

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С.Н. МИХАЛИН, Т.Ю. КОВАЛЕВА

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторные работы №9-11

*Методическое пособие
по курсам*

«Электрофизика и электроника», «Основы теории цепей» и
«Электрофизика информационных систем»

для студентов, обучающихся по направлениям «Приборостроение», 220100,
«Управление в технических системах», 220200 и
«Информатика и вычислительная техника», 230100

Под редакцией Ю.А. Казанцева

УДК 621.3
М 692

Рецензент:

канд. техн. наук, проф. Геворкян В.М.

Михалин С.Н., Ковалева Т.Ю.

Основы электротехники. Сборник лабораторных работ. Часть 2. Методическое пособие под ред. Ю.А. Казанцева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 16 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов обучающихся по курсам «Электрофизика и электроника», «Основы теории цепей», «Электрофизика информационных систем» по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Приборостроение» и «Управление в технических системах».

Практикум содержит 3 лабораторные работы и методический материал, необходимый для их выполнения на оборудовании лаборатории «Основы электротехники и электроники» кафедры «Электрофизики информационных систем». Выполнение работ подразумевает подготовку к работе – теоретический расчет и подготовку шаблона к выполнению работы, проведение физических измерений и анализ результатов, а также математическое моделирование с помощью программного обеспечения *Design Lab 8.0*. Практикум ориентирован на индивидуальное выполнение студентом заданий лабораторных работ.

Лабораторная работа №9

Нелинейные элементы электрических цепей.

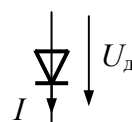
Цель работы: Изучение статических характеристик нелинейных элементов – диода и стабилитрона. Расчет токов и измерения в нелинейных цепях.

Подготовка к работе

2. Статические характеристики нелинейных элементов (НЭ).

1.1. В цепи рис. 1.1 графическим методом (изобразив вольтамперные характеристики (ВАХ) линейной части схемы – эквивалентного генератора и нелинейного элемента (НЭ) – диода) определить ток НЭ с заданной аналитической аппроксимацией его ВАХ:

$$\begin{cases} I = 6.4 \cdot 10^{-7} e^{26.2U_d} \text{ мА, если } U_d > 0 \text{ В} \\ I = 0 \text{ мА, при } U_d \leq 0 \text{ В} \end{cases}$$



1.2. В схеме рис. 1.1 определить и построить зависимость $U_2 = f(U_1)$, если ВАХ НЭ аппроксимирована двумя отрезками прямых:

$$\begin{cases} I = \left(\frac{U_d}{3} - 0.2 \right) \text{ А, если } U_d > 0.6 \text{ В} \\ I = 0 \text{ А, при } U_d \leq 0.6 \text{ В} \end{cases}$$

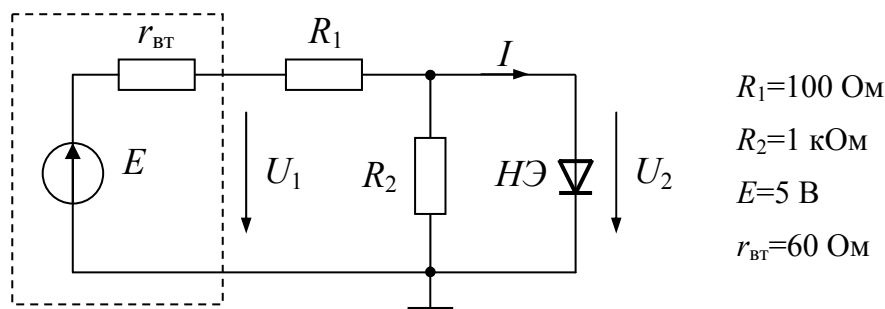
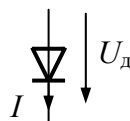


Рис. 1.1 – Разветвленная цепь с нелинейным элементом.

Выполнение работы

2. Измерение ВАХ НЭ.

2.1. Нарисовать и собрать электрическую цепь – рис. 1.2, дополнив ее измерительными приборами. Изменяя величину резистора R , измерить напряжения на зажимах диода (U_2) и ток цепи (I), результаты представить в виде таблицы 1.

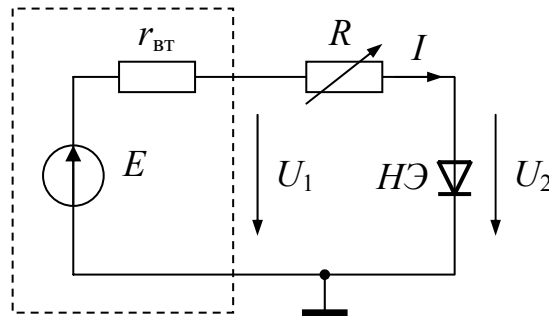


Рис. 1.2 – Схема для измерения ВАХ диода.

