

Лабораторная работа №3

Тема: «Исследование выпрямителей на полупроводниковых диодах»

Цель работы: Компьютерное моделирование работы одно- и двухполупериодных схем выпрямителей, исследование возможности сглаживания пульсаций с помощью фильтров, сравнительный анализ расчетных значений токов и напряжений с экспериментальными данными.

Теоретическая часть

Вольтамперная характеристика реального неуправляемого диода, представленная на рисунке 3.1 имеет две ветви: ветвь прямого тока при $u > 0$ (кривая 1 рисунок 3.1) и ветвь обратного тока при $u < 0$. Обратный ток $i_{обр}$ у диодов сравнительно невелик и составляет единицы микроампер. Прямой ток может достигать у мощных диодов десятков ампер. При теоретическом исследовании процессов выпрямления реальный диод заменяется идеальным, имеющим прямоугольную ВАХ (кривая 2 рисунок 3.1).

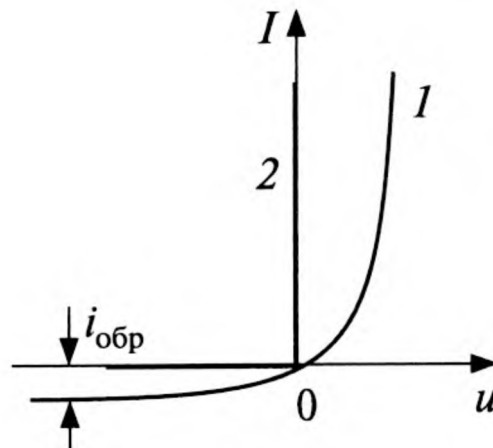


Рисунок 3.1 – Вольтамперные характеристики реального (1) и идеального (2) диодов

На рисунке 3.2 (а) представлена простейшая схема однополупериодного выпрямителя, работающего на резистивную нагрузку. При входном напряжении $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ ток и напряжение на нагрузке R_H имеют вид положительных полуволн (рисунок 3.2 (б)). Моменты отпираания и запираания диода определяются соответственно моментами перехода напряжения и тока через нулевые значения.

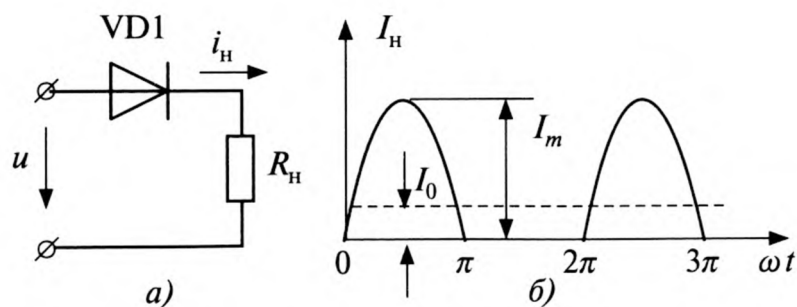


Рисунок 3.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

В мостовой схеме двухполупериодного выпрямителя (рисунок 3.3) при входном напряжении $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ ток в нагрузку поступает в каждый полупериод (рисунок 3.4) и имеет форму двух положительных полувольт $i_H(t) = U_m/R_H |\sin(\omega t)|$. В положительные полупериоды входного напряжения диоды $VD1$ и $VD2$ открыты, а $VD3$ и $VD4$ закрыты, в отрицательные полупериоды диоды $VD1$ и $VD2$ заперты, а $VD3$ и $VD4$ открыты.

