.818 \text{ В}.$$

Максимальное значение совпадает с максимальным в случае обычного мостового выпрямителя, а вот минимальное значение, которые (мы и стремились приблизить к верхней границе) увеличилось.

Среднее значение выходного сигнала:  $U_{out_{mean}} = 6.9282 \text{ В}$ .

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0.6007$$

Работа выпрямителя с емкостным фильтром эффективнее, так как мы видим по осциллограммам более устойчивый, менее пульсирующий выходной ток по сравнению с обычным мостовым выпрямителем.

Это подтверждает и меньшее значение коэффициента пульсации (выпрямитель с фильтром эффективнее на 10%).

### Увеличенная частота входного сигнала

Увеличим частоту входного сигнала до максимально допустимой 200 Гц.



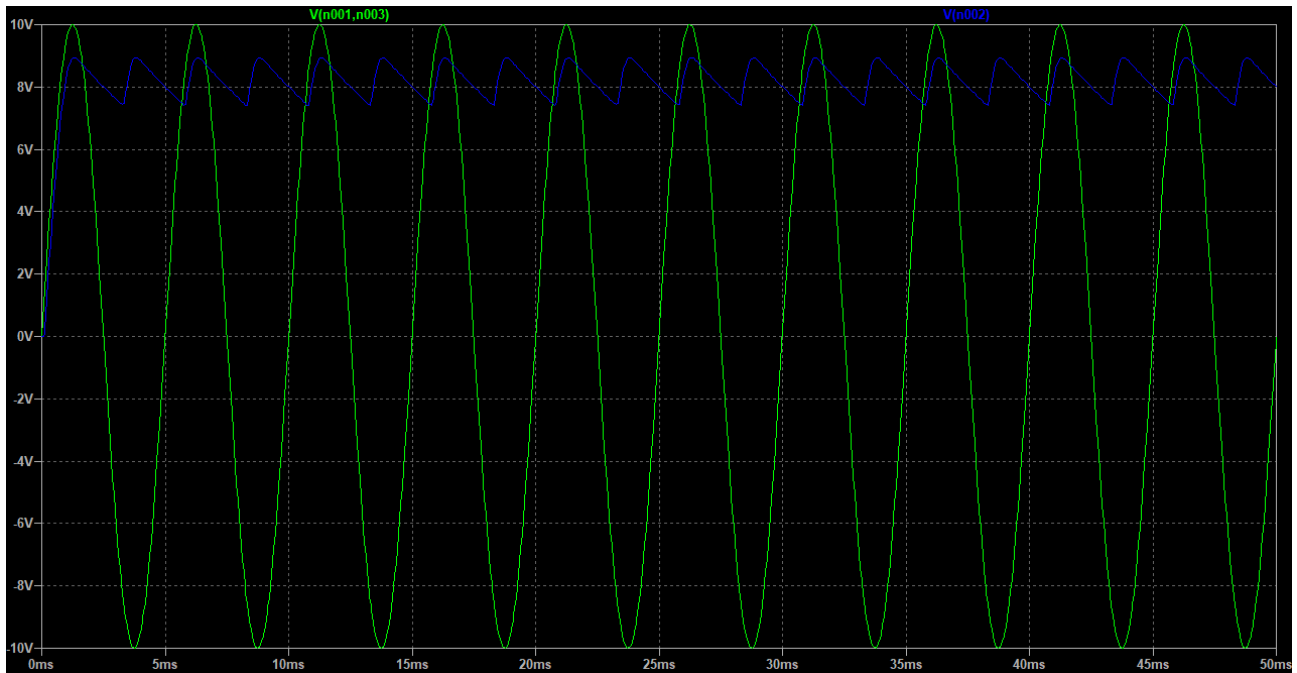


Рис. 11: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при 200 Гц.

Максимальное и минимальное мгновенные значения напряжения на выходе выпрямителя, определенные по осциллограмме:

$$U_{out_{max}} = 8.942 \text{ В}, U_{out_{min}} = 7.407 \text{ В}.$$

Среднее значение выходного сигнала:  $U_{out_{mean}} = 8.1473 \text{ В}$ .

