

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 2

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

*Лабораторный практикум с использованием
компьютерной программы Mathcad*

Факультет электроэнергетический

Направления: 13.03.02, 09.03.04, 09.03.01, 27.03.04

Электро- и теплоэнергетика

Информатика и вычислительная техника

Управление в технических системах

Вологда
2014

УДК 371.315.8

Теоретические основы электротехники. Электротехника и электроника.
Часть 2. Линейные электрические цепи: лабораторный практикум с использованием компьютерной программы Mathcad. - Вологда: ВоГУ, 2014. - 51 с.

Приведены краткие теоретические сведения, описание лабораторных работ, порядок их выполнения на универсальных лабораторных стендах, разработанных на кафедре электротехники, и примеры расчётов с использованием программы Mathcad.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГУ

Составитель В.В. Реутов, канд. техн. наук, доцент

Рецензент Н.А. Сердюков, канд. техн. наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ

Методическое пособие составлено в соответствии с рабочей программой дисциплин «Теоретические основы электротехники» и «Электротехника и электроника» для студентов электротехнических специальностей.

В настоящее методическое пособие включены описания лабораторных работ по наиболее важным разделам теории электрических цепей, поставленные с применением разработанного на кафедре электротехники ВоГУ универсального лабораторного стенда. По теме каждой работы приведены основные теоретические сведения, необходимые для подготовки к лабораторным работам

Описания лабораторных работ содержат цель работы, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы, пример расчётов с использованием компьютерной программы Mathcad и содержание отчета.

Компьютерные программы моделирования и расчёта электрических цепей дают обучающимся мощный современный аппарат исследования и проектирования электронных и электротехнических устройств. Реальные исследования на универсальном стенде дают навыки работы с реальными приборами, сборки электрических схем, исследования характеристик реальных компонентов электрических цепей.

Все студенты выполняют лабораторные работы по фронтальному методу, после рассмотрения теоретической части в лекционном курсе и на практических занятиях. Очередность выполнения работ соответствует последовательности их изложения.

Каждая работа рассчитана на 4 часа учебных занятий в лаборатории.

Указания по технике безопасности

В лаборатории электрических цепей кафедры питание стендов осуществляется при напряжении источников до 220 В.

ПОМНИТЕ! — ЭТИ НАПРЯЖЕНИЯ ОПАСНЫ ДЛЯ ЖИЗНИ ПРИ НЕОСТОРОЖНОМ И НЕКВАЛИФИЦИРОВАННОМ ОБРАЩЕНИИ СО СХЕМОЙ.

1. Осциллограф содержит источники высокого напряжения плюс 3000 В, минус 750 В, 220 В, поэтому категорически запрещается работа с прибором, если на нем нет защитных крышек.
2. При включении генераторов сигналов низких частот в сеть необходимо соединить зажим защитного заземления генератора с зануленным зажимом питающей сети.
3. Запрещается измерять прибором В7-38 напряжение сети.

При выполнении экспериментальной части лабораторных работ следует выполнять следующие правила:

1. Сборку схем производить при отключенном источнике питания.
2. Подавать напряжение на схему разрешается только после и кратковременного пробного включения преподавателем.
3. При проведении работы недопустимы касания руками неизолированных токоведущих частей установки.
4. Все изменения в схеме должны производиться только при отключенных источниках питания.

При возникновении каких-либо ненормальных режимов работы цепи (нагрев, запах горелой изоляции, дым, искры и т.п.) следует НЕМЕДЛЕННО отключить цепь от источника питания и сообщить об этом преподавателю.

5. Особую осторожность следует соблюдать при работе с резонансными цепями, содержащими реактивные катушки и конденсаторы, так как при этом на отдельных участках цепи напряжение может значительно превышать напряжение источника.
6. Нельзя оставлять без присмотра находящуюся под напряжением установку.
7. По окончании работы установка должна быть отключена от источника питания.

Метрологическая карта средств измерения к универсальному лабораторному стенду

Наименование прибора	Пределы измерения	Цена деления шкалы прибора	Класс точности	Погрешность измерения приведен
Вольтметр В7-38	0,1 - 300 В синусоидального и постоянного напряжений до 1кВ 10 Ом-1МОм		2,5	$\pm 2,5\%$
			4	$\pm 4\%$
Осциллограф С1-72	Напряжение от 40 мВ до 60 В Время от 0,2 мкс до 500 мс	0,02 В/дел. 0,05 мкс/дел. 10 мс/дел.		$\pm 10\%$
Генератор ГЗ-102 ГЗ-111 ГЗ-118	От 20 Гц до 200 кГц	0,5 Гц/дел.		$\pm (1+50/f)\%$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
Исследование электрической цепи при несинусоидальной форме
напряжения и тока

1. Цель работы:

Исследование влияния параметров r , L и C на форму кривой тока в электрической цепи при периодической несинусоидальной э.д.с.

2. Основные теоретические положения

Во многих практических случаях форма кривой периодических э.д.с. и токов в той или иной мере отличается от синусоидальной.

Периодическую несинусоидальную функцию, удовлетворяющую условиям Дирихле, т.е. непрерывную во всех точках или имеющую за период конечное число разрывов первого рода и конечное число экстремумов, можно представить в виде ряда Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t).$$

Для вычисления коэффициентов ряда целесообразно воспользоваться известным из курса математики преобразованием:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot d\omega t; \quad B_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin k\omega t \cdot d\omega t;$$

$$C_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos k\omega t \cdot d\omega t.$$

$$\text{Так как } B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t = A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

$$\text{где } A_{km} = \sqrt{(B_{km})^2 + (C_{km})^2}; \quad \psi_k = \operatorname{arctg} \frac{C_{km}}{B_{km}},$$

$$\text{то получаем } f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

Здесь A_0 – постоянная составляющая функции $f(\omega t)$,

A_{km} , ψ_k – амплитуда и начальная фаза составляющей k -й гармоники.

Разложение функции в гармонический ряд упрощается, если ее график обладает симметрией относительно осей или начала координат (1,2,3). Например, разложение в гармонический ряд кривой прямоугольного напряжения, применяемого в настоящей работе, имеет вид:

$$u(t) = \frac{4 \cdot U_0}{\pi} \sin(\omega \cdot t) + \frac{4 \cdot U_0}{3 \cdot \pi} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{4 \cdot U_0}{5 \cdot \pi} \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \dots$$

График кривой несинусоидального периодического напряжения $u(t)$ показан на рисунке 1.

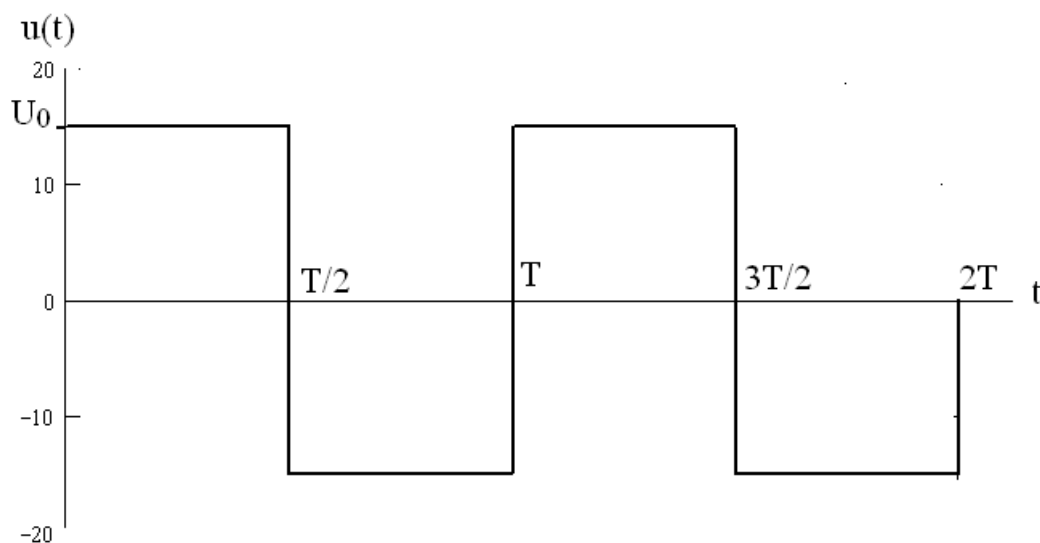


Рис. 1

Рассмотрим влияние параметров приемника на форму кривой тока, если на зажимы подано периодическое несинусоидальное напряжение:

$$u(t) = \sum_{K=1}^{\infty} U_{mK} * \sin(k * \omega * t + \Psi_K),$$

Ток в цепи с активным сопротивлением:

$$i_r(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \frac{U_{mK} * \sin(k * \omega * t + \Psi_K)}{r}.$$

Ток в цепи с индуктивностью:

$$i_L(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \frac{U_{mK} * \sin(k * \omega * t + \Psi_K - \phi_K)}{Z_K}.$$

Ток в цепи с емкостью:

$$i_C(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \frac{U_{mK} * \sin(k * \omega * t + \Psi_K - \phi_K)}{Z_K}.$$

В общем случае для цепи, состоящей из последовательного соединения элементов r , L , C , полное сопротивление цепи Z_K и угол сдвига фаз ϕ_K тока и напряжения для каждой гармоники будут различными.

$$Z_K = \sqrt{r_K^2 + \left(k * \omega * L - \frac{1}{k * \omega * C}\right)^2}, \quad \phi_K = \arctg \frac{k * \omega * L - \frac{1}{k * \omega * C}}{r_K}.$$

Как следует из приведенных формул, ток в цепи с активным сопротивлением будет повторять форму кривой напряжения, т.к. пренебрегая поверхностным эффектом, можно считать активное сопротивление одинаковым для всех гармоник. Кривая тока в цепи с катушкой индуктивности по форме будет близка к синусоиде, ближе, чем кривая напряжения, что следует из того, что индуктивное сопротивление пропорционально номеру « k » гармоник: $k = 1, 2, 3, \dots$

Кривая тока в цепи с емкостью будет по форме больше отличаться от синусоиды, чем кривая напряжения. Это следует из того, что емкостное сопротивление обратно пропорционально порядковому номеру гармоники.

Принято говорить, что *включением индуктивности в цепь гасят высшие гармоники и сглаживают форму кривой тока, а включением ёмкости - выделяют высшие гармоники.*

Действующее значение тока и напряжения при воздействии заданного напряжения на входе цепи может быть рассчитано по формулам:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_K^2 + \dots}, \quad U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_K^2 + \dots}$$

Здесь I_K, U_K – действующие значения тока и напряжения гармонических составляющих ряда Фурье для тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$.

3. Описание лабораторной установки

Исследование электрической цепи при несинусоидальной форме напряжения и тока в лаборатории проводится на универсальном лабораторном стенде. Рекомендованные для исследования элементы цепи указываются преподавателем. Параметры элементов уточняются перед началом исследования.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Исследование влияния параметров цепи на форму кривой тока осуществляется путем просмотра и копирования (перенос с экрана осциллографа на лист бумаги) кривых тока для участка электрической цепи, содержащей элементы R, L, C .

Напряжение прямоугольной формы частотой 2-3 кГц подается на схему соединения элементов R, L, C включением тумблера на блоке генератора напряжений специальной формы. В работе используется электронный осциллограф, что позволяет наблюдать на его экране кривую напряжения на входе электрической цепи (зажимы "m" и "n" на схеме) и кривую тока в ней, а точнее, кривую падения напряжения на активном сопротивлении, подобную кривой тока. Все измерения в работе производятся только универсальным вольтметром V .

Результатом рассмотренного раздела экспериментальной части должны быть:

- осциллограмма входного напряжения в режиме холостого хода;
 - осциллограммы тока в электрической цепи при включении следующих элементов:

- сопротивление R_4 (или другое по указанию преподавателя), рис.2;
- сопротивление R_4 и индуктивность L_1 , рис.3;
- сопротивление R_4 и ёмкость C_1 , рис.4;
- сопротивление R_4 , индуктивность L_1 и ёмкость C_1 , рис.5.

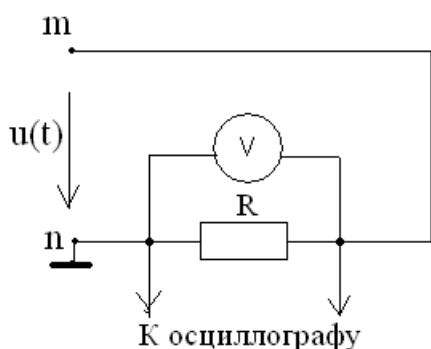


Рис. 2

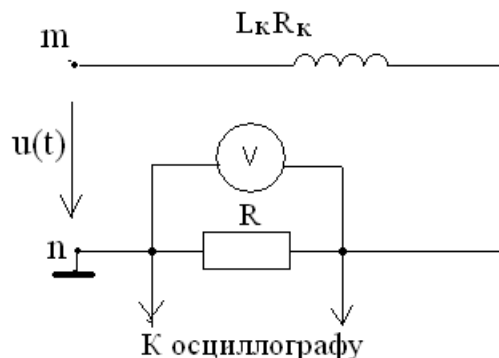


Рис. 3

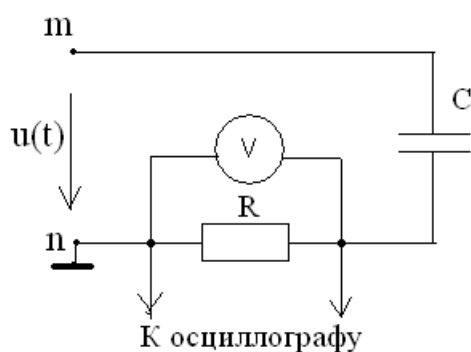


Рис. 4

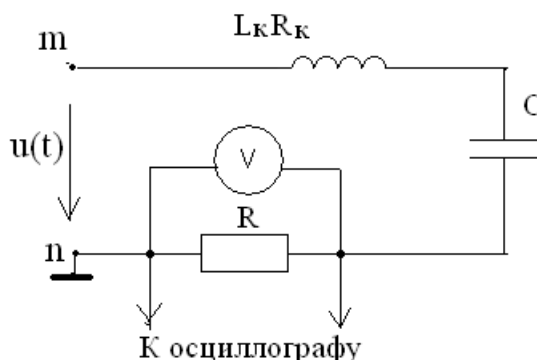


Рис. 5

На каждой из осциллограмм, помимо обозначений u и i , следует указать численные значения параметров R , R_k , L , C и масштабы напряжения и времени, руководствуясь при определении масштабов показаниями соответствующих переключателей на передней панели осциллографа. Данные измерений универсальным прибором заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

Исследуемая схема цепи	По данным измерений		По данным расчёта	
	$U_R, (B)$	$I = \frac{U_R}{R}, (A)$	$U_R, (B)$	$I, (A)$
Режим х.х.	$U_{BX} = \dots$	0	$U_{BX} = \dots$	0
R				
R,L				
R,C				
R,L,C				

4.2. Целью второй части работы является теоретическая обработка данных, полученных в результате эксперимента. Разложение кривой входного напряжения прямоугольной формы в ряд Фурье приведено в теоретической части работы. После того как сложная кривая напряжения будет приближенно представлена суммой гармоник, необходимо аналитически определить ток в цепи при различном соединении элементов r, L, C . По данным расчета необходимо построить график тока и сравнить его с осциллограммой.