Таблица 1

$R, \text{ Ом}$	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900
$U_2, \text{ В}$												
$I, \text{ мА}$												

- 2.2. По полученным данным построить участок ВАХ диода, соответствующий состоянию открытого диода. Аппроксимировать характеристику двумя отрезками прямых. Нарисовать схемы замещения каждого участка и найти их параметры.
- 2.3. Нарисовать и собрать схему рис. 1.3. Установить параметры генератора (Г): амплитуда 5 В, частота 100 Гц (см. указание). Подключить к цепи осциллограф: первый канал к зажимам источника, второй – к зажимам диода. Включив режим XY осциллографа, наблюдать зависимость $U_2 = f(U_1)$. Сохранить результат в виде графического файла (рекомендуемый масштаб по каналам осциллографа 1 В/дел).
- 2.4. В схеме рис. 1.3 заменить диод на стабилитрон, нарисовать схему. Установив амплитуду напряжения на генераторе 10 В, получить и сохранить в виде графического файла зависимость $U_2 = f(U_1)$ (рекомендуемый масштаб по каналам осциллографа 2 В/дел). Выделив характерные линейные участки характеристики, нарисовать эквивалентные схемы замещения и определить их параметры (см. указание).

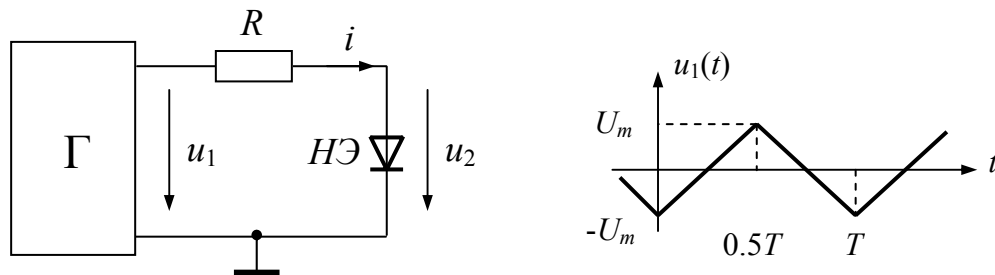


Рис. 1.3 – Схема для измерения зависимости $U_2 = f(U_1)$, $R=200 \text{ Ом}$

2. Измерения в разветвленной цепи с нелинейным элементом.

- 3.1. Собрать и нарисовать электрическую цепь рис. 1.1.
- 3.2. С помощью вольтметра и амперметра (*GDM-8135*) измерить напряжение и ток диода.
- 3.3. Изменить полярность источника и повторить измерения (нарисовать соответствующую схему). Объяснить результат.
- 3.4. В схеме рис. 1.1, отключив диод, измерить параметры эквивалентной схемы замещения активного двухполюсника (измерив U_p и $I_{кз}$, рассчитать $R_{вх}$). В координатах $I(U)$ построить внешнюю характеристику активного двухполюсника и экспериментальную ВАХ диода (по данным таблицы 1). Определить точку пересечения характеристик и сопоставить результат с данными п. 3.2.
- 3.5. Заменяя в цепи рис. 1.1 источник постоянного напряжения генератором напряжения треугольной формы с амплитудой 10 В и частотой 100 Гц, получить зависимость $U_2 = f(U_1)$. Сохранить результат в виде графического файла. Определить напряжение прямого смещения диода, сопоставить результаты с данными п. 1.2 и п. 2.2.

Указание.

1. При измерениях с помощью осциллографа в режиме XY необходимо убедиться:
 - входы канала открыты (пропускают постоянную составляющую);
 - постоянная составляющая на выходе генератора отсутствует (иначе – компенсировать ее плавной регулировкой уровня смещения сигнала).
2. Для выполнения пункта 2.4 необходимо по данным осциллографа записать координаты двух точек для каждой прямой выделяемой на осциллограмме $U_2=f(U_1)$, по которым рассчитать линейную зависимость напряжения от тока (см. приложение), т.е. получить аппроксимированную по линейному закону ВАХ НЭ.

Лабораторная работа №10

Разветвленные нелинейные цепи при синусоидальном источнике напряжения.

Цель работы: Исследование нелинейных цепей при воздействии источника напряжения синусоидальной формы.

Подготовка к работе

1. Расчет нелинейных цепей с источниками синусоидального напряжения.

- 1.1. Для схемы рис. 1.1 в соответствии с вариантом определить напряжение $u_2(t)$, если амплитуда синусоидального напряжения $u_1(t)$ равна 5 В, а частота – 1 кГц (диод считать идеальным). Построить графики напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, отобразив 2 периода сигналов. Записать разложение напряжения $u_2(t)$ в ряд Фурье. Рассчитать действующее и среднее значения напряжения $u_2(t)$.

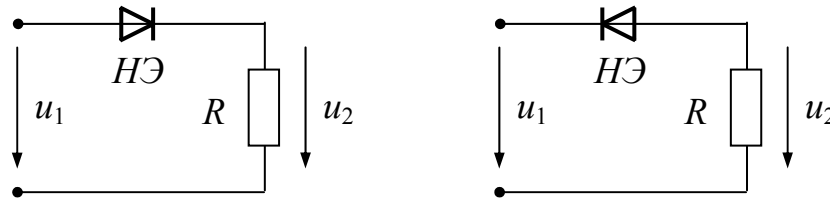


Рис. 1.1 – Схема однополупериодного выпрямителя напряжения, $R=1$ кОм (слева – для четного варианта, справа – для нечетного).