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0.1884$$

Увеличение частоты входного сигнала положительно влияет на характер выходного тока - коэффициент пульсации снижается.

Так как мы знаем, что формула зависимости нарастания напряжения от времени заряда в конденсаторе имеет вид:

$$U = U_{out}(1 - \exp(-t/T)),$$

где  $U_{out}$  – электродвижущая сила источника,  $t$  - время заряда,  $T$  - постоянная времени, равная  $R \cdot C$ .

Следовательно, до определенной частоты конденсатор будет успевать накапливать такой же заряд (как в случае идентичной системы, но с меньшей частотой), а значит из-за бОльшей частоты смены фазы (в этот момент напряжение поддерживается за счёт зарядов, накопленных в конденсаторе) напряжение не успевает упасть так, как в системе с меньшей частотой.

### Увеличенная емкость конденсатора

Увеличим емкость конденсатора в 10 раз до 100 мкФ.

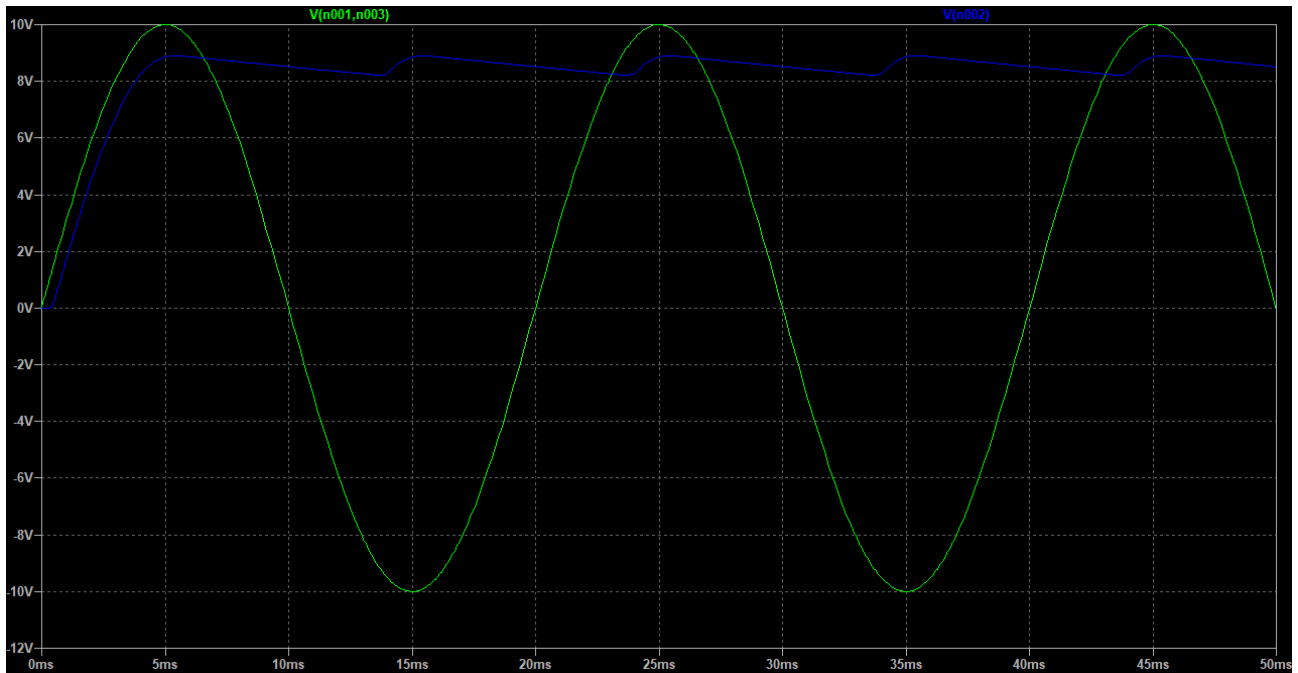


Рис. 12: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при  $C_f = 100$  мкФ.

