

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

---

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

---

## Расчетно-графическая работа №2

Задание №1

по учебному курсу «Теоретические основы электротехники – 2»

Вариант 4.13

Обучающегося:

Группа:

Преподаватель: Шлыков С.В.

Тольятти 2023

## Задача №1 «Расчет нелинейной электрической цепи переменного тока»

В заданной, согласно варианту, расчетной электрической цепи необходимо:

1. Произвольно задайтесь максимальным значением входного напряжения  $U_m$ . Изобразите временные диаграммы на интервале двух периодов входного  $u_{вх}(t)$  и выходного  $u_{выпр}(t)$  напряжений полупроводникового выпрямителя согласно варианту (пакет Mathcad), считая полупроводниковый диод идеальным (рисунок 1).

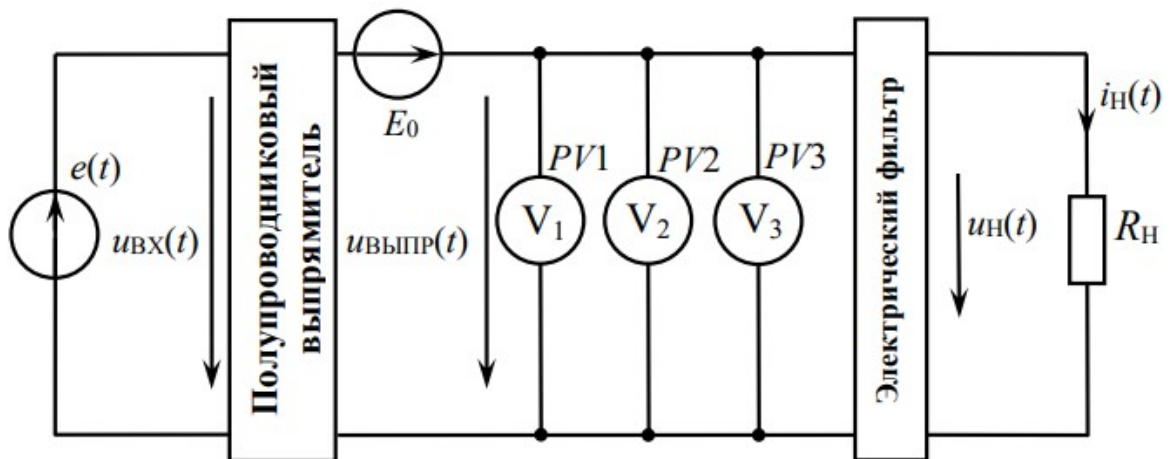


Рисунок 1 – Расчетная электрическая цепь.

2. Разложите в ряд Фурье кривую выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{выпр}(t)$ , ограничившись пятью ненулевыми гармоническими составляющими ряда. Запишите получившееся выражение несинусоидальной функции напряжения  $u_{выпр}(t)$  и постройте данную кривую напряжения на интервале двух периодов. Постройте спектр амплитуд и фаз полученного сигнала;

3. Определите показания приборов различных систем измерения:

Вольтметр PV1 – прибор магнитоэлектрической системы;

Вольтметр PV2 – прибор электромагнитной системы;

Вольтметр PV3 – прибор выпрямительной системы;

Показания приборов занести в таблицу.

Приведите вычисления каждого значения напряжения вольтметров.11 Найдите коэффициент искажения несинусоидальной функции напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{выпр}(t)$ .

4. Рассчитайте напряжение  $u_n(t)$ , от каждой составляющей ряда Фурье, в нагрузочном резисторе, считая, что в качестве фильтра используется L-фильтр. Запишите полученное выражение  $u_n(t)$ . Постройте кривую напряжения  $u_n(t)$  и сравните с кривой напряжения пункта 2. Постройте спектр амплитуд и фаз полученного сигнала. Определите коэффициент искажения несинусоидальной функции напряжения  $u_n(t)$ .

5. Рассчитайте напряжение  $u_n(t)$ , от каждой составляющей ряда Фурье, в нагрузочном резисторе, считая, что в качестве фильтра используется C-фильтр. Запишите полученное выражение  $u_n(t)$ . Постройте кривую напряжения  $u_n(t)$  и сравните с кривой напряжения пункта 2. Постройте спектр амплитуд и фаз полученного сигнала. Определите коэффициент искажения несинусоидальной функции напряжения  $u_n(t)$ .

6. Изобразите схему заграждающего (полосового) L-C-фильтра, который необходимо включить для подавления (пропускания) одной частоты гармоники, заданной вариантом. Рассчитайте параметры L-C фильтра. Рассчитайте напряжение  $u_n(t)$ , от каждой составляющей ряда Фурье, в нагрузочном резисторе и построить кривую напряжения  $u_n(t)$ . Определите коэффициент искажения несинусоидальной функции напряжения  $u_n(t)$ .

Закон изменения входного напряжения:  $u_{\text{вх}}(t) = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Таблица 1 – Значения варианта.

$E_0$	$\frac{U_m}{2}$
Номер гармоники	0
Тип фильтра	ПФ

ПФ – полосовой фильтр. Однополупериодный выпрямитель.

## Пункт 1

Зададимся произвольным максимальным значением входного напряжения  $U_m$ .

Пусть это максимальное значение входного напряжения равно:  $U_m=550$  В.

Изобразим временные диаграммы входного и выходного напряжений полупроводникового выпрямителя в математическом пакете Mathcad. Для этого необходимо аналитически представить выражения соответствующих мгновенных напряжений.

Выражение входного напряжения  $u_{вх}(t)$  запишется следующим образом (формула 1):

$$U_{Bx}(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) = 550 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{2}) \text{ В} \quad (1)$$

Полупроводниковый выпрямитель является однополупериодным, следовательно, его схема состоит из одного полупроводникового диода VD и резистора R (рисунок 2). Напряжение на выходе выпрямителя будет наблюдаться только при положительной полуволне источника питания  $e(t)$ . Источник постоянной ЭДС  $E_0$  создает смещение по оси напряжения равное (формула 2):

$$E_0 = \frac{U_m}{2} = 275 \text{ В}. \quad (2)$$

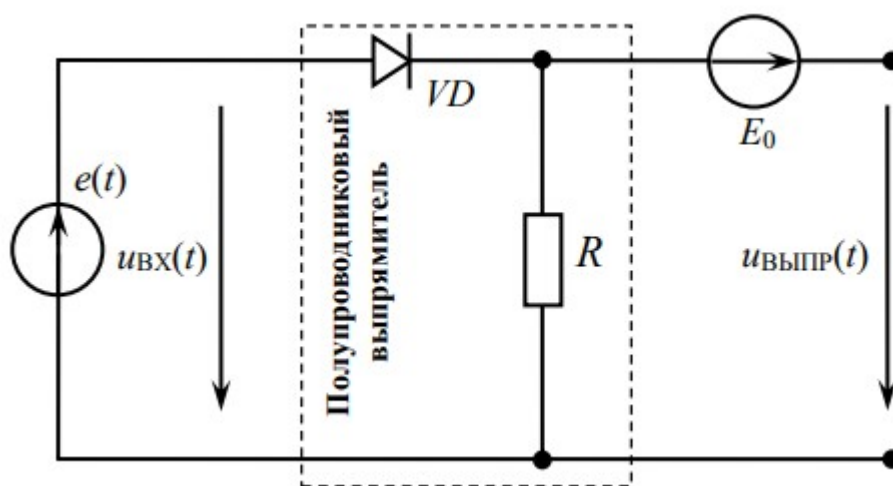


Рисунок 2 – Расчетная электрическая цепь в пункте 1

Таким образом, функция выходного напряжения выпрямителя является кусочно-заданной на интервале одного периода и запишется она следующим образом (формула 3).

$$u_{\text{выпр}}(t) = \begin{cases} 275 + 550 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t), & \text{если } \frac{-T}{4} \leq t \leq \frac{T}{4} \\ 275, & \text{если } \frac{T}{4} \leq t \leq \frac{3 \cdot T}{4} \end{cases} \quad (3)$$

Вспользуемся встроенной панелью инструментов «График» в математическом пакете Mathcad и построим два графика входного и выходного напряжений полупроводникового выпрямителя на интервале двух периодов (рис. 3).