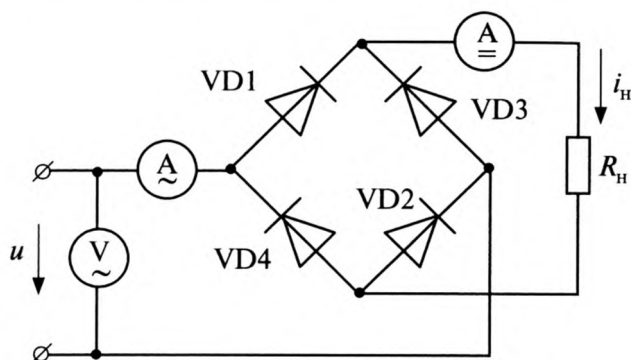


Рисунок 3.3 – Схема двухполупериодного выпрямителя

Напряжение на нагрузке равно $R_H = U_m |\sin(\omega t)|$ и будет повторять по форме кривую тока. Так как каждая ветвь выпрямления содержит два последовательно включенных диода, то потеря амплитудного значения выпрямленного напряжения в два раза меньше, чем у однополупериодного в то время, как средневывпрямленное значение примерно в 2 раза больше.

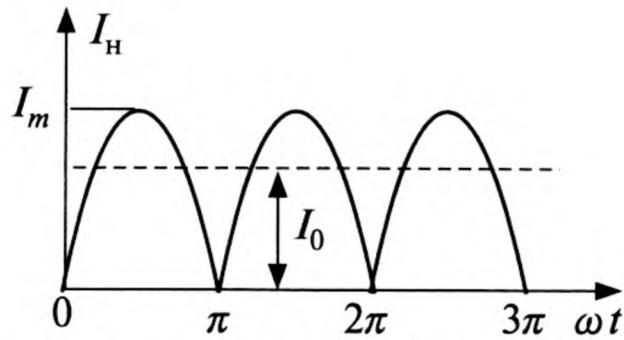


Рисунок 3.4 – Зависимость изменения тока в нагрузке двухполупериодного выпрямителя

Сглаживание пульсаций выпрямленного тока может производиться с помощью емкостного фильтра. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным выходным фильтром представлена на рисунке 3.5.

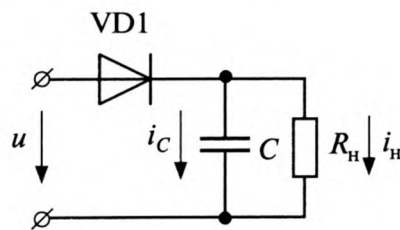


Рисунок 3.5 – Однополупериодный выпрямитель с емкостным фильтром

При открытом состоянии диода $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$ напряжение $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ приложено к резистивно-емкостной нагрузке (рисунок 3.6).

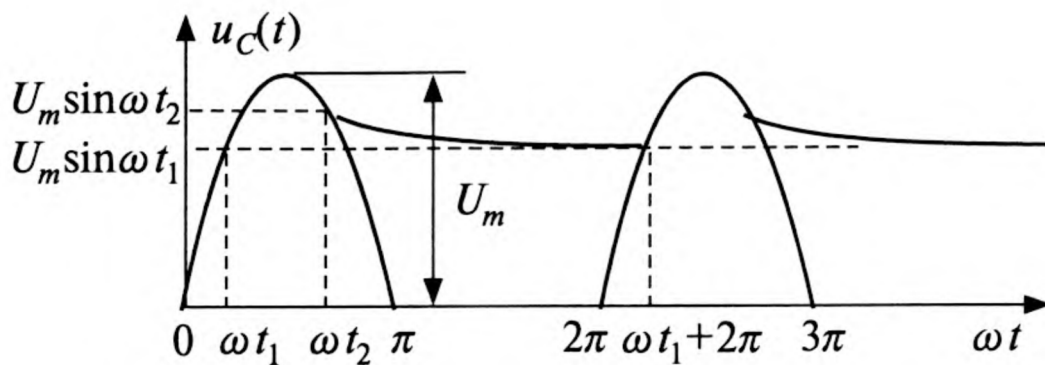


Рисунок 3.6 – Изменение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя

В эти промежутки времени происходит заряд емкостного элемента. Ток протекающий через диод равен сумме токов через резистор и емкость. В момент времени t_2 ток через диод будет равен нулю, а напряжение на конденсаторе