- 1.2. В схеме рис. 1.2 (при $R_H \rightarrow \infty$) определить напряжение $u_2(t)$, если известна ВАХ стабилитрона, $u_1(t) = 2 \sin(2\pi 10^3 t)$ В. Нарисовать график, отобразив на нем 1.5÷2 периода напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$.

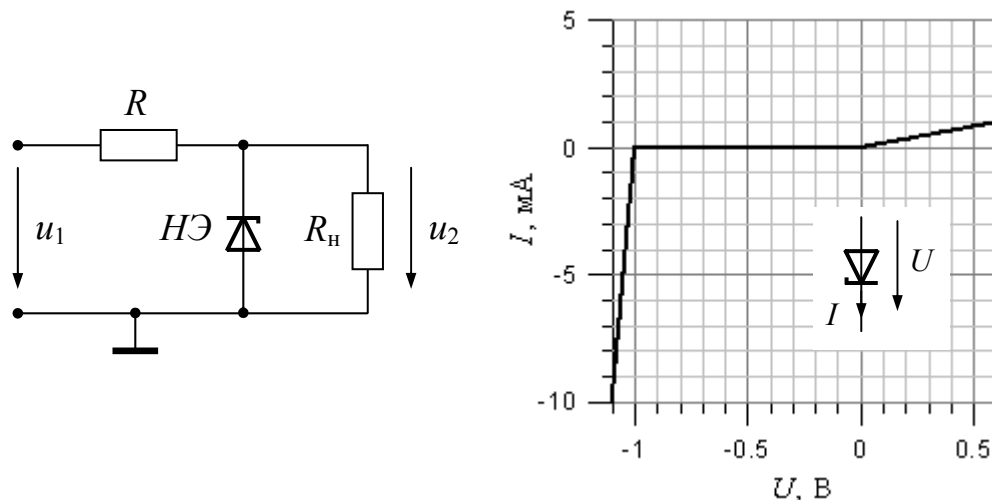


Рис. 1.2 – Цепь со стабилитроном и его ВАХ ($R=200$ Ом).

- 1.3. В схеме рис. 1.2 определить $U_2 = f(U_1)$ для двух случаев: $R_H \rightarrow \infty$ и $R_H = 2$ кОм. Построить эти зависимости на одном графике. Провести соответствие между линейными участками ВАХ стабилитрона и характерными линейными участками характеристики $U_2 = f(U_1)$.

Выполнение работы

2. Нелинейные элементы в цепях синусоидального напряжения.

- 2.1. Согласно варианту нарисовать и собрать цепь рис. 1.1, подключив к ее входу генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В, частотой 1 кГц. Подключить к схеме осциллограф для наблюдения входного и выходного напряжений. Сопоставить форму напряжений с кривыми, изображенными на графике п. 1.1. Измерить амплитуды входного напряжения (u_1) и максимальное (минимальное) значение выходного напряжения (u_2).
- 2.2. С помощью функций осциллографа поочередно получить спектры напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$. По осциллограмме напряжения $u_2(t)$ определить относительные амплитуды гармоник. Результаты записать в таблицу 1 (см. указания).

Таблица 1

i – номер гармоники		1	2	3	4
Амплитуда (экспер.), дБ					
U_i / U_1	теор.	1	0.424	0	0.085
	эксперимент	1			

- 2.3. С помощью вольтметра измерить действующие значения напряжений u_1 , u_2 и постоянную составляющую напряжения u_2 (см. указание п. 4). Результаты сопоставить с данными п. 1.1.
- 2.4. Нарисовать и собрать схему двухполупериодного выпрямителя – рис. 1.3, подключив к ее входу генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В, частотой 1 кГц. С помощью вольтметра измерить действующие значения напряжений u_1 , u_2 и постоянную составляющую напряжения u_2 .

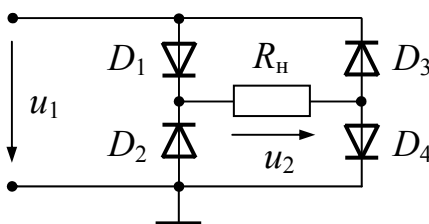


Рис. 1.3 – Схема двухполупериодного выпрямителя напряжения, $R_H = 1$ кОм

- 2.5. Подключить к схеме осциллограф для наблюдения напряжений на диодах D_2 и D_4 . С помощью функций осциллографа получить напряжение $u_2(t)$. Сохранить результат в виде графического файла.
- 2.6. Подключить параллельно сопротивлению нагрузки конденсатор $C=390$ нФ (нарисовать схему). С помощью вольтметра измерить действующие значения напряжений u_1 , u_2 и постоянную составляющую напряжения u_2 . Сохранить осциллограмму напряжения $u_2(t)$ в виде графического файла. Сравнить полученную кривую с данными п. 2.5 и объяснить результат.
- 2.7. Свести в таблицу 2 действующие значения входного, выходного напряжений ($U_{д1}$, $U_{д2}$) и уровни постоянной составляющей выходного напряжения ($U_{ср2}$), полученных в пп. 2.3, 2.4 и 2.6. Сделайте выводы об эффективности соответствующих схем для получения постоянного напряжения.