Расчёт напряжений и токов электрической цепи с элементами R, L, C при воздействии периодического несинусоидального сигнала с применением математического пакета Mathcad приведён в приложении 1.

Примечание: в расчётах, приведённых в приложении, сопротивление резистора в цепи (например, R_4) обозначено R_r , внутреннее сопротивление источника R_g . Результаты расчёта и измерений представлены в единицах измерения системы СИ.

5. Содержание отчета

5.1. Наименование и цель работы.

5.2. Схемы исследуемых электрических цепей.

5.3. Осциллограмма несинусоидального напряжения источника питания без нагрузки, осциллограммы токов в цепи с элементами R, L ; в цепи с элементами R, C ; в цепи с элементами R, L, C .

5.4. Расчёт мгновенных значений тока в исследуемых цепях по известному частотному спектру несинусоидального напряжения и их графики. Сопоставление экспериментальных и аналитических кривых тока и напряжения.

5.5. Таблица с результатами измерений и расчёта действующих значений несинусоидального напряжения источника в режиме без нагрузки и несинусоидальных токов в цепи R, L ; в цепи R, C ; в цепи R, L, C .

5.6. Выводы по работе.

6. Литература

1. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов/ К.С. Демирчян. [и др.].- СПб.: Питер, 2006.- 377с

2. Новгородцев, А.Б. 30 лекций по теории электрических цепей: учеб. для вузов/ А.Б. Новгородцев.- СПб.: Политехника, 1995.-519с.

Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях?

2. Какие величины и коэффициенты характеризуют периодические несинусоидальные переменные?
3. Какие гармонические отсутствуют в спектрах кривых, симметричных относительно: 1) оси абсцисс; 2) оси ординат; 3) начала системы координат?
4. Достаточно ли для определения величины полной мощности в цепи несинусоидального тока наличие информации об активной и реактивной мощностях?
5. Для каких цепей справедлива методика расчета цепей несинусоидального тока, основанная на разложении ЭДС и токов источников в ряды Фурье?
6. Определить действующее значение напряжения на зажимах ветви с последовательным соединением резистора с $R = 10 \text{ Ом}$ и катушки индуктивности с $\omega L = 10 \text{ Ом}$, если ток в ней

$$i = 10\sqrt{2} \cdot \sin \omega t + 5\sqrt{2} \cdot \sin 3\omega t + \sqrt{2} \cdot \sin 5\omega t.$$

Рассчитать активную мощность в ветви.

7. Определить действующее значение тока в ветви с источником ЭДС в схеме с последовательным соединением элементов R , L , C , если $e = 100 + 50 \cdot \sin \omega t + 10 \cdot \sin 3\omega t$; $R = 20 \text{ Ом}$; $\omega L = 1 / \omega C = 10 \text{ Ом}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях первого и второго порядка

1. Цель работы: Исследование переходных процессов в простейших цепях, содержащих элементы R , L , C .

2. Общие сведения о переходных процессах в линейных цепях

Переходным называется процесс, возникающий в электрической цепи при переходе из одного установившегося режима в другой.

При всех изменениях в электрической цепи: включении, выключении, коротком замыкании, колебаниях величины какого-либо параметра и т.п. – в ней возникают переходные процессы, которые не могут протекать мгновенно, так как невозможно мгновенное изменение энергии, запасенной в электромагнитном поле цепи. Таким образом, *переходный процесс обусловлен несоответствием величины запасенной энергии в магнитном поле катушки и электрическом поле конденсатора ее значению для нового состояния цепи.*

Энергия, запасённая в электрическом поле ёмкости, и энергия, запасённая в магнитном поле индуктивности

$$W_C = \frac{C \cdot u^2}{2} \quad W_L = \frac{L \cdot i^2}{2}$$

не могут изменяться скачком. Скачкообразное изменение энергии привело бы к выделению в ёмкости и индуктивности бесконечно большой мощности, что не имеет физического смысла. Равенство $\Delta W = 0$ означает, что в момент коммутации остаются неизменными напряжения ёмкостей и токи индуктивностей:

$$u_C(+0) = u_C(-0) \quad i_L(+0) = i_L(-0)$$

Следует отметить, что скачкообразно могут изменяться как напряжения на сопротивлениях и индуктивностях, так и токи на емкостях и сопротивлениях.

Существуют различные методы анализа переходных процессов в электрических цепях. В данной работе рассматривается классический метод.

2.1. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением элементов R, L

Если цепь, состоящая из последовательно соединённых сопротивления и индуктивности (рис. 6), без начального запаса энергии подключается к источнику внешнего напряжения в момент времени $t = 0$, то для $t \geq 0$ справедливо уравнение:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = u(t),$$

имеющее решение для тока в цепи

$$i(t) = i' + A \cdot e^{\alpha \cdot t},$$

где i' - принуждённая составляющая тока (ток установившегося режима); α - корень характеристического уравнения: $R + L\alpha = 0 \rightarrow \alpha = -R/L$; A - постоянная интегрирования уравнения.

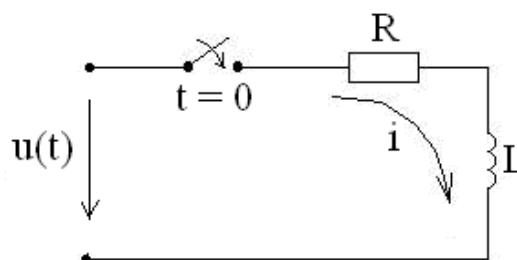


Рис. 6

При включении источника постоянного напряжения $u(t) = U$ ток будет нарастать не скачкообразно (рис. 7), а по закону: $i(t) = U/R + A \cdot e^{\alpha \cdot t}$, где

$$U/R = i' = i_{np}.$$

Найдём постоянную интегрирования:

$$A = i(0) - i'(0) \rightarrow A = 0 - U/R = -U/R$$

Таким образом, ток: $i(t) = U/R (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$;

напряжение на сопротивлении R: $u_R(t) = R \cdot i(t)$, $u_R = U(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$;

напряжение на индуктивности L: $u_L(t) = L \frac{di}{dt}$, $u_L = U \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$

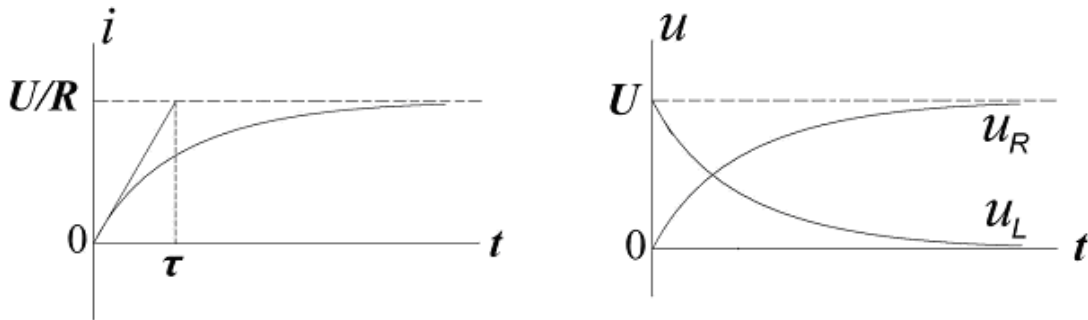


Рис. 7

Постоянной времени RL-цепи $\tau = L / R$ называют время, в течение которого свободная составляющая тока или свободная составляющая напряжения на элементах уменьшается в e раз. За время $t = 3\tau$ ток в цепи достигает **0,95**, а за время, $t = 5\tau$ более **0,99** от установившегося значения, т.е. можно считать переходный процесс практически законченным за время $t = (3-5)\tau$.

В качестве источника напряжения $u(t) = U$ в исследуемых цепях на стендах лаборатории используется генератор прямоугольного напряжения (ГПН). При длительности импульса $t_u \geq (3-5)\tau$, действие прямоугольного напряжения с амплитудой U на нагрузку эквивалентно подключению цепи к источнику с постоянной э.д.с. $E = U$.

Графики переходных напряжений $u_R(t)$ и $u_L(t)$ для случая $t_u \geq 3\tau$ при воздействии прямоугольного импульса изображены на рис. 8.

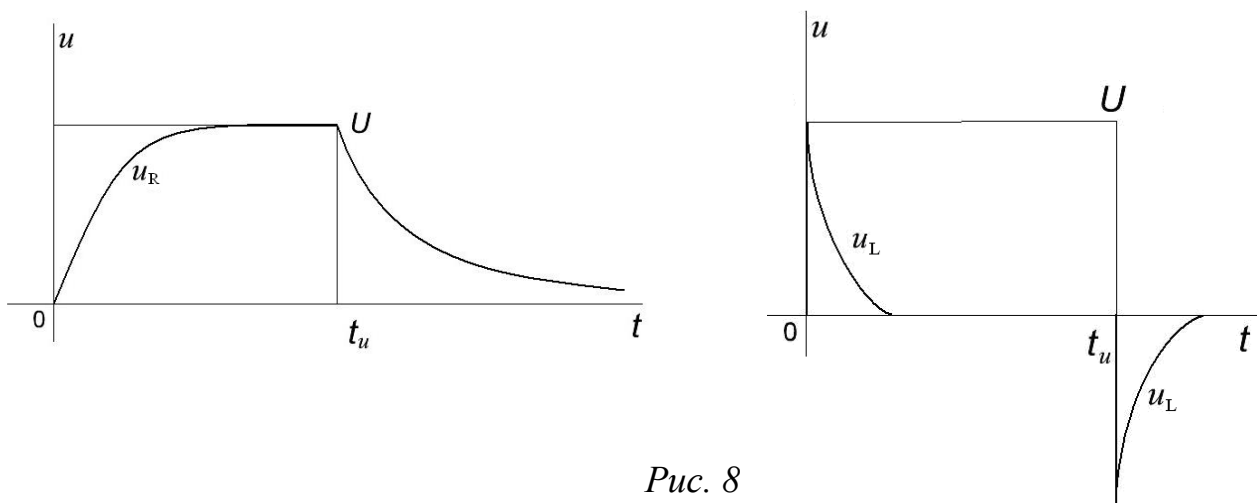


Рис. 8

На рис. 9 изображены переходные напряжения $u_R(t)$ и $u_L(t)$ при воздействии на цепь R,L положительного прямоугольного импульса длительностью $t_u \leq 3\tau$.

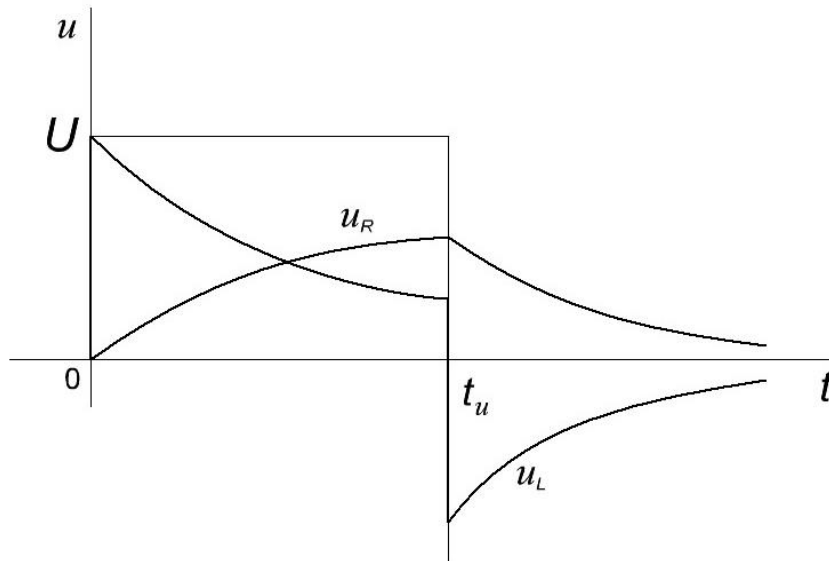


Рис. 9

В интервале времени от 0 до t_u напряжения $u_R(t)$ и $u_L(t)$ в соответствующий момент времени рассчитываются по формулам:

$$u_R = U(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad u_L = U \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Для $t \geq t_u$:

$$u_L = U \cdot e^{-\frac{R}{L}t} (1 - e^{\frac{R}{L}t_u}) \quad u_R = U \cdot e^{-\frac{R}{L}t} (e^{\frac{R}{L}t_u} - 1)$$

2.2. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением элементов R, C

Для RC - цепи, изображённой на рис. 10, при $t \geq 0$ справедливо уравнение:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = u(t),$$

имеющее решение для напряжения ёмкости:

$$u_C(t) = u_C^{\prime} + A \cdot e^{\alpha \cdot t},$$

где $u_C^{\prime}$ - принуждённая составляющая $u_C(t)$;

α - корень характеристического уравнения: $RC\alpha + 1 = 0 \rightarrow \alpha = -1/RC$;

A - постоянная интегрирования уравнения.

