

# 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 2024

## 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 вольтамперной 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  $\theta$  – угол отсечки; условие перехода от одного участка линейности к другому  $u(t)|_{\omega t=\theta} = U_0$ , или  $U_m \sin \theta = U_0$ .

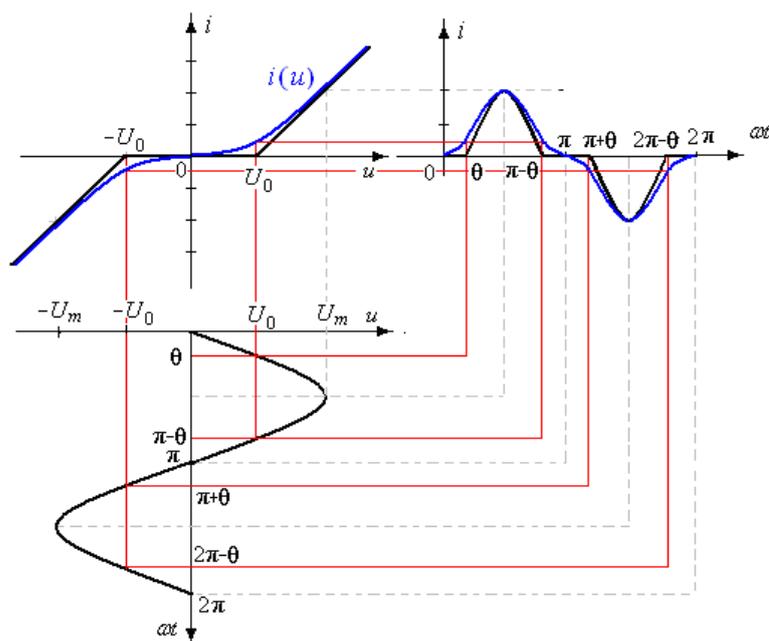


Рис. 1

**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.

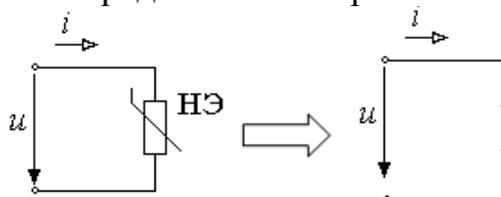


Рис. 2

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).

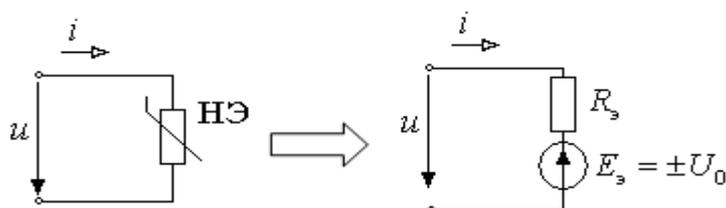


Рис. 3

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  $u = 0$ .

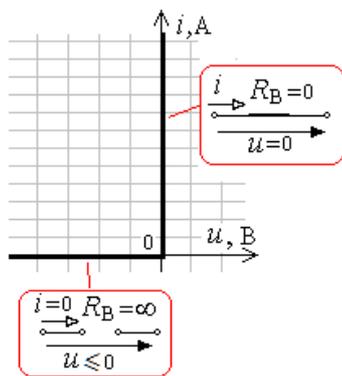


Рис. 4

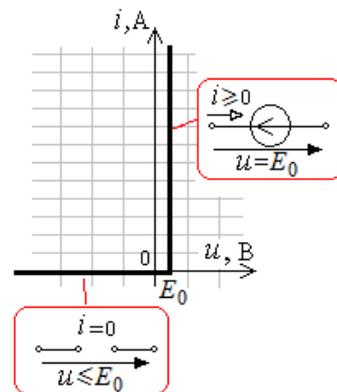


Рис. 5

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).

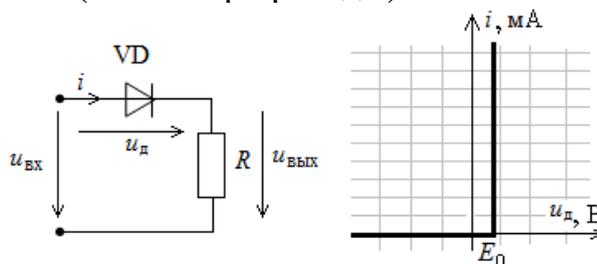


Рис. 6

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).