Таблица 2

№	п. 2.3	п. 2.4	п. 2.6
$U_{д1}$, В			
$U_{д2}$, В			
$U_{ср2}$, В			

- 2.8. Нарисовать и собрать цепь рис. 1.2 при $R_H \rightarrow \infty$. Подключить ко входу цепи генератор синусоидального напряжения с амплитудой 10 В и частотой 1 кГц. Подключить к цепи осциллограф для наблюдения напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Сохранить результат в виде графического файла. Повторить измерения для случая $R_H=2$ кОм. Сопоставить результаты.

Указание.

- Для получения спектров сигналов в п. 2.2 необходимо сначала выставить масштаб по времени 2.5 мс/дел, затем включить режим преобразования Фурье на нужном канале (кнопки «Матем», «FFT», «Источник») и установить его параметры: окно Хеннинга, масштаб 5 дБ/дел, положение: +3 деления.
- Логарифмическая шкала (в дБ) связана с линейной соотношением: $u_{дБ}=20\text{Lg}(u_{\text{лин}})$, где под функцией $u_{\text{лин}}$ понимается отношение напряжений, токов и т.п.
- При наблюдении на экране осциллографа однополярных сигналов необходимо смещать уровень запуска синхронизации осциллографа.
- Вольтметр $GDM-8135$ в режиме измерения переменных напряжений измеряет действующее значение напряжения без учета постоянной составляющей. Поэтому для получения действующего значения напряжения таких сигналов необходимо вычислять квадратный корень из суммы квадратов показаний вольтметра в режимах измерения постоянного и переменного напряжений.

Лабораторная работа №11

Цепи с распределенными параметрами.

Цель работы: Исследование цепей с распределенными параметрами – длинных линий передачи.

Подготовка к работе

1. Расчет установившегося режима в цепях с распределенными параметрами.

- 1.1. Для воздушной линии без потерь – рис. 1.1 построить распределение действующего значения напряжения вдоль ее длины при $Z_{\text{н}}=2Z_{\text{в}}$ (четный вариант) и $Z_{\text{н}}=0.5Z_{\text{в}}$ (нечетный вариант) и определить ток нагрузки $\dot{I}_{\text{н}}$, если $U_1=120$ В.

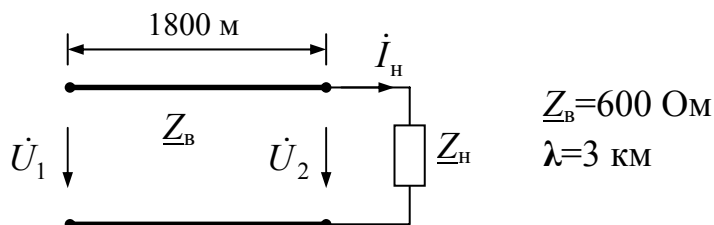


Рис. 1.1 – Длинная линия с нагрузкой

- 1.2. Выполнить согласование длинной линии рис. 1.1. с помощью четвертьволнового трансформатора, включенного в конце линии (перед нагрузкой) – как показано на рис. 1.2. В соответствии с вариантом рассчитать параметры четвертьволнового трансформатора. Определить ток нагрузки $\dot{I}_{\text{н}}$ после согласования ($U_1=120$ В).

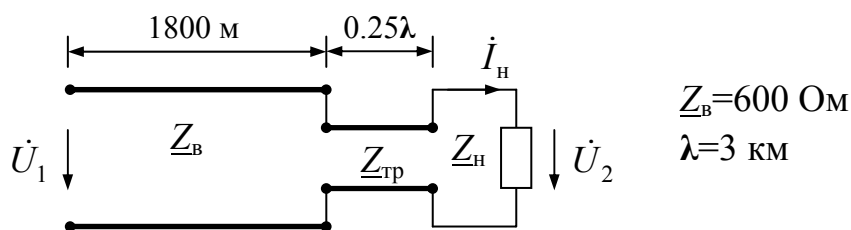


Рис. 1.2 – Длинная линия с устройством согласования

- 1.3. Сравнить результаты расчетов тока нагрузки в п. 1.1 и п. 1.2. Сделать выводы о передаче мощности от генератора к нагрузке в режимах согласованной и несогласованной нагрузки (рассчитать отношение выходной мощности к входной в обоих случаях).

Выполнение работы

2. Расчет установившихся режимов нагрузки длинной линии передачи с помощью численного моделирования.