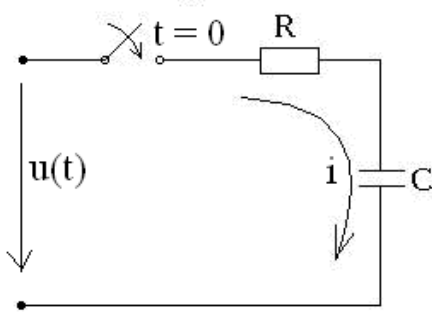


Рис. 10

При подключении RC-цепи к источнику постоянного напряжения $u(t) = U$, напряжение u_C будет нарастать не скачкообразно (рис. 11), а по закону: $u_C(t) = U + A \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$, где $U = u_C' = u_{Cnp}$.

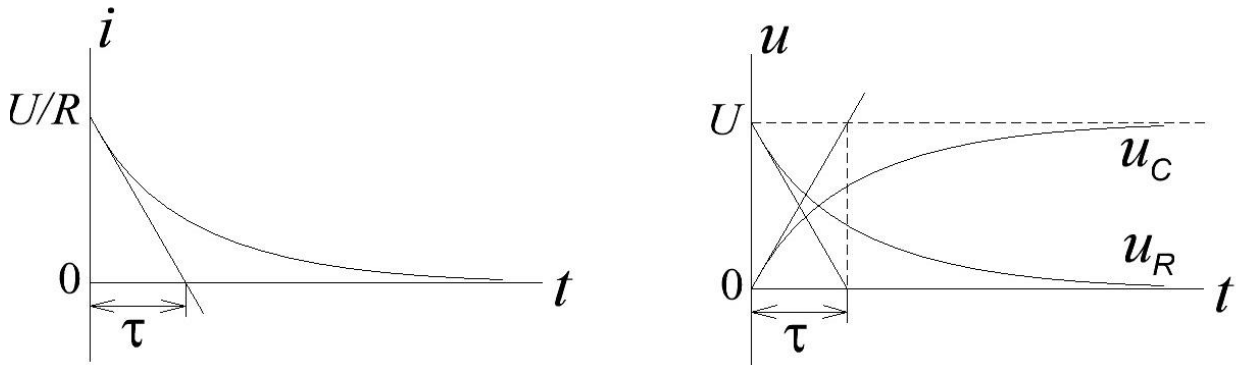


Рис. 11

Найдём постоянную A интегрирования. При нулевых начальных условиях: $A = u_C(0) - U \rightarrow A = -U$.

Таким образом, напряжение на ёмкости: $u_C(t) = U(1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$;

закон изменения тока: $i(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$;

напряжение на сопротивлении R : $u_R = R \cdot i = U \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$.

Постоянная времени RC – цепи: $\tau = \frac{1}{|\alpha|} = RC$.

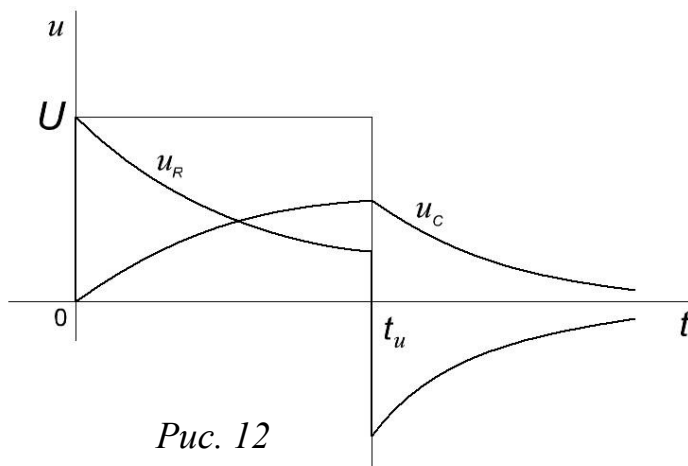


Рис. 12

В лабораторной работе, как было уже сказано, для исследования переходных процессов на электрическую цепь подаются прямоугольные импульсы напряжением U и длительностью t_u при нулевых начальных условиях. Графики переходного процесса в цепи RC при воздействии прямоугольного им-

пульса длительностью $t_u \leq 3\tau$ приведены на рис. 12.

Когда импульс заканчивается ($t = t_u$), ёмкость C разряжается на сопротивление R :

$$u_C = A \cdot e^{-\frac{t-t_u}{\tau}}$$

Постоянную A найдём из условия равенства напряжений u_C при $t = t_u$ при заряде и разряде ёмкости:

$$U \cdot (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}}) = A$$

Таким образом, напряжение u_C (рис. 13) при разряде ёмкости ($t = t_u$) определяется выражением:

$$u_C = U e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (e^{\frac{t_u}{\tau}} - 1)$$

Переходный ток и переходное напряжение (рис. 13) на сопротивлении R :

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}}) \quad u_R = U e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}})$$

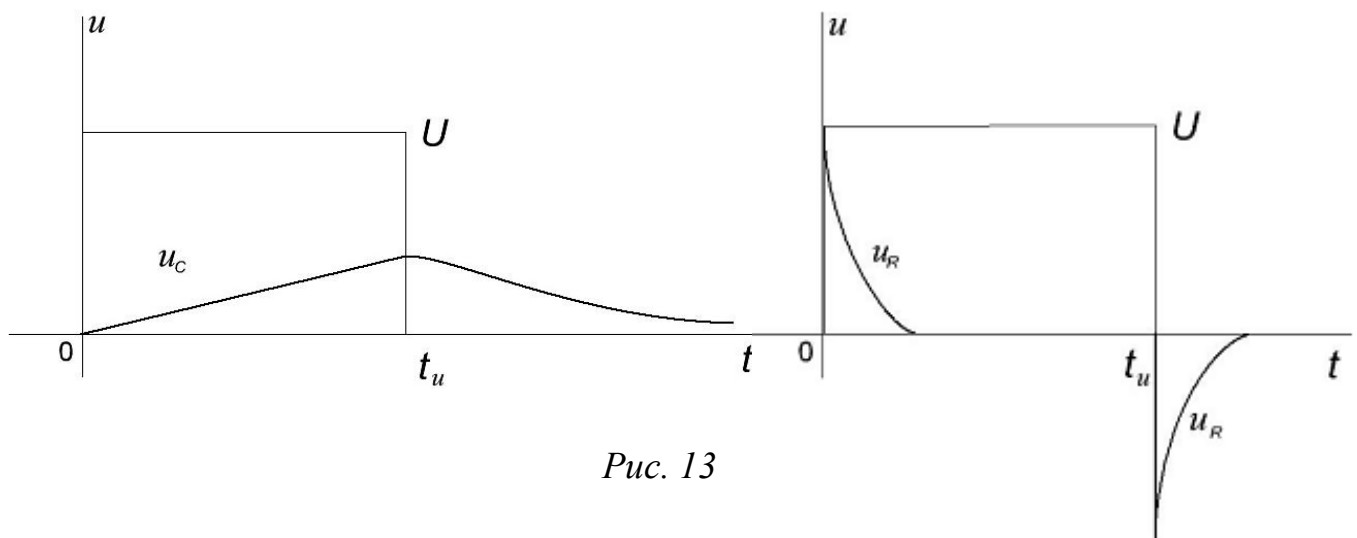


Рис. 13

Форма напряжений u_C, u_R зависит от соотношений постоянной времени τ и длительности импульса t_u . Цепь RC с большой постоянной времени ($t_u \leq 3\tau$) называется интегрирующей (график u_C); цепь с малой постоянной времени ($t_u \geq 3\tau$) называется дифференцирующей (график u_R).

2.3. Переходные процессы в линейной электрической цепи с последовательным соединением элементов R, L, C

Для цепи, изображённой на рис. 14, запишем уравнение второго закона Кирхгофа при подключении к источнику постоянного напряжения:

$$U = u_L + u_R + u_C = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

Уравнение после дифференцирования приводится к одному уравнению:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0$$

Это означает, что закон изменения тока $i(t)$ определяется только свободной составляющей. В установившемся режиме после заряда ёмкости от источника постоянного напряжения принуждённая составляющая тока будет равна нулю.

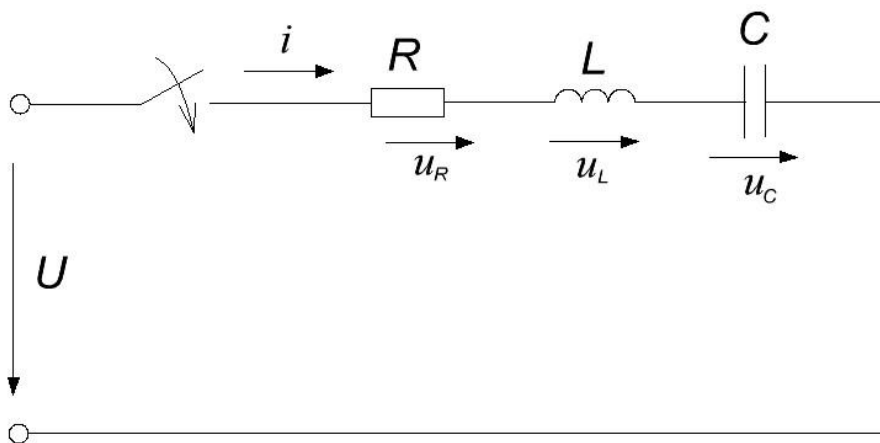


Рис. 14

Однородному уравнению соответствует характеристическое уравнение:

$$\alpha^2 + \frac{R}{L} \alpha + \frac{1}{LC} = 0 \text{ или } \alpha^2 + 2\delta + \omega_0^2 = 0,$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент, характеризующий затухание переходного процесса; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – угловая резонансная частота контура.

Корни уравнения могут быть действительными ($\delta \geq \omega_0 \rightarrow R \geq 2\sqrt{L/C}$) или комплексными сопряжёнными ($\delta \leq \omega_0 \rightarrow R \leq 2\sqrt{L/C}$). Действительным

корням характеристического уравнения соответствует аperiodический характер переходного процесса, комплексным – колебательный.

Наименьшее активное сопротивление, соответствующее предельному аperiodическому режиму, называется критическим:

$$R_{кр} = 2\sqrt{L/C}.$$

Рассмотрим три возможных случая при включении цепи на постоянное напряжение.

2.3.1. Пусть $\delta \geq \omega_0 \rightarrow R \geq R_{кр}$. Корни характеристического уравнения будут действительные различные:

$$\alpha_1 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad \alpha_2 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

На рис. 15 приведены графики тока и напряжений на элементах L, C с указанием характерных точек для моментов времени t_1 и t_2 .

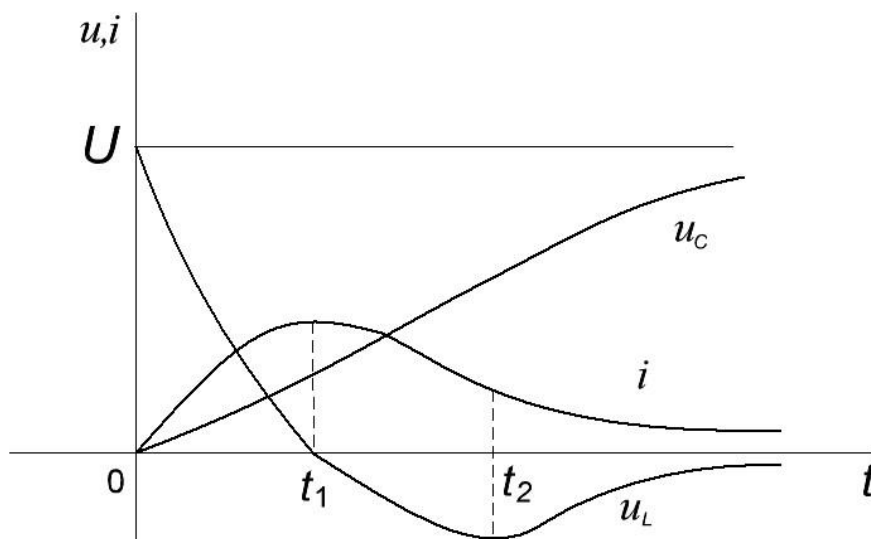


Рис. 15

Законы изменения тока $i(t)$ и переходных напряжений на элементах R, L, C при аperiodическом характере переходного процесса определяются выражениями:

$$i(t) = \frac{U}{L(\alpha_1 - \alpha_2)}(e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad u_R(t) = \frac{R \cdot U}{L(\alpha_1 - \alpha_2)}(e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t})$$

$$u_L(t) = \frac{U}{(\alpha_1 - \alpha_2)}(\alpha_1 e^{\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t}) \quad u_C(t) = \frac{U}{(\alpha_1 - \alpha_2)}(\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) + U$$

В момент времени t_1 кривая тока достигает максимума. Это время можно рассчитать, приравняв производную тока к нулю:

$$t_1 = \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

В момент времени t_2 кривая напряжения u_L достигает максимума: $t_2 = 2t_1$.