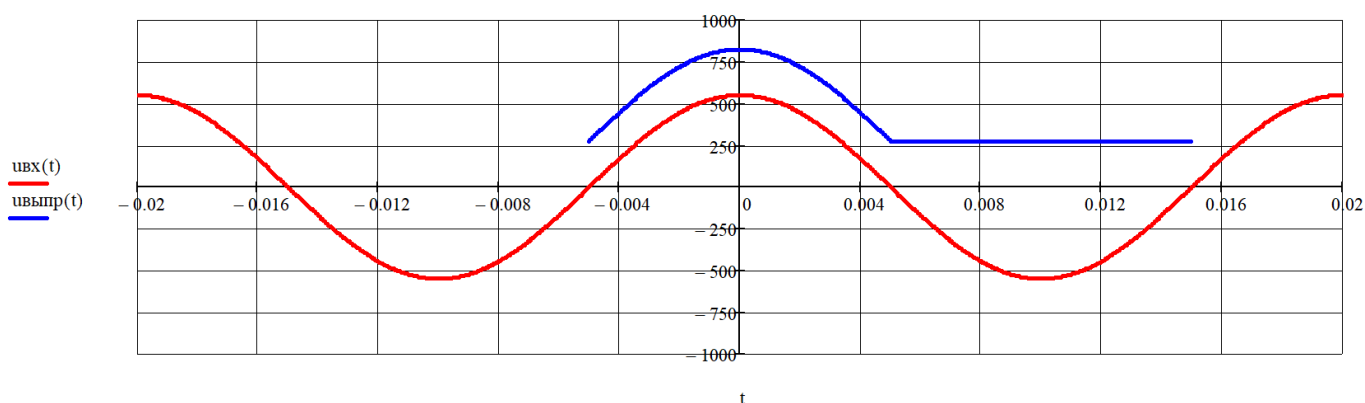


Рисунок 3 – Временные диаграммы напряжений полупроводникового выпрямителя

Временная диаграмма входного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{вх}}(t)$  показана красным цветом, а выходного  $u_{\text{выпр}}(t)$  - синим цветом. Видно, что временные зависимости напряжений соответствуют алгоритму работы однополупериодного выпрямителя.

## Пункт 2

Для дальнейшего расчета электрической цепи разложим кривую выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$  в ряд Фурье. Данная кривая представляет собой периодическую негармоническую функцию напряжения, которая может быть разложена в тригонометрический ряд Фурье (формула 4).

$$u_{\text{выпр}}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\omega \cdot t) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega \cdot t) \quad (4)$$

где  $k$  – порядковый номер гармоники,  $A_0$  – нулевая гармоника или постоянная составляющая,  $B_k$  – амплитуды синусных гармоник,  $C_k$  – амплитуды косинусных гармоник.

Найдем величину постоянной составляющей ряда Фурье по формуле 5.

$$A_0 = U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{выпр}}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} E_0 + u_{Bx}(t) dt + \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3 \cdot T}{4}} E_0 dt =$$

$$\frac{1}{T} E_0 T \quad (5)$$

Пределы интегрирования и сама подынтегральная функция определяются по ранее записанной формуле 3.

Амплитуды синусных гармоник ряда Фурье находим по формуле 6.

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T u_{\text{выпр}}(t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt =$$

$$\frac{2}{T} E_0 \int_0^T \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt \quad (6)$$

Амплитуды косинусных гармоник ряда Фурье находим по формуле 7.

$$C_k = \frac{2}{T} \int_0^T u_{\text{выпр}}(t) \cdot \cos(k\omega \cdot t) dt =$$

$$\frac{2}{T} E_0 \int_0^T \cos(k\omega \cdot t) dt \quad (7)$$

Расчет амплитуд синусных и косинусных гармонических составляющих ряда Фурье был произведен в математическом пакете Mathcad и результат этого расчета сведен в таблицу 2.

Поскольку тригонометрические функции синус и косинус образуют квадратуру, то каждую гармоническую составляющую можно представить в виде тригонометрической функции синуса, которая имеет начальную фазу. В этом случае, ряд Фурье приводится в так называемую амплитудно-фазовую форму (формула 8).

$$u_{\text{выпр}}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega k t + \psi_k) \quad (8)$$

где  $A_k$  – амплитуды синусных гармоник, начальные фазы которых равны  $\psi_k$ .  
 Параметры синусоидальных гармонических составляющих определяются по формуле 9.

$$A_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \quad \psi_k = \begin{cases} \arctg\left(\frac{C_k}{B_k}\right), & \text{если } B_k > 0 \\ \pi + \arctg\left(\frac{C_k}{B_k}\right), & \text{если } B_k < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Результаты вычислений в математическом пакете Mathcad сведём в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры гармоник ряда Фурье.

К, номер гармоники	Амплитуды гармоник, В			Начальные фазы гармоник	
	$B_k$	$C_k$	$A_k$	$\psi_k, \text{рад}$	$\psi_k, ^\circ$
1	0	275	275	1,571	90
2	-0	116,714	116,71	1,571	90
3	0	0	0	1,43	81,931
4	0	-23,343	23,34	4,712	270
5	-0	0	0	2,662	152,54
6	0	10,004	10	1,571	90
7	0	-0	0	-0,432	-24,746
8	-0	-5,558	5,56	4,712	270
9	0	0	0	1,168	66,946
10	-0	3,537	3,54	1,571	90

Окончательно запишем получившееся выражение несинусоидальной функции выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$ . Данное выражение представлено рядом Фурье, в котором число ненулевых гармонических составляющих ограничено пятью членами (формула 10).

$$u_{\text{выпр}}(t) = 450,07 + 275 \cdot \sin(\omega t + 1,571) + 116,71 \cdot \sin(2\omega t + 1,571) + \dots$$

$$+23,24 \cdot \sin(\dot{4}\omega \cdot t+4,712)+10 \cdot \sin(\dot{6}\omega \cdot t+1,571)+5,56 \cdot \sin(\dot{8}\omega \cdot t++4,712)+3,54 \cdot \sin(\dot{10}\omega \cdot t+1,571) \quad (10)$$

Вспользуемся встроенной панелью инструментов «График» в математическом пакете Mathcad и построим кривую выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$  на интервале двух периодов (рисунок 5). Видно, что форма кривой напряжения, представленная тригонометрическим рядом Фурье, достаточно точно описывает выходное напряжение полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$ . Для этого достаточно пяти гармонических составляющих ряда Фурье.

Гармонический состав функции выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$  можно задать при помощи дискретных спектров амплитуд и фаз. В математическом пакете Mathcad создадим два массива амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих ряда Фурье.

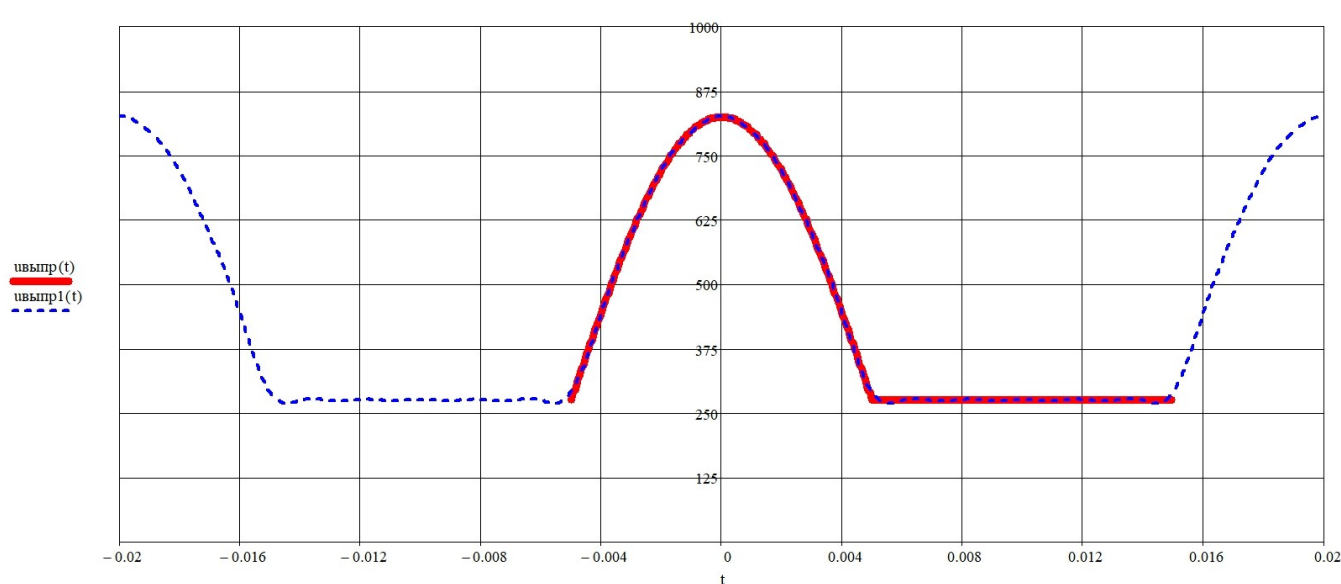


Рисунок 4 – Форма кривой выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$

С помощью встроенной панели инструментов «График» отобразим амплитуды гармонических составляющих ряда Фурье в зависимости от номера гармоники и получим график спектра амплитуд (рисунок 4) выходного напряжения выпрямителя.