- 2.1. В среде *Design Lab* выполнить расчет комплексного значения тока нагрузки для цепи – рис. 1.1, записать результат и сравнить с данными п. 1.1.
- 2.2. Выполнить моделирование согласования четвертьволновым трансформатором, определить ток нагрузки. Сопоставить результаты с данными п. 1.2.
- 2.3. Выполнить расчет во временной области цепи рис. 1.1, объяснить запаздывающее появление напряжения на нагрузке. Аналитически обосновать величину задержки.

Указание.

В *Design Lab* блок, моделирующий длинную линию передачи без потерь, называется «*T*», в котором необходимо задать параметры:

- Z_0 – волновое сопротивление линии [Ом];
- F – частота сигнала [Гц];
- NL – электрическая длина линии, определяемая отношением физической длины линии к длине волны;
- TD – не задавать значений (время распространения сигнала).

Моделирование в частотной области, выполняется с помощью раздела «AC Sweep», в котором необходимо указать число точек расчета (минимальное значение 2), начальную и конечную частоты. Для наблюдения напряжений в узлах необходимо воспользоваться блоком «VPRINT1», в настройках которого необходимо указать величины, которые будут рассчитаны и выведены в выходной файл. Для наблюдения тока в ветви, необходимо применять блок «IPRINT», который включается в разрыв ветви и в настройках которого необходимо указать величины подлежащие расчету (более подробно – см. описание программы *Design Lab* 8¹).

¹ А.Т. Кобяк, Н.Р. Новикова, В.И. Паротькин, А.А. Титов. Применение системы DESIGNLAB 8.0 в курсах ТОЭ и электроники. – М.: Московский энергетический институт, 2001. – 128 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Об аппроксимации результатов измерений в нелинейных цепях

Рассмотрим электрическую цепь рис. П1 ($R_1=100$ Ом), в которой генератор (Γ) вырабатывает напряжение треугольной формы $u_1(t)$ и подключенный двухканальный осциллограф (канал 1 и канал 2), работающий в режиме XY, показывает зависимость напряжения U_2 как функцию напряжения U_1 – рис. П2.

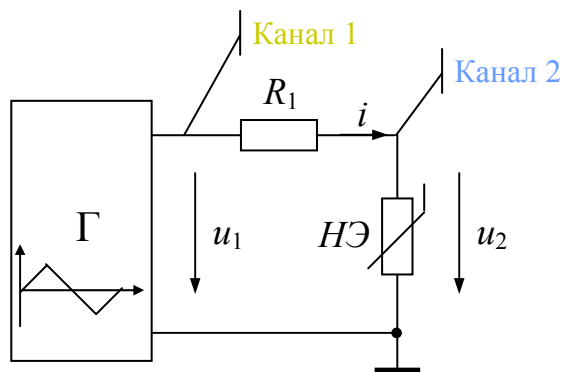


Рис. П1 – Разветвленная цепь с нелинейным элементом.

