

## Задание

1. Исследовать работу однополупериодной и двухполупериодной схем выпрямителя для случаев:
  - активной нагрузки;
  - емкостной нагрузки;
  - зарисовать форму выходного напряжения, а также форму тока, протекающего через диод.
2. Определить угол отсечки  $\varphi$  и коэффициент пульсаций  $K_p$  для одно- и двухполупериодной схем.
3. Исследовать сглаживающее действие фильтра LC при одно- и двухполупериодном выпрямлении. Определить коэффициенты сглаживания.
4. Отснять нагрузочные характеристики выпрямителя и определить его выходное сопротивление.
5. Подключить к выпрямителю параметрический стабилизатор, снять нагрузочную характеристику стабилизатора и определить по ней его выходное сопротивление, определить коэффициент стабилизации (схема выпрямителя мостовая, фильтр-LC отключен).

### Исходные данные

Таблица 1 – Исходные данные

$R_1 = R_H$	1000 Ом
$R_2 = R_6$	1000 Ом
C2	20 мкФ
L1	0,5 Гн
C1	20 мкФ
$r_6$ (стабилитрона)	2 Ом
U ст	12 В
$r_6$ диода	1 Ом
Материал выпр. диода	Si
$f_{вх}$	400 Гц
$U_{вх}$	25 В

## Однополупериодный выпрямитель без фильтра

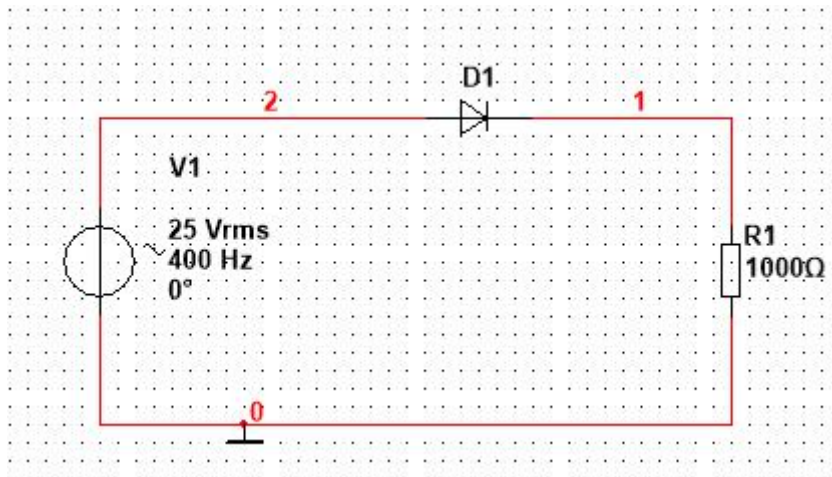


Рисунок 1.1 – Схема однополупериодного выпрямителя без фильтра

Проведем анализ переходных процессов для схемы однополупериодного выпрямителя без фильтра.

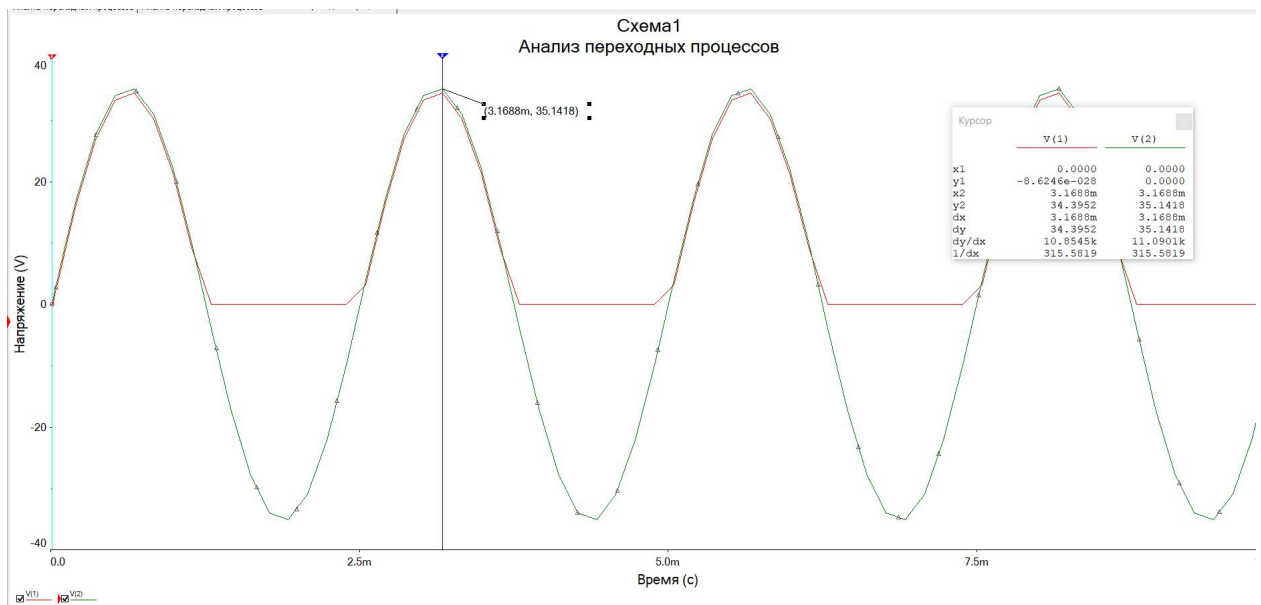


Рисунок 1.2 – Анализ переходных процессов

1. Постоянная составляющая напряжения вычисляется следующим образом:

$$U_0 = \frac{U_{\text{ампл}}}{\pi}$$

2. Так как  $U_{\text{действ}}$  дано из условия, можно вычислить  $U_{\text{ампл}}$ :

$$U_{\text{ампл}} = \sqrt{2} * U_{\text{действ}} = \sqrt{2} * 25 = 35,36 \text{ В}$$

$$U_0 = \frac{U_{\text{ампл}}}{\pi} = \frac{35,36}{\pi} = 11,25 \text{ В}$$

3. Далее определим коэффициент пульсации, используя формулу:

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{m1}}}{U_0}$$

$U_{\text{m1}}$  – амплитуда первой гармоники на выходе, для ее нахождения проведем анализ Фурье:

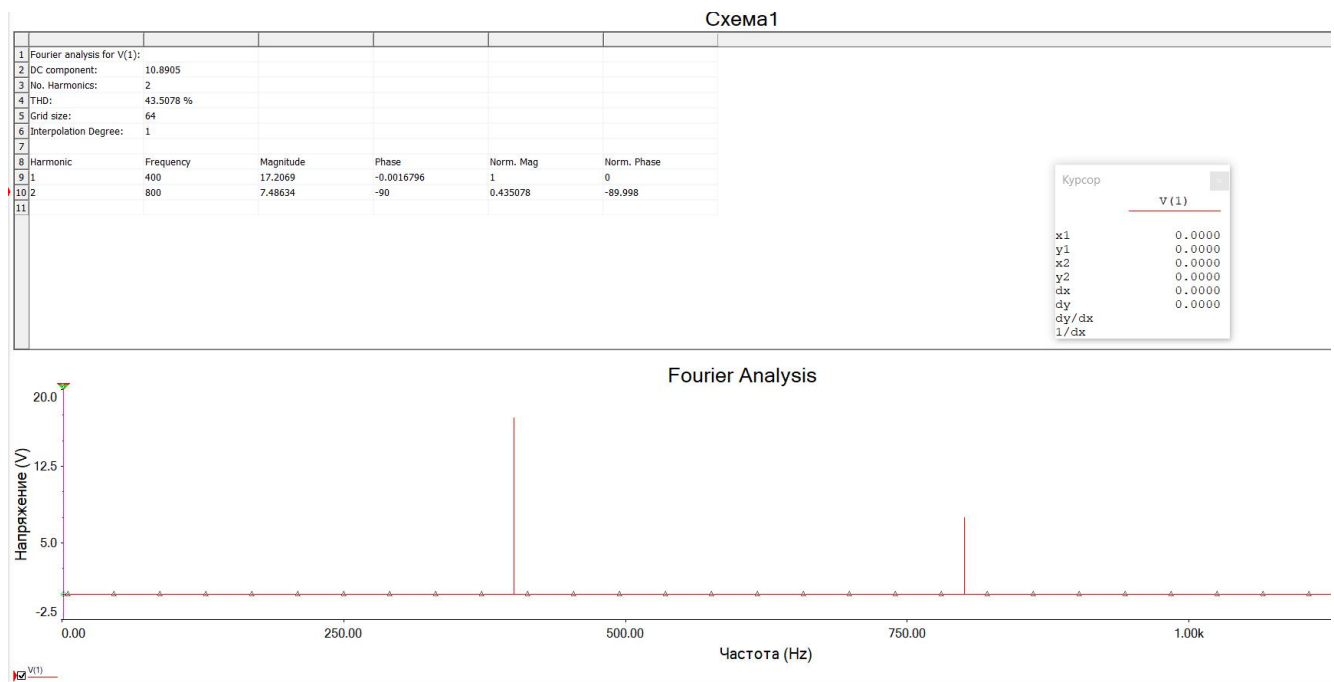


Рисунок 1.3 – Анализ переходных процессов

Из результатов анализа Фурье амплитуда первой гармоники на выходе

$U_{\text{m1}} = 17,2 \text{ В}$ , а также постоянная составляющая напряжения  
 $U_0 = \text{DC} = 10,9$

4. Коэффициент пульсации из анализа Фурье:

$$K_{\Pi} = \frac{17,2}{10,9} = 1,58$$

Коэффициент пульсации с  $U_0$ , полученным по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{17,2}{11,25} = 1,53$$

Точное значение коэффициента пульсации для данной схемы должно быть равно  $K_{\Pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57$ . Следовательно, более точным является значение коэффициента, посчитанное с использованием значений, полученных из анализа Фурье.

5. Среднее значение выпрямленного тока:

$$I_{cp} = \frac{U_0}{R_H} = \frac{10,9}{1000} = 0,0109 \text{ A}$$

6. Амплитудное значение тока через диод:

$$I_{max} = \frac{U_{ампл}}{R_H} = \frac{35,36}{1000} = 0,03536 \text{ A}$$

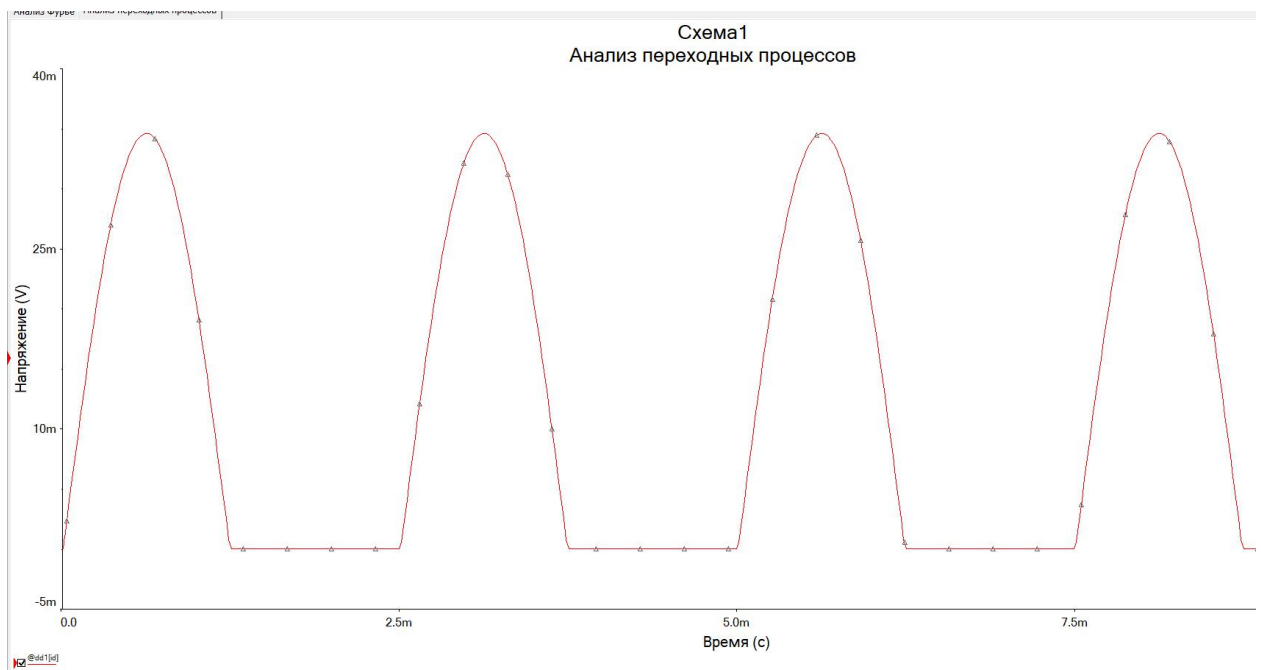


Рисунок 1.4 – График формы тока однополупериодной схемы без фильтра

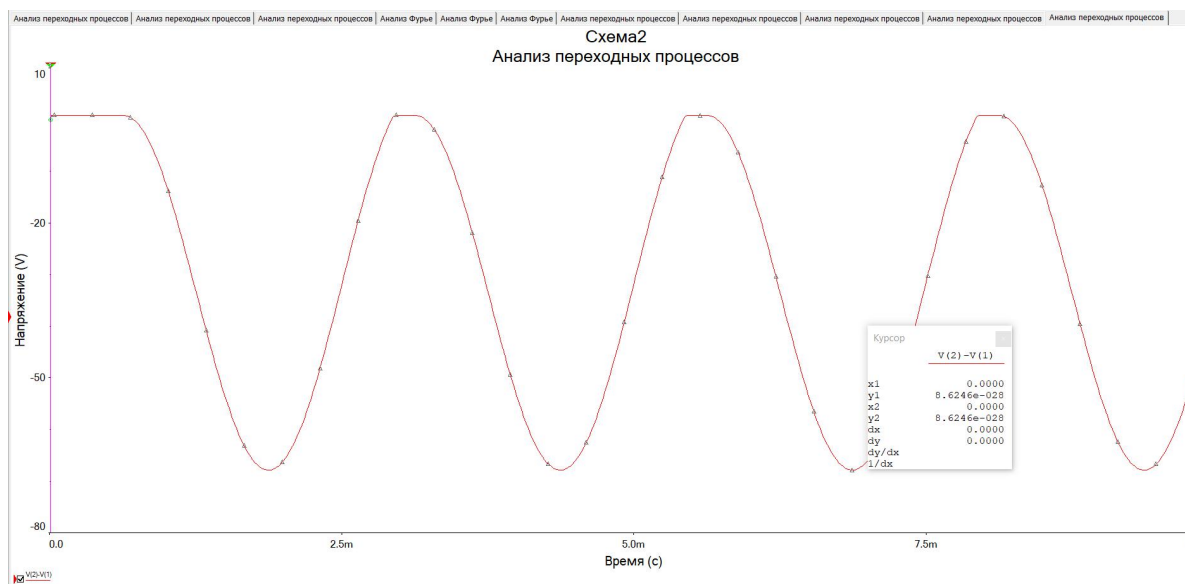


Рисунок 1.5 – График обратных напряжений на диоде

### Однополупериодный выпрямитель с фильтром

К исходной схеме параллельно нагрузочному резистору добавлен конденсатор C1.

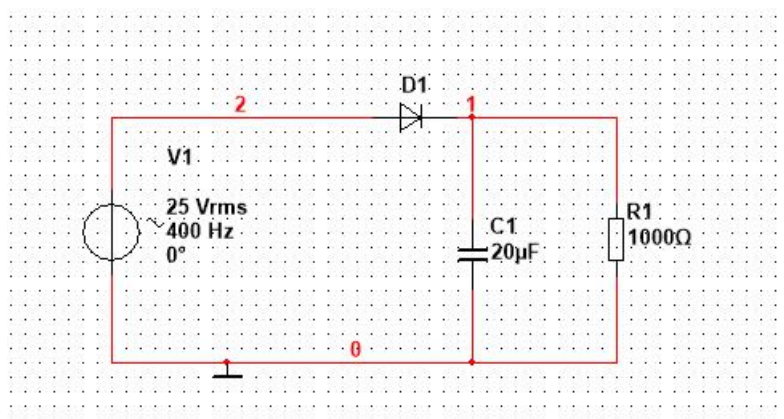


Рисунок 2.1 – Схема однополупериодного выпрямителя с фильтром

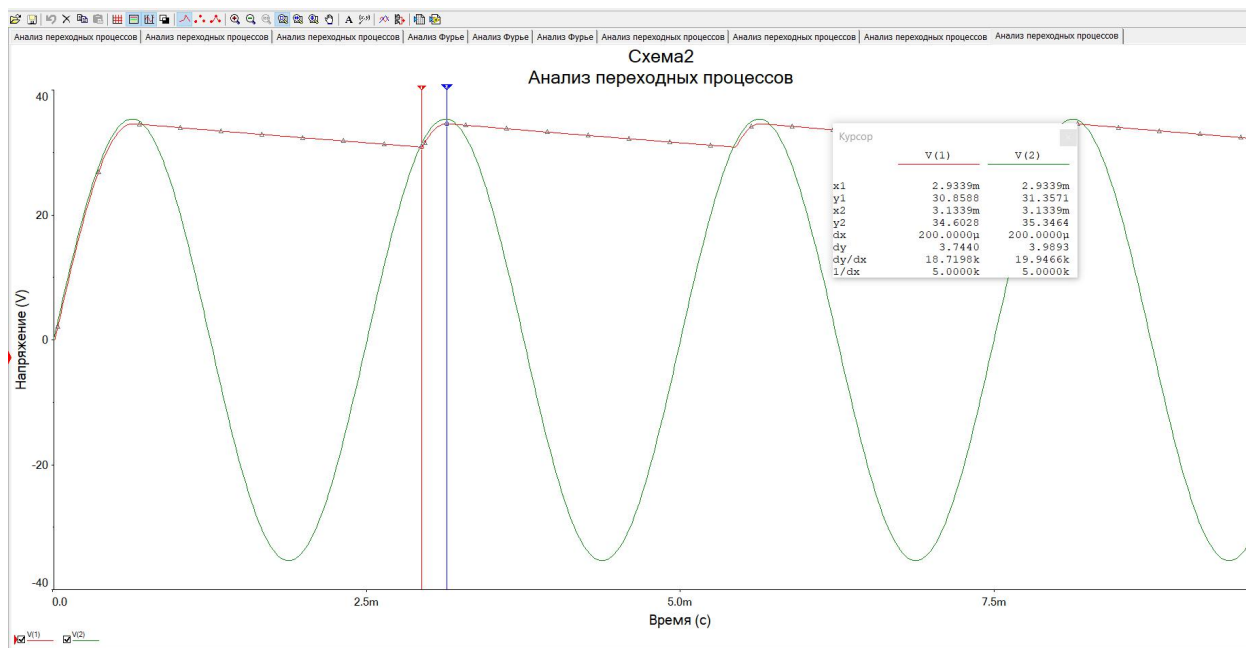


Рисунок 2.2 – Анализ переходных процессов однополупериодного выпрямителя с фильтром

1. Можно определить угол отсечки  $\theta$ .

Из графика видно, что  $t_1 = 2,9339$  мс, а  $t_2 = 3,1339$  мс.

$$\theta = \omega * \frac{t_2 - t_1}{2} = \pi * 400 * 2 * 0,1 = 251,33 \text{ рад}$$

2. Вычислим  $U_0$  по следующей формуле:  $U_0 = U_{\text{ампл}} * \cos \theta$

$$U_0 = 35,355 * \cos(251,33) = 35,3549 \text{ В}$$

3. Чтобы определить коэффициент пульсации  $K_{\Pi}$  выполним анализ Фурье на нагрузке:

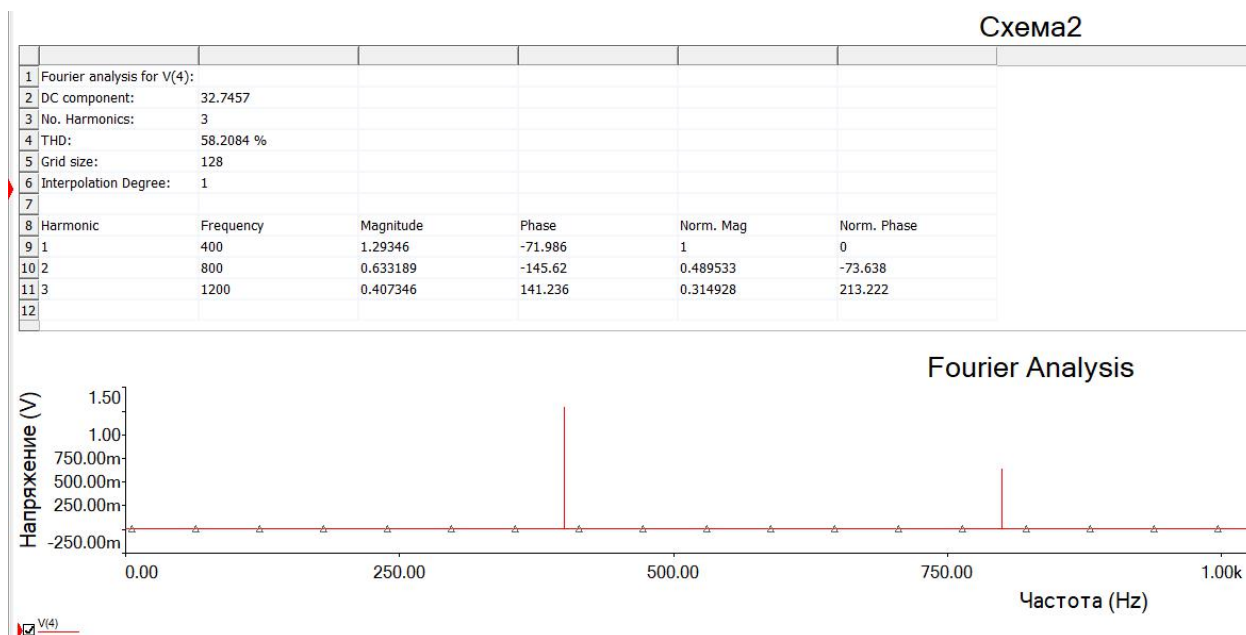


Рисунок 2.3 – Анализ Фурье однополупериодного выпрямителя с фильтром

Исходя из анализа Фурье,  $U_{m1} = 1,29346$  В, а  $DC=U_0= 32,7457$  В

Теперь вычислим коэффициент пульсации:

- $U_0 = 32,7457$  В (значение, полученное из анализа Фурье)

$$K_{\Pi} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{1,29346}{32,7457} = 0,0395$$

- $U_0 = 35,3549$  В (значение, полученное по формуле)

$$K_{\Pi} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{1,29346}{35,3549} = 0,03658$$

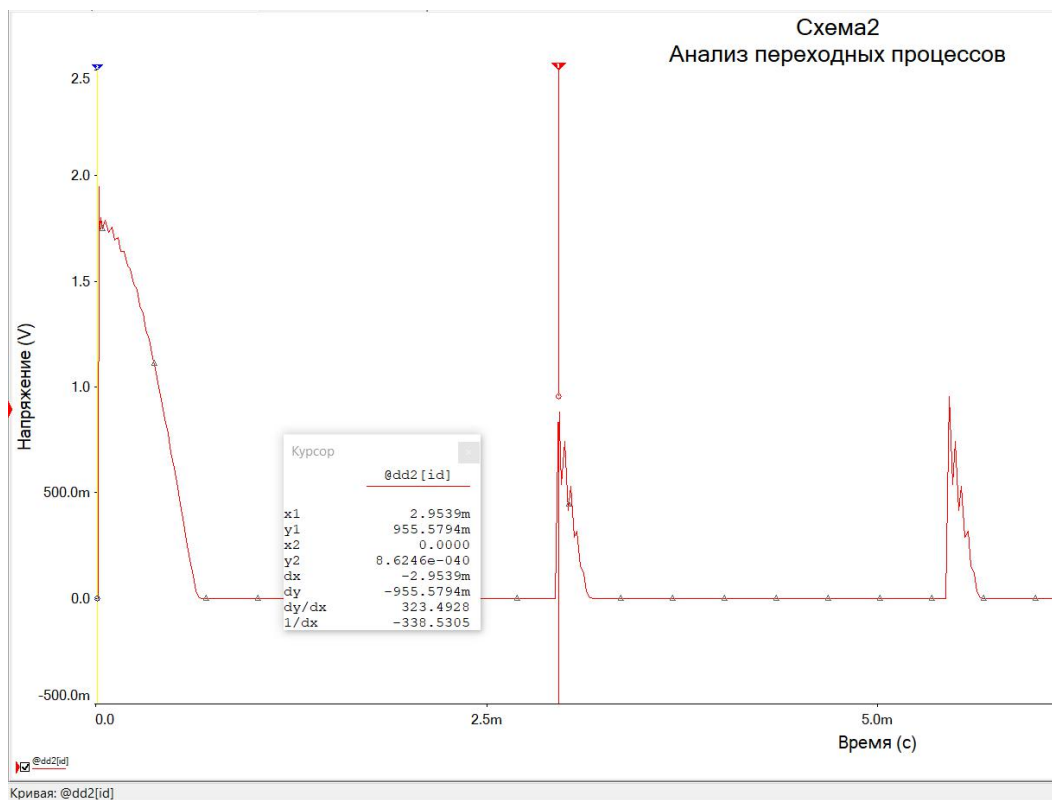


Рисунок 2.4 – График формы тока однополупериодной схемы с фильтром

Определяем амплитудное значение тока через диод

$$I_{\text{амп}} = 995,5794 \text{ мА}$$

Также рассмотрим график формы обратных напряжений на диоде.