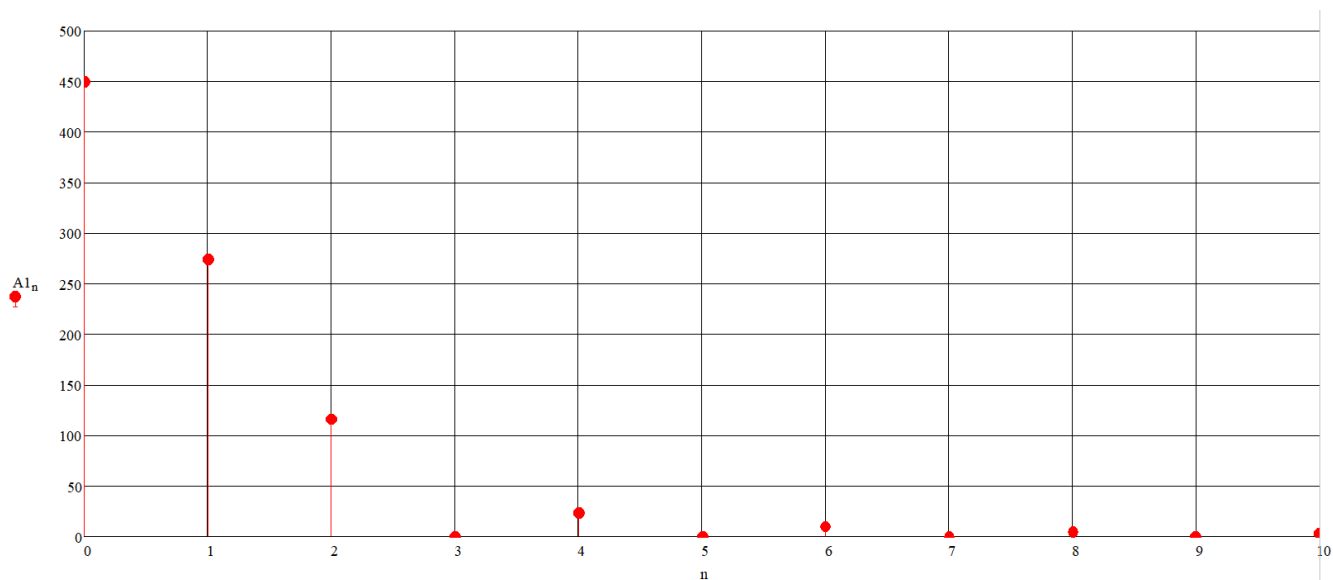


Рисунок 5 – Дискретный спектр амплитуд

Значения начальных фаз гармонических составляющих ряда Фурье отобразим в градусах и получим график спектра фаз (рисунок 5) выходного напряжения выпрямителя.

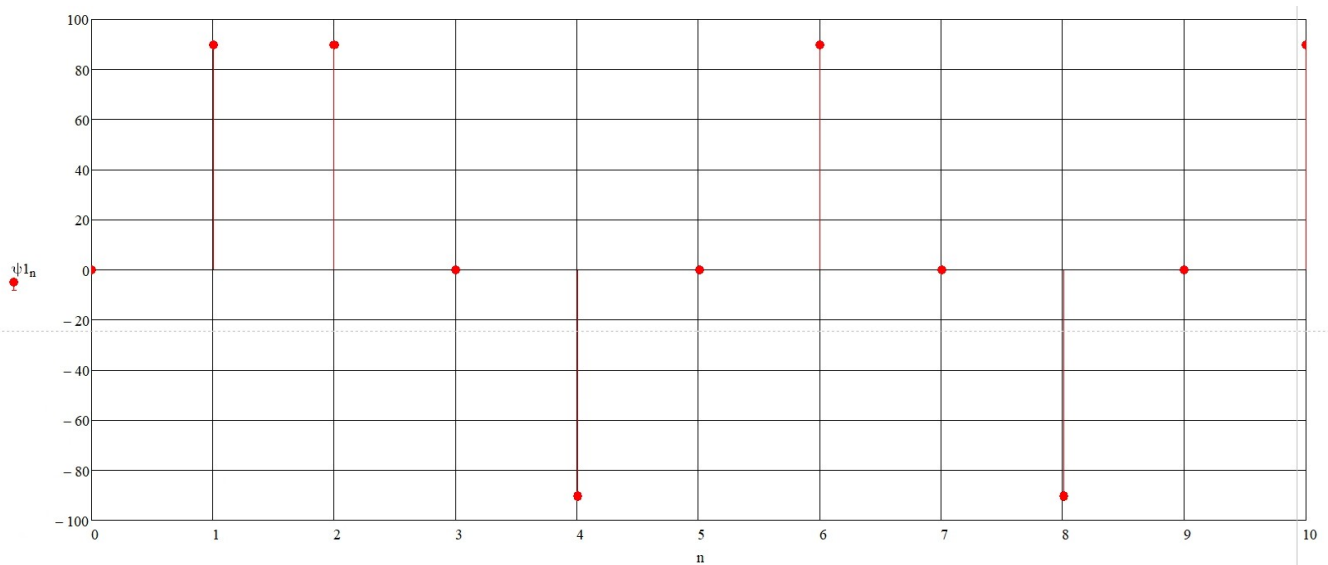


Рисунок 6 – Дискретный спектр фаз

Проведя анализ графика спектра амплитуд, можно сделать вывод, что амплитуды высших гармоник резко убывают.

### Пункт 3

Определим показания вольтметров различных систем измерения (рис. 7).

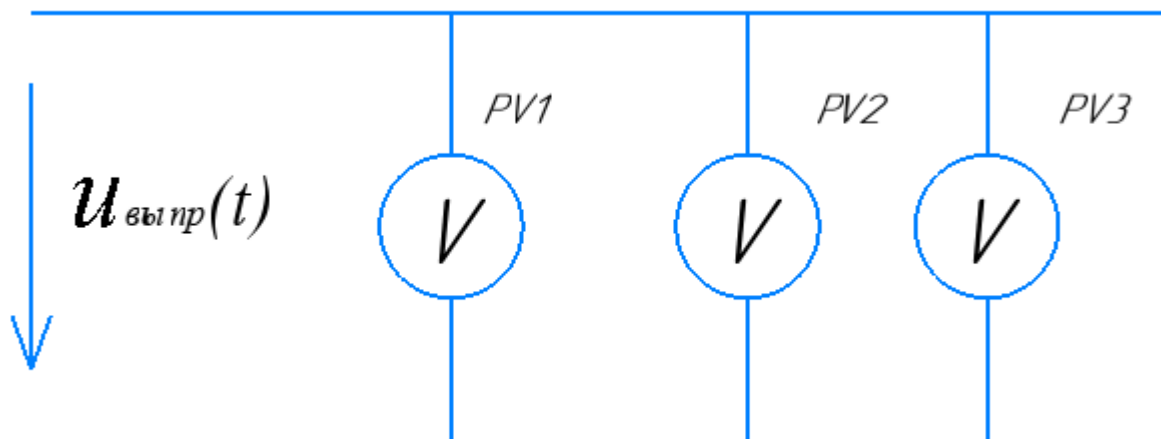


Рисунок 7 – Расчетная электрическая цепь в пункте 3

Вольтметр PV1 является измерительным прибором магнитоэлектрической системы, который реагирует на постоянную составляющую ряда Фурье, представленного в формуле 10. Расчет данного значения показано в формуле 11.

$$U_{V1} = A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{выпр}(t) dt = 450,07 \text{ В} \quad (11)$$

Вольтметр PV2 является измерительным прибором электромагнитной системы, который реагирует на действующее значение несинусоидального выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{выпр}(t)$ . Действующее значение несинусоидального напряжения найдем следующим образом (формула 12).

$$U_{V2} = \sqrt{A_0^2 + \frac{1}{2} \cdot (A_1^2 + A_2^2 + A_4^2 + A_6^2 + A_8^2 + A_{10}^2)} = \sqrt{450,07^2 + \frac{1}{2} \cdot \dots} \approx 497,525 \text{ В} \quad (12)$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая или нулевая гармоника,  $A_k$  – амплитуды  $k$  – гармонических составляющих ряда Фурье. Вольтметр PV3 является измерительным прибором выпрямительной системы, который реагирует на среднее значение по модулю несинусоидального выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{выпр}(t)$ . Основой данного измерительного прибора является вольтметр магнитоэлектрической системы, в который встроен полупроводниковый выпрямительный мост. Мостовой выпрямитель выполняется

математическую функцию модуля функции, следовательно, среднее значение несинусоидального напряжения найдем следующим образом (формула 13). Занесем расчетные показания напряжений вольтметров в таблицу 3.

$$U_{V3} = \frac{1}{T} \int_0^T |u_{\text{выпр}}(t)| dt = 497,525 \text{ В} \quad (13)$$

Таблица 3 – Сводная таблица показаний вольтметра.