Максимальное и минимальное мгновенные значения напряжения на выходе выпрямителя, определенные по осциллограмме:

$$U_{out_{max}} = 8.898 \text{ В}, \quad U_{out_{min}} = 8.212 \text{ В}.$$

Среднее значение выходного сигнала:  $U_{out_{mean}} = 8.2354 \text{ В}$ .

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0.0833$$

Очевидно, что при увеличении емкости конденсатора, он способен накапливать больший заряд и, следовательно, при смене фазы падение напряжения будет значительно меньше, так как оно будет поддерживаться на уровне из зарядов, накопленных на конденсаторе (конденсатор не успевает полностью разряжаться).

Следовательно мы видим достаточно хороший выпрямленный ток, практически без пульсаций.

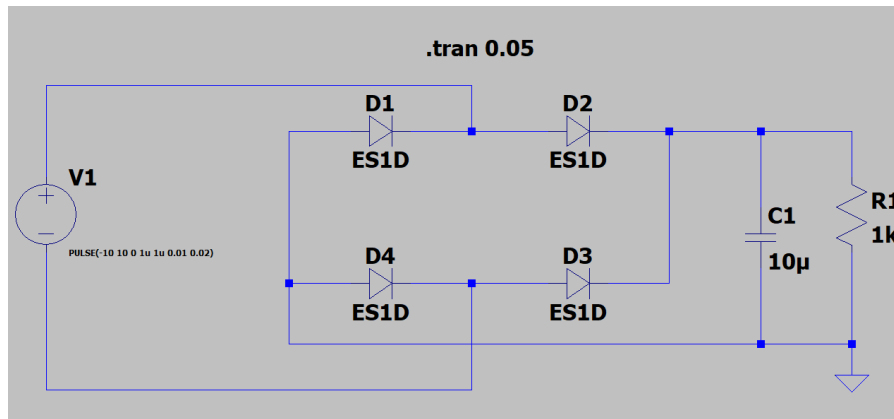


Рис. 13: Принципиальная схема для моделирования выпрямителя с прямоугольным сигналом.