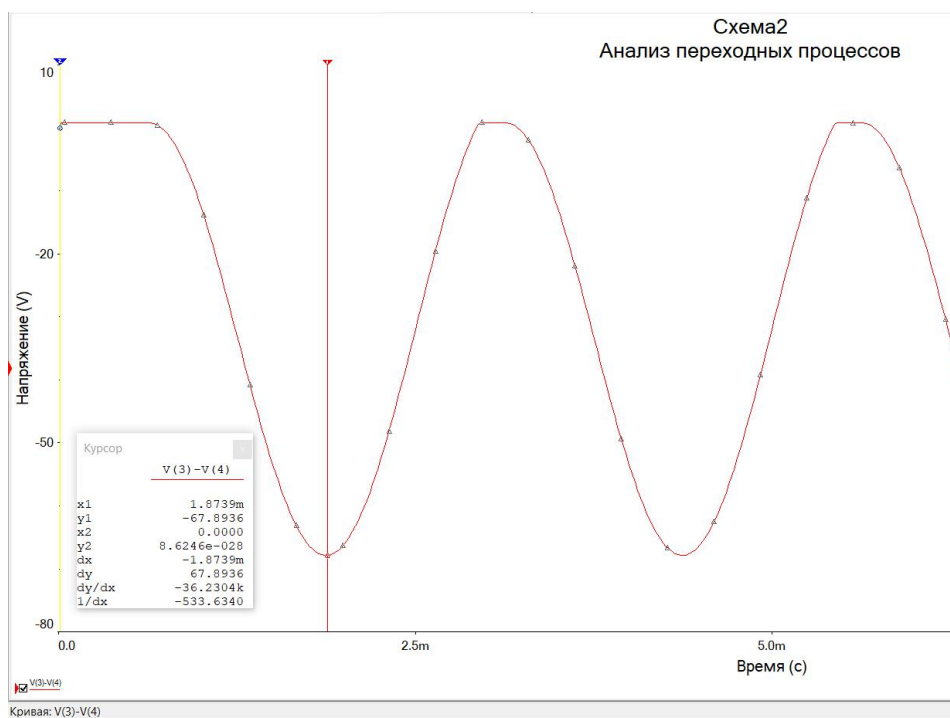




Рисунок 2.5 – График обратных напряжений на диоде

Из графика обратных напряжений видно, что обратное напряжение на диоде  $|U_{обр}| = 67,8936 \text{ В}$ . Следовательно, расчетные данные верны, так как полученное значение не больше удвоенного значения амплитудного напряжения.

### Мостовой выпрямитель без фильтра

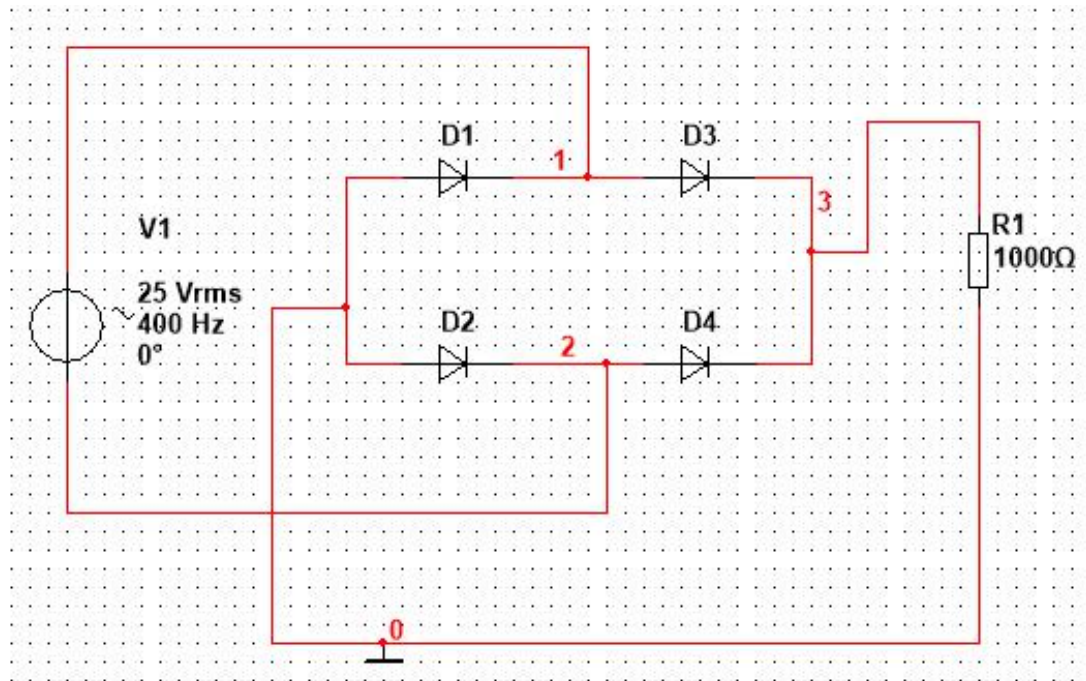


Рисунок 3.1 – Схема мостового выпрямителя без фильтра

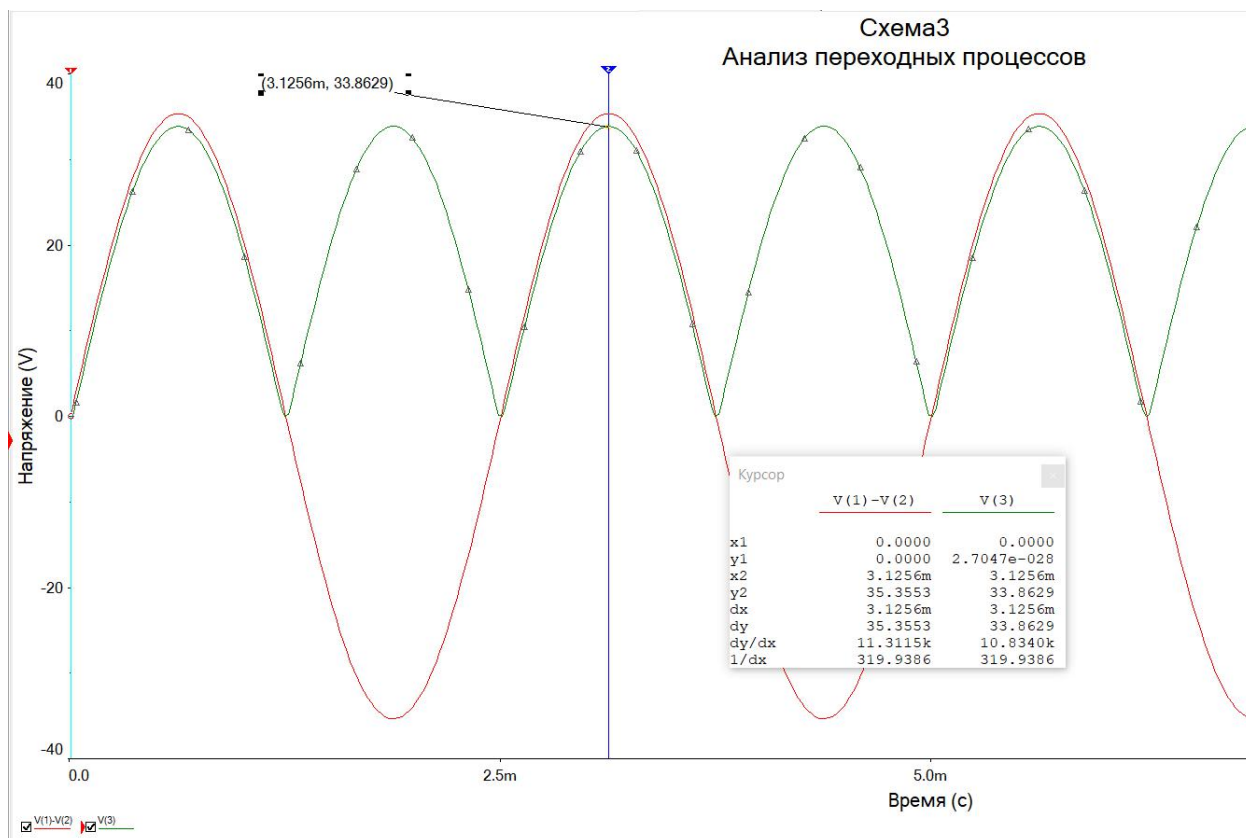


Рисунок 3.2 – Анализ переходных процессов мостового выпрямителя без фильтра

По графику видим, что  $U_{\text{Вых}} = 33,8629 \text{ В}$ .

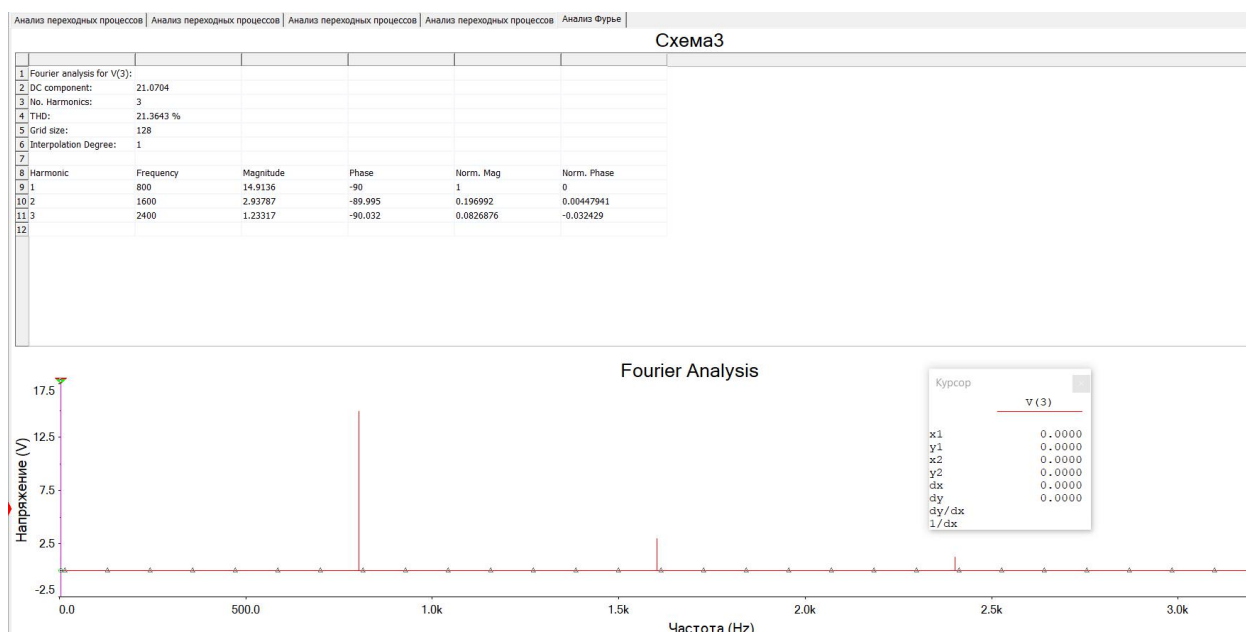


Рисунок 3.3 – Анализ Фурье мостового выпрямителя без фильтра

Для нахождения постоянной составляющей напряжения  $U_0$  данного выпрямителя воспользуемся формулой:

$$U_0 = 2 * \frac{U_{\text{ампл}}}{\pi} = 22,5 \text{ В}$$

Теперь при помощи анализа Фурье определим амплитуду первой гармоники  $U_{m1}$ . Также сравним значение DC-компонент и вычисленное значение  $U_0$ . Для мостового выпрямителя анализ Фурье будем проводить на удвоенной частоте, то есть на частоте равной 800 Гц.