Показания приборов	Расчетные данные
$U_{V1}, \text{ В}$	450,07
$U_{V2}, \text{ В}$	497,525
$U_{V3}, \text{ В}$	497,525
$U_m, \text{ В}$	481,707

Определим коэффициент искажения несинусоидального напряжения  $u_{\text{выпр}}(t)$ , который равен отношению действующего значения первой гармоники к действующему значению несинусоидального напряжения (формула 14).

$$k_u = \frac{\frac{A^{(1)}}{\sqrt{2}}}{U_{V2}} = \frac{\frac{275}{\sqrt{2}}}{497,525} = 0,391 \quad (14)$$

Данный коэффициент показывает, насколько близка несинусоидальная функция к синусоидальному закону изменения.

#### Пункт 4

Рассмотрим, как проходит сигнал через разные реактивные цепи. В качестве реактивного элемента, возьмем индуктивность L (рисунок 8). Электрическая цепь R-L является частотно-зависимым делителем напряжения и выходной сигнал полупроводникового выпрямителя при прохождении через данную цепь изменит свою форму. Найдем характер этого изменения расчетным путем.

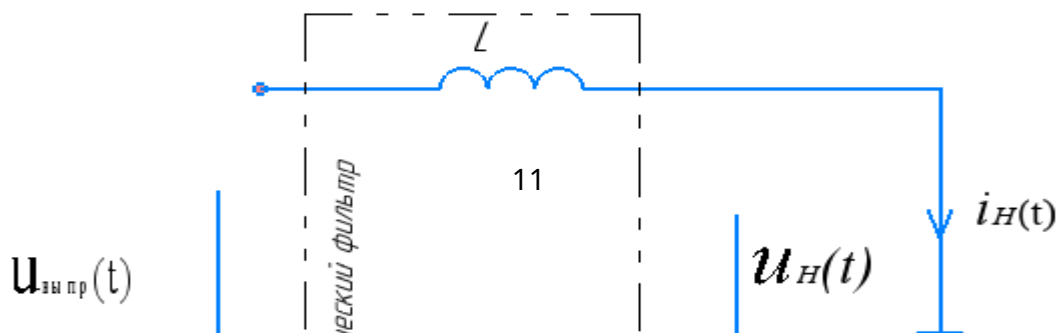


Рисунок 8 – Расчетная электрическая цепь в пункте 4

Основываясь на принципе наложения, справедливым для линейных электрических цепей, расчет цепей при воздействии несинусоидальных напряжений проводится для каждой гармонической составляющей в отдельности, а потом результаты суммируются. Для этого представим каждую гармоническую составляющую несинусоидального напряжения 22 полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$  комплексной амплитудой. Результаты этой записи представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Комплексные амплитуды гармоник напряжения

k	Параметры гармоник			Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m^{(k)}$ , В
	$U_m^{(k)}$	$\omega, c^{-1}$	$\psi^{(k)}$ , рад	
0	450,07	0	-	450,07
1	275	$100 \cdot \pi$	1,571	275i
2	116,71	$200 \cdot \pi$	1,571	116,714i
3	0	$300 \cdot \pi$	1,43	0
4	23,34	$400 \cdot \pi$	4,712	-23,343i
5	0	$500 \cdot \pi$	2,662	0
6	10	$600 \cdot \pi$	1,571	10,004i
7	0	$700 \cdot \pi$	-0,432	0
8	5,56	$800 \cdot \pi$	4,712	-5,558i

9	0	$900 \cdot \pi$	1,168	0
10	3,54	$1000 \cdot \pi$	1,571	$3,537i$

Произвольно зададимся параметрами  $L$  – фильтра и сопротивлением нагрузки  $R_H$ . Пусть  $R_H = 24$  Ом, а  $L = 0,34$  Гн, тогда комплексное сопротивление цепи определится следующим образом (формула 15).

$$\dot{Z}^{(k)} = R_H + j \cdot k \cdot \omega \cdot L \quad (15)$$

Занесём значения комплексных сопротивлений от номера гармоники в таблицу 6. Определим комплексные амплитуды гармоник тока, протекающего в цепи по закону Ома (формула 16).

$$\dot{I}^{(k)} = \frac{\dot{U}_m^{(k)}}{\dot{Z}^{(k)}} = \frac{\dot{U}_m^{(k)}}{R_H + j \cdot k \cdot \omega \cdot L} \quad (16)$$

Комплексные амплитуды гармоник напряжения в нагрузке определим следующим образом (формула 17):

$$\dot{U}_{Hm}^{(k)} = \dot{I}_m^{(k)} \cdot R_H \quad (17)$$

Результаты всех расчетов по пункту сведём в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные комплексные величины  $L$  – фильтра

k	Параметры цепи			Комплексная амплитуда напряжения
	$R_H, \text{Ом}$	$x_C^{(k)}, \text{Ом}$	$\dot{Z}^{(k)}, \text{Ом}$	
0	24	0	24	450,07
1	24	107	$24+107j$	$58,82+13,216i$
2	24	214	$24+214j$	$12,949+1,455i$
3	24	320	$24+320j$	0
4	24	427	$24+427j$	$-1,307-0,073i$
5	24	534	$24+534j$	0
6	24	641	$24+641j$	$0,374+0,014i$
7	24	748	$24+748j$	0

8	24	855	24+855j	-0,156-0,004i
9	24	961	24+961j	0
10	24	1068	24+1068j	0,079-0,002i

Используя данные расчета комплексных амплитуд гармоник напряжения в нагрузке, запишем выражение этого напряжения на временной плоскости с помощью ряда Фурье (формула 18).

$$u_H(t) = 450,07 + 60,287 \cdot \sin(\omega t + \arg(58,82 + 13,216i)) + 13,03 \cdot \sin(2\omega t + \arg(12,949 + 1,455i)) + 1,309 \quad (18)$$

Воспользуемся встроенной панелью инструментов «График» в математическом пакете Mathcad, построим кривую напряжения нагрузки  $u_H(t)$  в интервале двух периодов и сравним с кривой напряжения пункта 2.

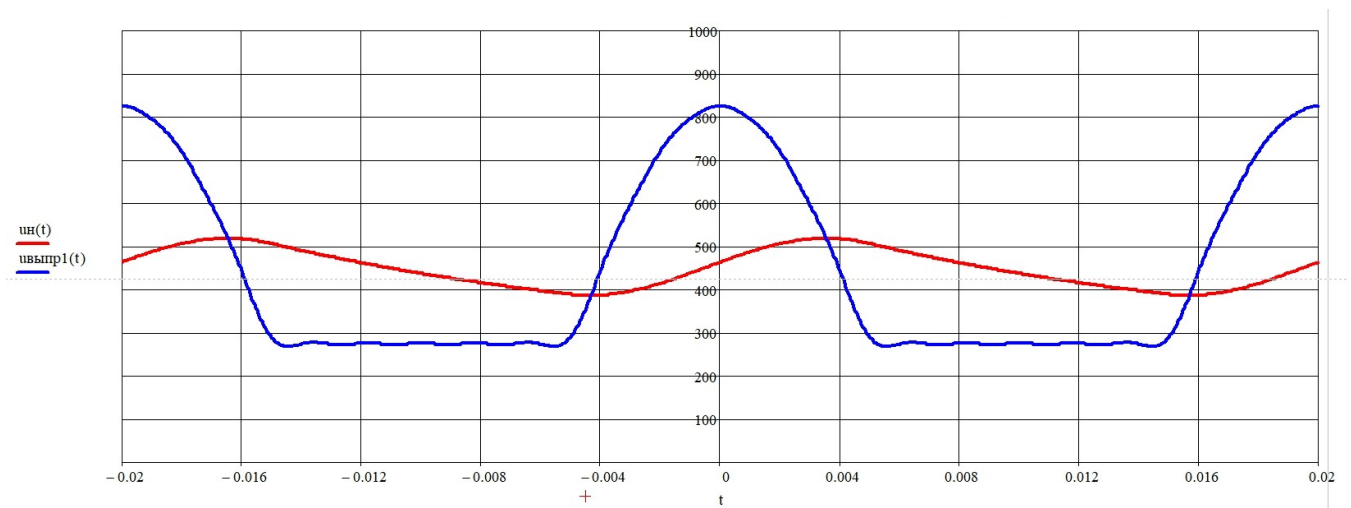


Рисунок 9 – Формы кривых напряжения нагрузки  $u_H(t)$  и выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$

С помощью встроенной панели инструментов «График» отобразим амплитуды гармонических составляющих ряда Фурье в зависимости от номера гармоники и получим график спектра амплитуд (рисунок 10) напряжения нагрузки.