$U_c(\omega t_2) = U_m \sin(\omega t_2)$. После того как диод закроется начинается разряд конденсатора на резистор R_H по экспоненциальному закону

$$U_c(t) = U_m \sin(\omega t_2) e^{-(t-t_2)/R_H C}.$$

Зависимость изменения напряжения на конденсаторе от времени представлена на рисунке 3.6. В момент времени t_1 входное напряжение становится равным напряжению на емкостном элементе, диод закрывается. Для определения момента открытия диода t_1 запишем равенство

$$U_m \sin(\omega t_1) = U_m \sin(\omega t_2) \exp\left(-\frac{2\pi + \omega t_1 - \omega t_2}{\omega R_H C}\right).$$

Емкость C практически выбирают так, чтобы при заданной нагрузке выполнялось соотношение $\omega R_H C > 1$, тогда напряжение на емкости спадает относительно медленно. Схема двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром отличается от рисунка 3.3 тем, что параллельно сопротивлению нагрузки включается емкость.

При $\omega R_H C > 10$, можно принять $\omega t_2 = \frac{\pi}{2}$, для расчета ωt_1 пригодная приближенная формула

$$\sin(\omega t_1) = \exp\left(-\frac{1,5\pi + \omega t_1}{\omega R_H C}\right).$$

При этом следует принять $\omega t_2 < \frac{\pi}{2}$. Зная ωt_1 и ωt_2 , можно определить постоянную составляющую на нагрузке U_0 как среднее значение за период T , в угловом измерении за 2π для однополупериодного выпрямителя и π – для двухполупериодного выпрямителя:

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\omega t_1}^{\omega t_2} U_m \sin(\omega t) d\omega t + \int_{\omega t_2}^{(2\pi + \omega t_1)} U_c(t) d\omega t \right].$$

Графики формы выпрямленного напряжения на нагрузке приведены на рисунке 3.7. При этом для их расчета было принято $U_m=10V$, $m=\omega R_H C=5$. U_{01} , U_{C1} – постоянная составляющая и форма напряжения на нагрузке в однополупериодном выпрямителе, U_{02} , U_{C2} – постоянная составляющая и форма напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя.

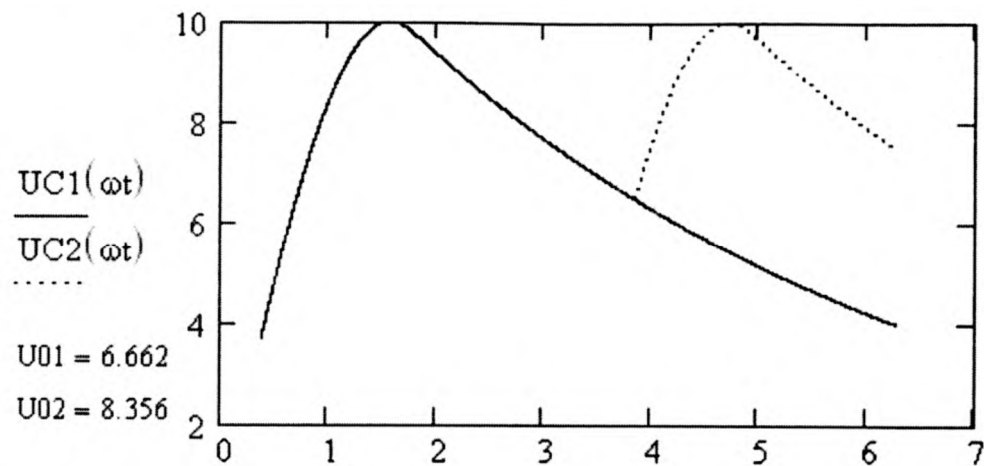


Рисунок 3.7 – Графики напряжения на нагрузке в однополупериодном ($UC1(\omega t)$) и двухполупериодном ($UC2(\omega t)$) выпрямителе при $m=\omega R_n C=5$

Степень пульсации напряжения или тока в нагрузке можно оценить коэффициентом пульсации $K_{\Pi} = (U_{\max} - U_{\min})/U_0$. Если величина $m > 100 \dots 200$, то емкость C не успевает разряжаться за время периода T и напряжение на нагрузке будет практически равно амплитуде входного напряжения U_m . Такой выпрямитель получил название пиковый детектор и применяется в радиотехнических устройствах для детектирования сигналов.