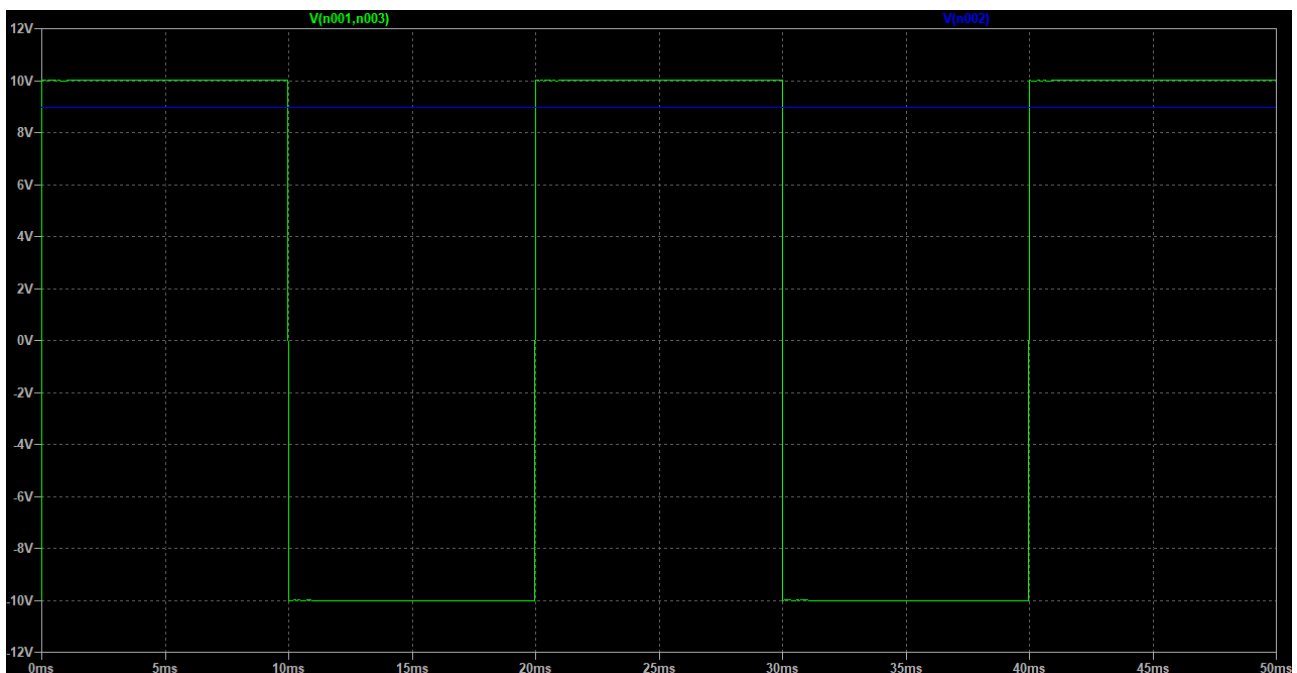


Рис. 14: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при прямоугольном сигнале.

**Прямоугольный сигнал** Максимальное, минимальное мгновенные и среднее значения напряжения на выходе выпрямителя равны:

$$U_{out_{max}} = U_{out_{min}} = U_{out_{mean}} = 8.986 \text{ В.}$$

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0$$

При данном сигнале мы получаем идеально выпрямленный ток (коэффициент пульсации 0). Это происходит, так как конденсатор успевает накопить достаточно заряда для того, чтобы скомпенсировать недостающее напряжение при смене фаз.

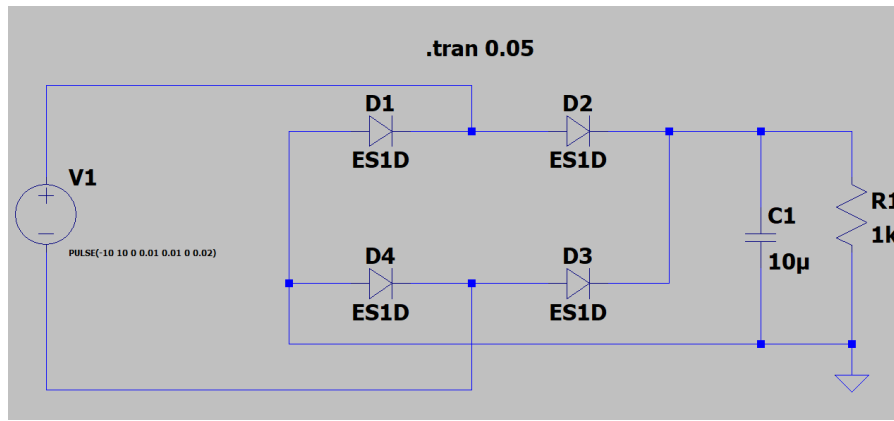


Рис. 15: Принципиальная схема для моделирования выпрямителя с треугольным сигналом.