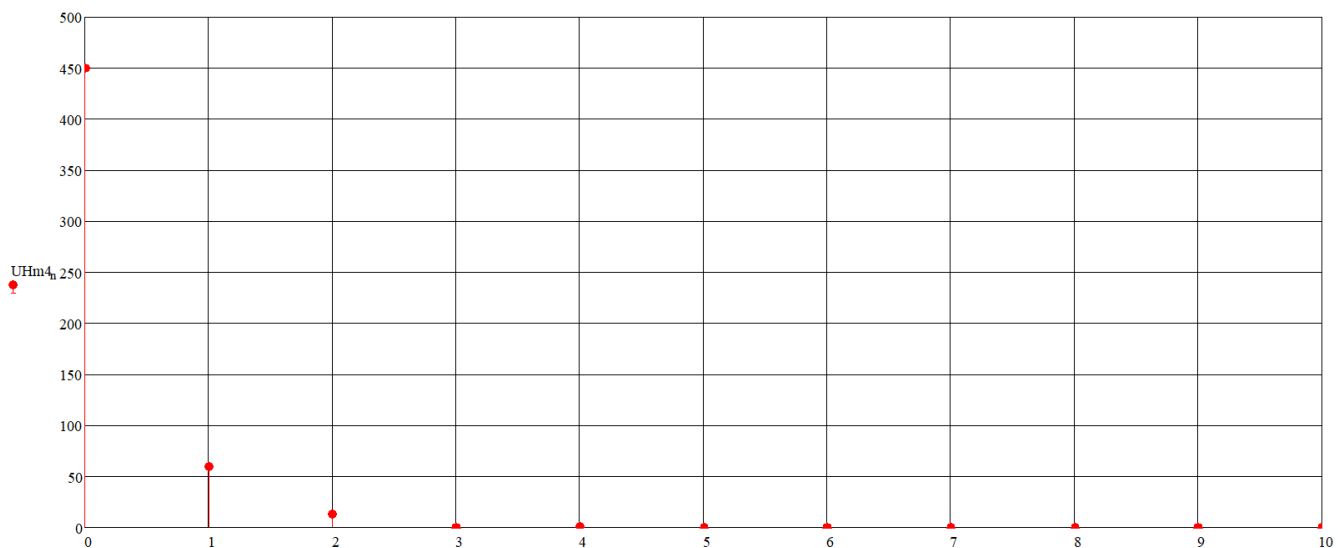


Рисунок 10 – Дискретный спектр амплитуд напряжения нагрузки

Значения начальных фаз гармонических составляющих ряда Фурье отобразим в градусах и получим график спектра фаз (рисунок 11) напряжения нагрузки.

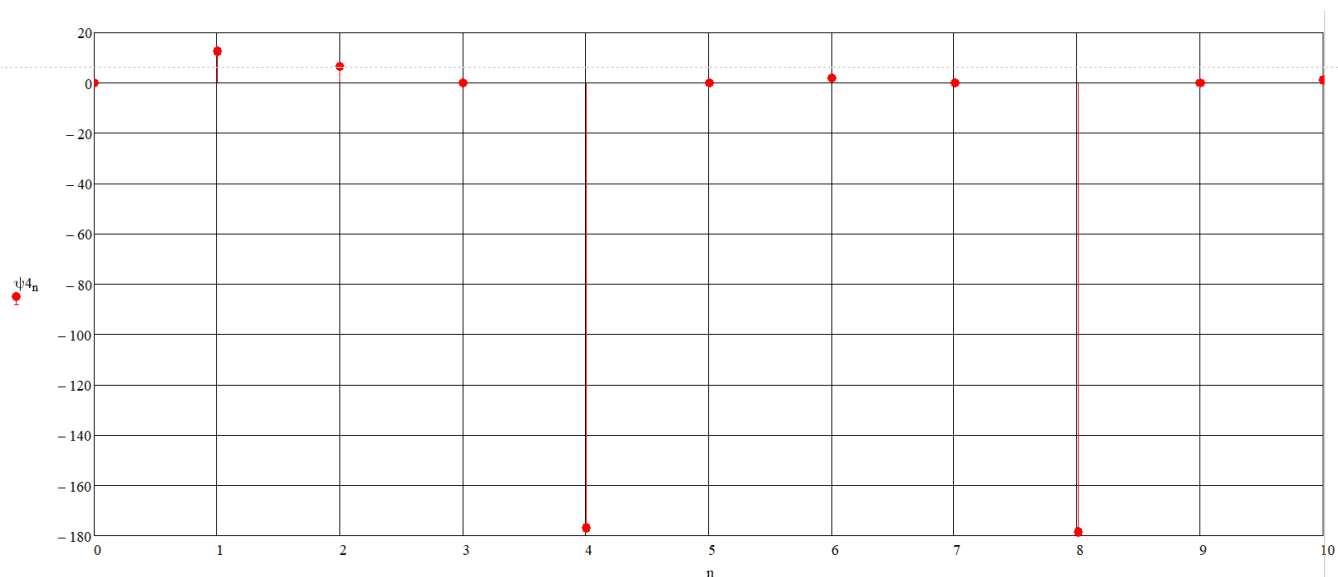


Рисунок 11 – Дискретный спектр фаз напряжения нагрузки

Проведя анализ графика спектра амплитуд, можно сделать вывод, что произошло ослабление амплитуд высших гармоник при прохождении сигнала через индуктивность.

Действующее значение несинусоидального напряжения найдем по (формуле 19).

$$U_H = \sqrt{U_0^2 + \frac{1}{2} \cdot (U_{Hm}^{(1)2} + U_{Hm}^{(2)2} + U_{Hm}^{(4)2} + U_{Hm}^{(6)2} + U_{Hm}^{(8)2} + U_{Hm}^{(10)2})} = 452,18 \text{ В}$$

$$452,18 \text{ В}$$

(19)

Определим коэффициент искажения несинусоидального напряжения  $u_H(t)$ , который равен отношению действующего значения первой гармоники к действующему значению несинусоидального напряжения (формула 20).

$$k_H = \frac{\frac{60,287}{\sqrt{2}}}{452,18} = 0.094 \quad (20)$$

По расчету видно, что значение коэффициента искажения уменьшилось по сравнению с пунктом 3. Это значит, что форма напряжения нагрузки меньше походит на синусоиду, то есть форма напряжения нагрузки становится более искривленной.

### Пункт 5

Рассмотрим, как проходит сигнал через емкостной элемент (рисунок 12). Электрическая цепь R-C также является частотно-зависимым делителем напряжения и выходной сигнал полупроводникового выпрямителя при прохождении через данную цепь изменит свою форму. Найдем характер этого изменения расчетным путем.

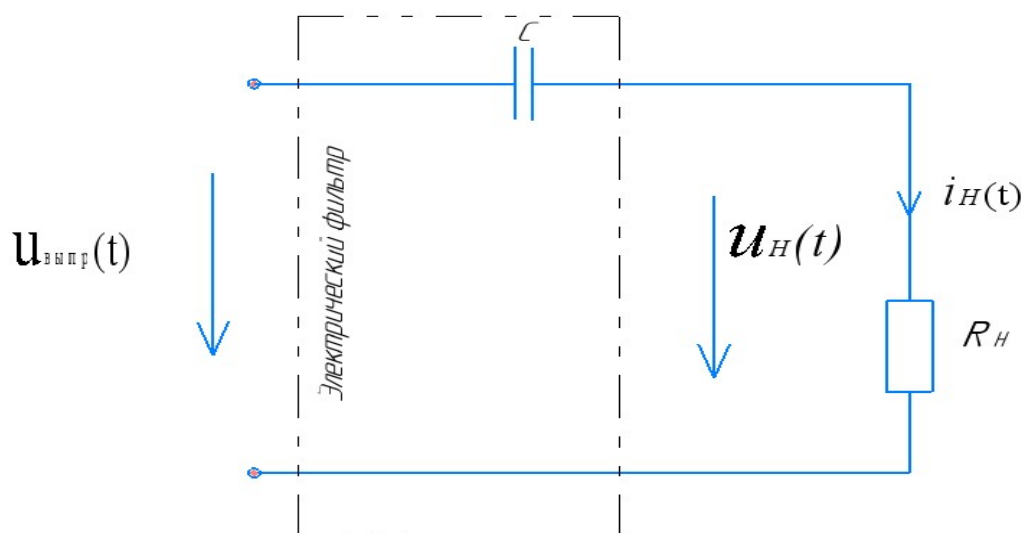


Рисунок 12 – Расчетная электрическая цепь в пункте 5

Источником несинусоидального периодического сигнала является полупроводниковый выпрямитель, поэтому комплексные амплитуды гармоник напряжений будут такие же как в пункте 4 и сведены в таблицу 4. Произвольно зададимся параметрами  $C$  – фильтра и сопротивлением нагрузки  $R_H$ . Пусть  $R_H = 24$



Ом, а  $C = 22$  мкФ, тогда комплексное сопротивление цепи определится следующим образом (формула 21).

$$\dot{Z}^{(k)} = R_H + \frac{1}{j \cdot k \cdot \omega \cdot C} \quad (21)$$

Занесём значения комплексных сопротивлений от номера гармоники в таблицу 6.