Исходя из анализа Фурье,  $U_{m1} = 14,9136 \text{ В}$  и  $U_0 = 21,0754 \text{ В}$ .

Теперь для каждого значения  $U_0$  рассчитаем коэффициент пульсации  $K_{\text{п}}$ :

- $U_0 = 21,0754 \text{ В}$  (значение, полученное из анализа Фурье)

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{14,9136}{21,0754 \text{ В}} = 0,7076$$

- $U_0 = 22,5 \text{ В}$  (значение, полученное по формуле)

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{14,9136}{22,5} = 0,6628$$

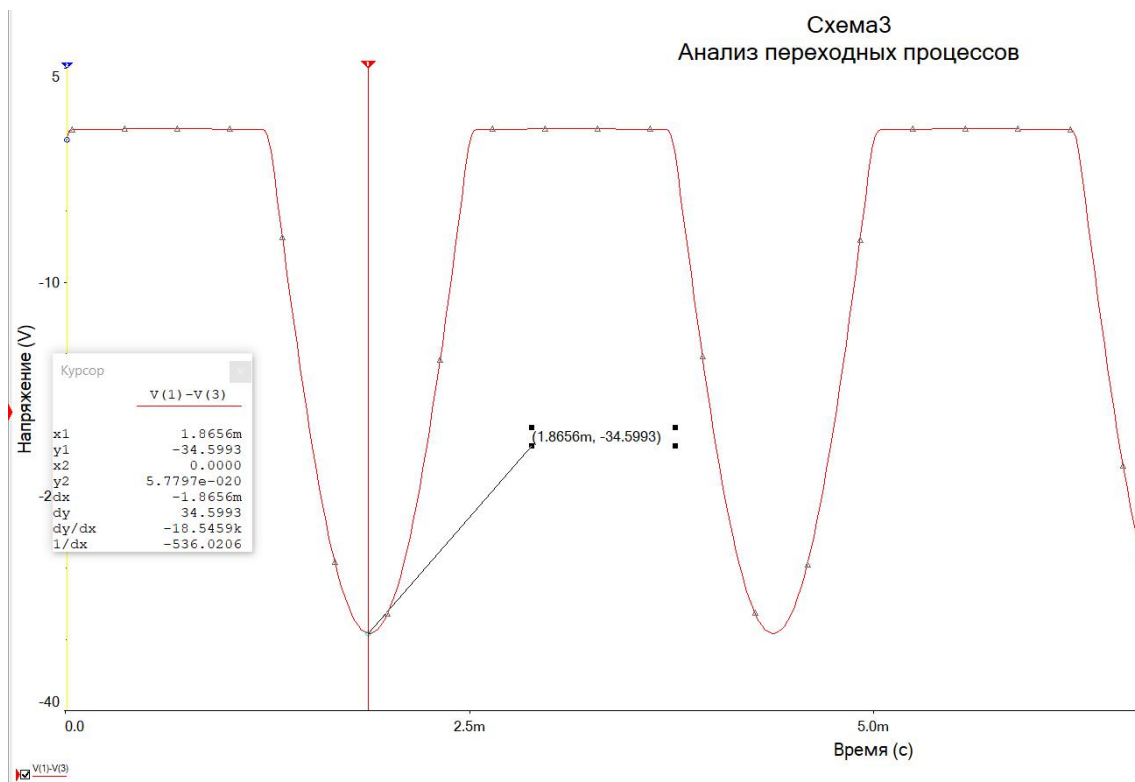


Рисунок 3.4 – График обратных напряжений на диоде

### Мостовой выпрямитель с фильтром

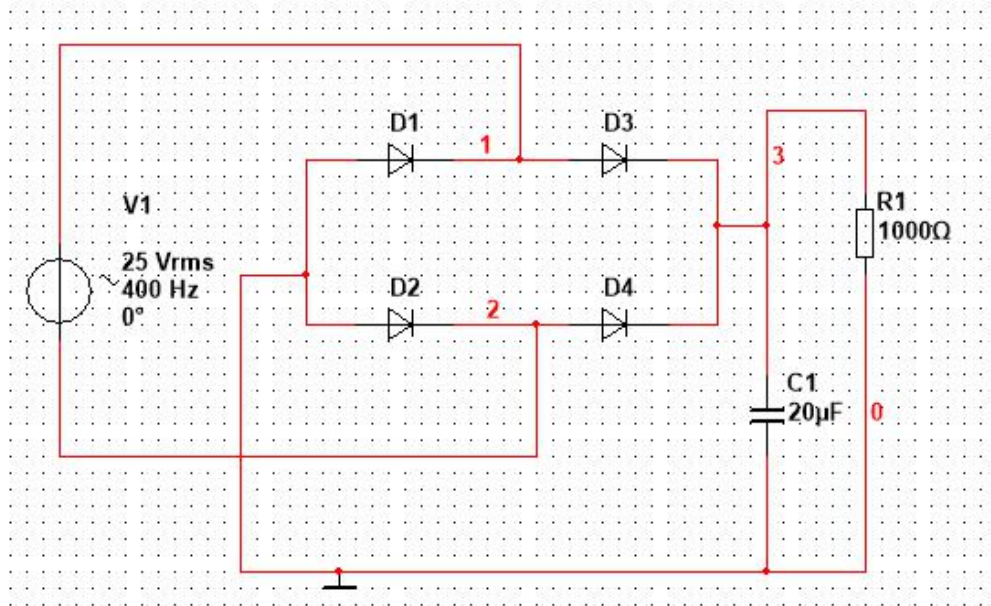


Рисунок 4.1 – Схема мостового выпрямителя с фильтром

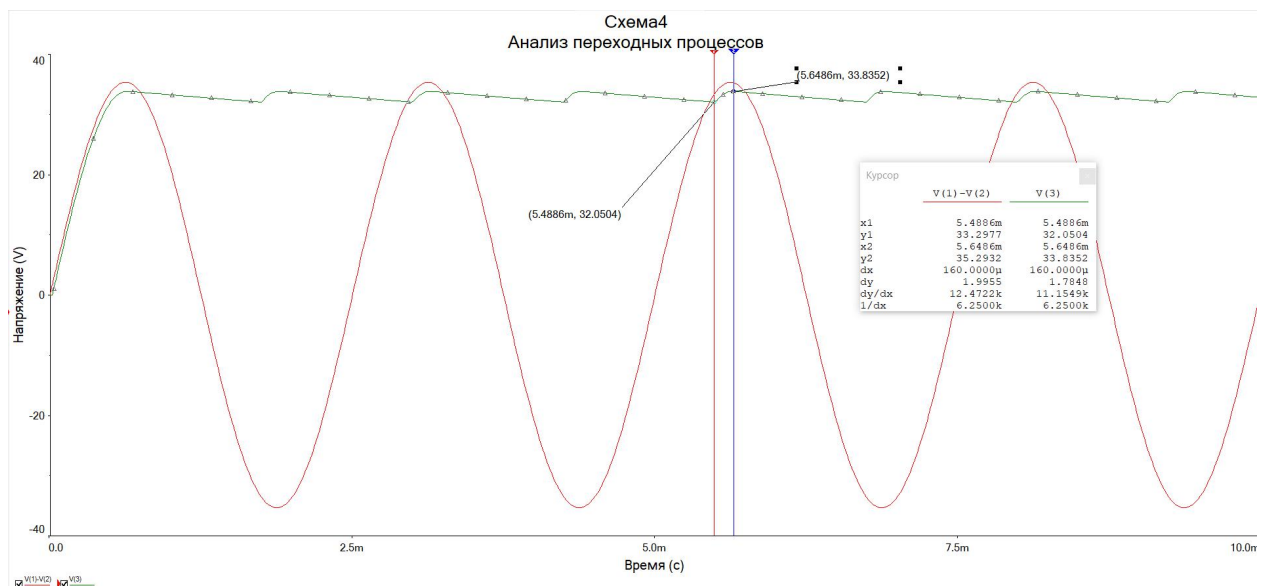


Рисунок 4.2 – График формы напряжений для мостового выпрямителя с фильтром

Из графика видно, что  $t_1 = 5,4886$  мс, а  $t_2 = 5,6486$  мс.

Чтобы определить коэффициент пульсации  $K_p$  выполним анализ Фурье на нагрузке:

Схема4

1	Fourier analysis for V(3):				
2	DC component:	32.969			
3	No. Harmonics:	4			
4	THD:	59.3669 %			
5	Grid size:	128			
6	Interpolation Degree:	1			
7					
8	Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag
9	1	800	0.645613	-157.66	1
10	2	1600	0.307876	44.0352	0.476874
11	3	2400	0.189592	-113.62	0.293662
12	4	3200	0.127165	89.5255	0.196968
13					

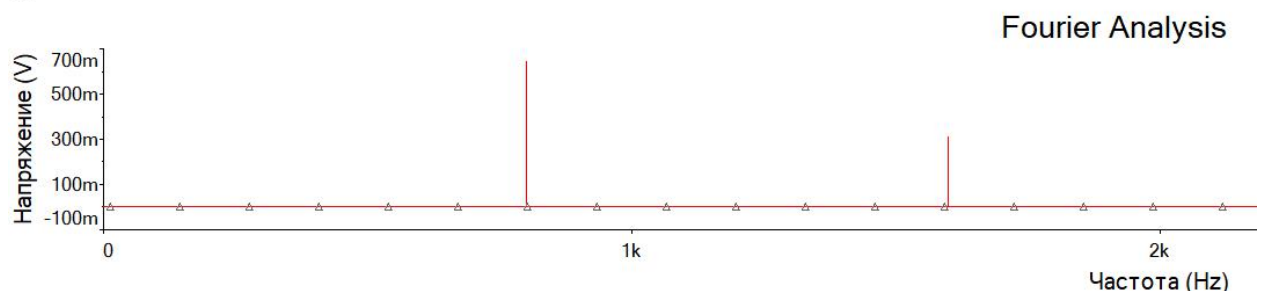


Рисунок 4.2 – График формы напряжений для мостового выпрямителя с фильтром

Исходя из анализа Фурье,  $U_{m1} = 0,645613$  В, а  $DC=U_0=32,969$  В

Перейдем к расчетам:

Определим угол отсечки:  $\theta = \frac{\omega \cdot (t_2 - t_1)}{2} = \frac{2\pi \cdot f_{\text{ВХ}} \cdot (t_2 - t_1)}{2}$

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot 400 \cdot (5,6486 - 5,4886) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,00098 \text{ рад}$$

Вычислим  $U_0$  по следующей формуле:

$$U_0 = U_{\text{ампл}} \cdot \cos \theta$$

$$U_0 = 35,355 \cdot \cos(0,00098) = 35,354983 \text{ В}$$

Видно, что, как и в предыдущей схеме, значение  $U_0$ , вычисленное по формуле, практически совпадает (с учетом погрешности) со значением, полученным из анализа Фурье.

