

Министерство науки и высшего образования РФ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 16 по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

«Исследование нелинейной цепи переменного тока»

Студент:	
Группа:	
Бригада:	
Подпись студента:	
Дата выполнения:	
Дата защиты:	
Оценка:	
Преподаватель:	
Подпись преподавателя:	

Москва 2025

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

При использовании нелинейных элементов в цепях переменного тока возникает ряд явлений, принципиально не возможных в линейных цепях. Нелинейный элемент (НЭ) обладает способностью преобразовывать спектр воздействующих периодических ЭДС (источников напряжения или тока). Если нелинейная электрическая цепь переменного тока содержит безынерционные в тепловом отношении элементы, то токи и напряжения в них в той или иной степени несинусоидальные. Токи и напряжения принимаются синусоидальными в нелинейных цепях, содержащих только инерционные нелинейные элементы.

Метод кусочно-линейной аппроксимации является одним из основных инженерных методов расчета нелинейных цепей и основан на кусочно-линейной аппроксимации характеристик нелинейного элемента. Возможно графическое и аналитическое решение. Прежде всего осуществляется замена реальной вольт-амперной характеристики кусочно-линейной (отрезками прямых линий). Кривая тока или напряжения строится по методу трех проекций. Аналитическое решение заключается в подстановке в нелинейные уравнения уравнений прямых, при этом на каждом участке задача решается как линейная. Для удобства рисуют схемы замещения на каждом участке вольт-амперной характеристики (ВАХ). Необходимо сопряжение решения на одном участке линейности с решением на другом участке, расчет координат точек перехода с одного линейного участка на другой (углов отсечки).

Графическое решение. На основе метода трех плоскостей графически проецируют значения синусоидального напряжения, приложенного к ВАХ, для различных моментов времени. По ВАХ находят значения тока для тех же временных интервалов и строят график тока. На рис. 1 реальная характеристика нелинейного элемента заменена кусочно-линейной. Определен θ – угол отсечки; условие перехода от одного участка линейности к другому $u(t)|_{\omega t=\theta} = U_0$, или $U_m \sin \theta = U_0$.

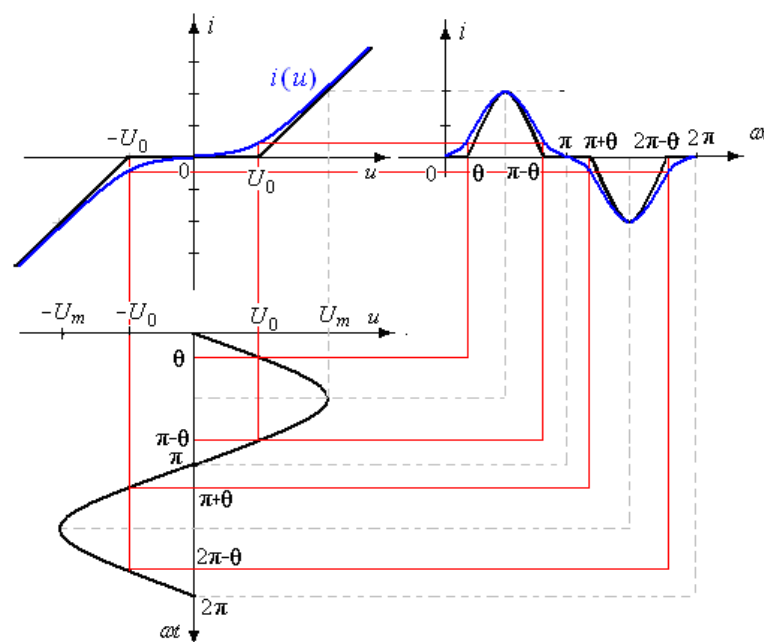


Рис. 1

Аналитическое решение. Для различных участков ВАХ составляют эквивалентные схемы с учетом вида характеристики на этом участке. Для интервала значений напряжения ВАХ $-U_0 \leq u \leq U_0$ ток равен нулю, схема замещения НЭ – «разрыв» и представлена на рис. 2.

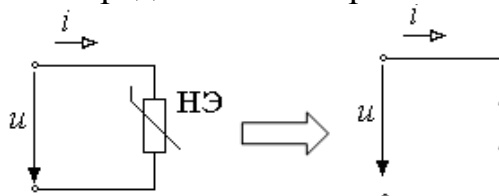


Рис. 2

На интервале $u \leq -U_0$ и $u \geq U_0$ ток не равен нулю, схема замещения НЭ – резистор с сопротивлением R_3 , соединенный последовательно с источником напряжения $E_3 = \pm U_0$ (рис. 3).