Определим комплексные амплитуды гармоник тока, протекающего в цепи по закону Ома (формула 22):

$$\dot{I}_m^{(k)} = \frac{U_m^{(k)}}{\dot{Z}^{(k)}} = \frac{U_m^{(k)}}{R_H + \frac{1}{j \cdot k \cdot \omega \cdot C}} \quad (22)$$

Комплексные амплитуды гармоник напряжения в нагрузке определим следующим образом (формула 23):

$$\dot{U}_{Hm}^{(k)} = \dot{I}_m^{(k)} \cdot R_H \quad (23)$$

Результаты всех расчетов по пункту сведем в таблицу 6.

Таблица 6 – Таблица параметров С-фильтра

k	Параметры цепи			Комплексная амплитуда напряжения
	$R_H, \text{Ом}$	$x_C^{(k)}, \text{Ом}$	$\dot{Z}^{(k)}, \text{Ом}$	$\dot{U}_{Hm}^{(k)}, \text{В}$
0	24	$\infty$	$\infty$	0
1	24	145	24-j145	-44,394+7,364i
2	24	72	24-j72	-34,881+11,572i
3	24	48	24-j48	0
4	24	36	24-j36	10,754-7,135i
5	24	29	24-j29	0
6	24	24	24-j24	-5,002+4,978i
7	24	21	24-j21	0
8	24	18	24-j18	2,671-3,545i
9	24	16	24-j16	0
10	24	14	24-j14	-1,564+2,594i

Используя данные расчета комплексных амплитуд гармоник напряжения в нагрузке, запишем выражение этого напряжения на временной плоскости с помощью ряда Фурье (формула 24).

$$u_H(t) = 45,001 \cdot \sin(\dot{i} 1 \omega t + 2,977) + 36,75 \cdot \sin(\dot{i} 2 \omega t + 2,821) + 12,906 \cdot \sin(\dot{i} 4 \omega t - 0,586) + 7,057 \cdot \sin(\dot{i} 6 \omega t + \dots) \quad (24)$$

Вспользуемся встроенной панелью инструментов «График» в математическом пакете Mathcad, построим кривую напряжения нагрузки  $u_H(t)$  в интервале двух периодов и сравним с кривой напряжения пункта 2 (рисунок 13).

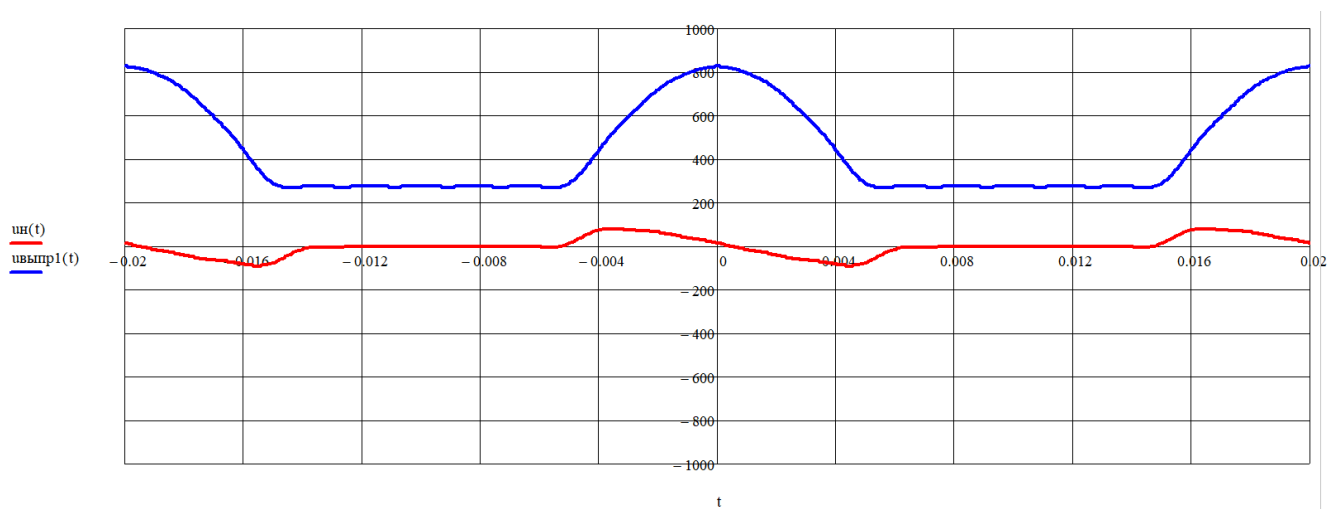


Рисунок 13 – Формы кривых напряжения нагрузки  $u_H(t)$  и выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$

С помощью встроенной панели инструментов «График» отобразим амплитуды гармонических составляющих ряда Фурье в зависимости от номера гармоники и получим график спектра амплитуд (рис. 14) напряжения нагрузки.

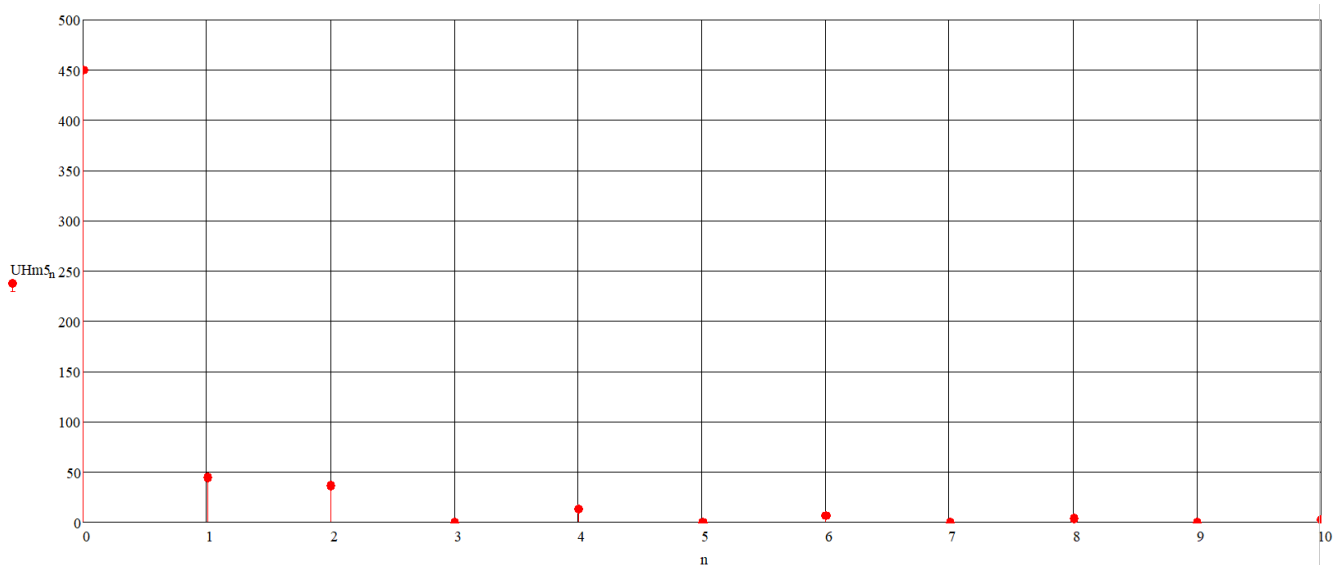


Рисунок 14 – Дискретный спектр амплитуд напряжения нагрузки

Значения начальных фаз гармонических составляющих ряда Фурье отобразим в градусах и получим график спектра фаз (рис. 15) напряжения нагрузки.