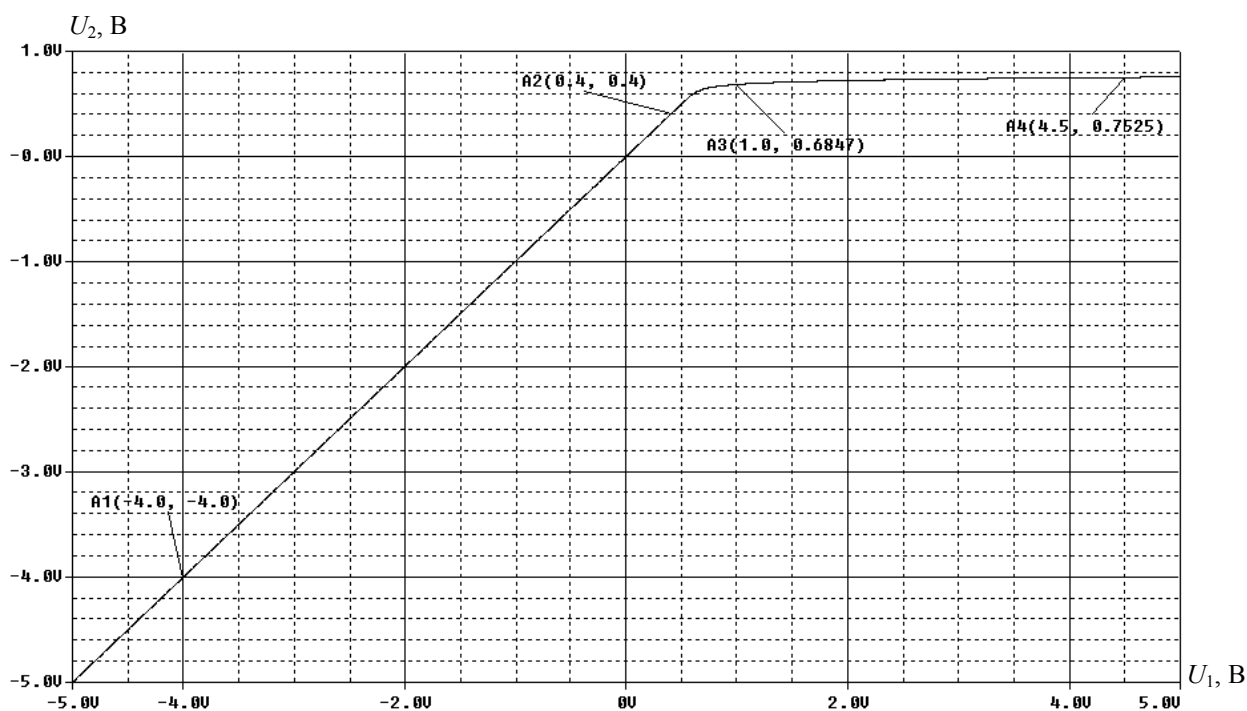


Рис. П2 – Зависимость $U_2=f(U_1)$.

Для аппроксимации экспериментально полученной характеристики отрезками прямых необходимо выделить характерные участки нелинейной характеристики. Допустим точки A_1, A_2, A_3, A_4 разделяют характеристику на такие участки. Тогда зависимость рис. П2 можно аппроксимировать тремя отрезками: A_1A_2, A_2A_3 , и A_3A_4 (или двумя отрезками A_1A_5, A_5A_4 , где точку A_5 получить пересечением прямых A_1A_2 и A_3A_4). Этим линейным участкам можно поставить в соответствие участок линейной цепи и найти его параметры. Для этого необходимо знать координаты концевых точек

отрезков, отождествляемых с линеаризуемыми участками: $A_1(-4.0; -4.0)$, $A_2(0.4; 0.4)$, $A_3(1.0; 0.6847)$, $A_4(4.5; 0.7525)$. Для каждого из полученных линейных участков можно рассчитать связь тока цепи с напряжением, т.е. построить участок линеаризованной ВАХ НЭ и поставить ему в соответствие эквивалентную схему замещения в виде, например, последовательного соединения идеального источника ЭДС (E_x) и резистора (R_x). Результаты расчета тока цепи сведены в таблицу П1 (по закону Ома для участка цепи ток

НЭ: $I^{A_k} = \frac{U_1^{A_k} - U_2^{A_k}}{R_1}$, где k – номер точки: $1 \div 4$). Отметив на воображаемой

ВАХ НЭ полученные точки (U_2, I) и соединив их отрезками прямых, определим номинальные величины элементов последовательной схемы замещения, которые представлены в таблице П2 ($\Delta U_2 = U_2^{A_{n+1}} - U_2^{A_n}$, $\Delta I = I^{A_{n+1}} - I^{A_n}$, n – номер точки: $1 \div 3$; ВАХ линеаризованного участка: $U_2 = E_x + IR_x$).

Таблица П1

k	1	2	3	4
$U_2, \text{В}$	-4.0	0.4	0.6847	0.7525
$I, \text{мА}$	0	0	3.153	37.475

Таблица П2

Участок	1-2	2-3	3-4
$\Delta U_2, \text{В}$	4.4	0.2847	0.0678
$\Delta I, \text{мА}$	0	3.153	34.322
$R_x, \text{Ом}$	∞	90.295	1.9754
$E_x, \text{В}$	0	0.4	0.6785

В результате получена аппроксимированная (по линейному закону – пунктир) ВАХ НЭ – рис. П3 (точки B соответствуют точкам A на рис. П2), каждому участку которой соответствует своя схема замещения с параметрами E_x и R_x .