Теперь вычислим коэффициент пульсации:

- $U_0 = 32,969 \text{ В}$  (значение, полученное из анализа Фурье)

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{m1}}}{U_0} = \frac{0,64561}{32,969} = 0,01958$$

- $U_0 = 35,354983 \text{ В}$  (значение, полученное по формуле)

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{m1}}}{U_0} = \frac{0,64561}{35,354983} = 0,01826$$

Приведем график формы тока двухполупериодной схемы с фильтром:

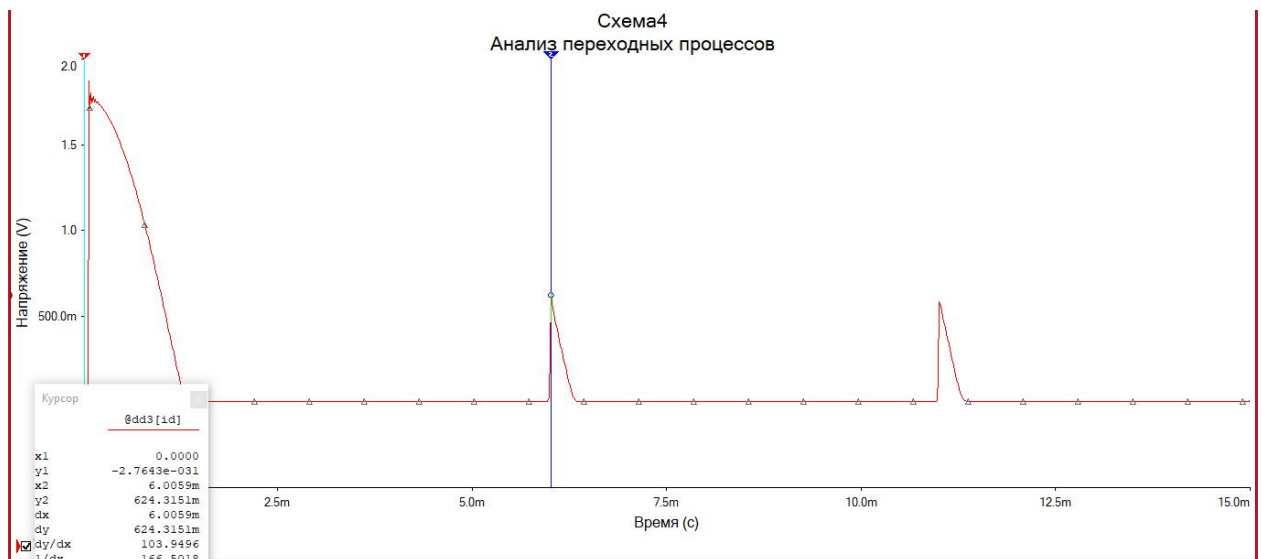


Рисунок 4.3 - График формы тока мостовой схемы с фильтром

Определяем амплитудное значение тока через диод

$$I_{\text{амп}} = 624,3151 \text{ мА}$$

Также рассмотрим график формы обратных напряжений на диоде.

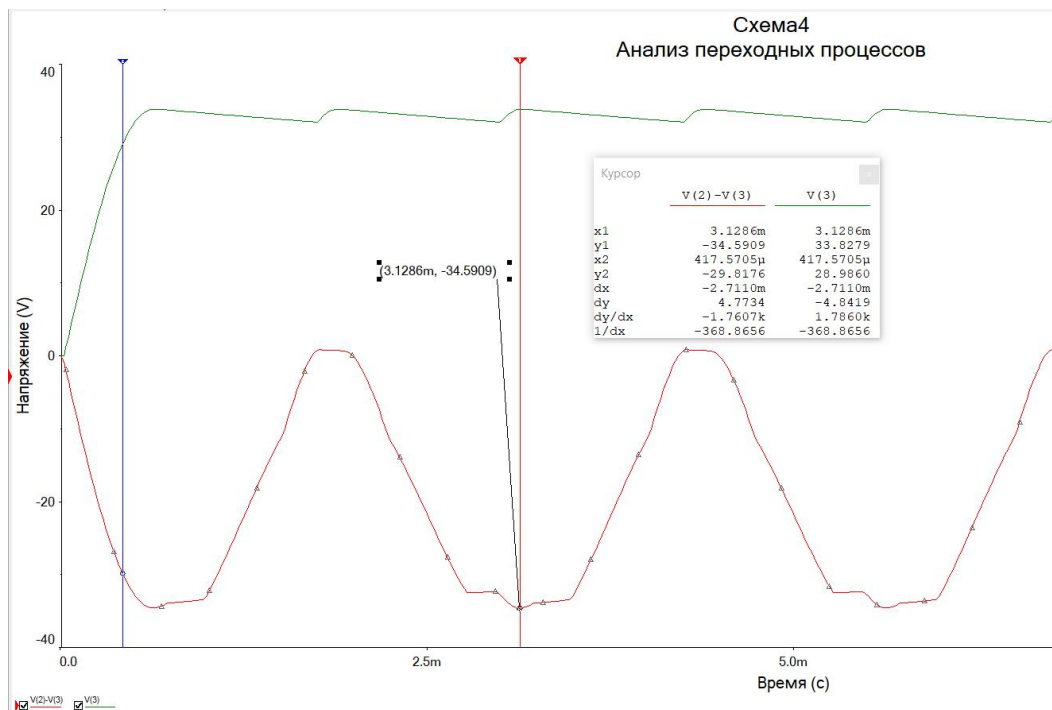


Рисунок 4.4 - График формы обратных напряжений для мостового выпрямителя с фильтром

Из графика обратных напряжений видно, что обратное напряжение на диоде  $|U_{\text{обр}}| = 34,59 \text{ В}$ .

## Однополупериодный выпрямитель с П-образным фильтром

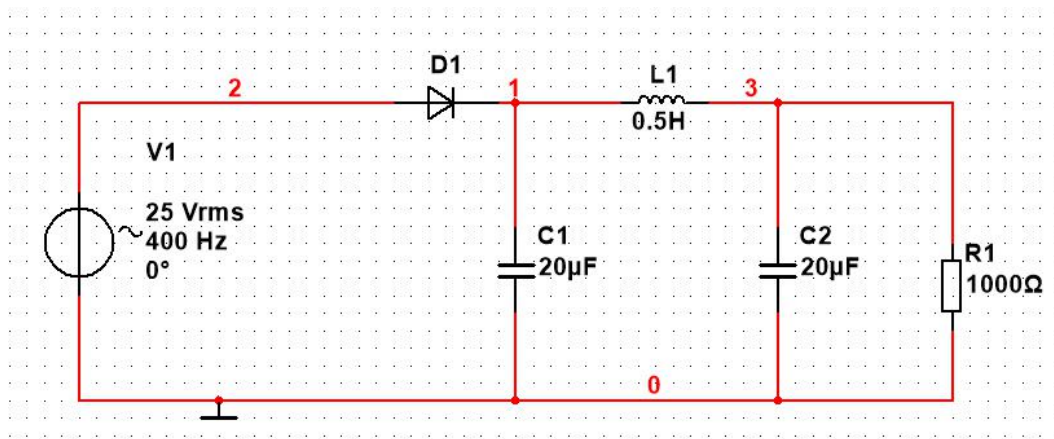


Рисунок 5.1 - Схема однополупериодного выпрямителя с П-образным фильтром

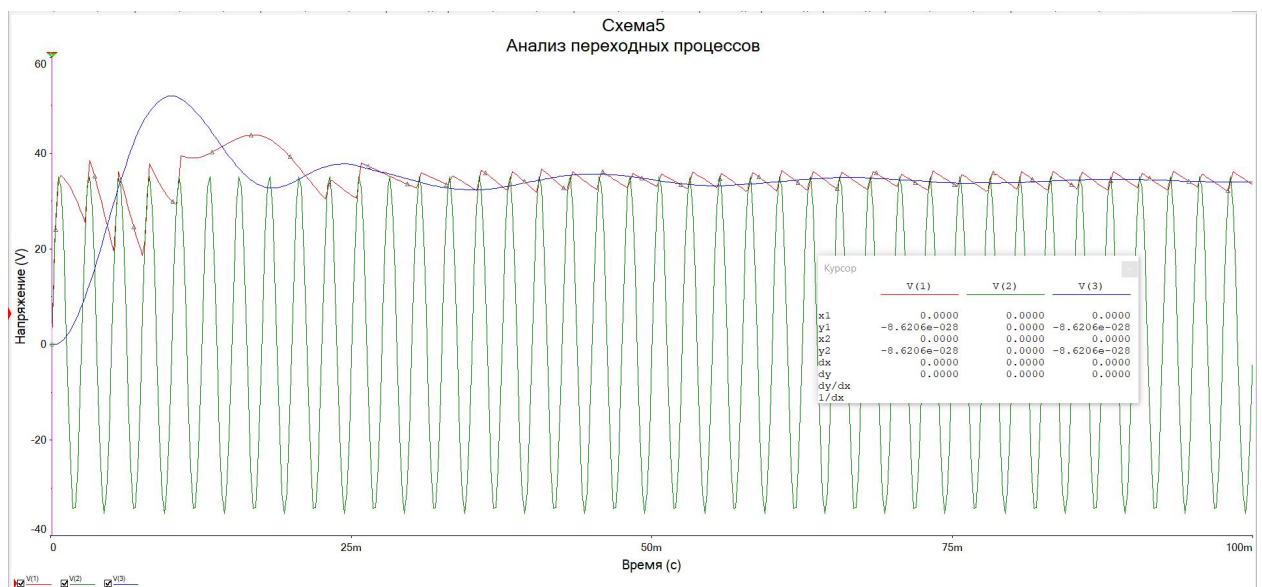


Рисунок 5.2 - Анализ переходных процессов

На графике найдем момент времени, начиная с которого переходные процессы завершатся, и значение напряжения будет относительно постоянно. Исходя из графика, переходные процессы закончатся в момент времени  $t = 50\text{мс} = 0,05\text{с}$ . Следовательно, при выполнении анализа Фурье время начала будем задавать равным  $0,05\text{с}$ .

Далее проведем анализ Фурье на входе фильтра и на нагрузке.