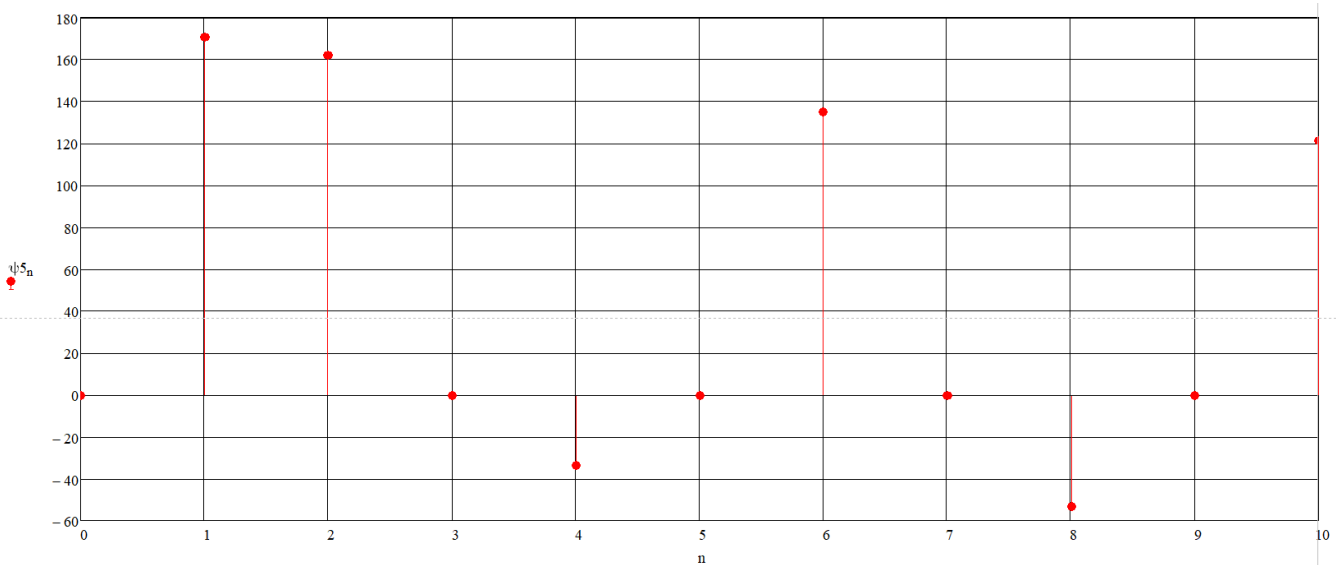


Рисунок 15 – Дискретный спектр фаз напряжения нагрузки

Проведя анализ графика спектра амплитуд, можно сделать вывод, что произошло усиление амплитуд высших гармоник при прохождении сигнала через конденсатор.

Действующее значение несинусоидального напряжения найдем по формуле 25.

$$U_H = \sqrt{U_0^2 + \frac{1}{2} \cdot (U_{Hm}^{(1)} + U_{Hm}^{(2)} + U_{Hm}^{(4)} + U_{Hm}^{(6)} + U_{Hm}^{(8)} + U_{Hm}^{(10)})} = 43,624 \text{ B} \quad (25)$$

Определим коэффициент искажения несинусоидального напряжения 26.

$$k_{II} = \frac{U_{Hm}^{(1)}}{\sqrt{2}UH} = 0.977$$

(26)

По расчету видно, что значение коэффициента искажения увеличилось по сравнению с пунктом 3, то есть форма напряжения нагрузки приближается к синусоидальной или форма напряжения нагрузки становится более сглаженной.

### Пункт 6

Рассмотрим, как проходит сигнал через заграждающий фильтр (ЗФ) настроенный на нулевую гармонику. Выходной сигнал, проходящий через этот фильтр, должен пройти без нулевой гармоники. Найдем характер этого изменения расчетным путем.

Источником несинусоидального периодического сигнала является полупроводниковый выпрямитель, поэтому комплексные амплитуды гармоник напряжений будут такие же как в пункте 4 и сведены в таблицу 4.

Необходимо рассчитать значения реактивных элементов, то есть настроить L-C-фильтр на данную частоту. Если  $R_H = 24$  Ом, а  $L = 0,34$  Гн, то величина резонансной емкости найдется по формуле 27:

$$C_0 = 10^{-4} \Phi \quad (27)$$

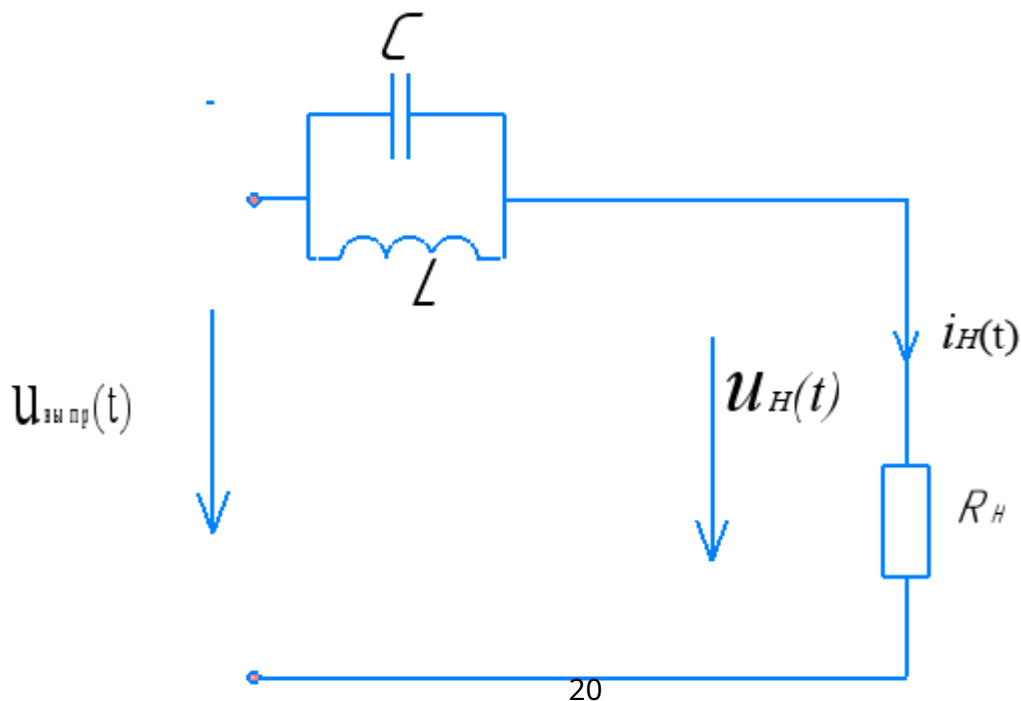


Рисунок 16 – Расчетная электрическая цепь в пункте 6

Комплексное сопротивление цепи определится по формуле 28.

$$\dot{Z}^{(k)} = R_H + \frac{1}{j \cdot k \cdot \omega \cdot C_0} \quad (28)$$

Занесём значения комплексных сопротивлений от номера гармоники в таблицу 8.

Определим комплексные амплитуды гармоник тока, протекающего в цепи по закону Ома (формула 29).

$$\dot{I}_m^{(k)} = \frac{U_m^{(k)}}{\dot{Z}^{(k)}} = \frac{U_m^{(k)}}{R_H + \frac{1}{j \cdot k \cdot \omega \cdot C_0}} \quad (29)$$

Комплексные амплитуды гармоник напряжения в нагрузке определим следующим образом (формула 31).

$$\dot{U}_{Hm}^{(k)} = \dot{I}_m^{(k)} \cdot R_H \quad (31)$$

Результаты всех расчетов по пункту сведем в таблицу 7

Таблица 7 – Расчетные комплексные величины L-C -фильтра.

К – номер гармоники	Параметры цепи			Комплексная амплитуда напряжения
	$R_H, \text{Ом}$	$x^{(k)}, \text{Ом}$	$\dot{Z}^{(k)}, \text{Ом}$	$\dot{U}_{Hm}^{(k)}, \text{В}$
0	24	$\infty$	$\infty$	0
1	24	-32	24-32i	-132,194+99,672i
2	24	-16	24-16i	-53,758+81,065i
3	24	-11	24-11i	0
4	24	-8	24-8i	6,973-21,031i
5	24	-6	24-6i	0
6	24	-5	24-5i	-2,108+9,538i
7	24	-5	24-5i	0
8	24	-4	24-4i	0,897-5,409i
9	24	-4	24-4i	0

10	24	-3	24-3i	-0,461+3,476i
----	----	----	-------	---------------

Используя данные расчета комплексных амплитуд гармоник напряжения в нагрузке, запишем выражение этого напряжения на временной плоскости с помощью ряда Фурье (формула 32).

$$u_H(t) = 45,001 \cdot \sin(\dot{i}\omega t + 2,977) + 36,75 \cdot \sin(\dot{i}2\omega t + 2,821) + 12,906 \cdot \sin(\dot{i}4\omega t - 0,586) + 7,057 \cdot \sin(\dot{i}6\omega t + \dots)$$

Воспользуемся встроенной панелью инструментов «График» в математическом пакете Mathcad, построим кривую напряжения нагрузки  $u_H(t)$  в интервале двух периодов и сравним с кривой напряжения пункта 2 (рисунок 17).