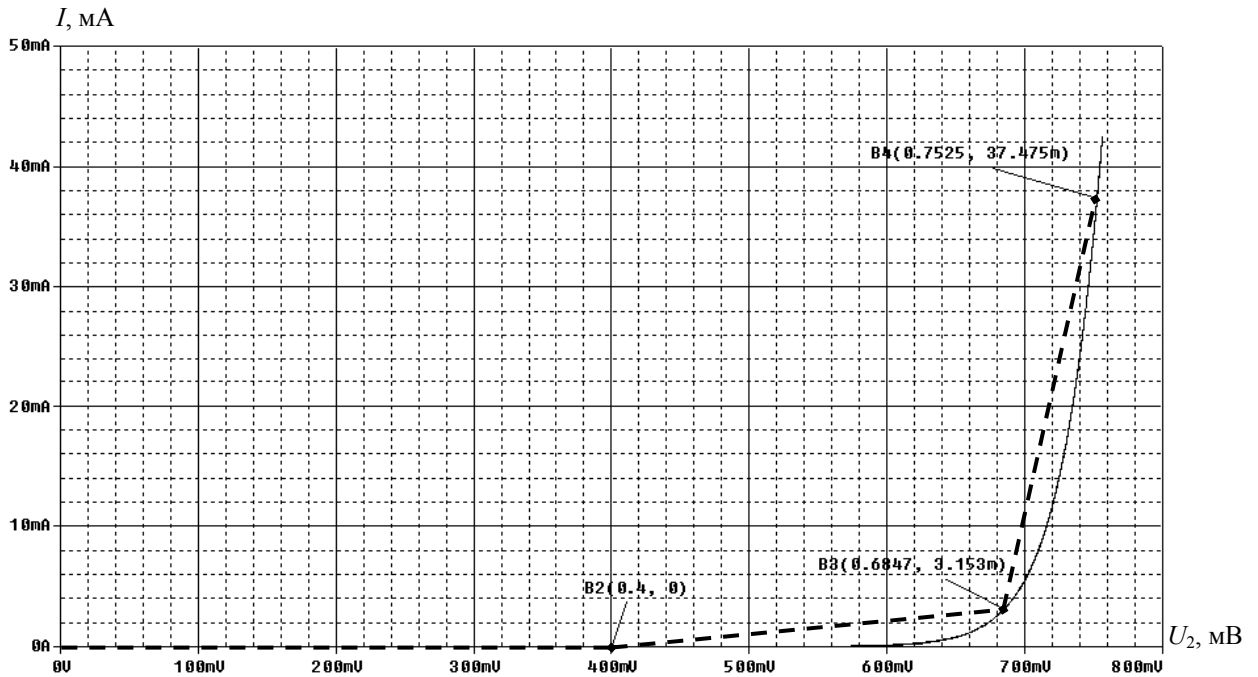


Рис. П3 – Аппроксимированная ВАХ НЭ.

Линейные цепи с распределенными параметрами

Анализ цепей с распределенными параметрами основан на моделях, которые позволяют учесть соизмеримость длины волны сигнала и геометрических размеров проводников, элементов и т.п. На рис. П4 представлена модель участка двухпроводной линии длиной Δx (R_0 – сопротивление проводов на единицу длины (Ом/м); G_0 – проводимость среды между проводами на единицу длины (См/м); C_0 – емкость между участками проводов (Ф/м); L_0 – индуктивность контура, образованного участками проводов (Гн/м)). Совокупность этих параметров называется первичными параметрами линии. Если первичные параметры линии не зависят от координаты x (т.е. от выбора точки рассмотрения малого участка Δx) – такая линия называется однородной.

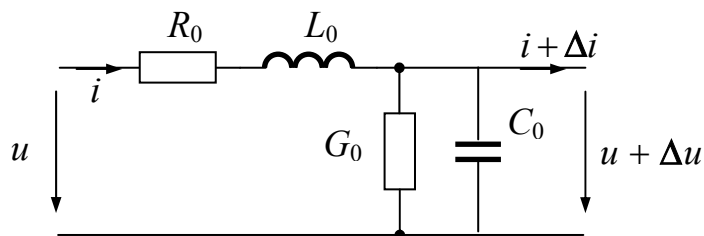


Рис. П4 – Схемная модель участка линии длиной Δx

Для цепи рис. П4 запишем выражения для первого и второго законов Кирхгофа:

$$\begin{cases} u + \Delta u = u - R_0 i \Delta x - L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \Delta x \\ i + \Delta i = i - G_0 (u + \Delta u) \Delta x - C_0 \frac{\partial (u + \Delta u)}{\partial t} \Delta x \end{cases}$$

Сгруппировав слагаемые, разделив на Δx , устремив Δx к нулю и переходя к изображениям (считая начальные условия нулевыми), получим:

$$\begin{cases} \frac{dU(p)}{dx} = -Z_0(p)I(p) \\ \frac{dI(p)}{dx} = -Y_0(p)U(p) \end{cases}$$

где $Z_0(p) = R_0 + pL_0$ – «продольное» операторное сопротивление;

$Y_0(p) = G_0 + pC_0$ – «поперечная» операторная проводимость.

Продифференцировав эти выражения по x , получим дифференциальные уравнения второго порядка (относительно x), где $\gamma = \gamma(p) = \sqrt{Z_0 Y_0}$ – коэффициент распространения:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(p)}{dx^2} - \gamma^2 U(p) = 0 \\ \frac{d^2 I(p)}{dx^2} - \gamma^2 I(p) = 0 \end{cases}$$

Эти уравнения называются телеграфными и имеют решение в виде наложения «волн» (прямых и отраженных) напряжения и тока:

$$U(p, x) = U_{\text{пр}}(p, x) + U_{\text{отр}}(p, x) = A_1(p)e^{-\gamma x} + A_2(p)e^{\gamma x}$$

$$I(p, x) = I_{\text{пр}}(p, x) - I_{\text{отр}}(p, x) = B_1(p)e^{-\gamma x} - B_2(p)e^{\gamma x}$$

A_1, A_2, B_1, B_2 – коэффициенты прямых и отраженных волн напряжения и тока, соответственно.

Величина $Z_{\text{в}} = \frac{Z_0}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$ называется волновым сопротивлением.

Параметры γ и $Z_{\text{в}}$ называют вторичными параметрами линии.