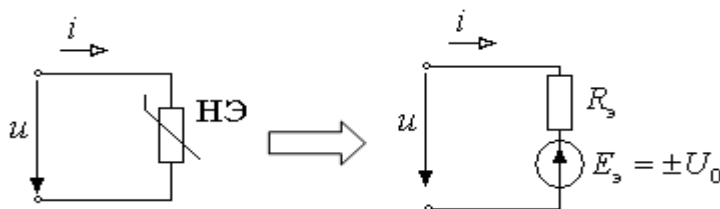


Рис. 3

Аналитически на этом участке ток можно определить по формуле $i(t) = \frac{U_m \sin \omega t \mp U_0}{R_3}$. Знак минус соответствует условию $i(t) \geq 0$. Угол отсечки можно найти из условия $i(\theta) = 0$ или $u(\theta) = U_0$.

Решение, полученное методом кусочно-линейной аппроксимации, имеет

$$\text{вид: } i(t) = \begin{cases} \frac{U_m \sin \omega t \mp U_0}{R_3}, & \theta \leq \omega t \leq \pi - \theta \quad \pi + \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta \\ 0, & 0 \leq \omega t \leq \theta \quad \pi - \theta \leq \omega t \leq \pi + \theta \quad 2\pi - \theta \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} .$$

Реальная кривая (выделена синим цветом) отличается от кривой тока, соответствующей решению методом кусочно-линейной аппроксимации.

Нелинейный элемент *диод* имеет резко выраженную несимметричную вольтамперную характеристику и используется при преобразовании переменного тока в постоянный. Характеристика диода как нелинейного сопротивления может быть аппроксимирована на отдельных участках отрезками прямых линий или аналитической функцией. На рис. 4 показана характеристика идеального диода (управляемого ключа), который может находиться в двух состояниях: «закрыт» при $u < 0$, $i = 0$ и «открыт» при $u \geq 0$, $i \geq 0$. В «открытом» состоянии для идеального диода $u = 0$.

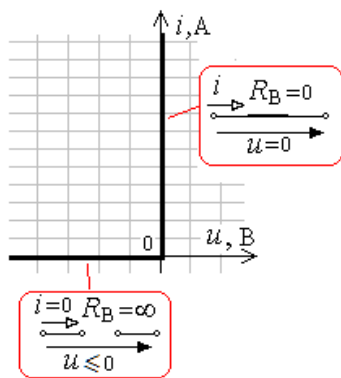


Рис. 4

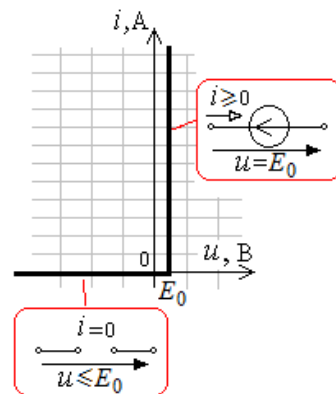


Рис. 5

Используемый в работе кремниевый диод имеет напряжение в проводящем направлении E_0 от 0,5 до 1,0 В, в обратном направлении практически идеален (рис. 5). Кремниевые диоды также используют в качестве полупроводниковых стабилизаторов.

Основные интегральные величины, используемые в практических задачах при несинусоидальных токах и напряжениях:

1. Средние значения (постоянные составляющие):

$$\text{тока } I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t \text{ или напряжения } U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d\omega t .$$

2. Действующие значения:

$$\text{тока } I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\omega t) d\omega t} \text{ или напряжения } U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) d\omega t} .$$

Прибор *магнитоэлектрической системы* измеряет постоянную составляющую периодически изменяющегося тока или напряжения, прибор *электромагнитной, электродинамической* или *тепловой системы* – действующее значение.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное исследование электрических цепей с нелинейными элементами – диодами и стабилизаторами. Снимаются осциллограммы напряжений на элементах цепи при действии на входе источника синусоидального напряжения. Проводятся измерения постоянной составляющей и действующего значения напряжений на элементах цепи. Для аналитического расчета используется метод кусочно-линейной аппроксимации характеристик нелинейных элементов.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. В качестве измерительных приборов используются **МУЛЬТИМЕТРЫ, ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОЛЬТМЕТР** и стрелочный **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВОЛЬТМЕТР**. Для наблюдения кривых напряжения используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Нелинейные элементы электрической цепи выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ И ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА СТУДЕНТОВ К РАБОТЕ

1. На рис. 6 представлена ВАХ кремниевого диода, имеющего напряжение в проводящем направлении $E_0 \approx 0,7$ В. Используя метод кусочно-линейной аппроксимации, рассчитать и построить кривые мгновенного значения тока, напряжения на диоде и выходного напряжения, если действующее значение синусоидального напряжения на входе $U=2$ В, сопротивление линейного резистора $R=100+10n$ Ом (n – номер бригады).