Для сглаживания пульсаций может применяться П-образный фильтр низких частот (рисунок 3.8).

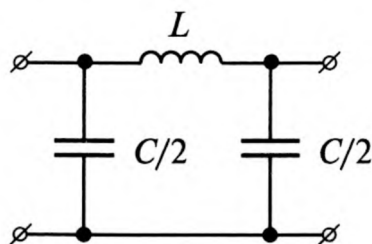


Рисунок 3.8 – П-образный LC-фильтр низких частот

П-образный фильтр низких частот включают между выпрямителем и нагрузкой.

Наибольшее сглаживание пульсаций получают в симметричном фильтре. Частота среза ФНЧ $\omega_c = 2/\sqrt{LC}$ для однополупериодного выпрямителя должна быть в 2...3 раза меньше частоты первой гармоники, а для двухполупериодного выпрямителя в 2...3 раза меньше частоты второй гармоники.

Описание схемы моделирования

Схема моделирования представлена на рисунке 3.9

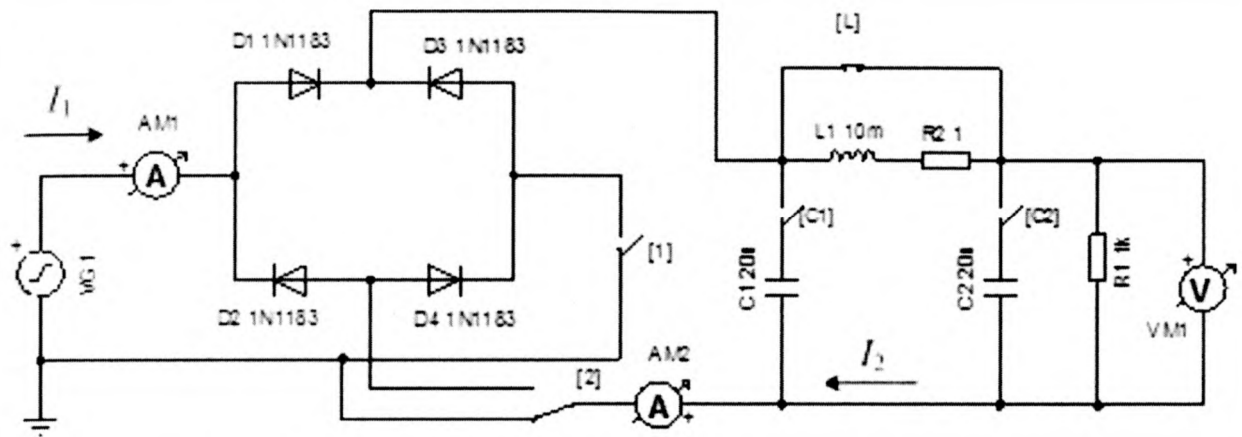


Рисунок 3.9 – Схема моделирования работы выпрямителей

Генератор синусоидального напряжения VG1 подключается к диодному мосту из диодов D1, D2, D3, D4. С помощью ключей (1) и (2) можно установить режим однополупериодного и двухполупериодного выпрямления. Нагрузка $R1 = 1 \text{ кОм}$ подключается к диодам непосредственно или с использованием сглаживающих фильтров ($L1 = 10 \text{ мГн}$, $C1 = C2 = 20 \text{ мкФ}$). Вспомогательный резистор $R2 = 1 \text{ Ом}$ требуется для корректности расчетов в программе и не влияет на точность моделирования.

Исследование однополупериодного выпрямителя

Для выполнения компьютерного моделирования необходимо использовать схему однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра. В ней ключ [1] должен быть разомкнут, ключ [2] находится в нижнем положении, ключ [L] замкнут, ключи [C1], [C2] разомкнуты. Выпрямление выполняется диодом D1.