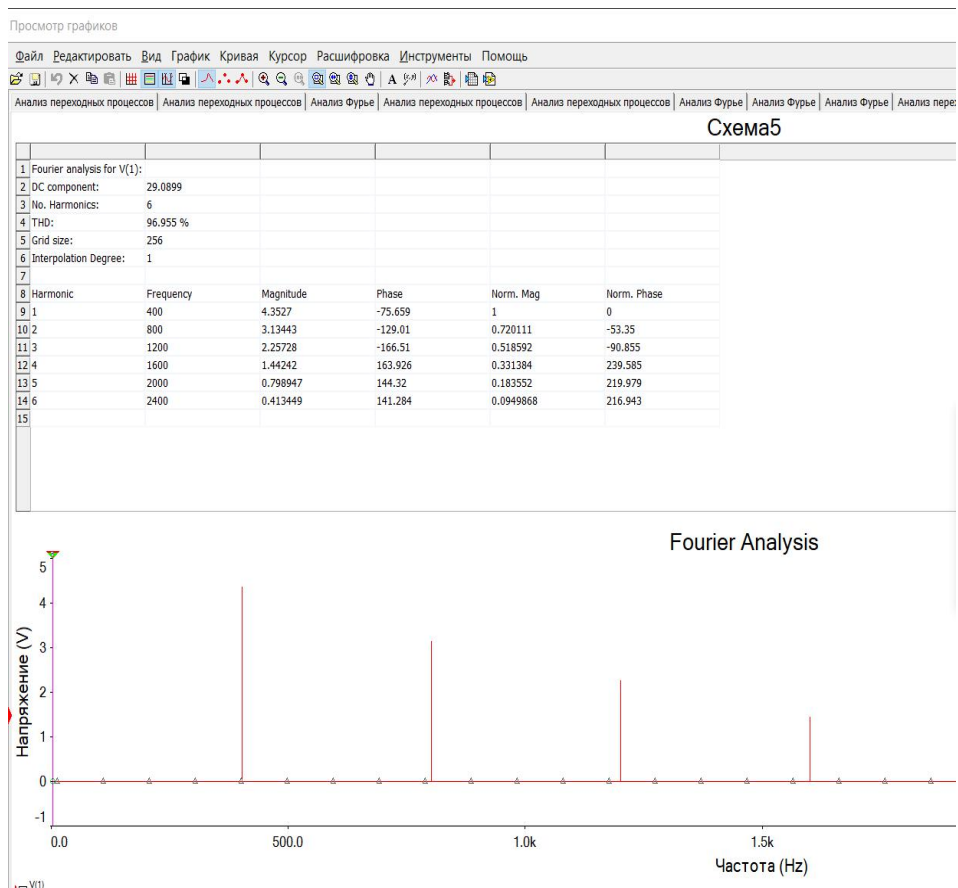


Рисунок 5.3 – Анализ Фурье на входе фильтра

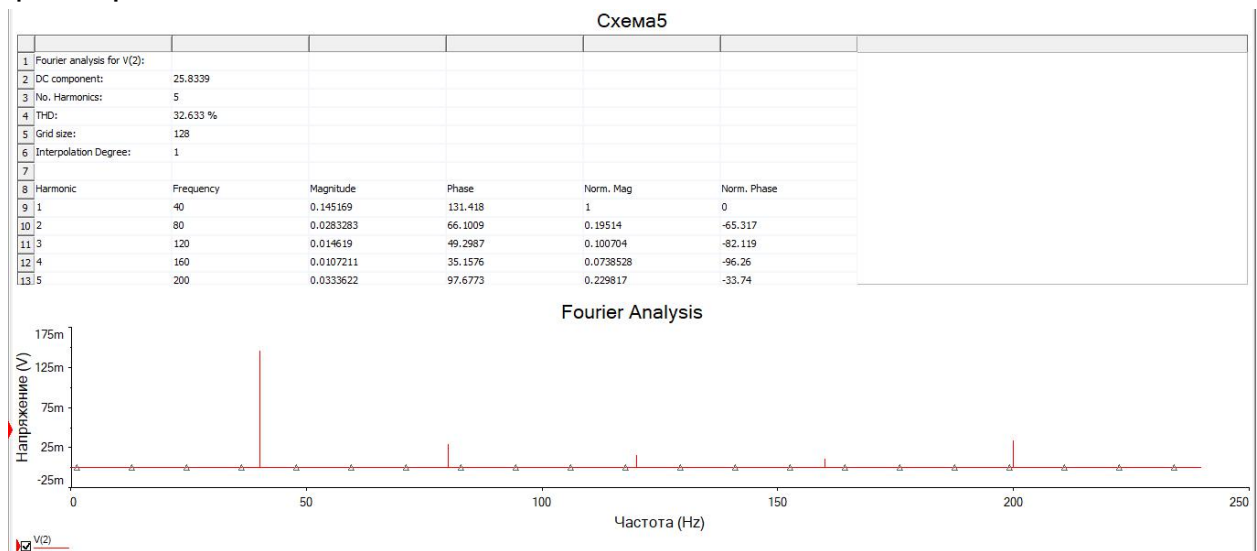


Рисунок 5.4 - Анализ Фурье на нагрузке фильтра

Вычислим коэффициенты пульсации на входе и на выходе:

- На входе в фильтр

$$U_0 = 29,08 \text{ В}; U_{m1} = 4,35 \text{ В}$$

$$K_{\pi \text{ ВХ}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{4,35}{29,08} = 0,15$$

- На выходе из фильтра

$$U_0 = 32,89 \text{ В}; U_{m1} = 0,574 \text{ В}$$

$$K_{\pi \text{ ВЫХ}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{0,574}{32,89} = 0,017$$

Теперь вычислим коэффициент сглаживания  $K_{\text{сгл}}$ :

$$K_{\text{сгл}} = \frac{K_{\pi \text{ ВХ}}}{K_{\pi \text{ ВЫХ}}} = \frac{0,15}{0,017} = 8,82$$

### Мостовой выпрямитель с П-образным фильтром

Для рассмотрения работы мостового выпрямителя с П-образным фильтром построим его схему, представленную на рисунке 23:

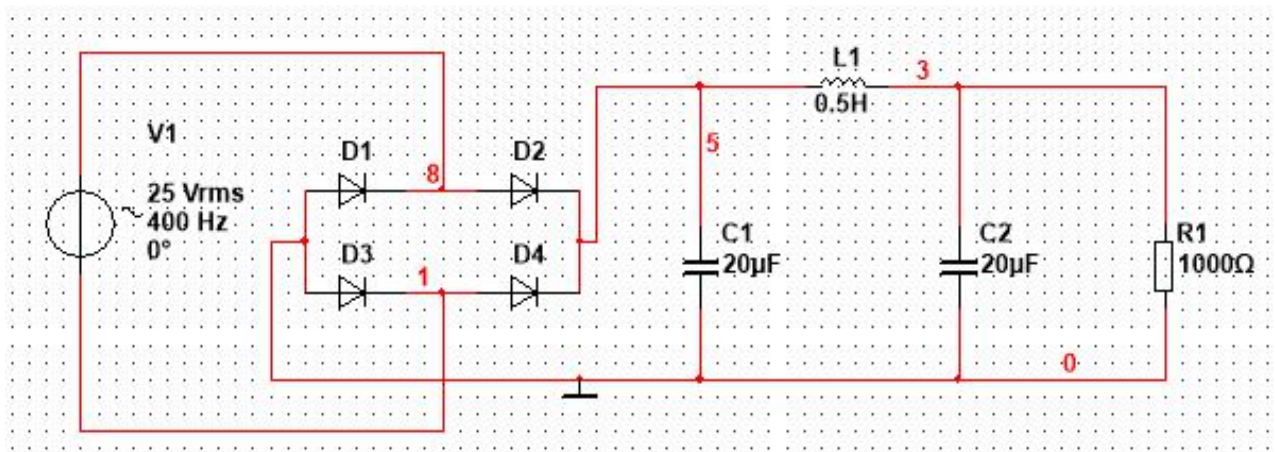


Рисунок 6.1 - Схема мостового выпрямителя с П-образным фильтром

Проведем анализ переходных процессов для схемы мостового выпрямителя с фильтром:

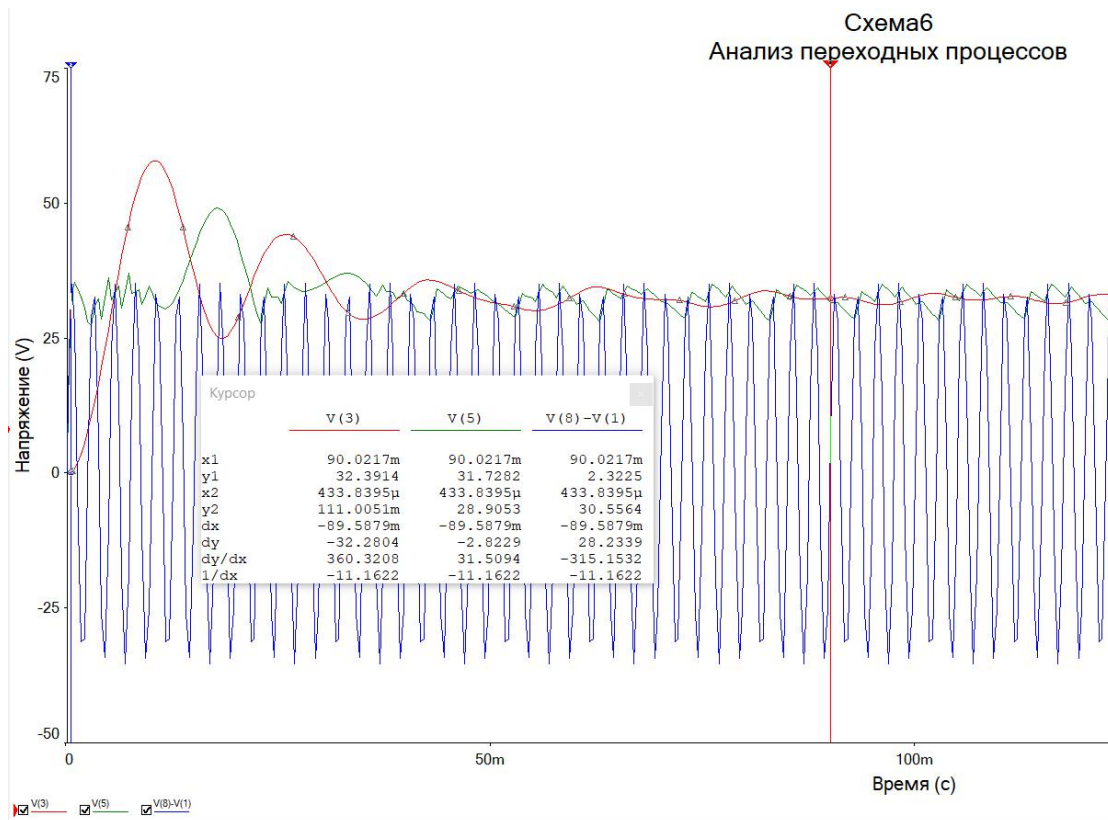


Рисунок 6.2 - Анализ переходных процессов

На графике найдем момент времени, начиная с которого переходные процессы завершатся, и значение напряжения будет относительно постоянно. Исходя из графика, переходные процессы закончатся в момент времени  $t = 90\text{мс} = 0,09\text{с}$ . Следовательно, при выполнении анализа Фурье время начала будем задавать равным  $0,09\text{с}$ . Далее проведем анализ Фурье на входе фильтра и на нагрузке.