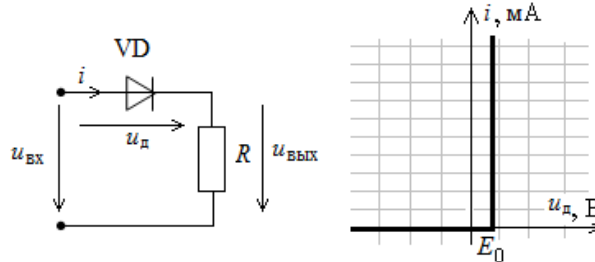


Рис. 6

2. Рассчитать постоянную составляющую и действующее значение напряжения на диоде и напряжения на выходе. Как они изменятся при $E_0=0$?

3. На рис. 7 представлена схема стабилизации напряжения с полупроводниковыми стабилитронами (опорными диодами), где R – балластное сопротивление, $U_{ст}$ – напряжение стабилизации опорного диода. ВАХ нелинейного двухполюсника, представляющего собой соединение двух полупроводниковых стабилитронов, представлена на рис. 7. Используя метод кусочно-линейной аппроксимации, построить кривые мгновенного значения напряжения на балластном сопротивлении $u_R(t)$ и выходного напряжения $u_{вых}(t)$. Частота входного синусоидального напряжения $f=100$ Гц, напряжение стабилизации $U_{ст}=6$ В, действующее значение напряжения на входе $U=7$ В, значение балластного сопротивления R приведено в табл. 1.

4. Определить длительность нарастания выходного напряжения до значения $U_{ст}$ (длительность фронта $t_{ф}$).

5. Рассказать преподавателю о порядке выполнения лабораторной работы (см. Рабочее задание).

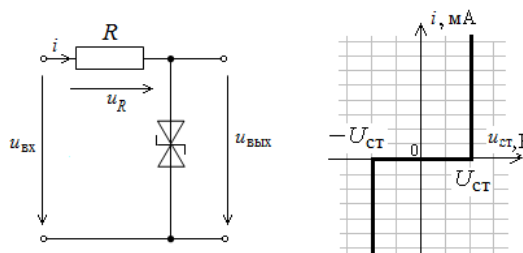


Рис. 7

Таблица 1

Номер бригады	Действующее значение напряжения источника U , В	Сопротивление резистора R , Ом
1, 7, 13	5	100
2, 8, 14	5,5	100
3, 9, 15	6	100
4, 10, 16	6,5	150
5, 11, 17	7	150
6, 12, 18	7,5	150

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

- Собрать цепь по схеме рис. 1П протокола измерений, проверить собранную цепь в присутствии преподавателя.
- Установить значение сопротивления R в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** в соответствии с данными табл. 1. Подключить измерительные приборы.
- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель **Форма** установить в положение \sim . Установить регулятором **Частота** значение частоты $f=100$ Гц, записать его в протокол.
- Регулятором **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить действующее значение напряжения $U=2$ В. Измерение напряжения на входе проводить электронным вольтметром.
- Используя **МУЛЬТИМЕТРЫ** измерить постоянную составляющую и действующее значение напряжения на диоде и напряжения на выходе. Результаты измерений занести в табл. 1П.
- Подключить **ОСЦИЛЛОГРАФ** и зарисовать/сфотографировать кривую входного напряжения $u_{вх}(t)$, напряжения на диоде $u_{д}(t)$ и кривую выходного напряжения $u_{вых}(t)$. Зафиксировать масштаб. Сравнить полученные осциллограммы с соответствующими кривыми из Подготовки к работе.
- Установить действующее значение входного напряжения в соответствии с данными табл. 1. Измерить постоянную составляющую и действующее значение напряжения на диоде и напряжения на выходе, результаты измерений занести в табл. 1П.
- Подключить **ОСЦИЛЛОГРАФ** и зарисовать/сфотографировать кривую входного напряжения $u_{вх}(t)$, напряжения на диоде $u_{д}(t)$ и кривую выходного напряжения $u_{вых}(t)$. Зафиксировать масштаб.
- Собрать цепь по схеме рис. 1П протокола измерений, проверить собранную цепь в присутствии преподавателя. Регулятором **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить действующее значение напряжения $U=7$ В. Установить величину балластного сопротивления R в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** в соответствии с данными табл. 1.
- Подключить **ОСЦИЛЛОГРАФ** и зарисовать/сфотографировать кривую напряжения на балластном сопротивлении $u_R(t)$ и кривую выходного напряжения $u_{вых}(t)$. Зафиксировать масштаб. Сравнить полученные осциллограммы с соответствующими кривыми из Подготовки к работе.
- По осциллограмме выходного напряжения определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ и длительность нарастания выходного напряжения до значения $U_{ст}$ (длительность фронта $t_{ф}$).
- Утвердить и подписать протокол измерений у преподавателя.
- Выключить тумблер **Сеть** источника **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

5. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 16

I часть

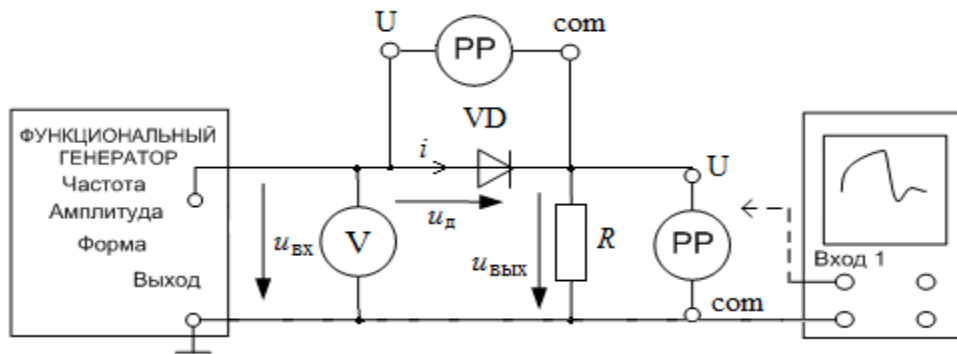


Рис. 1П

Частота $f = \underline{\hspace{2cm}}$ Гц. Сопротивление линейного резистора: $R = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.
 Результаты измерений представлены в табл. 1П.

Таблица 1П

Опыт	На входе		На диоде		На выходе	
	$U_{вх}, В$	$U_m, В$	$U_{0д}, В$	$U_d, В$	$U_0, В$	$U, В$
опыт						
расчет	2	2,82				
опыт						
расчет						

Замечание. Для сравнения опытных и теоретических данных провести расчет постоянной составляющей, действующего значения напряжения на диоде, напряжения на входе при значении напряжения на входе из табл. 1.

II часть

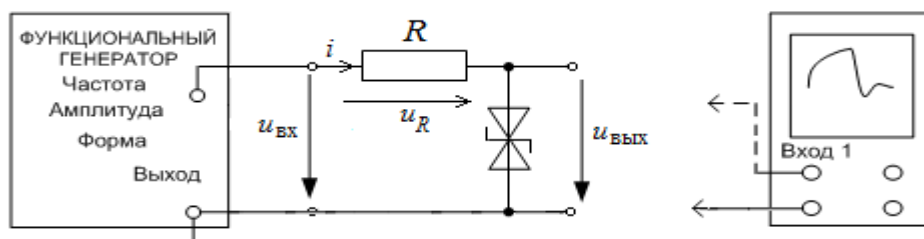


Рис. 2П

Частота $f = \underline{\hspace{2cm}}$ Гц, действующее значение напряжения на входе $U = \underline{\hspace{2cm}}$ В,
 амплитуда входного напряжения $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Значение балластного сопротивления: $R = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.

Для осциллограмм $m_u = \underline{\hspace{2cm}}$ В/см, $m_t = \underline{\hspace{2cm}}$ мс/см.

Напряжение стабилизации $U_{ст} = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Длительность нарастания выходного напряжения до значения $U_{ст}$ (длительность фронта) $t_\phi = \underline{\hspace{2cm}}$ с.