1. Необходимо установить на генераторе частоту синусоидального сигнала по указанию преподавателя в диапазоне от 50 до 200 Гц (для варианта №1 частота 50 Гц, для каждого последующего варианта частота увеличивается на 5 Гц), амплитуду 10 В.

2. В режиме *Анализ – Анализ переходных процессов* получить графики напряжений на выходе генератора (VG1) и на нагрузке (VM1) (рисунок 3.10).

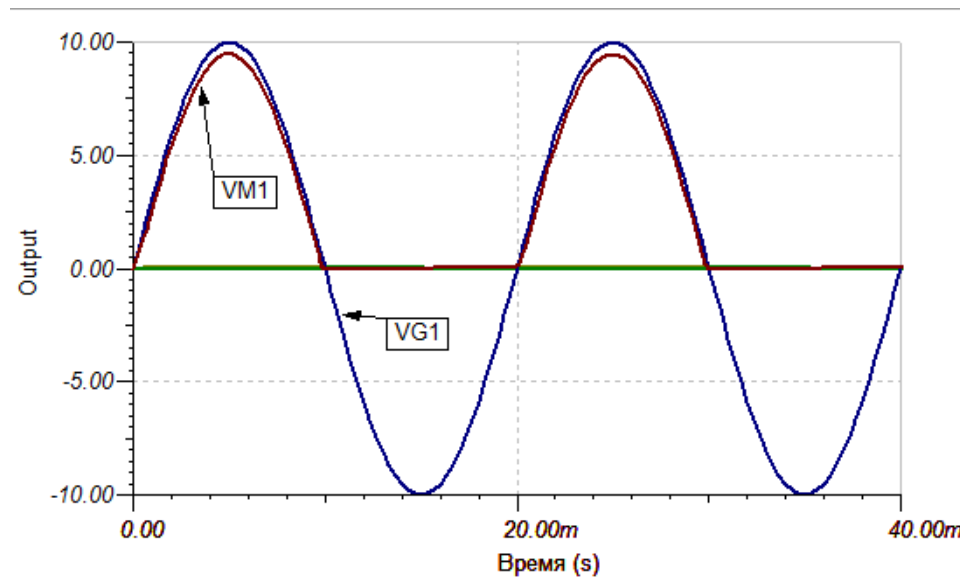


Рисунок 3.10 – Графики напряжений однополупериодного выпрямителя

В окне результатов удалить графики VG1 и VM1. В меню результатов выбрать *Правка – Добавить больше кривых – Постпроцессинг – AM2 – Добавить – Ok*. Получим совпадающие по форме графики токов I_{\sim} и $I_{=}$ (рисунок 3.11).

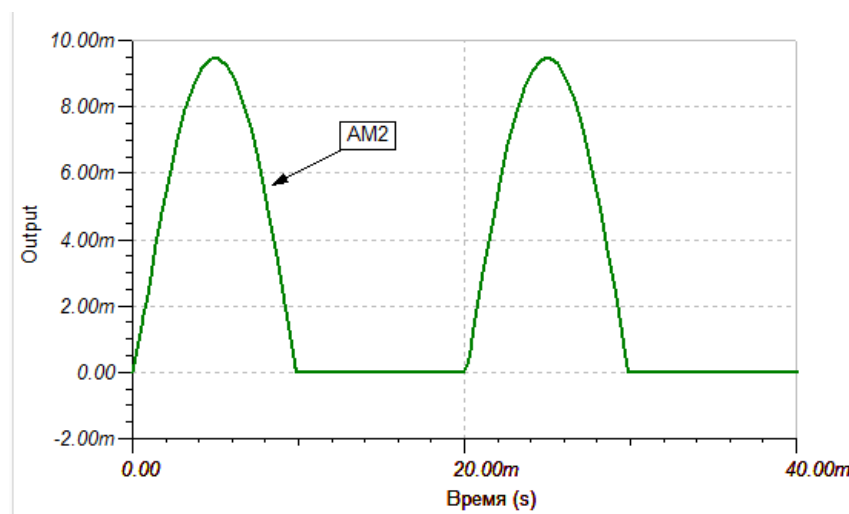


Рисунок 3.11 – Графики токов однополупериодного выпрямителя

3. Измерить значения постоянной составляющей и первой гармоники напряжений и токов в однополупериодном выпрямителе.