2.3.2. Если $\delta = \omega_0 \rightarrow R = R_{кр}$, корни характеристического уравнения будут равные действительные:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = -\delta.$$

Это предельный случай аperiodического процесса. Кривые тока и напряжений в этом режиме по форме не отличаются от графиков, приведённых на рис. 15. Вместе с этим, возрастают и убывают переменные быстрее, чем для случая $\delta \geq \omega_0 \rightarrow R \geq R_{кр}$.

2.3.3. Если $\delta \leq \omega_0 \rightarrow R \leq R_{кр}$, корни характеристического уравнения будут комплексные сопряжённые с отрицательной действительной частью:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega',$$

где $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - угловая частота собственных колебаний тока и напряжений в режиме переходного процесса цепи с элементами R, L, C.

Переходный процесс имеет колебательный характер. Период затухающих колебаний:

$$T' = \frac{2\pi}{\omega'}.$$

Закон изменения тока в колебательном режиме:

$$i(t) = \frac{U}{\omega' L} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega' t.$$

Переходные напряжения на элементах контура:

$$u_R(t) = \frac{R \cdot U}{\omega' L} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega' t,$$

$$u_L(t) = -\frac{U \cdot \omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega' t - \psi),$$

$$u_C(t) = -\frac{U \cdot \omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega' t + \psi) + U.$$

Графические зависимости напряжений приведены на рис. 16. График тока по форме совпадает с напряжением u_R на сопротивлении. Ток совершает затухающие колебания с угловой частотой ω' относительно оси времени, стремясь к нулю.

Колебания возникают вследствие периодического преобразования энергии электрического поля емкости в энергию магнитного поля индуктивности и обратно, причем эти колебания сопровождаются потерей энергии в виде тепла в сопротивлении R.

Затухание колебаний по амплитуде, определяемое множителем $e^{-\delta \cdot t}$, зависит от соотношения параметров контура. Быстроту затухания колебаний оценивают обычно

декрементом колебания Δ , равным отношению двух последующих амплитуд одного знака, отстоящих друг от друга на период T' :

$$\Delta = \frac{e^{-\delta \cdot t}}{e^{-\delta(t+T')}} = e^{\delta T'}$$

или по графику, например, для $u_C(t)$:

$$\Delta = \frac{u_C(t)}{u_C(t+T')} = e^{\delta T'}.$$

Вводится также понятие логарифмического декремента колебаний:

$$\ln \Delta = \delta T'.$$

Декремент колебаний не зависит от времени и определяется только параметрами цепи.

При подаче на входные зажимы контура *положительного прямоугольного импульса* амплитудой U и длительностью t_u в контуре возникает переходный процесс, аналогичный процессу при включении цепи к источнику постоянного напряжения.

По окончании действия импульса начнется переходный процесс, связанный с разрядкой ёмкости на цепь R, L. Ток и напряжения во время переходного процесса определяются только свободными составляющими.

3. Описание лабораторной установки

Исследование переходных процессов в лаборатории проводится на универсальном лабораторном стенде. Необходимые для исследования элементы электрической цепи: источник напряжения прямоугольной формы, резистор

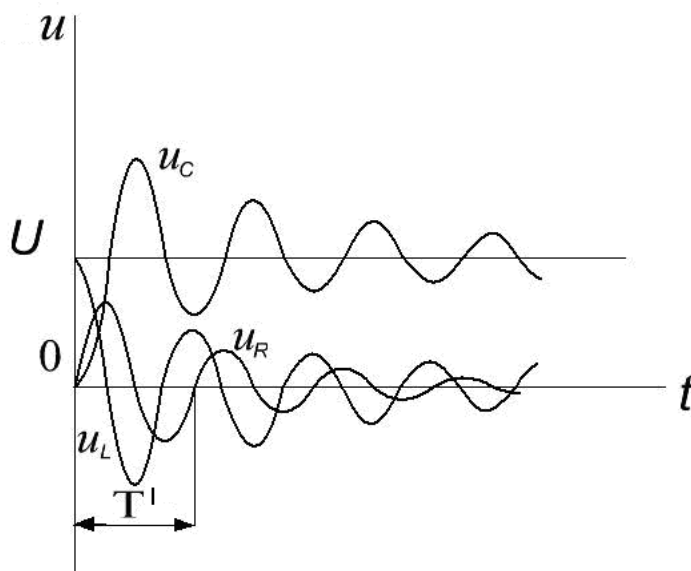


Рис. 16

R1(или R2,R3) с регулированием величины его сопротивления, ёмкость C1, индуктивность L1(или L2).

Примечание: внутреннее сопротивление источника и параметры элементов R, L, C определяются перед началом работы по результатам измерений.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Включением автомата и соответствующих тумблеров на передней панели универсального лабораторного стенда подать напряжение питания на вход усилителя-преобразователя, осциллографа, универсального вольтметра В7-38.

4.2. Установить на генераторе ГЗ – 101 частоту 500 Гц. Исследовать с помощью осциллографа напряжение прямоугольной формы на выходе усилителя - преобразователя в режиме холостого хода. Результатом исследования должна быть осциллограмма, скопированная с экрана осциллографа, с указанными на ней масштабами по времени m_t и по напряжению m_u , длительностью прямоугольного импульса t_u и максимального его значения U_0 (рис. 17).

4.3. Исследование переходного процесса при последовательном соединении элементов R, L.

Собрать электрическую цепь, изображённую на рис.18. Результатом исследования должна быть осциллограмма напряжения на резисторе, пропорционального току в цепи, с указанием масштабов по осям. Опыт проводится для двух значений сопротивления резистора $R1 = 50 \text{ Ом}$ и $R1 = 500 \text{ Ом}$ с индуктивностью L1.

Составьте матрицу мгновенных значений $u_R(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа для одного из значений R1 (показано в приложении), и измерьте напряжение $u_R(\tau)$ и $u_R(t_u + \tau)$. Запишите результаты измерений в таблицу 2.

Поменяйте местами резистор и индуктивность в соответствии со схемой, изображённой на рис.19. Для тех же значений R1 исследуйте закон изменения напряжения на индуктивности. Результатом исследования должны быть осциллограммы $u_L(t)$, скопированные с экрана осциллографа с указанием масштабов по осям. *Измерьте напряжение $u_L(\tau)$ и $u_L(t_u + \tau)$ для одного из значений R1 в порядке, изложенном выше для $u_R(\tau)$ и $u_R(t_u + \tau)$. Запишите результаты измерений в таблицу 2.*

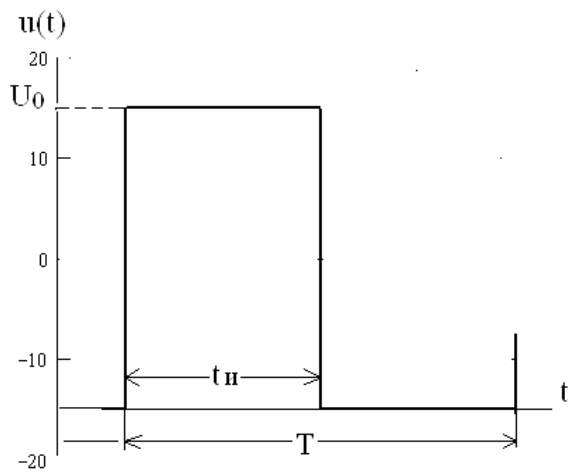


Рис. 17

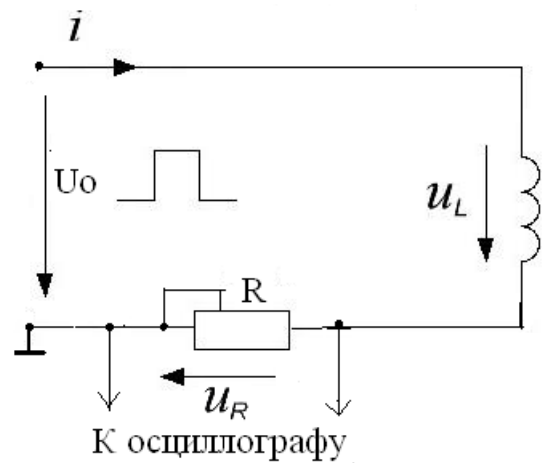


Рис. 18

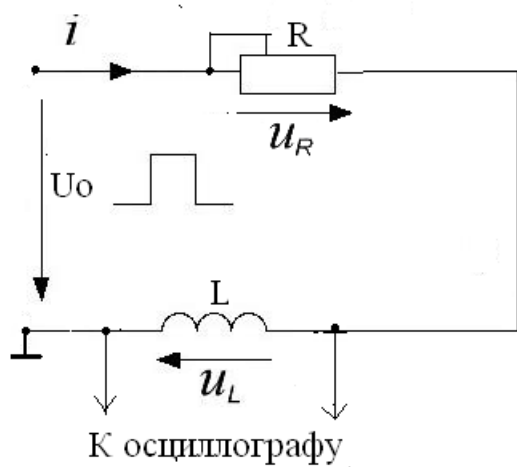


Рис. 19

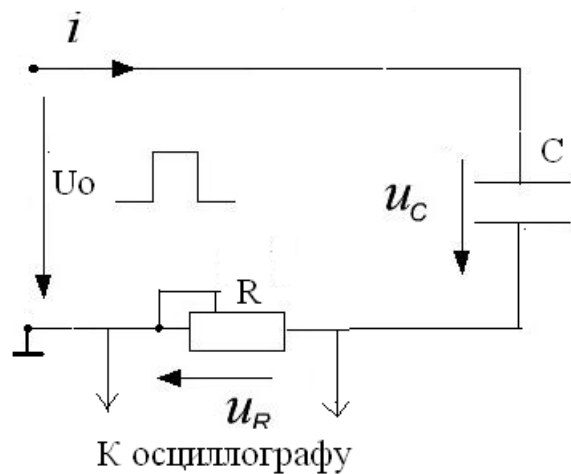


Рис. 20

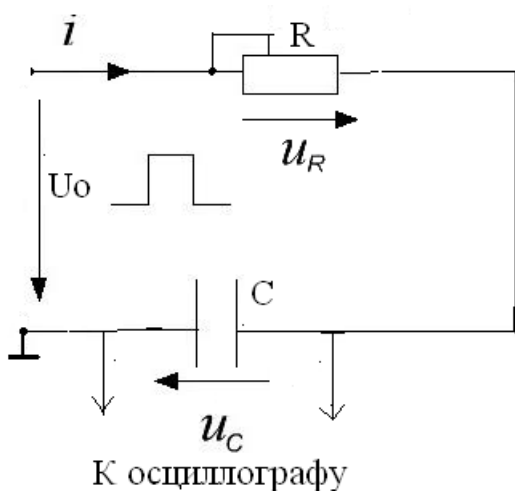


Рис. 21

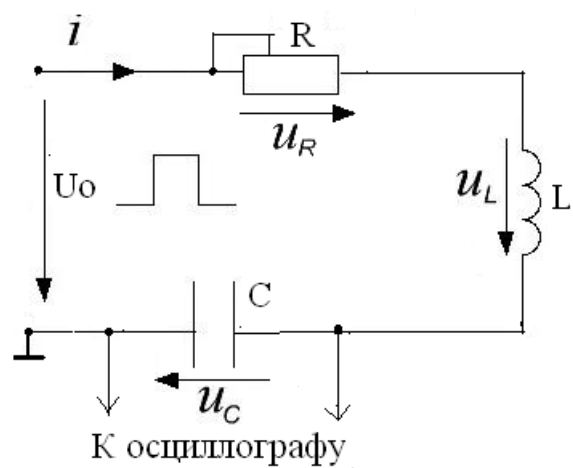


Рис. 22

4.4. Исследование переходного процесса при последовательном соединении элементов R, C .

Собрать электрическую цепь, изображённую на рис.20. Результатом ис-

следования должна быть осциллограмма напряжения на резисторе, пропорционального току в цепи, с указанием масштабов по осям. Опыт проводится для двух значений сопротивления резистора $R1 = 100 \text{ Ом}$ и $R1 = R1_{\max}$ с ёмкостью $C1$.

Составьте матрицу мгновенных значений $u_R(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа для $R1_{\max}$, и измерьте напряжение $u_R(\tau)$ и $u_R(t_u + \tau)$. Запишите результаты измерений в таблицу 3.

Таблица 2

Измерено				Вычислено			
подключение к источнику		отключение от источника		подключение к источнику		отключение от источника	
$u_R(\tau)$	$u_L(\tau)$	$u_R(t_u + \tau)$	$u_L(t_u + \tau)$	$u_R(\tau)$	$u_L(\tau)$	$u_R(t_u + \tau)$	$u_L(t_u + \tau)$
В	В	В	В	В	В	В	В

Таблица 3

Измерено				Вычислено			
подключение к источнику		отключение от источника		подключение к источнику		отключение от источника	
$u_R(\tau)$	$u_C(\tau)$	$u_R(t_u + \tau)$	$u_C(t_u + \tau)$	$u_R(\tau)$	$u_C(\tau)$	$u_R(t_u + \tau)$	$u_C(t_u + \tau)$
В	В	В	В	В	В	В	В

Поменяйте местами резистор и ёмкость в соответствии со схемой, изображённой на рис.21. Для тех же значений $R1$ исследуйте закон изменения напряжения на ёмкости. Результатом исследования должны быть осциллограммы $u_C(t)$, скопированные с экрана осциллографа с указанием масштабов по осям. *Измерьте напряжение $u_C(\tau)$ и $u_C(t_u + \tau)$ для значения $R1_{\max}$ в порядке, изложенном выше для $u_R(\tau)$ и $u_R(t_u + \tau)$. Запишите результаты измерений в таблицу 3.*

4.5. Исследование переходного процесса при последовательном соединении элементов R,L,C.