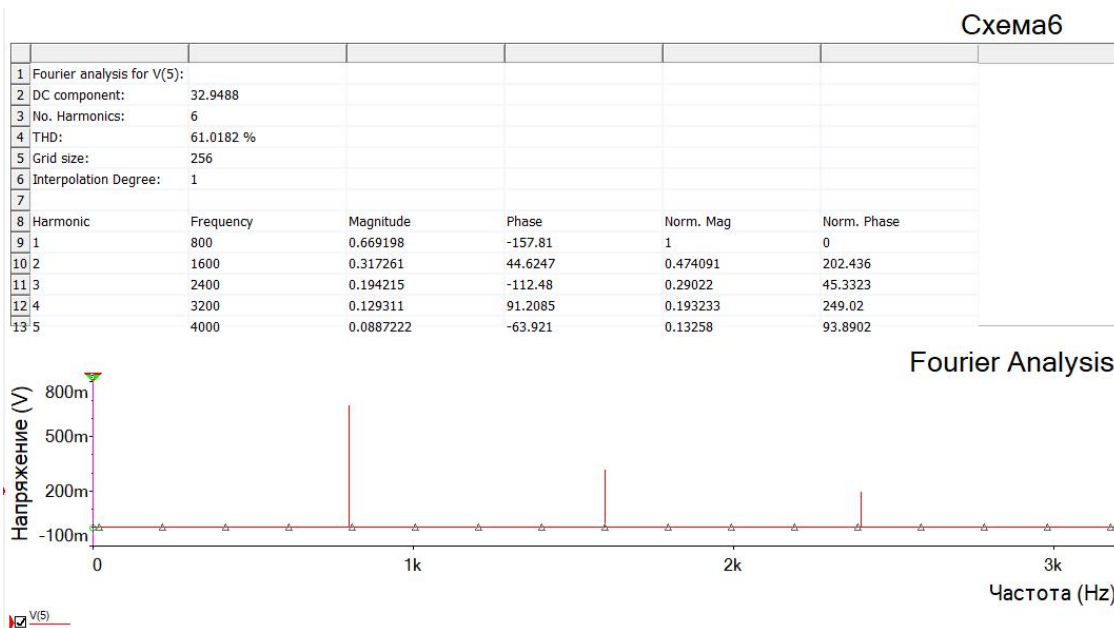


Рисунок 6.3 - Анализ Фурье на входе фильтра

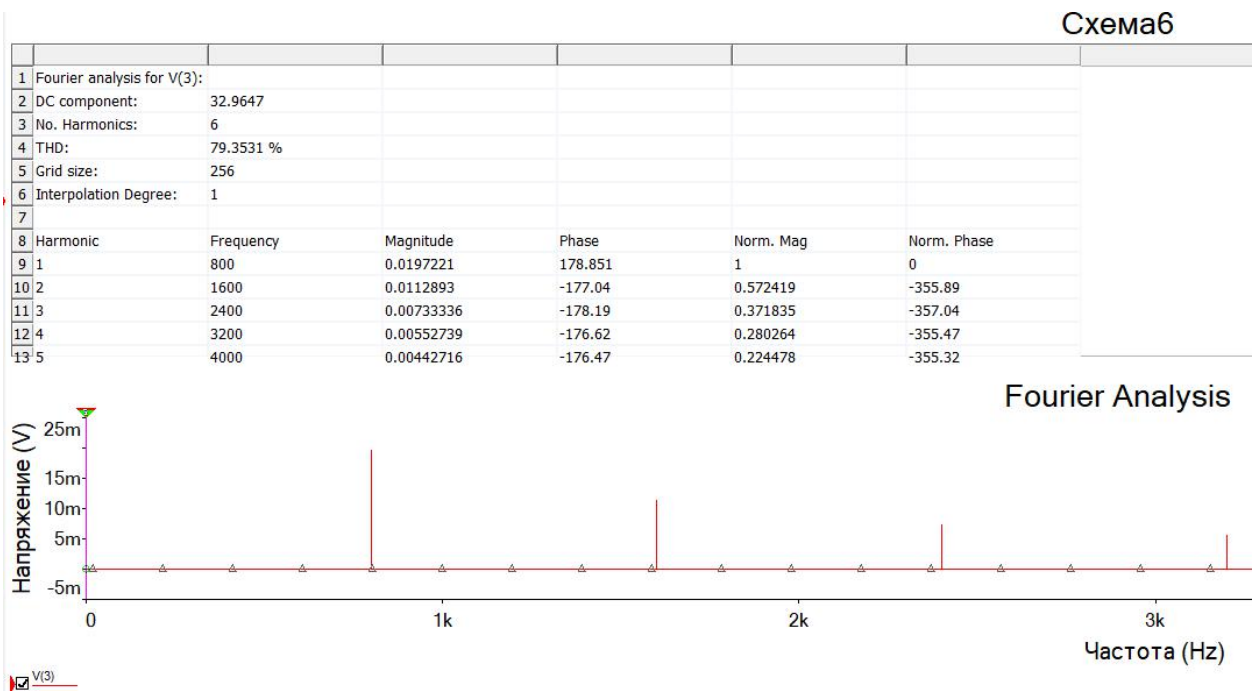


Рисунок 6.4 - Анализ Фурье на выходе из фильтра

Теперь вычислим коэффициенты пульсации на входе и на выходе:

- На входе в фильтр

$$U_0 = 32,9488 \text{ В}$$

$$U_{m1} = 0,6692 \text{ В}$$

$$K_{\text{П ВХ}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{0,6692}{32,9488} = 0,0203$$

- На выходе

$$U_0 = 32,9647; U_{m1} = 0,01972 \text{ В};$$

$$K_{\text{П Вых}} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{0,01972}{32,9647} = 0,000598$$

Теперь вычислим коэффициент сглаживания  $K_{\text{сгл}}$

$$K_{\text{сгл}} = \frac{K_{\text{П Вх}}}{K_{\text{П Вых}}} = \frac{0,0203}{0,000598} = 33,946$$

### Нагрузочная характеристика для однополупериодного выпрямителя с П-образным фильтром

Изменим схему, необходимую для построения нагрузочной характеристики.

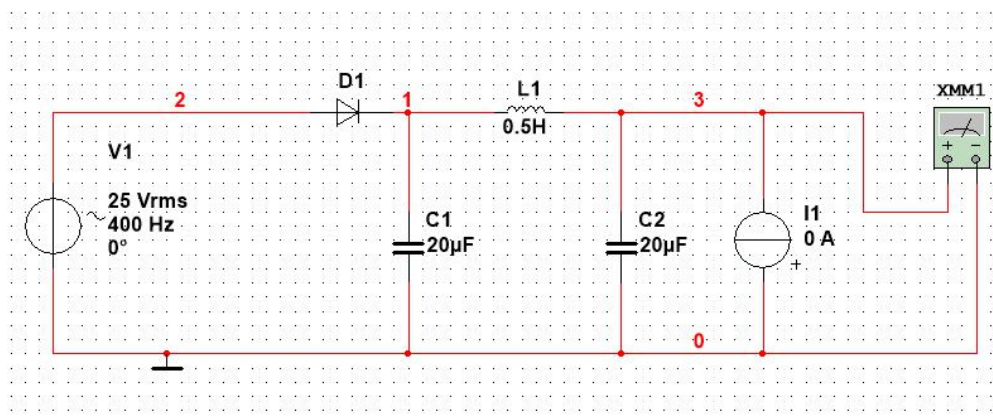


Рисунок 1.1 - Схема необходимая для построения нагрузочной характеристики

Установим начальный ток в генераторе тока равным 0 А и будем снимать выходное напряжение, при этом изменяя ток с шагом равным 0,1 А.

Таблица 2 - Зависимость выходного напряжения от изменения тока

I, А	0,005	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
U, В	34,323	29,398	25,021	21,193	17,806	14,8	12,133	9,722	7,695	5,879

Определим выходное дифференциальное сопротивление R

$$R_{\text{ВЫХ } 1} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{34,323 - 29,398}{0,1} = 49,25 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ВЫХ } 2} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{7,695 - 5,879}{0,1} = 18,16 \text{ Ом}$$

График зависимости выходного напряжения от изменения тока представлен на рисунке:

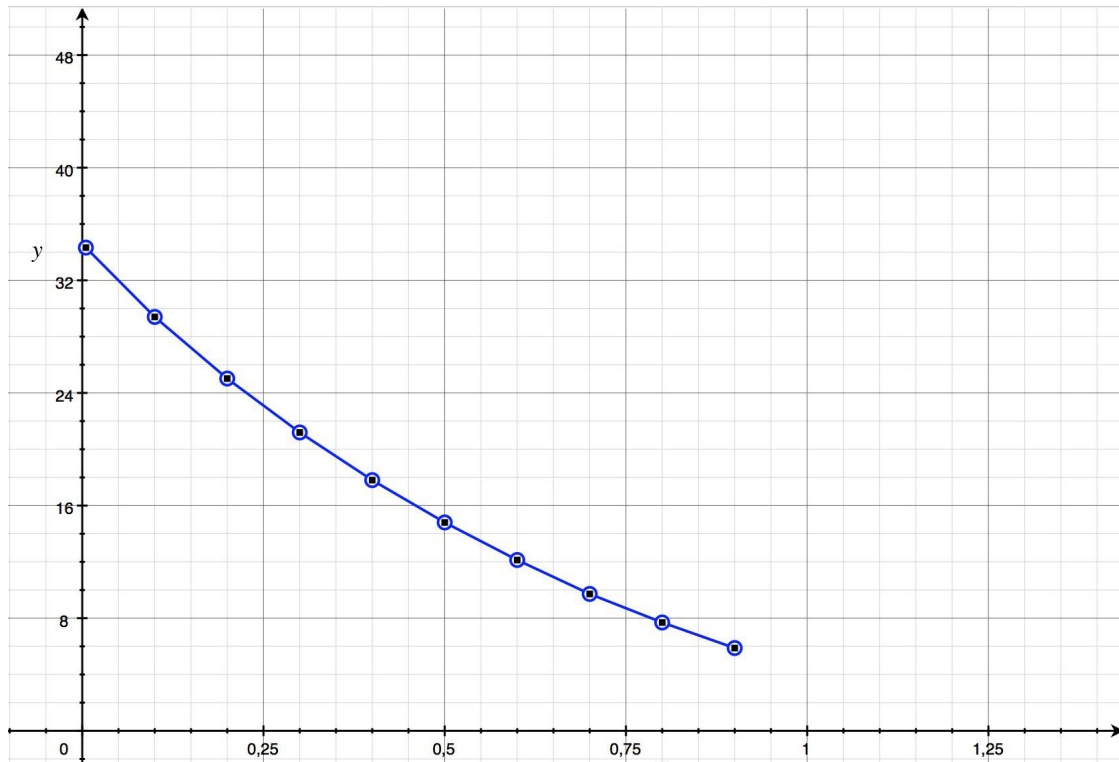


Рисунок 7.2 - Зависимость напряжения от изменения тока

### **Нагрузочная характеристика для мостового выпрямителя с П-образным фильтром**

Изменим схему, необходимую для построения нагрузочной характеристики.

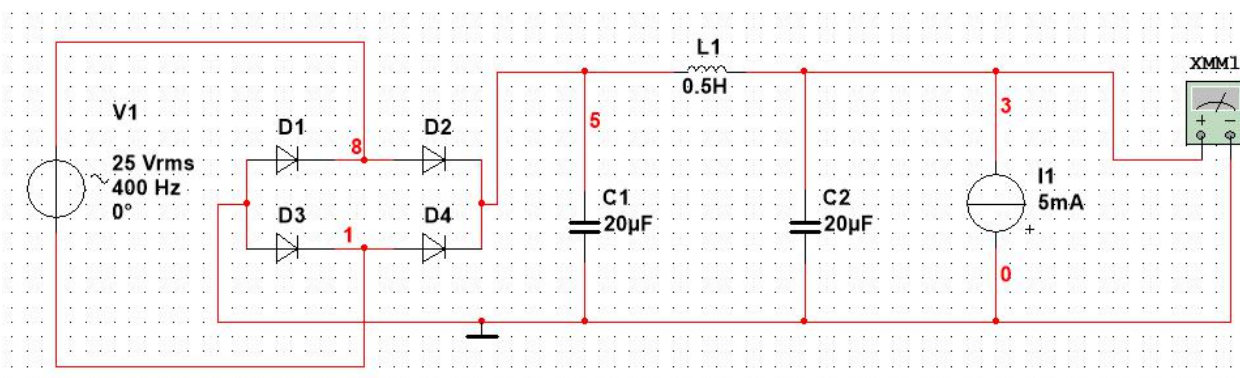


Рисунок 8.1 - Схема необходимая для построения нагрузочной характеристики

Установим начальный ток в генераторе тока равным 5 мА и будем снимать выходное напряжение, при этом изменяя ток с шагом равным 0,1 А.

Таблица 3 - Зависимость выходного напряжения от изменения тока

I, A	0,005	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
U, В	33,725	31,455	29,598	28,069	26,787	25,7	24,778	23,994	23,33	22,77

Определим выходное дифференциальное сопротивление R

$$R_{\text{ВЫХ } 1} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{33,725 - 31,455}{0,1} = 22,7 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ВЫХ } 2} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{23,33 - 22,77}{0,1} = 5,6 \text{ Ом}$$

График зависимости выходного напряжения от изменения тока представлен на рисунке:



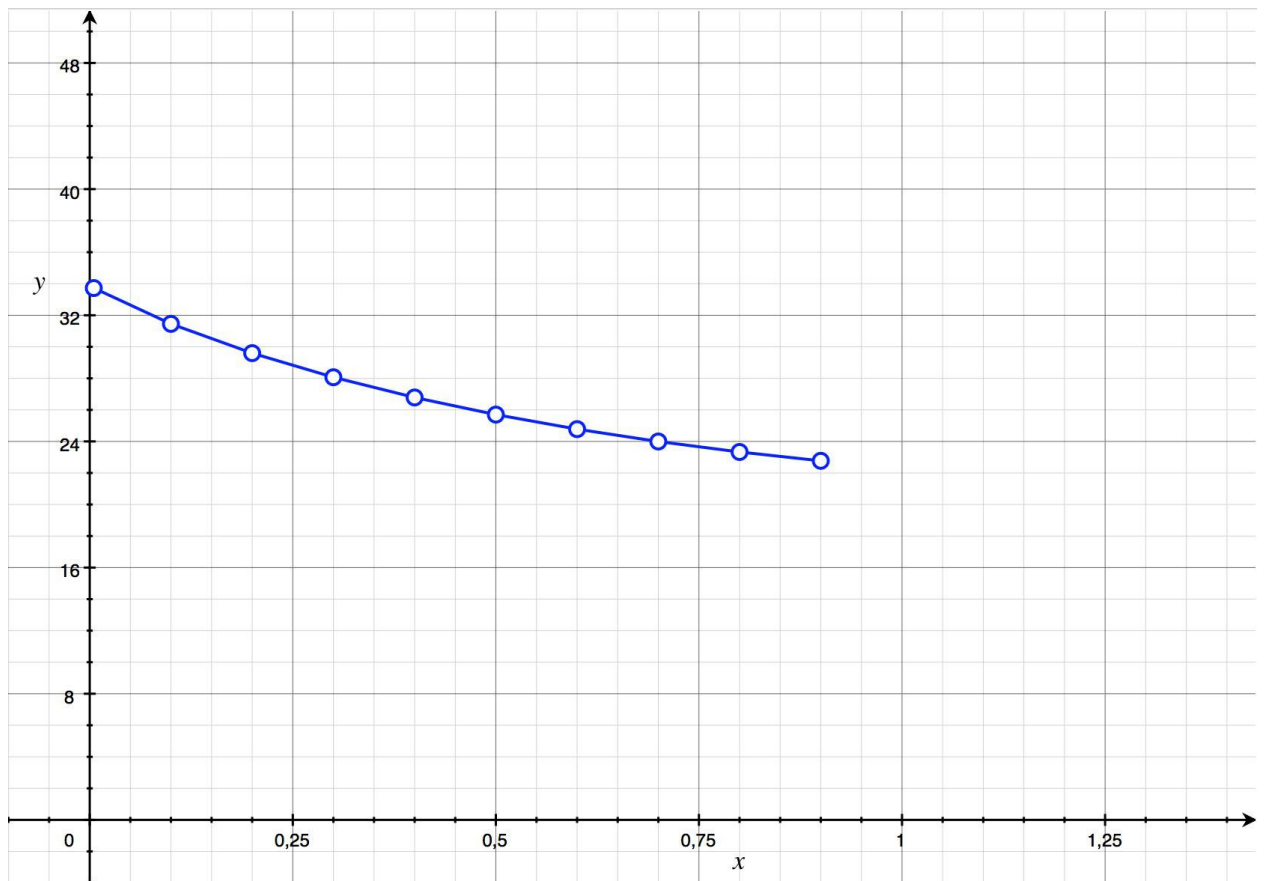


Рисунок 8.2 - Зависимость напряжения от изменения тока

### Мостовая схема с фильтром и стабилизатором

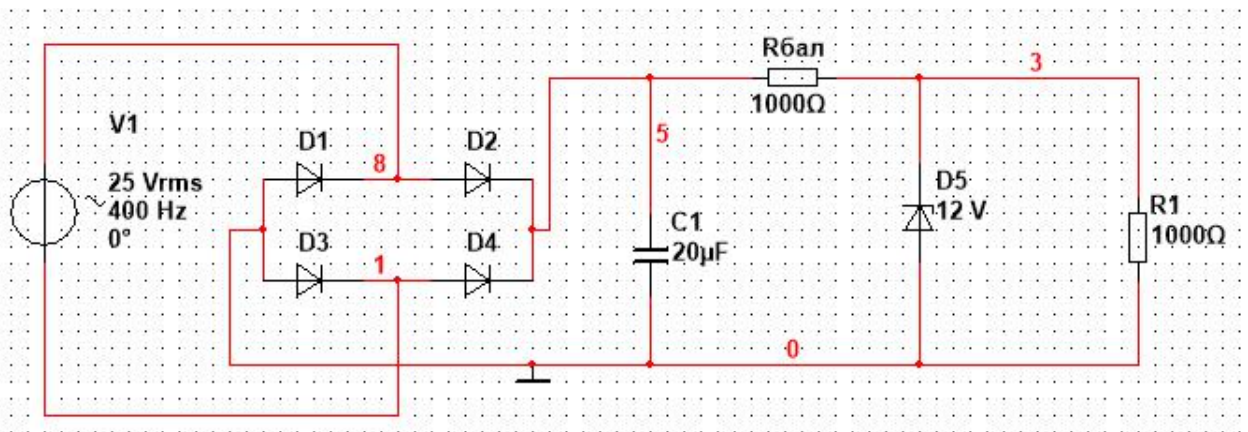


Рисунок 9.1 - Схема мостового выпрямителя с фильтром и стабилизатором



Проведем анализ переходных процессов для схемы мостового выпрямителя с фильтром и стабилизатором:

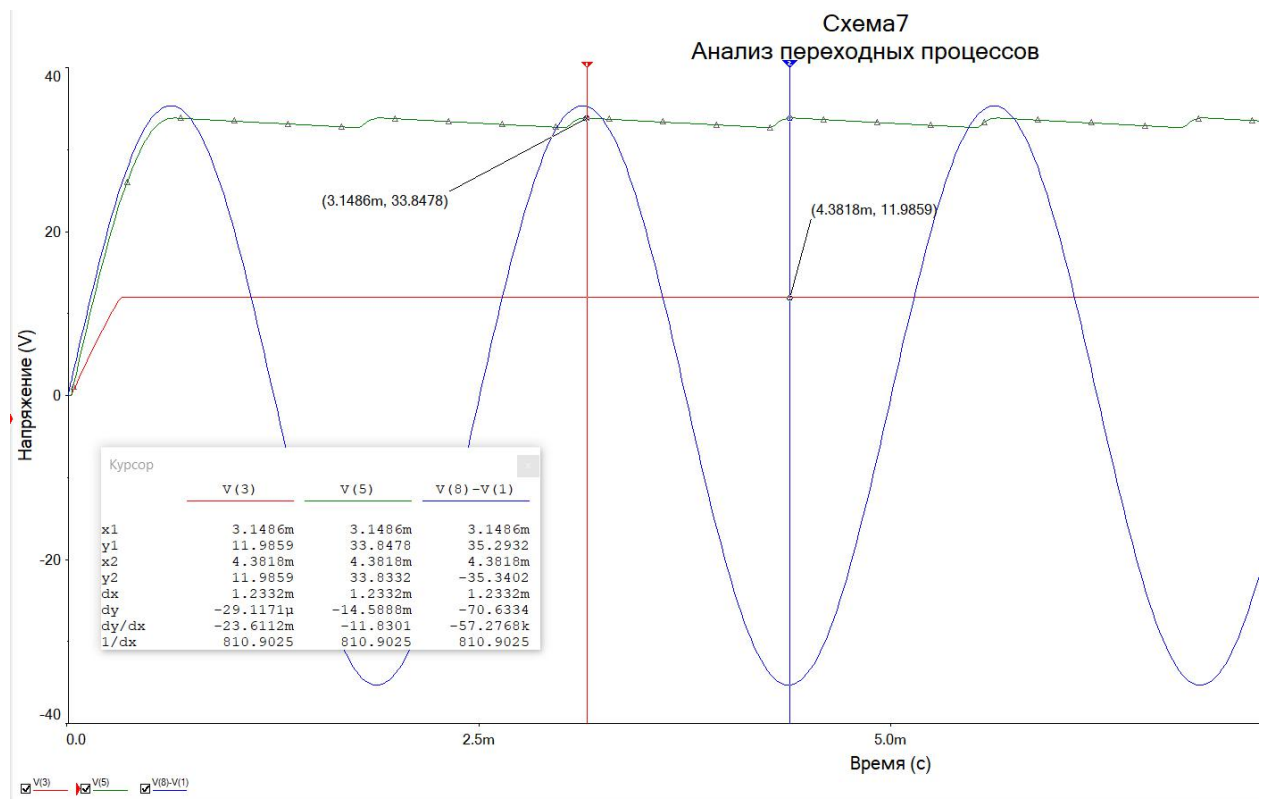


Рисунок 9.2 - Анализ переходных процессов

По данному графику можно заметить, что при напряжении на входе в фильтр равном 34 В, на выход подается только 12 В (что равно обратному напряжению стабилитрона).

$$U_{\text{ВХ}} = 33,8478 \text{ В}; U_{\text{ВЫХ}} = 11,9859 \text{ В}$$

### Нагрузочная характеристика для мостового выпрямителя с фильтром и стабилизатором

Изменим схему, необходимую для построения нагрузочной характеристики.

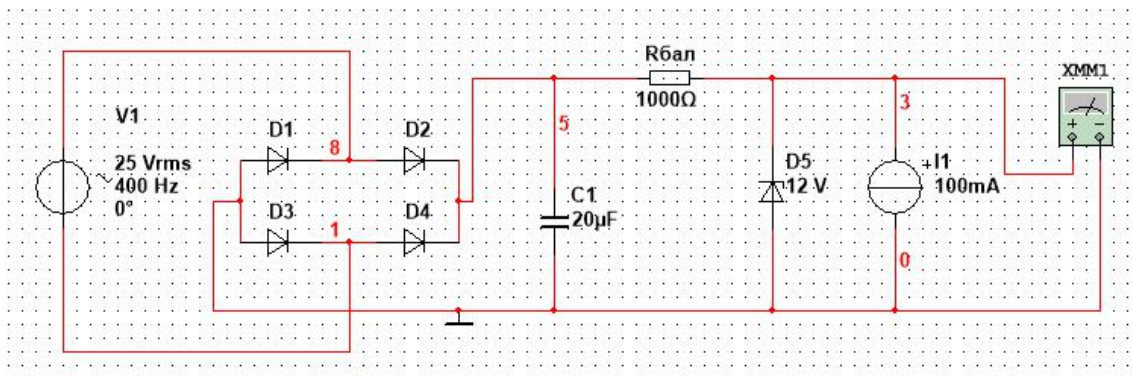


Рисунок 10.1 - Схема для построения нагрузочной характеристики

Установим начальный ток в генераторе тока равным 1 А и будем снимать выходное напряжение, при этом изменяя ток с шагом равным 10 мА.

Таблица 4 - Зависимость выходного напряжения от изменения тока

I, mA	0,5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U, В	12,002	12,009	12,014	12,019	12,022	12,025	12,028	12,03	12,032	12,034	12,036

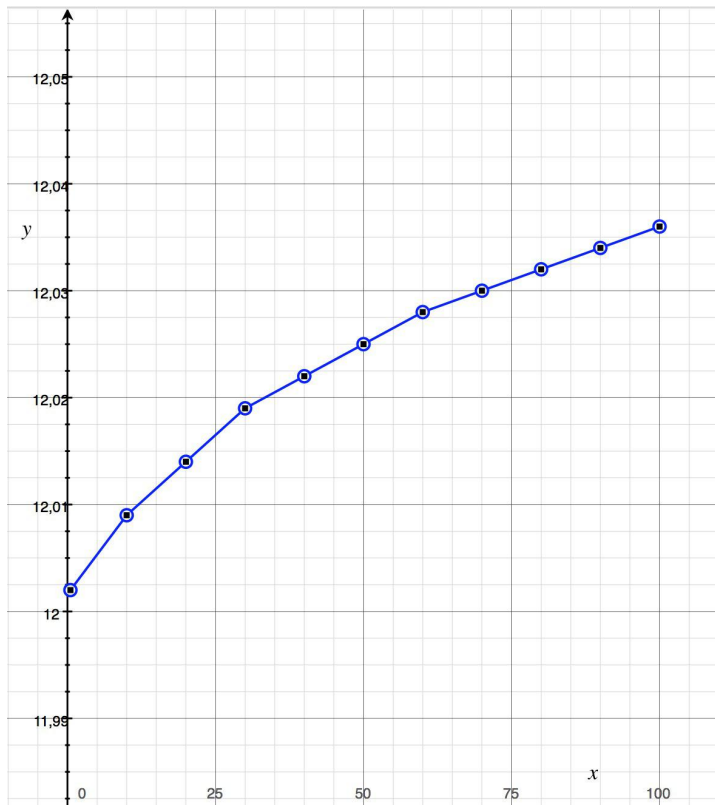


Рисунок 10.2 – График зависимости выходного напряжения от изменения тока

Вычислим выходное сопротивление стабилитрона  $R \approx r_{\text{дин}}$

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{12,025 - 12,022}{10} * 1000 = 0,3 \text{ Ом}$$

Вычислим коэффициент стабилизации  $K_{\text{ст}}$

$$K_{\text{ст}} = \left( \frac{R_{\text{бал}}}{r_{\text{дин}}} + 1 \right) * \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \left( \frac{1000}{0,3} + 1 \right) * \frac{11,9859}{33,8478} = 1177$$

## Вывод

Изучены различные способы применения диодов в качестве компонентов выпрямителей, а также способы исследования и сравнения эффективности работы выпрямителей и их поведение под нагрузкой.