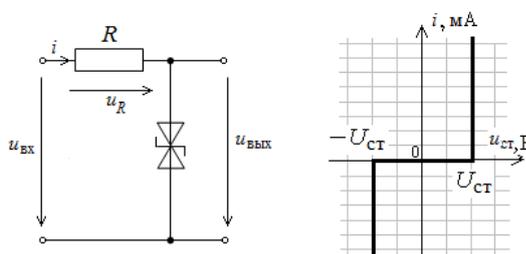


Рис. 7

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

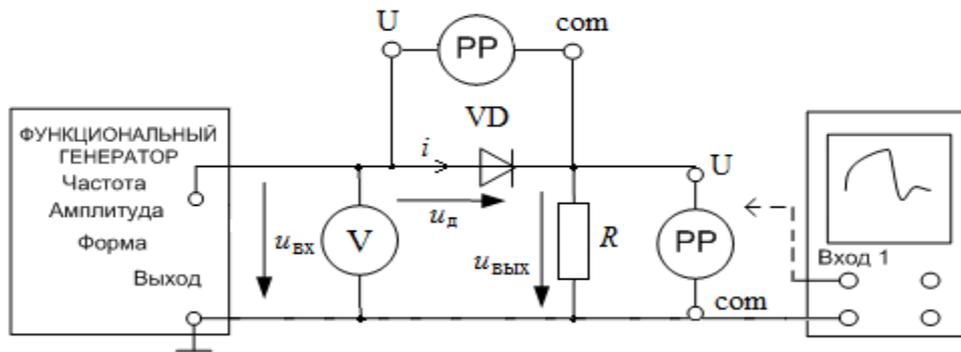


Рис. 1П

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

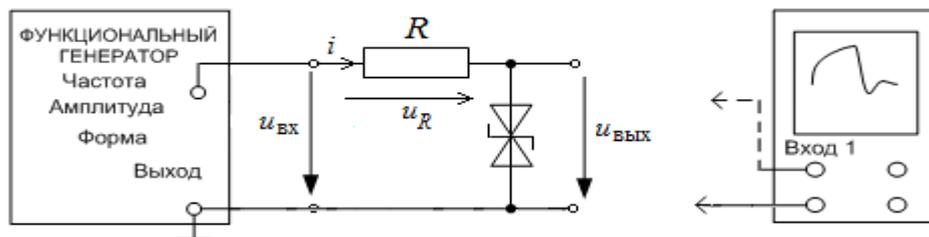


Рис. 2П

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.

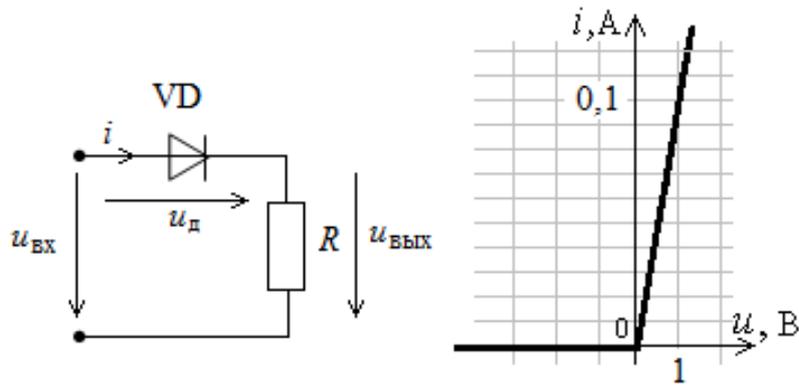


Рис. 3П

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.