Собрать электрическую цепь, изображённую на рис.22. Результатом исследования должны быть осциллограммы напряжения на конденсаторе для трех значений сопротивления резистора $R1$, соответствующих апериодическому, критическому и колебательному характеру переходного процесса. Осциллограммы для всех трех случаев переносятся с экрана осциллографа на бумагу, а данные эксперимента заносятся в таблицу 4.

Таблица 4

Характер процесса	Из опыта					Из расчета		
	Исследуемая цепь			Для определения масштабов		$2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$	ω'	δ
	R1	L1	C1			Ом	1/с	1/с
	Ом	Гн	Ф	м _{д.}	м _т			
Апериодический								
Критический								
Колебательный								

5. Содержание отчёта

5.1. Цель работы.

5.2. Схемы исследуемых электрических цепей и осциллограммы напряжений по каждому эксперименту и по результатам расчёта. *Пример расчёта и оформления результатов эксперимента с использованием пакета Mathcad приведён в приложении.*

5.3. Расчетные формулы для вычисления указанных напряжений. Результаты расчёта, записанные в таблицах 1 и 2.

5.4. Таблицы опытных и расчетных данных.

5.5. Выводы по работе.

6. Литература

6.1. Новгородцев, А.Б. 30 лекций по теории электрических цепей: учеб. для вузов/ А.Б. Новгородцев.- СПб.: Политехника, 1995.-519с.

6.2. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов/ К.С. Демирчян. [и др.].- СПб.: Питер, 2006.- 377с.

7. Контрольные вопросы

1. По каким причинам возникают переходные процессы в электрических цепях?

2. Как сформулировать законы коммутации?

3. В чём сущность классического метода расчёта переходных процессов? Что такое принуждённый и свободный режим?

4. Что характеризует постоянная времени τ переходного процесса? Как определить τ графическим способом?

5. Как можно рассчитать переходный процесс классическим методом в цепи с элементами R,L,C при воздействии прямоугольного импульса?

6. Как зависит форма напряжения на элементах цепи R,C (R,L) от величины τ при подачи на вход прямоугольного импульса?

7. От каких параметров и как зависит характер переходного процесса в электрической цепи с последовательным соединением элементов R,L и C ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Исследование нелинейной цепи постоянного тока

1. Цель работы. Снять вольтамперные характеристики нелинейных цепей при различных способах соединения элементов. Выполнить графический расчет неразветвленной и разветвленной нелинейной цепи и проверить его опытом.

2. Основные теоретические положения

Зависимость тока, протекающего через резистивный элемент электрической цепи от напряжения, приложенного к его выходным зажимам, называется вольтамперной характеристикой (ВАХ): $I = f(U)$ или $U = f(I)$.

Если график ВАХ является прямой линией, то такой элемент называется линейным элементом (рис. 23).

На примере рис.23 можно графически представить сущность понятия о линейном элементе. Какое бы напряжение ни было приложено к его выходным зажимам, ток всегда будет таким, что отношение $U/I = R$ есть величина постоянная. То есть для линейного резистивного элемента его параметр R (сопротивление) не зависит от режима работы электрической цепи, в которую он включён.

Если ВАХ не является прямой линией, то такой резистивный элемент будет *нелинейным резистивным элементом*. Нелинейность зависимости $I(U)$ связана с тем, что при изменении U и I (рис. 24) изменяется их отношение. Т.е. сопротивление нелинейного резистивного элемента не является постоянной величиной и изменяется с изменением U и I .

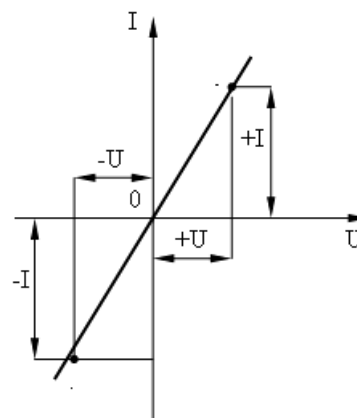


Рис. 23

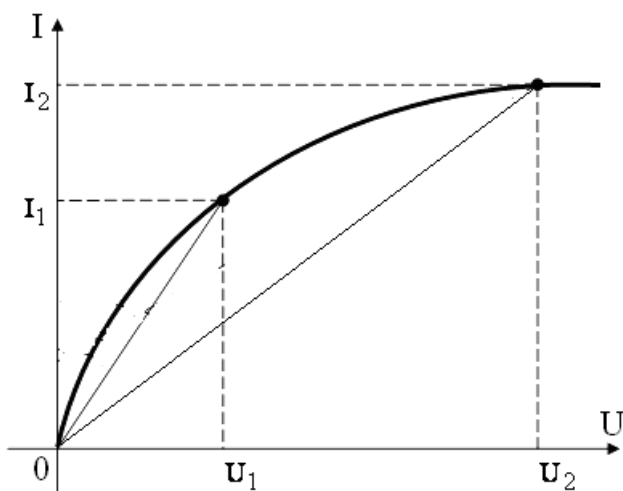


Рис. 24

В общем случае нелинейный элемент нельзя характеризовать каким-либо постоянным сопротивлением R и его характеристикой служит ВАХ, задаваемая таблично, графически или аналитически.

Нелинейные резисторы могут быть подразделены на две большие группы: неуправляемые и управляемые нелинейные элементы (НЭ). Вид ВАХ управляе-

мых НЭ зависит от некоторого физического параметра, например, от температуры, освещённости, тока или напряжения. Их вольт – амперные характеристики представляют собой семейство кривых, каждая из которых соответствует постоянному значению управляемого параметра. В неуправляемых резисторах ВАХ изображаются одной кривой.

В группу неуправляемых нелинейных резисторов входят лампы накаливания, электрическая дуга, полупроводниковые выпрямители (диоды), стабилитрон и другие НЭ.

К классу управляемых НЭ относятся термисторы, фотодиоды, управляемые световым потоком, биполярные транзисторы, выходные характеристики которых $I_K(U_{КЭ})$ управляются током базы I_B , полевые транзисторы, управляемые напряжением между затвором и истоком $U_{ЗИ}$.

Для каждого нелинейного резистора различают статическое сопротивление $R_{СТ} = U / I$ и дифференциальное сопротивление $R_D = \partial U / \partial I$ в заданной точке вольт – амперной характеристики.

В соответствии с целью лабораторной работы рассмотрим метод преобразований и расчёта цепей с нелинейными элементами, основанный на предварительной замене электрической цепи цепью, имеющей эквивалентную ВАХ, и последующего перехода в процессе расчёта к заданной электрической цепи. Для двухполюсников, состоящих из последовательно и параллельно соединённых элементов, эту задачу решают путём графических построений, базирующихся на применении законов Кирхгофа. Этот метод, при котором характеристики отдельных НЭ используют непосредственно в графической форме, является графическим методом расчёта.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух последовательно соединённых нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2 (рис. 25). Вольт – амперные характеристики элементов 1 и 2 приведены на рис. 26. К цепи подведено напряжение U . Построение эквивалентной характеристики $U(I)$ цепи осуществляется применением закона Кирхгофа для напряжений контура цепи:

$$U(I) = U_1(I) + U_2(I).$$

Для построения этой характеристики следует суммировать абсциссы кривых 1 и 2 ($ag = av + ab$), соответствующие одним и тем же значениям тока. Далее, задаваясь произвольным значением тока (например, больше I' или меньше I'), можно построить ВАХ всей цепи (рис. 26. кривая 3). Затем, пользуясь этой ВАХ, можно найти искомый ток всей цепи и искомые напряжения на НЭ1 и НЭ2.

Для этого отложим на оси абсцисс отрезок $OP = U/m_u$ (m_u - масштаб напряжения источника) и проведём из точки p прямую (параллельную оси ординат или перпендикулярную оси абсцисс) до пересечения с кривой 3. Так получим отрезок $np = ko$. Ток $I = ko \cdot m_i$ (m_i - масштаб тока всей цепи). Для найденного тока по ВАХ 1 и ВАХ 2 находим напряжения U_1 и U_2 :

$$U_1 = kd \cdot m_u; U_2 = kc \cdot m_u.$$

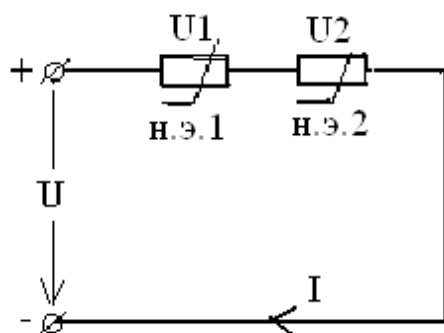


Рис. 25

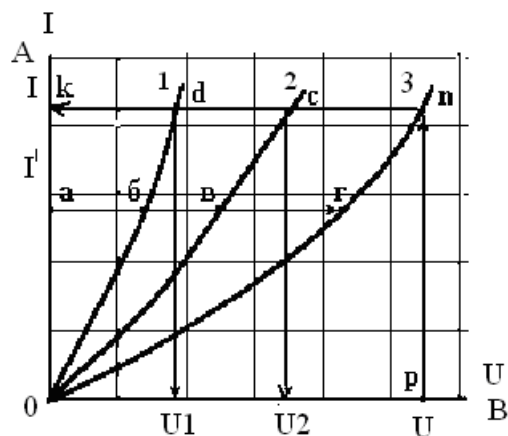


Рис. 26

При параллельном соединении двух НЭ (рис. 27) ток в неразветвлённой части ЭЦ равен сумме токов в отдельных ветвях.

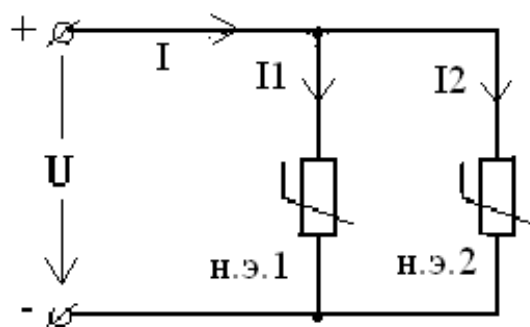


Рис. 27

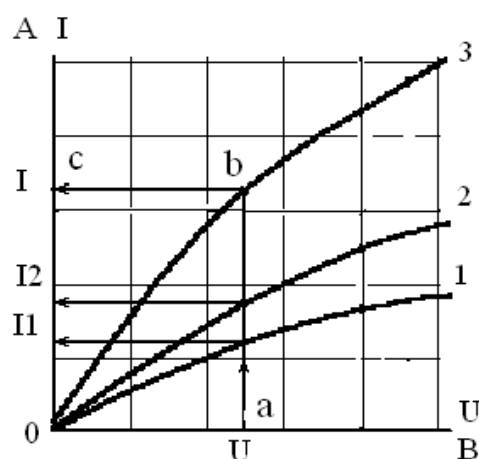


Рис. 28

Поэтому при построении результирующей ВАХ (кривая 3) всей цепи следует суммировать ординаты графиков 1 и 2 (рис. 28), соответствующие одним и тем же значениям напряжения, что отвечает второму закону Кирхгофа для токов в узле электрической цепи:

$$I(U) = I_1(U) + I_2(U)$$

Затем, пользуясь ВАХ, можно при любом значении приложенного напряжения U (отрезок oa) найти величину общего тока I ($ab = oc$). Это напряжение U также определяет значения токов I_1 и I_2 в отдельных ветвях с учётом масштаба тока (m_i).

В случае смешанного соединения нелинейных элементов (рис. 29) расчёт цепи производят в следующем порядке:

1. Параллельно соединённые НЭ2 и НЭ3 заменяют одним эквивалентным нелинейным сопротивлением НЭ4 (рис. 30) с вольт – амперной характеристикой 4 (рис. 31), полученной путём суммирования кривых 1 и 2 по напряжению, т.е. так же, как и в случае параллельных соединений двух НЭ.

2. Для получения последовательной цепи строят эквивалентную характеристику цепи ВАХ 5 путём суммирования кривых 1 и 4 по току (рис.31), т.е. так же, как и при последовательном соединении двух нелинейных элементов.

3. По результирующей ВАХ 5 определяют для заданного значения общего напряжения U величину тока I_1 в неразветвлённой части цепи.

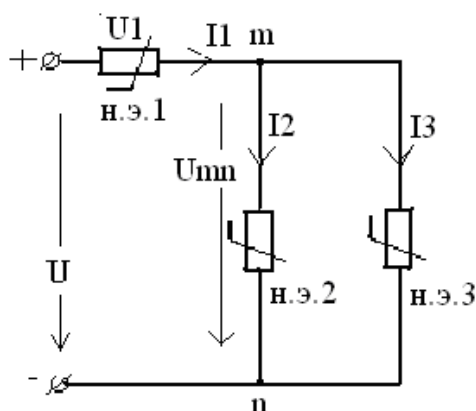


Рис. 29

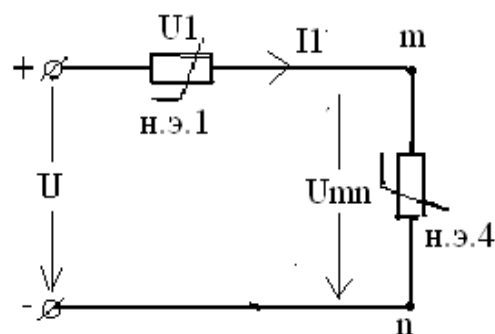


Рис. 30

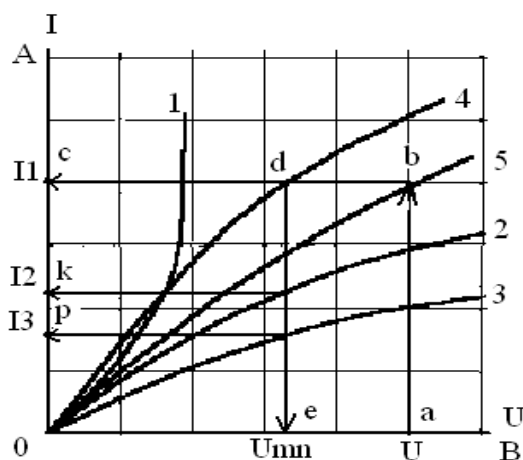


Рис. 31

4. Ток I_1 определяет напряжение U_1 и U_{mn} , а напряжение U_{mn} , в свою очередь, позволяет по графикам 1 и 2 определить токи I_1 и I_2 в ветвях с элементами НЭ1 и НЭ2.