Теоретический расчет $U_{ст}$ при $t_\phi = \underline{\hspace{2cm}}$ с.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Корректно оформленная подготовка к работе.
2. В Подготовке к работе при расчете методом кусочно-линейной аппроксимации должны быть приведены схемы замещения нелинейных элементов и соответственно расчетные схемы на каждом участке (интервале) линейности, определены углы отсечки и записано аналитическое выражение мгновенных значений напряжения на диоде $u_d(t)$ и на выходе $u_{\text{вых}}(t)$. Расчет постоянной составляющей и действующего значения напряжения на диоде и на выходе может быть проведен с помощью компьютерной программы MathCAD или SMath Studio (по выбору студента).
3. Кривые мгновенных значений должны быть построены с указанием масштаба на интервале $0 \leq t \leq 1,5T$, T – период.
4. Для осциллограмм должен быть указан масштаб m_u и m_t .
5. Сделать письменный вывод о проделанной работе.

7. ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

Все ответы на контрольные вопросы должны сопровождаться необходимыми схемами, формулами, численными результатами расчётов, графическими иллюстрациями (графиками, диаграммами и т.д.) и содержать однозначный ответ на поставленные вопросы.

1. Как изменятся показания приборов и кривые мгновенных значений для схемы на рис. 1П, если нелинейный элемент подключить в обратном направлении?
2. Как изменятся показания приборов и кривые мгновенных значений для схемы на рис. 1П, если частоту входного напряжения увеличить в два раза?
3. Как изменятся показания приборов и кривые мгновенных значений для схемы на рис. 1П, если действующее значение входного напряжения увеличить в два раза?
4. Как изменятся показания приборов и кривые мгновенных значений для схемы на рис. 1П, если действующее значение входного напряжения уменьшить в два раза?
5. Как изменятся показания приборов и кривые мгновенных значений для схемы на рис. 1П, если диод будет идеальным?
6. На рис. 3П показана вольтамперная характеристика диода. Постройте кривые мгновенных значений напряжения на диоде и выходного напряжения, если действующее значение синусоидального напряжения на входе $U=2$ В, сопротивление линейного резистора $R=100$ Ом.

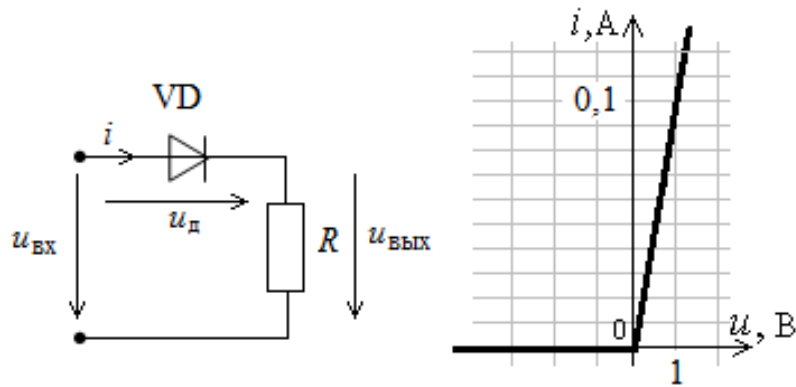


Рис. 3П

7. На рис.4П показана вольтамперная характеристика диода. Постройте кривые мгновенных значений напряжения на диоде и выходного напряжения, если действующее значение синусоидального напряжения на входе $U=5$ В, сопротивление линейного резистора $R=100$ Ом.

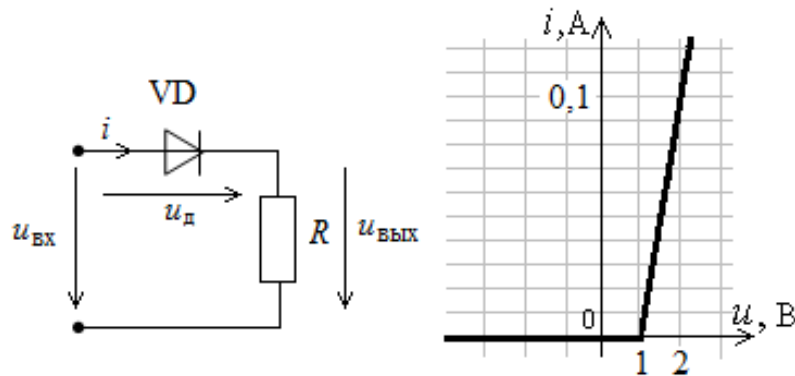


Рис. 4П

8. При каком соотношении действующего значения входного напряжения и напряжения $U_{ст}$ длительность фронта кривой выходного напряжения $u_{вых}(t)$ для схемы на рис. 2П составит $T/16$?