Важное пояснение. В программе TINA-8 измерительные приборы (вольтметр, амперметр, мультиметр) измеряют только постоянные и гармонические токи и напряжения. Поэтому в схеме эти приборы поставлены для обозначения выходных измеряемых параметров (Output) и не могут давать правильные значения в

таблицах результатов. Все измерения несинусоидальных величин надо проводить с использованием *анализа Фурье*.

Выбрать в главном меню *Анализ – Анализ Фурье – Ряд Фурье*. В окне *Format* выбрать *Aeff, Beff*. При этом будут вычисляться действующие значения постоянной составляющей и гармоник. В окне *Вывод* выбрать VM1. Нажать *Вычисление*. В таблице получим действующие значения постоянной составляющей 2,94 В ($\kappa = 0$), первой гармоники 3,31 В ($\kappa = 1$), второй гармоники -1,48 В ($\kappa = 2$) и т. д. Знаки минус учитывают начальные фазы гармоник и несущественны для исследования выпрямителя.

4. В окне *Ряд Фурье – Вывод* выбрать AMI. Исследовать спектр входного тока I_1 . В схеме однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой без сглаживающего фильтра входной ток совпадает с выходным.

5. Подключить параллельно сопротивлению нагрузки конденсаторы $C1$ и $C2$. Получить графики напряжений. Повторить исследования по пп. 2-4.

Исследование двухполупериодного выпрямителя

6. В схеме (рисунок 3.9) установить режим двухполупериодного выпрямления без сглаживающего фильтра. Для этого необходимо замкнуть ключи [1] и [L], разомкнуть ключи [C1] и [C2], ключ [2] переключить в верхнее положение. Получить графики напряжений для VG1 и VM1 (рисунок 3.16).

7. Повторить исследования по пп. 2-5 для VM1, AMI, AM2.

Зарегистрировать все графики и действующие значения напряжений и токов

8. Подключить к емкостям $C1$ и $C2$ индуктивность $L1$ так, чтобы образовался П-образный сглаживающий ФНЧ. Рассчитать частоту среза ФНЧ по формуле $f_c = 1/(\pi\sqrt{LC})$. Установить частоту сигнала генератора $f > 1,5 f_c$.

Ряд Фурье

Время начала дискретизации: 0
 Опорная частота: 50
 Количество выборок: 4096
 Количество колебаний: 16
 Формат: Aeff, Beff
 Вывод: VM1

Начальное переходное состояние:
☐ Вычислить опорную точку
☒ Использовать начальные условия
☐ Нулевые начальные условия

[Вычисление]
 [Отмена]
 [Помощь]
 [Черчение]

Коэффициенты Фурье

k	Амплитуда (A)	Амплитуда (B)
0.	2,94	0
1.	3,07m	3,31
2.	-1,48	-114,57u
3.	2,78m	-65,88m
4.	-285,8m	120,19u
5.	2,73m	-36,68m
6.	-117,22m	283,4u