Рассмотрим порядок построения передаточной характеристики, который полностью базируется на разобранном методе определения входных эквивалентных характеристик.

Для построения передаточной характеристики $U_{mn}(U)$ для цепи, показанной на рис. 29, необходимо иметь пары значений $U - U_{mn}$, которые определяют точки кривой. Имея характеристики, приведённые на рис. 31, задаёмся

значением входного напряжения, например, $U_1 = U$. Из входной характеристики 5 определяем соответствующее значение тока в цепи $I_1 = I_1$, а по нему из характеристики 4 – искомое значение выходного напряжения $U_2 = U_{mn}$. Найденная пара значений $U - U_{mn}$ даёт одну точку передаточной характеристики. Аналогично находят другие точки передаточной характеристики.

В лаборатории объектом исследования являются нелинейные электрические цепи и параметрический стабилизатор напряжения (рис. 32) с использованием кремниевых диодов, специально предназначенных для стабилизации напряжения.

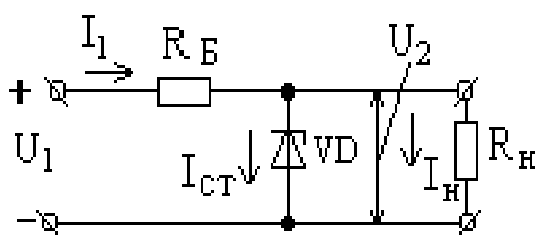


Рис. 32

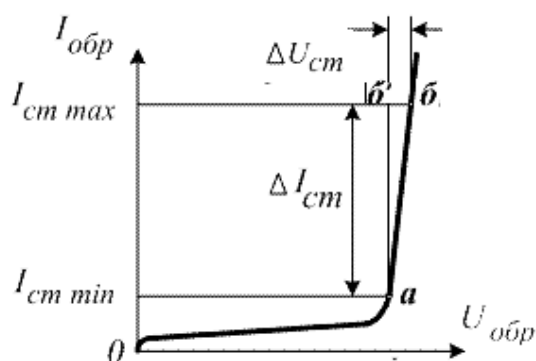


Рис. 33

Важнейшей характеристикой стабилитрона является его вольт-амперная характеристика. В прямом включении вольт-амперная характеристика стабилитрона практически не отличается от прямой ветви любого кремниевого диода. Обратная ветвь характеристики (рис. 33) имеет вид прямой вертикальной линии, проходящей почти параллельно оси токов. Благодаря этому при изменении в широких пределах обратного тока $I_{обр}$ падение напряжения $U_{ст}$ на приборе практически не изменяется.

Рассмотрим принцип действия данного стабилизатора. На рис.34 изображены ВАХ стабилитрона и нагрузки.

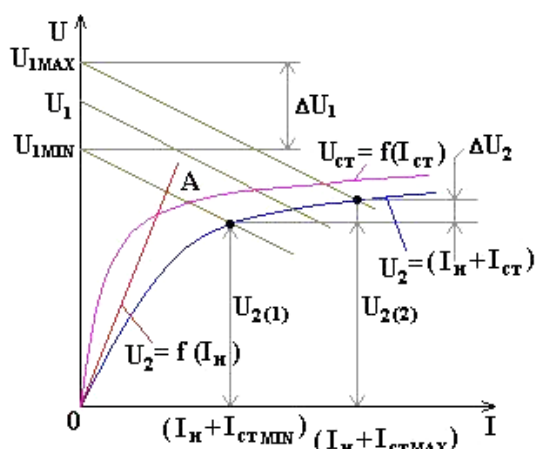


Рис. 34

Так как сопротивление нагрузки и стабилитрон включены параллельно, то для построения суммарной вольт-амперной характеристики необходимо сложить характеристики $U_2 = f(I_H)$ (прямая ОА) и стабилитрона $U_{ст} = f(I_{ст})$ по оси токов. Полученная кривая представляет собой зависимость $U_2 = f(I_H + I_{ст})$. Отложив на оси ординат величину входного напряжения U_1 , строим из этой точки нагрузочную характеристику:

$$U_2 = U_1 - R_6 \cdot I_1.$$

Точка пересечения этой характеристики с суммарной характеристикой сопротивления нагрузки и стабилитрона определяет установившийся режим для данной величины входного напряжения. При изменении входного напряжения нагрузочная характеристика перемещается и соответственно перемещается рабочая точка на суммарной характеристике $U_2 = f(I_H + I_{CT})$.

Как видно из рисунка, при изменении входного напряжения от $U_{1\min}$ до $U_{1\max}$ напряжение на сопротивлении нагрузки изменится от $U_2(1)$ до $U_2(2)$, причем изменение выходного напряжения ΔU_2 значительно меньше изменения напряжения на входе ΔU_1 .

Стабилизирующее действие стабилизатора напряжения оценивается коэффициентом стабилизации:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX.CP}}{\Delta U_{BЫX} / U_{BЫX.CP}},$$

$$\text{где } U_{BX.CP} = \frac{U_{BX.1} + U_{BX.2}}{2}; \quad U_{BЫX.CP} = \frac{U_{BЫX.1} + U_{BЫX.2}}{2}.$$

3. Описание лабораторной установки

Исследование нелинейной цепи в лаборатории проводится на универсальном лабораторном стенде. Необходимые для исследования элементы электрической цепи: источник выпрямленного регулируемого по величине напряжения, нелинейный элемент R11 – стабилитрон, линейные резисторы.

Для измерения токов в цепи используется резистор R4, включаемый последовательно с исследуемой цепью. Напряжение на всех элементах цепи измеряется универсальным вольтметром В7 – 38.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь в соответствии с рисунком 35 для снятия вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента (НЭ). Плавно регулируя напряжение источника в диапазоне от нуля до 25В, снять 10 – 12 значений тока и напряжения на НЭ.

Ток в цепи во всех опытах определяется через измеренное напряжение на резисторе R4: *после установки и измерения напряжения на нелинейном элементе вольтметр V переключается для измерения тока на зажимы резистора R4.* Вблизи напряжения стабилизации (на нелинейном участке характеристики) ВАХ резко изменяется, поэтому в этом диапазоне следует изменять напряжение на входе цепи через интервал не более 1 В.

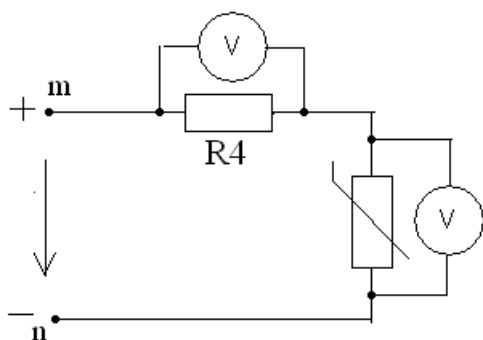


Рис. 35

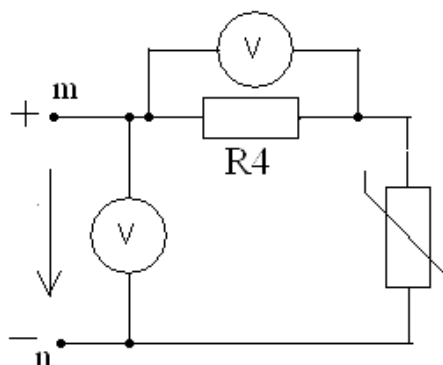


Рис. 36

Результаты измерений заносятся в таблицу 5.

Таблица 5

Опыты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{HЭ}, В$											
$U_{R4}, В$											
$I_{HЭ}, А$											

4.2. Исследование последовательной цепи с нелинейным элементом.

Для исследования собирается схема, представленная на рис. 36. Изменяя напряжение на входных зажимах цепи в пределах 0-25В, снять эквивалентную вольтамперную характеристику цепи $U_{BX}(I)$ при последовательном соединении резистора $R4$ и нелинейного элемента $R11$ – стабилитрона.

Результаты измерений заносятся в таблицу 6.

Таблица 6

Опыты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{BX}, В$											
$U_{R4}, В$											
$I, А$											

По результатам таблицы 6 построить эквивалентную характеристику по данным эксперимента.

В этой же системе координат по данным таблицы 5 построить ВАХ линейного резистора $R4$, ВАХ нелинейного элемента и эквивалентную характеристику цепи по данным расчёта графическим методом.

При двух значениях приложенного напряжения U_{BX} (по заданию преподавателя) измерить напряжение на стабилитроне $U_{HЭ}$, напряжение на резисторе U_{R4} и ток I цепи. Результаты измерений записать в таблицу 7.

Таблица 7

Из опыта				Из расчёта			
U_{BX}, B	U_{R4}, B	$U_{HЭ}, B$	I, A	U_{BX}, B	U_{R4}, B	$U_{HЭ}, B$	I, A

4.3. Исследование параллельной цепи с нелинейным элементом.

Для исследования собирается схема, представленная на рис. 37. Изменяя напряжение на входных зажимах цепи в пределах 0-25В, снять эквивалентную вольтамперную характеристику цепи $U_{ab}(I)$ при параллельном соединении резистора $R5$ и нелинейного элемента $R11$ – стабилитрона.

Результаты измерений заносятся в таблицу 8.

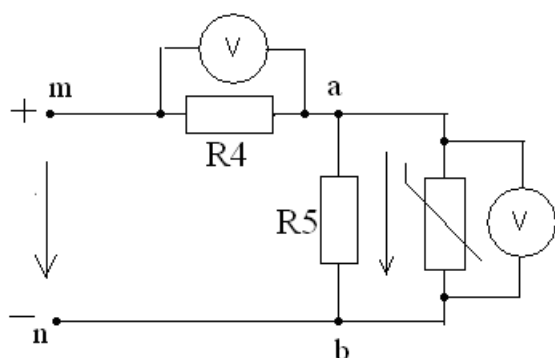


Рис. 37

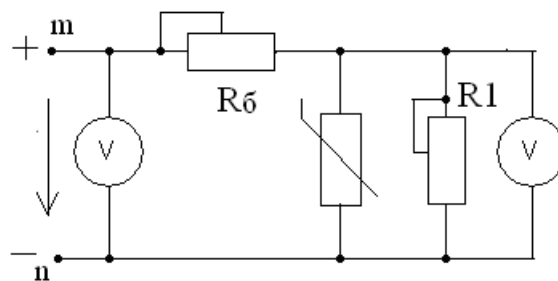


Рис. 38

Таблица 8

ОПЫТЫ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U_{BX}, B											
U_{R4}, B											
I, A											
U_{ab}, B											

По результатам таблицы 8 построить эквивалентную характеристику параллельной цепи $U_{ab}(I)$ по данным эксперимента.

В этой же системе координат построить ВАХ линейного резистора $R5$, ВАХ нелинейного элемента и эквивалентную характеристику $U_{ab}(I)$ по данным расчёта графическим методом.

При двух значениях приложенного напряжения U_{BX} (по заданию преподавателя) по данным измерений определить ток цепи I_{R4} , резистора I_{R5} и стабилитрона $I_{HЭ}$. Результаты измерений записать в таблицу 9.

Таблица 9

Из опыта				Из расчёта			
U_{BX}, B	I_{R4}, A	I_{R5}, A	$I_{HЭ}, A$	U_{BX}, B	I_{R4}, A	I_{R5}, A	$I_{HЭ}, A$

4.4. Исследование режима стабилизации напряжения на нагрузке при изменении входного напряжения.

Для исследования собирается схема, представленная на рис. 38. Изменяя напряжение на входных зажимах цепи в пределах 0-25В, снять передаточную характеристику цепи $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ для двух значений (по заданию преподавателя) сопротивления резистора $R1$ ($R1 = 200, 300, 400, \dots, 1000$). Сопротивление балластного резистора $Rб$ принять (по заданию преподавателя) в пределах от 40 до 80 Ом и постоянным для заданных значений сопротивления резистора $R1$. Результаты измерений для заданного значения $Rб$ заносятся в таблицу 10.

$$Rб = \dots \text{Ом}$$

Таблица 10

$R1 = \dots \text{Ом}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$										
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$										
$R1 = \dots \text{Ом}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$										
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$										

По данным таблицы 10 построить график передаточной функции $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ для одного из значений сопротивления резистора $R1$.

Для построения расчётной передаточной характеристики необходимо построить предварительно ВАХ всех элементов цепи: стабилитрона и линейных резисторов $Rб$, $R1$, после чего в соответствии с изложенным порядком расчёта нелинейной цепи со смешанным соединением элементов построить в этой же системе координат две вольтамперные характеристики $U_{\text{ВХ}}(I)$ и $U_{\text{ВЫХ}}(I)$.