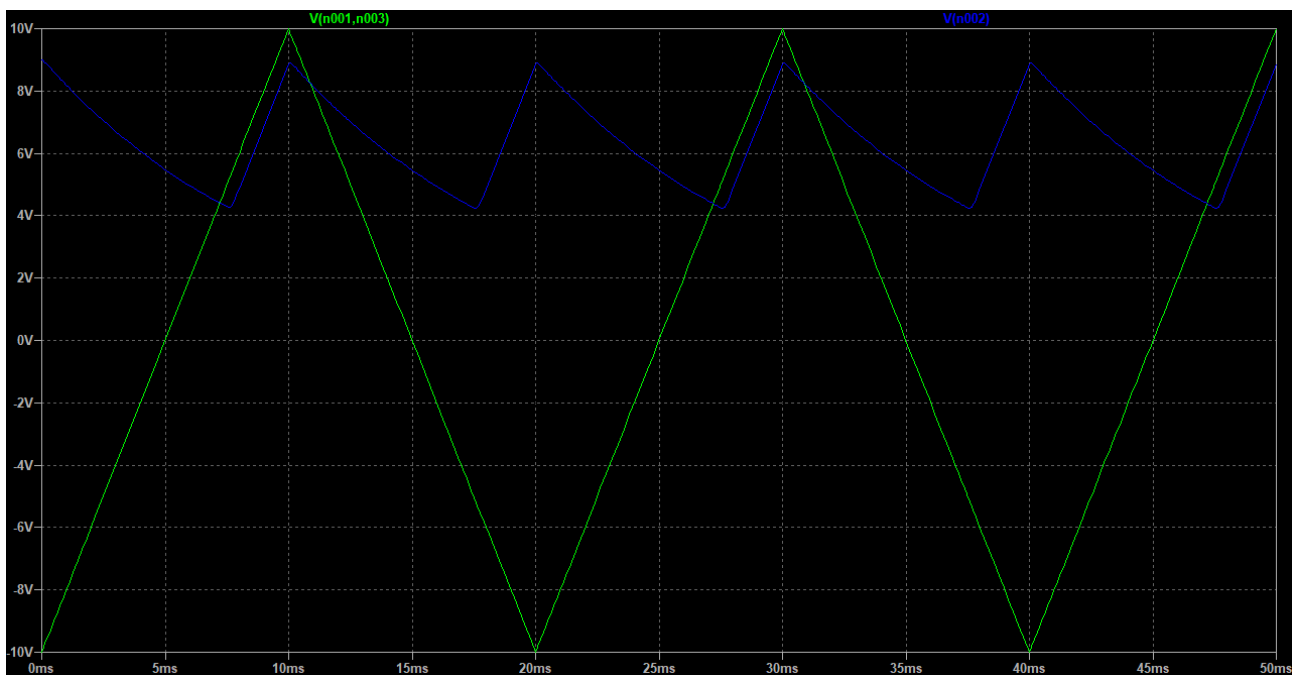


Рис. 16: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при треугольном сигнале.

**Треугольный сигнал** Максимальное и минимальное мгновенные значения напряжения на выходе выпрямителя, определенные по осциллограмме:

$$U_{out_{max}} = 8.895 \text{ В}, U_{out_{min}} = 4.236 \text{ В}.$$

Среднее значение выходного сигнала:

$$U_{out_{mean}} = 6.3495 \text{ В}.$$

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0.7336$$

Результаты данного эксперимента в целом схожи с аналогичным периодическим синусоидальным входным воздействием, однако там выпрямитель справлялся лучше (при всех аналогичных параметрах сети,  $k_{sin} = 0.6007$ ). Так как синусоидальный сигнал имеет большее среднее значение сигнала и, следовательно, конденсатор заряжается на больший заряд.

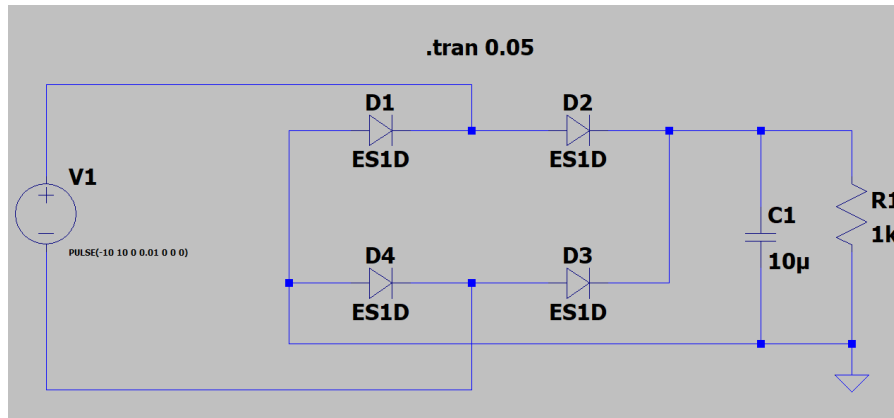


Рис. 17: Принципиальная схема для моделирования выпрямителя с пилообразным сигналом.