Для определения коэффициентов прямой и отраженной волн необходимо воспользоваться граничными условиями:

$$\begin{cases} U(p, 0) = U_1(p) = A_1 + A_2 \\ U(p, l) = U_2(p) = A_1 e^{-\gamma l} + A_2 e^{\gamma l} = I(p, l)Z_{\text{н}} = I_2(p)Z_{\text{н}} = \frac{Z_{\text{н}}}{Z_{\text{в}}} (A_1 e^{-\gamma l} - A_2 e^{\gamma l}) \end{cases}$$

Здесь $x=0$ – точка подключения генератора, $x=l$ – противоположный конец линии, точка подключения нагрузки. Соответственно, U_1, I_1, U_2, I_2 – напряжения и токи в начале и в конце линии.

В установившемся режиме уравнения, описывающие процессы в линии упрощаются: переход к символическому методу позволяет избежать

непосредственного дифференцирования по времени. Полученные соотношения следует переписать при $p = j\omega$:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_{\text{пр}}(x) + \dot{U}_{\text{отр}}(x) = \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x}$$

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_{\text{пр}}(x) - \dot{I}_{\text{отр}}(x) = \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_B} e^{-\gamma x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_B} e^{\gamma x}$$

Вторичные параметры оказываются комплексными величинами:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(j\omega L_0 + R_0)(j\omega C_0 + G_0)}$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{j\omega L_0 + R_0}{j\omega C_0 + G_0}}$$

коэффициент α (действительная часть постоянной распространения) называют коэффициентом затухания;

коэффициент β (мнимая часть постоянной распространения) называют коэффициентом фазы.

Если первичные параметры $R_0 = 0$, $G_0 = 0$ (или активными составляющими по сравнению с реактивными можно пренебречь), то такую линию называют «линией без потерь»:

$$\gamma = j\beta = \sqrt{j\omega L_0 j\omega C_0} = j\omega \sqrt{L_0 C_0}$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Расчет режима длинной линии основан на учете граничных условий. Наиболее простой вид решение имеет, если переместить начало координат в точку подключения нагрузки и поменять направление оси на противоположное. С учетом этого уравнения длинной линии примут следующий вид:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_{\text{пр}}(y) + \dot{U}_{\text{отр}}(y) = \underline{B}_1 e^{\gamma y} + \underline{B}_2 e^{-\gamma y}$$

$$\dot{I}(y) = \dot{I}_{\text{пр}}(y) - \dot{I}_{\text{отр}}(y) = \frac{\underline{B}_1}{\underline{Z}_B} e^{\gamma y} - \frac{\underline{B}_2}{\underline{Z}_B} e^{-\gamma y}$$

Если нагрузкой является сопротивление \underline{Z}_H , то можно получить соотношение постоянных прямой и отраженной волн, которое называется коэффициентом

$$\text{отражения: } \tilde{N} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B} = \frac{\dot{U}_{\text{обр}}(0)}{\dot{U}_{\text{пр}}(0)} = n \angle \eta.$$

Для линии без потерь уравнения длинной линии можно упростить:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_2 \cos(\beta y) + j\dot{I}_2 \underline{Z}_B \sin(\beta y)$$

$$\dot{I}(y) = j \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \sin(\beta y) + \dot{I}_2 \cos(\beta y)$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(y) = \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_H + j\underline{Z}_B \operatorname{tg}(\beta y)}{\underline{Z}_B + j\underline{Z}_H \operatorname{tg}(\beta y)}$$

Рассматривая линии передачи сигналов (или энергии) оказывается необходимым обеспечение согласованного режима работы источника (генератора), то есть к нему не должны возвращаться отраженные волны (коэффициент отражения равен нулю). Очевидно, для этого требуется равенство сопротивления нагрузки волновому сопротивлению линии. Мерой согласования в линии служит коэффициент стоячей волны, равный, по определению, отношению максимального значения действующего напряжения (тока) к минимальному:

$$K_c = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{B_1 + B_2}{B_1 - B_2} = \frac{1 + n}{1 - n}.$$

Для решения задач согласования применяются согласующие устройства. В основе простейших согласующих устройств два элемента: шлейф (короткозамкнутый или разомкнутый отрезок линии), включаемый либо в разрез одного из проводников линии (последовательное включение), либо параллельно участку линии с нагрузкой (параллельное включение); четвертьволновый трансформатор (отрезок линии со специально подобранным волновым сопротивлением длиной $\lambda/4$).

Принцип согласования четвертьволновым трансформатором основан на том, что входное сопротивление линии с волновым сопротивлением $Z_{\text{тр}}$ и активной нагрузкой R оказывается равно: $Z_{\text{вх}}(\lambda/4) = \frac{Z_{\text{тр}}^2}{R}$.

Тогда для решения задачи согласования активной нагрузки необходимо взять четвертьволновый отрезок линии с сопротивлением $Z_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{в}} R}$.

Скомпенсировать реактивную составляющую сопротивления нагрузки или входного сопротивления в некоторой точке можно, подобрав шлейф соответствующей длины, т.к. входное сопротивление х.х. шлейфа или к.з. шлейфа носит чисто реактивный характер.