Имея полученные характеристики, задаёмся значением входного напряжения от 0 до 25В и из входной характеристики $U_{\text{ВХ}}(I)$ определяем соответствующее значение тока в цепи, а по нему по выходной характеристике $U_{\text{ВЫХ}}(I)$ – искомое выходное напряжение.

5. Содержание отчёта

5.1. Цель работы.

5.2. Схемы исследуемых электрических цепей и эквивалентные характеристики по каждому эксперименту и по результатам расчёта. *Пример расчёта и оформления результатов эксперимента с использованием пакета Mathcad приведён в приложении 3.*

5.3. Схема параметрического стабилизатора и график передаточной функции стабилизатора по результатам эксперимента и расчёта. *Пример расчёта и оформления результатов эксперимента с использованием пакета Mathcad приведён в приложении 3.*

5.4. Таблицы опытных и расчетных данных.

5.5. Выводы по работе.

6. Литература

6.1. Новгородцев, А.Б. 30 лекций по теории электрических цепей: учеб. для вузов/ А.Б. Новгородцев.- СПб.: Политехника, 1995.-519с.

6.2. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов/ К.С. Демирчян. [и др.].- СПб.: Питер, 2006.- 377с.

7. Контрольные вопросы

1. Какие электрические цепи и элементы называются линейными и какие нелинейными?

2. Что понимается под статическим и дифференциальным сопротивлениями НЭ, как они определяются?

3. Приведите примеры НЭ и их применение.

4. В чем сущность графического метода расчета электрической цепи с нелинейными элементами?

5. Объясните механизм режима стабилизации напряжения на нагрузке при изменении напряжения на входе цепи.

6. Могут ли кремниевые стабилитроны работать в режиме теплового пробоя?

Расчёт напряжений и токов электрической цепи с элементами R, L, C при воздействии периодического несинусоидального сигнала с применением математического пакета Mathcad

$N := 400$ $i := 0..N$ число точек на интервале, равном периоду,

$j := 1, 3..29$ порядковый номер гармоники.

Параметры схемы: $R_r := 216$ $L := 0.023$ $C := 1.2 \cdot 10^{-7}$

Измеренное универсальным вольтметром напряжение источника:

$$U_{pr0} := 15.8$$

Амплитуда прямоугольного напряжения по результатам измерения вольтметром:

$$U_0 := \frac{U_{pr0}}{1.11} \quad U_0 = 14.234$$

Частота (Гц) и период колебаний прямоугольного сигнала:

$$f := 2500, \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad T := \frac{1}{f}$$

Реактивные сопротивления исследуемой электрической цепи:

$$X_L := \omega \cdot L \quad X_C := \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Показания универсального вольтметра равны среднему по модулю (средневыпрямленному) за период значению измеряемого напряжения, умноженному на коэффициент формы синусоиды ($K_f=1.11$).

1. Последовательная цепь R

Амплитуды гармонического ряда прямоугольного напряжения:

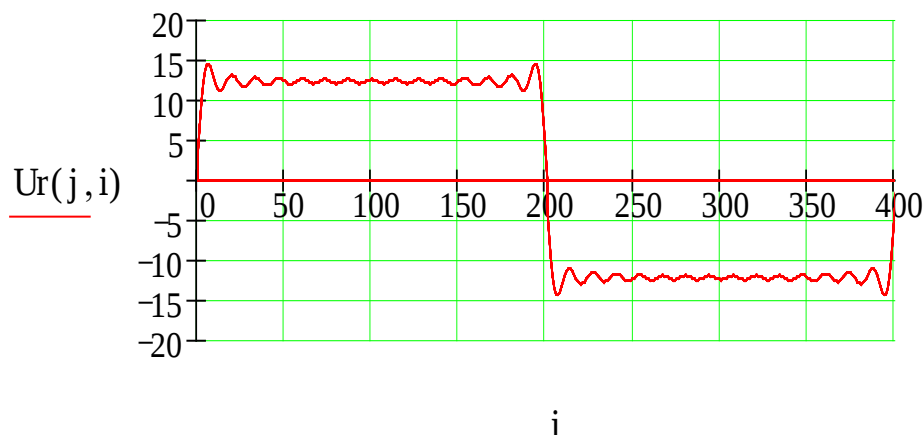
$$U_m(j) := 4 \cdot \frac{U_0}{j \cdot \pi}$$

Измеренное напряжение на резисторе, В: $U_{pr} := 13.6$

Внутреннее сопротивление источника: $R_g := \frac{U_{pr0} - U_{pr}}{U_{pr}} \cdot R_r \quad R_g = 34.941$

Активное сопротивление цепи: $R := R_g + R_r$, $R = 250.941$

График напряжения на резисторе: $U_r(j, i) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N}\right)}{R}$



Действующее значение напряжения на резисторе:

$$U_r := \sqrt{\sum_j \left(\frac{R_r \cdot U_m(j)}{\sqrt{2} \cdot R} \right)^2} \quad U_r = 12.169$$

Закон изменения напряжения на резисторе:

$$U_r(t) := \sum_j \frac{R_r}{R} \cdot U_m(j) \cdot \sin\left[j \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right) \cdot t\right]$$

Показания прибора: ,

$$U_{pr} := \frac{1.11}{T} \cdot \int_0^T |U_r(t)| dt \quad U_{pr} = 13.547$$

2. Последовательная цепь R, L

Введём данные для построения графика напряжения на резисторе. Для этого воспользуемся расчётными выражениями, приведёнными в разделе «Краткие теоретические сведения».

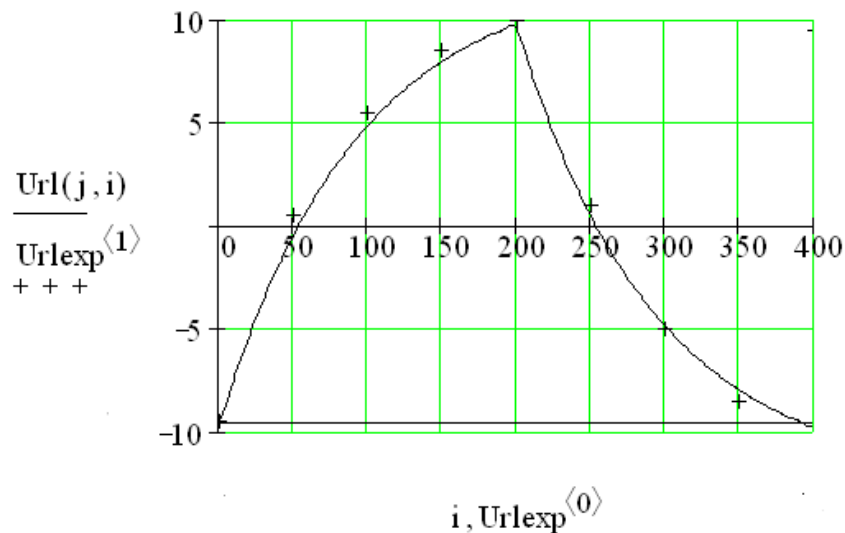
Расчётная функция напряжения на резисторе за время t , равное периоду T :

$$Url(j, i) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N} - \operatorname{atan}\left(j \cdot \frac{XL}{R}\right)\right)}{\sqrt{R^2 + (j \cdot XL)^2}}$$

Транспонированная матрица мгновенных значений напряжения на резисторе, измеренных с помощью осциллографа, т.е. по осциллограмме, полученной с экрана осциллографа:

$$Urlexp^T = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 100 & 150 & 200 & 250 & 300 & 350 & 400 \\ -9.5 & 0.5 & 5.5 & 8.5 & 10 & 1 & -5 & -8.5 & 9.5 \end{pmatrix} \blacksquare$$

График напряжения на резисторе по результатам расчёта и измерений



Действующее значение напряжения на резисторе:

$$Url := \sqrt{\sum_j \left[\frac{R_r \cdot U_m(j)}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{R^2 + (j \cdot XL)^2}} \right]^2} \quad Url = 6.358$$

Закон изменения напряжения на резисторе:

$$Url(t) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left[j \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right) \cdot t - \operatorname{atan}\left(j \cdot \frac{XL}{R}\right)\right]}{\sqrt{R^2 + (j \cdot XL)^2}}$$

Показания прибора:

$$U_{prl} := \frac{1.11}{T} \cdot \int_0^T |U_{rl}(t)| dt \quad U_{prl} = 6.295$$

3. Последовательная цепь R, C

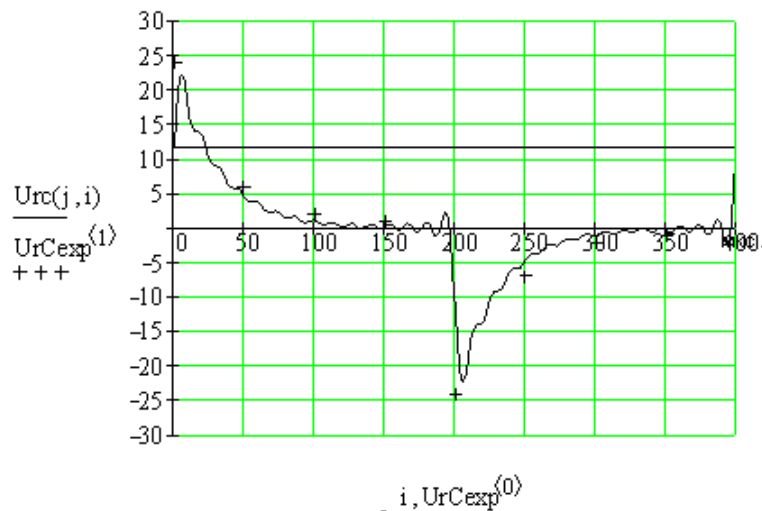
Расчётная функция напряжения на резисторе за время t, равное периоду T:

$$U_{rc}(j, i) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N} - \operatorname{atan}\left(\frac{-XC}{j \cdot R}\right)\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{XC}{j}\right)^2}}$$

Транспонированная матрица мгновенных значений напряжения на резисторе, измеренных по осциллограмме:

$$U_{rcexp}^T = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 100 & 150 & 200 & 250 & 300 & 350 & 400 \\ 24 & 6 & 2 & 1 & -24 & -7 & -2 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

График напряжения на резисторе по результатам расчёта и измерений



Действующее значение напряжения на резисторе:

$$U_{rc} := \sqrt{\sum_j \left[\frac{R_r \cdot U_m(j)}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{XC}{j}\right)^2}} \right]^2} \quad U_{rc} = 6.562$$

Закон изменения напряжения на резисторе:

$$U_{rc}(t) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left[\left(j \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{T} \cdot t + \operatorname{atan}\left(\frac{XC}{j \cdot R}\right)\right)\right]}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{XC}{j}\right)^2}}$$

Показания прибора:

$$U_{prc} := \frac{1.11}{T} \cdot \int_0^T |U_{rc}(t)| dt \quad , \quad U_{prc} = 4.302$$

4. Последовательная цепь R, L, C

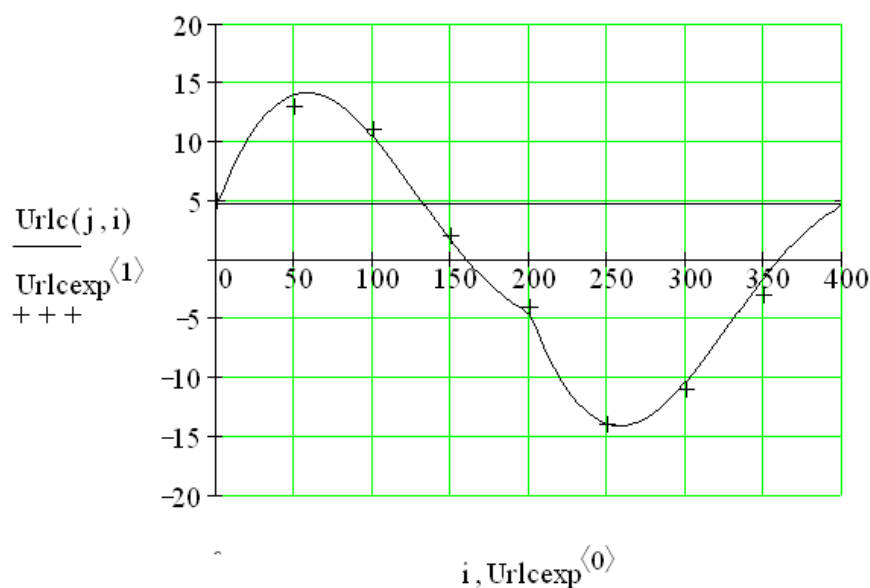
Расчётная функция напряжения на резисторе за время t, равное периоду T:

$$U_{rlc}(j, i) := \sum_j R_r \cdot U_m(j) \cdot \frac{\sin\left[j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N} - \operatorname{atan}\left[\frac{\left(j \cdot XL - \frac{XC}{j}\right)}{R}\right]\right]}{\sqrt{R^2 + \left(j \cdot XL - \frac{XC}{j}\right)^2}}$$

Транспонированная матрица мгновенных значений напряжения на резисторе, измеренных по осциллограмме:

$$U_{rlcexp}^T = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 100 & 150 & 200 & 250 & 300 & 350 & 400 \\ 5 & 13 & 11 & 2 & -4 & -14 & -11 & -3 & 5 \end{pmatrix}.$$

График напряжения на резисторе по результатам расчёта и измерений



Действующее значение напряжения на резисторе:

$$U_{rlc} := \sqrt{\sum_j \left[\frac{R_r \cdot U_m(j)}{(\sqrt{2}) \cdot \sqrt{R^2 + \left[(j) \cdot X_L - \frac{X_C}{j} \right]^2}} \right]^2} \quad U_{rlc} = 9.206$$

Закон изменения напряжения на резисторе:

$$U_{rlc}(t) := \sum_j \frac{R_r \cdot U_m(j)}{\sqrt{R^2 + \left(j \cdot X_L - \frac{X_C}{j} \right)^2}} \cdot \sin \left(j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t - \operatorname{atan} \left(j \cdot \frac{X_L - \frac{X_C}{j}}{R} \right) \right)$$

Показания прибора:

$$U_{prlc} := \frac{1.11}{T} \cdot \int_0^T |U_{rlc}(t)| \, dt \quad U_{prlc} = 8.83$$

Расчёт и оформление результатов экспериментального исследования переходных процессов с использованием математического пакета Mathcad

Результаты расчёта и экспериментального исследования представлены в виде графиков, построенных на основании данных осциллограмм и расчётных выражений для переходных напряжений и токов.