Нелинейное искажение: 45,769%

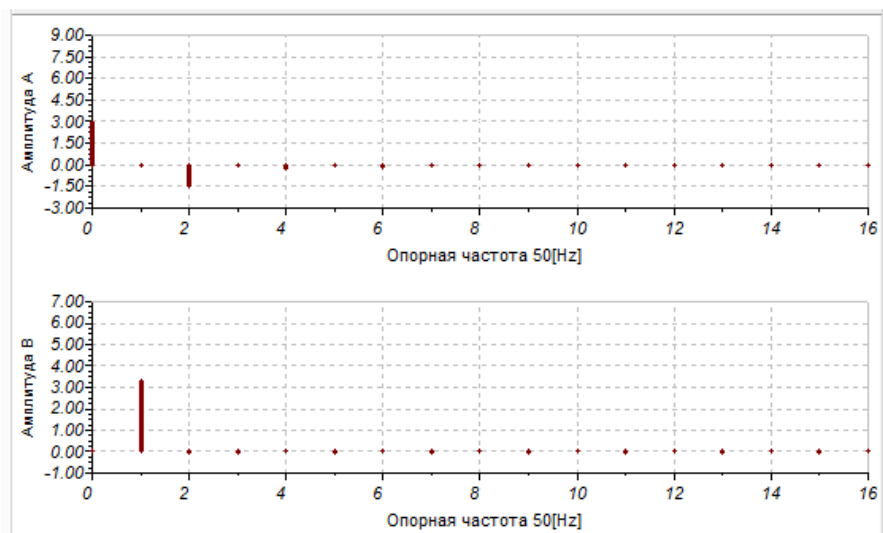


Рисунок 3.12 – Спектр Фурье напряжения на нагрузке однополупериодного выпрямителя

Повторить исследования двухполупериодного выпрямителя с П-образным LC-фильтром. Для этого в режиме *Анализ – Анализ переходных процессов* исследования провести в интервале 0...20 мс и 20...40 мс, когда переходные процессы закончатся.

Сохранив в режиме *Анализ – Анализ переходных процессов* установку интервала 20...40 мс, исследовать спектр VM1, AM1, AM2 (при значении *Запуска показа* 20 м). Определить характер изменения постоянной составляющей и пульсаций, занести полученные графики в отчет.

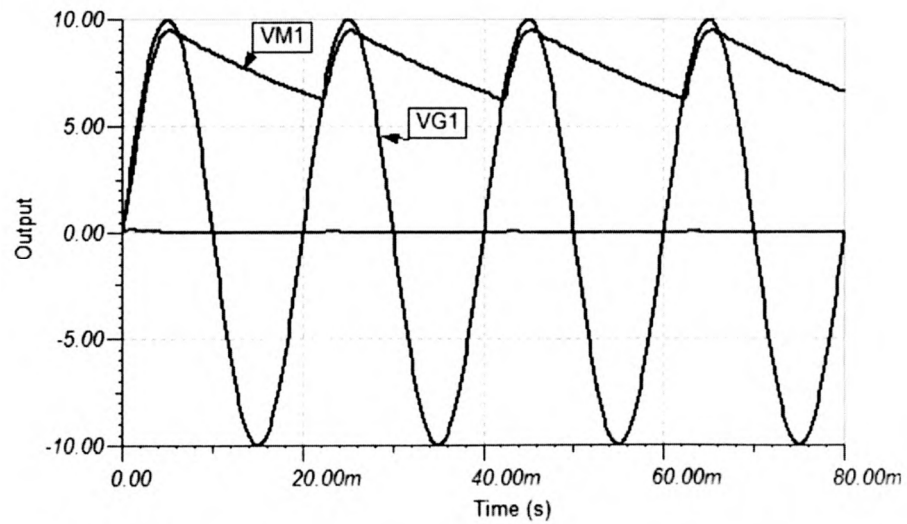


Рисунок 3.13 – Графики напряжений однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