9. На рис. представлена схема стабилизация, сопротивление нагрузки $R_{н}=R$. Построить кривые напряжений $u_R(t)$ и $u_{вых}(t)$, если амплитуда входного напряжения $U_m=4U_{ст}$.

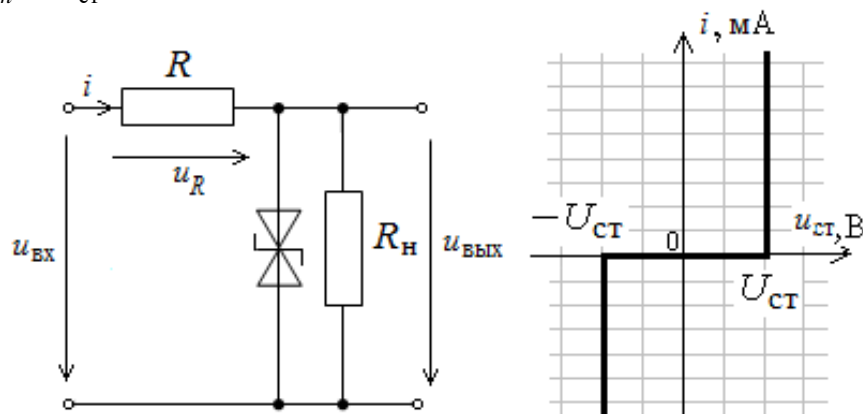


Рис. 5П

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример использования программы MathCAD (схема электрической цепи приведена на рис. 2.1)

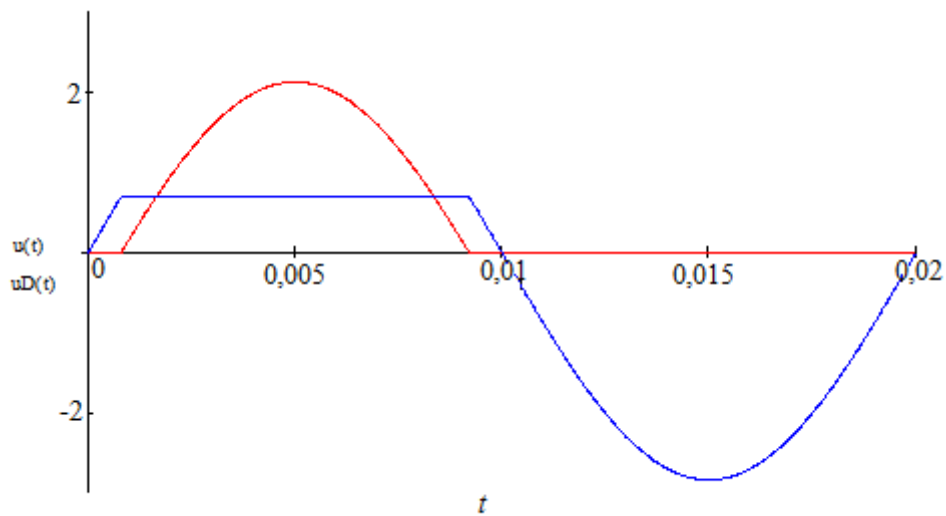
$$E_0 := 0.7 \quad U := 2 \quad U_m := \sqrt{2} \cdot U \quad U_m = 2.828 \quad f := 50$$

$$\theta := \arcsin\left(\frac{E_0}{U_m}\right) \quad \theta = 0.25 \quad \theta_{\text{г}} := \theta \cdot \frac{180}{\pi} \quad \theta_{\text{г}} = 14.329 \quad T := \frac{1}{f}$$

КРИВЫЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ

$$u(t) := \begin{cases} (U_m \sin(2\pi \cdot f \cdot t) - E_0) & \text{if } \theta \leq 2\pi \cdot f \cdot t \leq \pi - \theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{на выходе}$$

$$u_D(t) := U_m \sin(2\pi \cdot f \cdot t) - u(t) \quad \text{на диоде}$$



ПОСТОЯННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

$$U_0 := \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad U_0 = 0.578 \quad \text{на выходе}$$

$$U_{0D} := \frac{1}{T} \int_0^T u_D(t) dt \quad U_{0D} = -0.578 \quad \text{на диоде}$$

ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ

$$U := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad U = 0.986 \quad \text{на выходе}$$

$$U_D := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_D(t)^2 dt} \quad U_D = 1.489 \quad \text{на диоде}$$