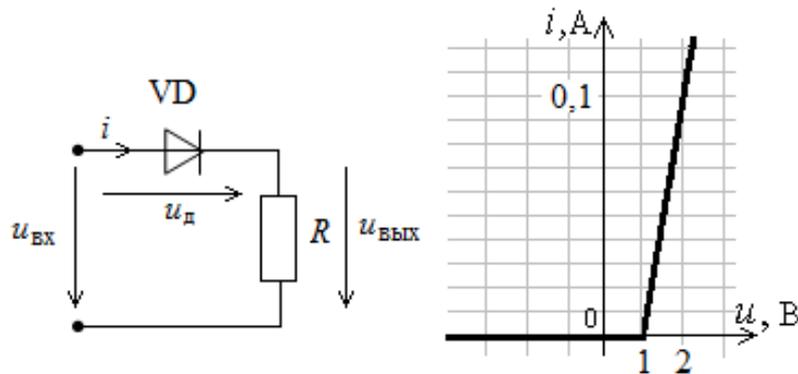


Рис. 4П

8. При каком соотношении действующего значения входного напряжения и напряжения  $U_{ст}$  длительность фронта кривой выходного напряжения  $u_{ввых}(t)$  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  $u_{ввых}(t)$ , если амплитуда входного напряжения  $U_m=4U_{ст}$ .

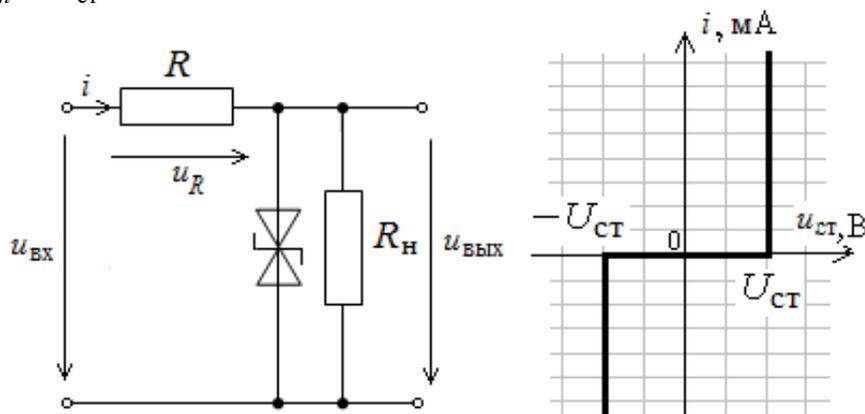


Рис. 5П

## ПРИЛОЖЕНИЕ

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

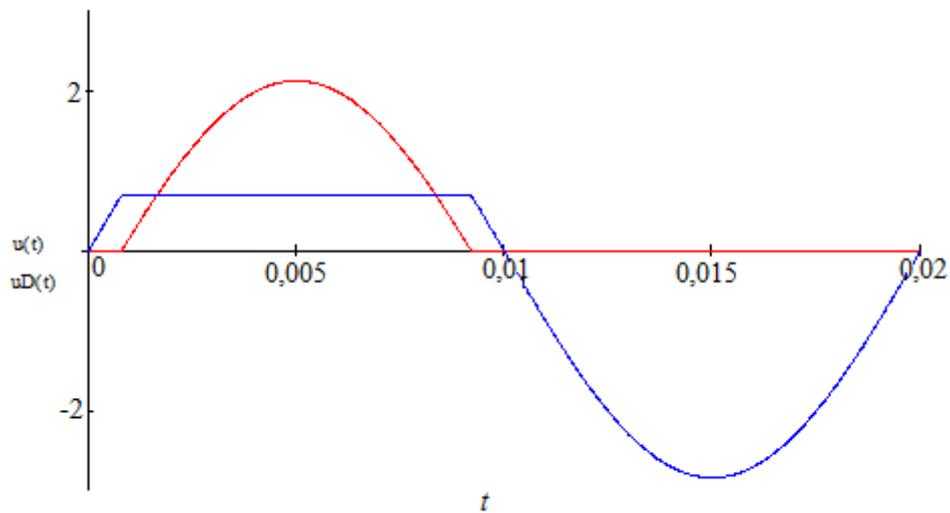
$$E_0 := 0.7 \quad U := 2 \quad U_m := \sqrt{2} \cdot U \quad U_m = 2.828 \quad f := 50$$

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

КРИВЫЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ

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

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



ПОСТОЯННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

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

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

ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ

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

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