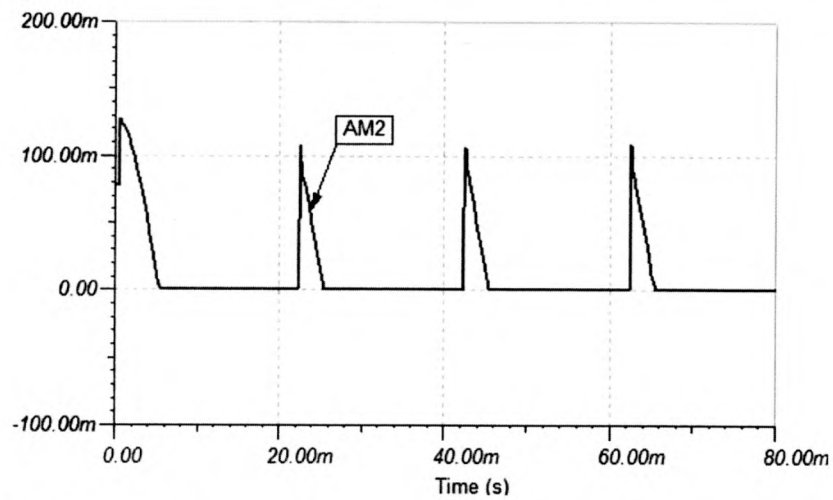


Рисунок 3.14 – Графики тока однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

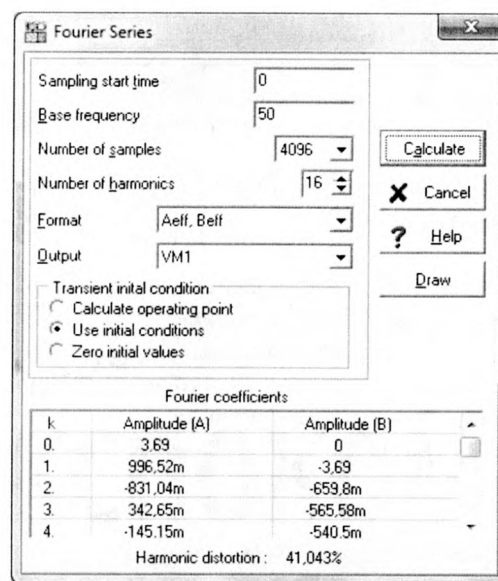


Рисунок 3.15 – Спектр Фурье напряжения на нагрузке однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

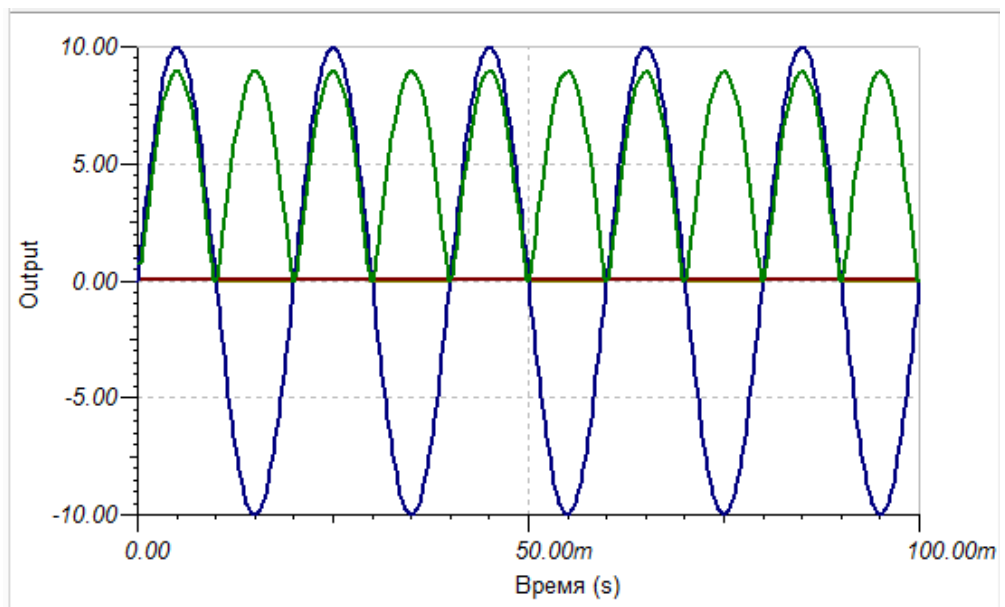


Рисунок 3.16 – Графики напряжений двухполупериодного выпрямителя