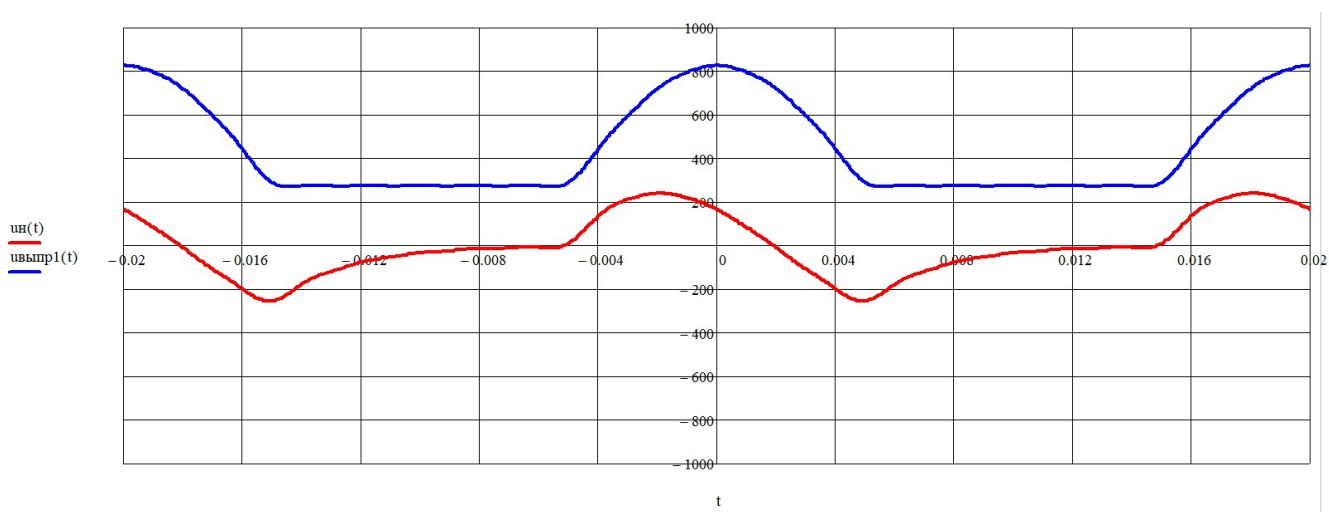


Рисунок 17 – Формы кривых напряжения нагрузки  $u_H(t)$  и выходного напряжения полупроводникового выпрямителя  $u_{\text{выпр}}(t)$

С помощью встроенной панели инструментов «График» отобразим амплитуды гармонических составляющих ряда Фурье в зависимости от номера гармоники и получим график спектра амплитуд (рис. 18) напряжения нагрузки.

Значения начальных фаз гармонических составляющих ряда Фурье отобразим в градусах и получим график спектра фаз (рис. 19) напряжения нагрузки.

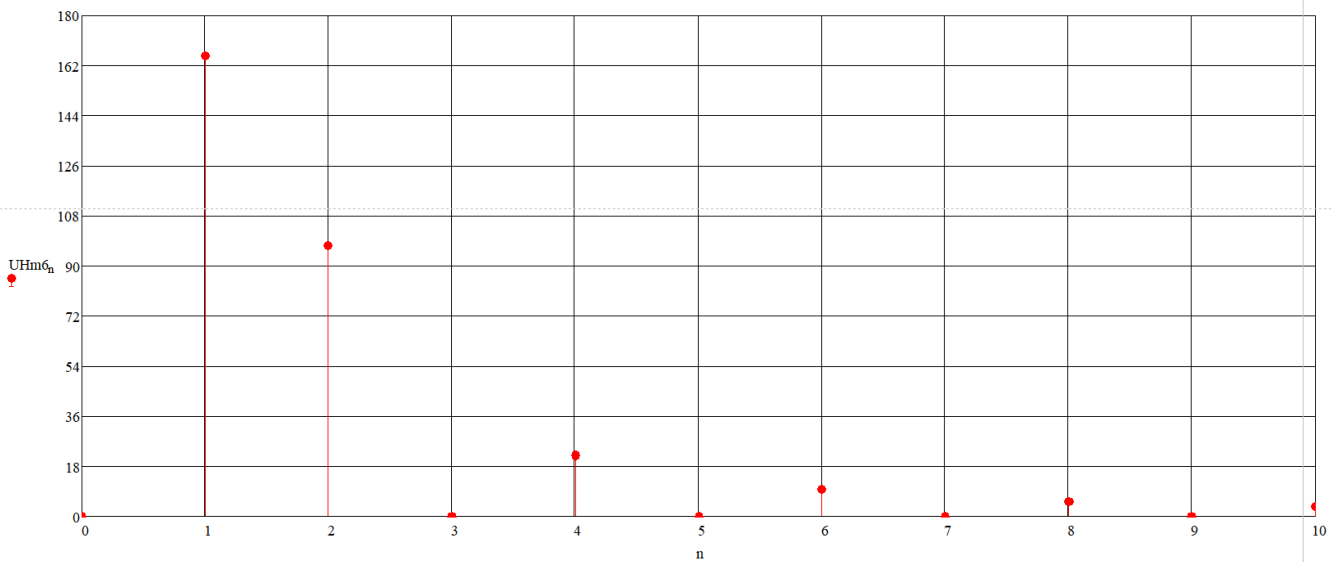


Рисунок 18 – Дискретный спектр амплитуд напряжения нагрузки

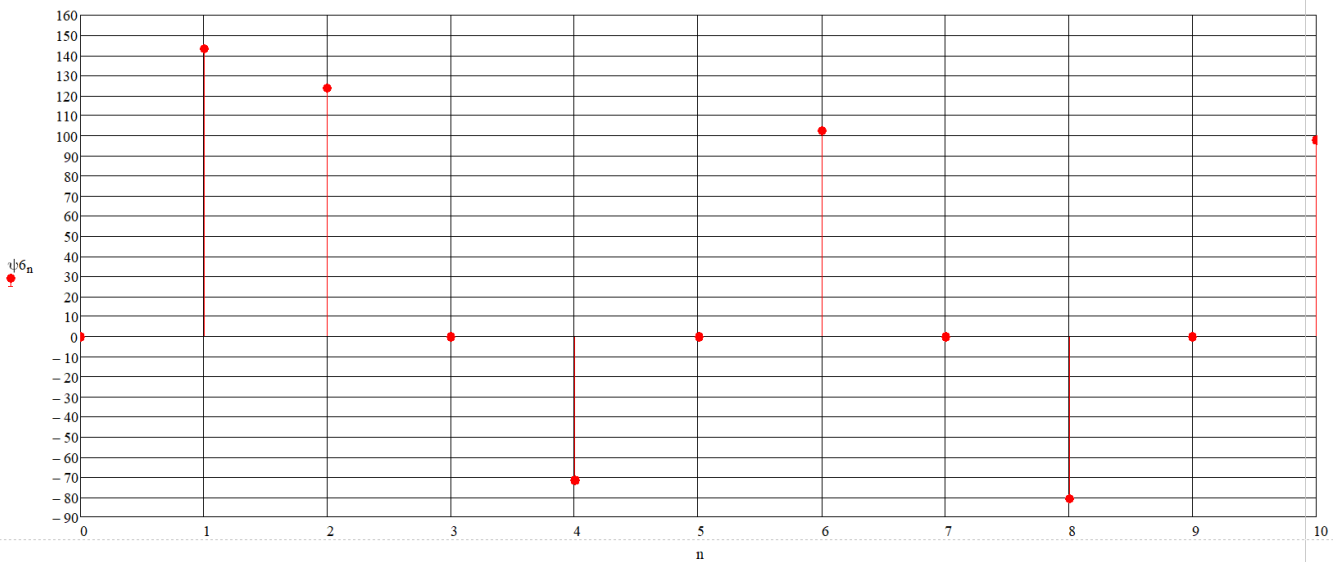


Рисунок 19 – Дискретный спектр фаз напряжения нагрузки

Действующее значение несинусоидального напряжения найдем по формуле 33.

$$U_H = \sqrt{U_{Hm0}^2 + \frac{1}{2} \cdot (U_{Hm}^{(1)} + U_{Hm}^{(2)} + U_{Hm}^{(4)} + U_{Hm}^{(6)} + U_{Hm}^{(8)} + U_{Hm}^{(10)})} = \sqrt{0^2 + \frac{1}{2} \cdot (45,001^2 + 36,75^2 + 12,906^2 + 7,057^2 + 4,439^2 + \dots)} \quad (33)$$

Определим коэффициент искажения несинусоидального напряжения (формула 34).

$$k_H = \frac{U_{Hm}^{(1)}}{U_H} = \frac{45,001}{42,549} = 0,0748 \quad (34)$$

По расчету видно, что значение коэффициента искажения почти равно единице, то есть форма напряжения нагрузки близка к синусоидальной, что соответствует графику напряжению на рисунке 17.

**Вывод:** В данной расчётно-графической работе был исследован однополупериодный выпрямитель с полосовым фильтром.

Разложил в ряд Фурье форму кривой выходного напряжения полупроводникового выпрямителя, построил кривую напряжения, спектр амплитуд и фаз полученного сигнала. Рассчитал напряжение от каждой составляющей ряда Фурье, в нагрузочном резисторе. Записал полученные выражения для тока и напряжения, построил соответствующие кривые. Построили спектры амплитуд и фаз полученного сигнала и определил значение тока и напряжения на нагрузке. Определил действующее значение тока и напряжения на нагрузке. Изобразил схему заграждающего L-C-фильтра и записали полученные выражения тока и напряжения на нагрузке, построили кривую напряжения и тока.