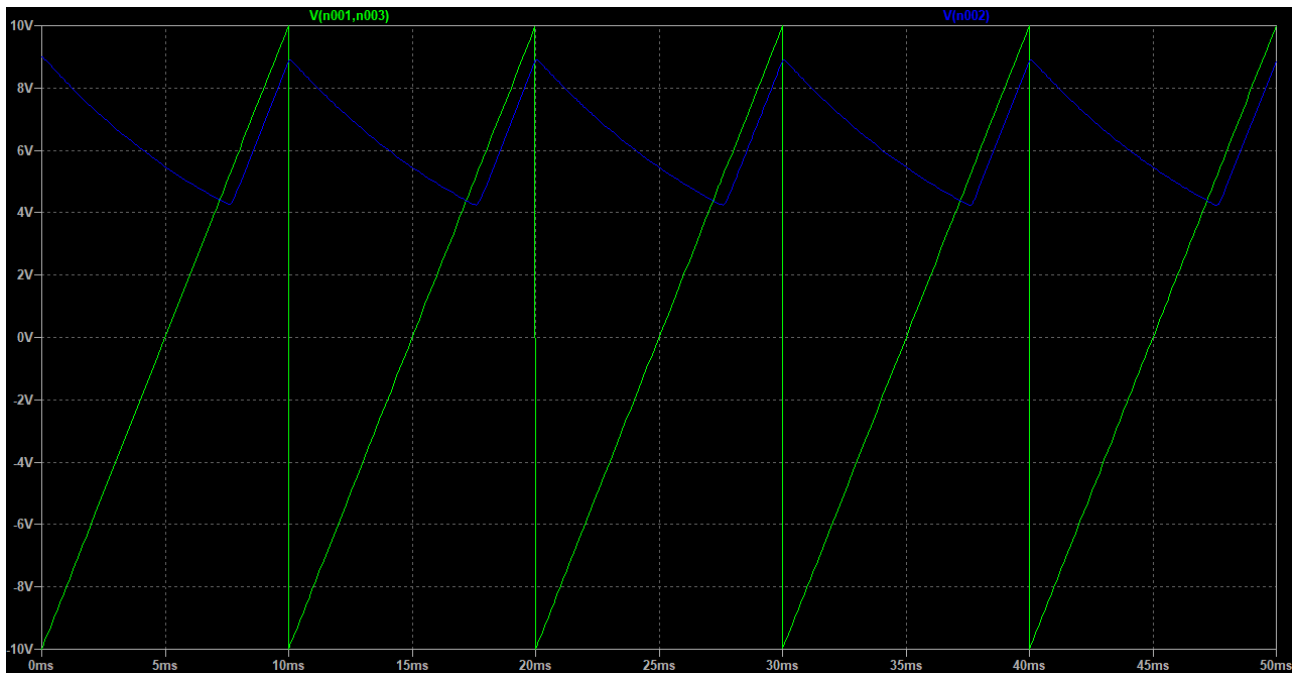


Рис. 18: Осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при пилообразным сигнале.

**Пилообразный сигнал** Максимальное и минимальное мгновенные значения напряжения на выходе выпрямителя, определенные по осциллограмме:

$$U_{out_{max}} = 8.896 \text{ В}, U_{out_{min}} = 4.241 \text{ В}.$$

Среднее значение выходного сигнала:

$$U_{out_{mean}} = 6.3496 \text{ В.}$$

Коэффициент пульсации:

$$k = \frac{U_{out_{max}} - U_{out_{min}}}{U_{out_{mean}}} = 0.7278$$

Результаты эксперимента при пилообразном сигнале практически идентичны эксперименту с треугольным сигналом.

## Выводы

В данной лабораторной работе были исследованы принципы работы выпрямительных диодов при различных параметрах.

Наиболее эффективным из рассмотренных выпрямителем является мостовой выпрямитель с емкостным сглаживающим фильтром. Оценка эффективности проводилась по значению коэффициента пульсаций  $k$  (чем меньше, тем эффективнее выпрямление тока). Работу данного выпрямителя можно улучшить увеличением емкости конденсатора.

При различных типах и частотах входного сигнала эффективность работы мостового выпрямителя с емкостным фильтром разная (при увеличении частоты входного сигнала до определенного значения эффективность возрастает).