1. Переходный процесс в цепи с элементами R,L при воздействии прямоугольного импульса

Исходные данные:

- напряжение, параметры элементов и источника:

$$U := 25 \text{ В} \quad L := 0.023 \text{ Гн} \quad R_r := 87 \text{ Ом} \quad R_g := 10.86 \text{ Ом}$$

где R_q – внутреннее сопротивление источника прямоугольных сигналов;

R_r – сопротивление резистора;

$R = R_q + R_r$ – полное сопротивление цепи

$$R := R_g + R_r \text{ Ом}$$

- частота f , период T и число N – разбиений на интервале от 0 до T :

$$f := 500 \text{ Гц} \quad T := \frac{1}{f} \text{ сек.} \quad N := 2000 \quad dt := \frac{T}{N} \text{ сек} \quad k := 0..N$$

- постоянная времени τ переходного процесса:

$$\tau := \frac{L}{R} \text{ сек.} \quad \tau = 2.35 \times 10^{-4}$$

Расчётные зависимости напряжения на резисторе R_r :

- в интервале времени от 0 до t_u напряжение $u_R(t)$ в соответствующий момент времени рассчитывается по формуле:

$$u1(t) := \frac{U}{R} \cdot R_r \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

- в интервале времени $t \geq t_u$, где $t_u = 0.5T$:

$$u2(t) := \frac{U}{R} \cdot R_r \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(e^{\frac{0.5T}{\tau}} - 1 \right)$$

- в интервале $0 \leq t \leq T$: $u(t) := \text{if}(0 \leq t \leq 0.5T, u1(t), u2(t))$

Формирование матрицы мгновенных значений $u_R(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа:

$$U_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0 & 100 & 200 & 400 & 600 & 800 & 1000 & 1100 & 1200 & 1400 & 1600 & 1800 \\ 0 & 12 & 15 & 20 & 21.5 & 22 & 22.5 & 12 & 6 & 2 & 0.6 & 0.2 \end{pmatrix},$$

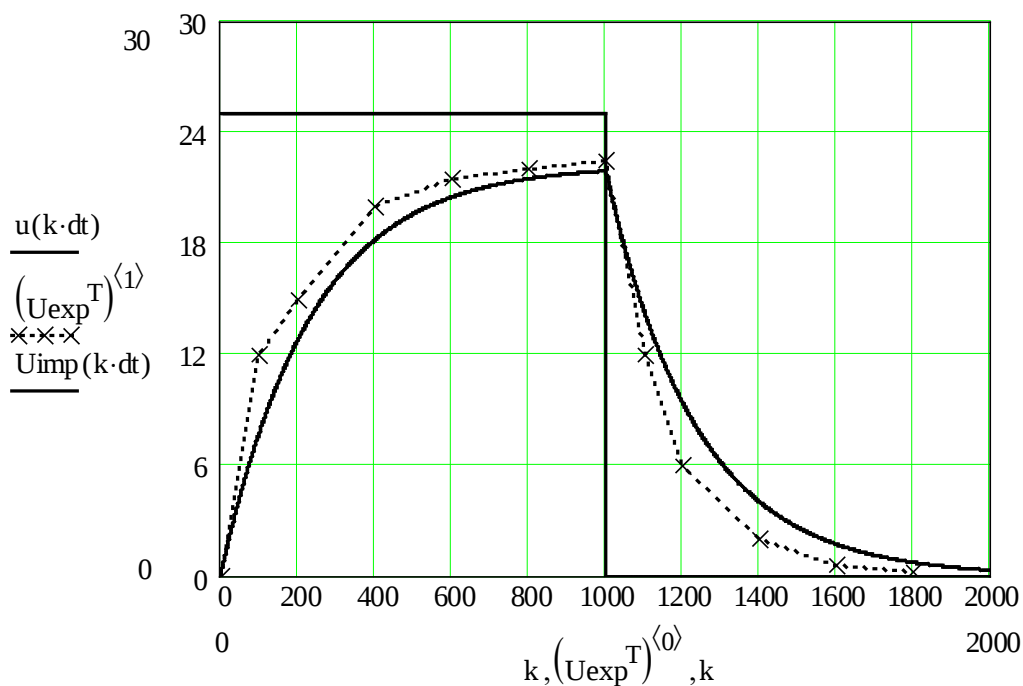
где первая строка – время в микросекундах, вторая – напряжение в вольтах.

Аналитическое представление прямоугольного импульса:

$$U_{\text{imp}}(t) := 25 \cdot \Phi(t) - 25 \cdot \Phi(t - 0.5T),$$

где $\Phi(t)$ – единичная ступенчатая функция.

Построение графиков переходного напряжения $u_R(t)$ и напряжения $U_{\text{imp}}(t)$ прямоугольного импульса.



Расчётные зависимости напряжения на индуктивности L .

- в интервале времени от 0 до t_u напряжение $u_L(t)$ в соответствующий момент времени рассчитывается по формуле:

$$U1(t) := U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$$

- в интервале времени $t \geq t_u$, где $t_u = 0.5T$:

$$U2(t) := U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot \left(1 - e^{\frac{0.5 \cdot T}{\tau}} \right)$$

- в интервале $0 \leq t \leq T$: $U(t) := \text{if}(0 \leq t \leq 0.5 \cdot T, U1(t), U2(t))$

Создание матрицы мгновенных значений $u_L(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа.

- в интервале времени от 0 до t_u :

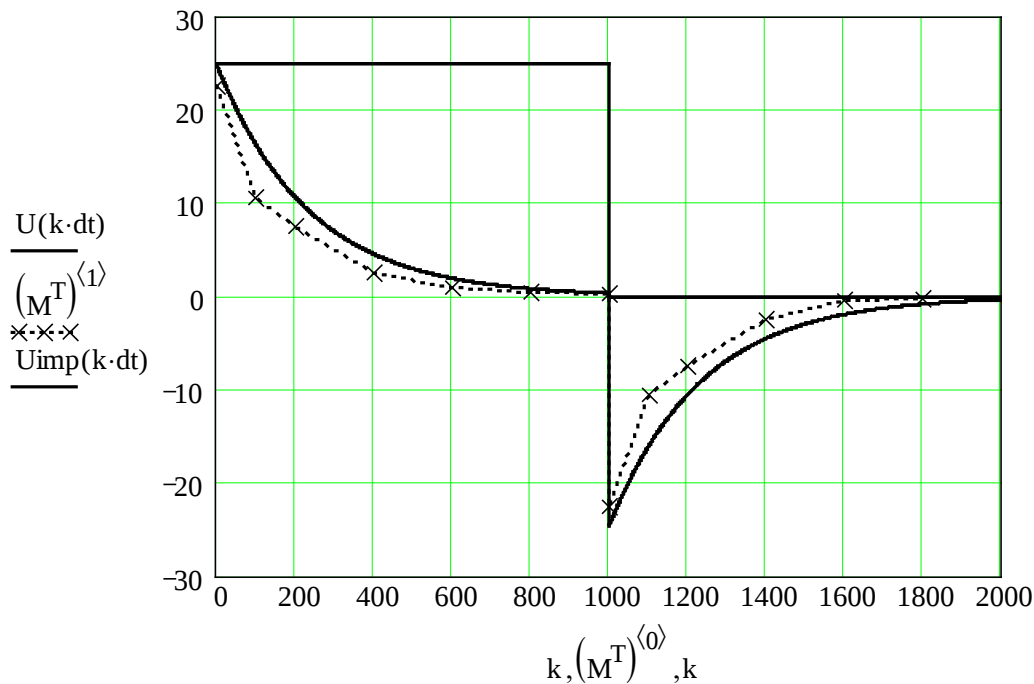
$$M1 := \begin{pmatrix} 0 & 100 & 200 & 400 & 600 & 800 & 1000 \\ 22.5 & 10.5 & 7.5 & 2.5 & 1 & 0.5 & 0.2 \end{pmatrix}$$

- в интервале времени $t \geq t_u$:

$$M2 := \begin{pmatrix} 1000 & 1100 & 1200 & 1400 & 1600 & 1800 \\ -22.5 & -10.5 & -7.5 & -2.5 & -0.5 & -0.2 \end{pmatrix}$$

- в интервале $0 \leq t \leq T$: $M := \text{augment}(M1, M2)$

Построение графиков переходного напряжения $u_L(t)$ и напряжения $U_{\text{imp}}(t)$ прямоугольного импульса.



2. Переходный процесс в цепи с элементами R,C при воздействии прямоугольного импульса

Исходные данные.

- напряжение, параметры элементов и источника:

$$U_0 := 28 \text{ В}, \quad C := 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}, \quad R_r := 1040 \text{ Ом}, \quad R_g := 10.86 \text{ Ом},$$

- постоянная времени τ переходного процесса:

$$\tau := R \cdot C \text{ сек.} \quad \tau = 1.261 \times 10^{-4} \quad R := R_g + R_r \text{ Ом}, \quad R = 1.051 \times 10^3$$

- частота f , период T и число N – разбиений на интервале от 0 до T :

$$f := 500 \text{ Гц} \quad T := \frac{1}{f} \text{ сек.} \quad N := 2000 \quad dt := \frac{T}{N} \text{ сек} \quad k := 0..N$$

Расчётные зависимости для напряжения на ёмкости:

- в интервале времени от 0 до t_u напряжение $u_C(t)$ рассчитывается по формуле:

$$U1rc(t) := U_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \right)$$

- в интервале времени $t \geq t_u$, где $t_u = 0.5T$:

$$U2rc(t) := U_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot \left(e^{\frac{0.5 \cdot T}{\tau}} - 1 \right)$$

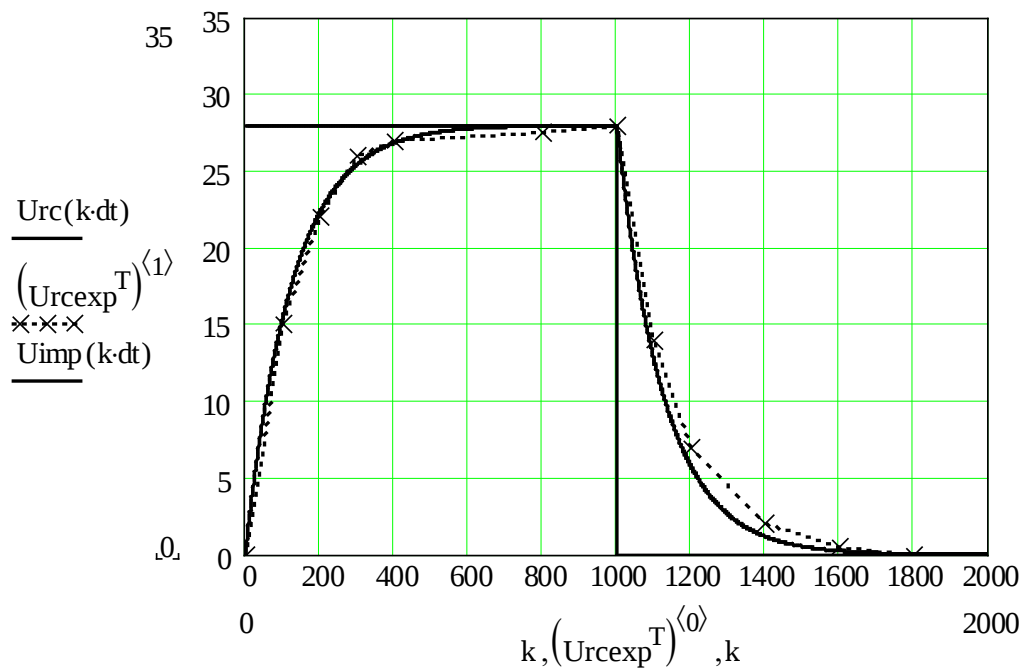
- в интервале $0 \leq t \leq T$:

$$Urc(t) := \text{if}[(0) \leq t \leq 0.5T, U1rc(t), U2rc(t)]$$

Формирование матрицы мгновенных значений $u_C(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа:

$$Urc_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0 & 100 & 200 & 300 & 400 & 800 & 1000 & 1100 & 1200 & 1400 & 1600 & 1800 \\ 0 & 15 & 22 & 26 & 27 & 27.5 & 28 & 14 & 7 & 2 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

Построение графиков переходного напряжения $u_C(t)$ и напряжения $U_{\text{imp}}(t)$ прямоугольного импульса.



В такой же последовательности производится расчёт и построение графиков для переходного напряжения $u_R(t)$ на сопротивлении R .

3. Переходный процесс в электрической цепи с элементами R, L, C при воздействии прямоугольного импульса

Рассмотрим случай переходного процесса, когда корни характеристического уравнения комплексные сопряжённые. В соответствии с заданием приведём расчёт переходного напряжения на ёмкости.

Исходные данные.

- напряжение, параметры элементов и источника:

$$U_0 := 28 \text{ В. } L := 0.023 \text{ Гн.}, C := 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}, R_g := 10.86 \text{ Ом.}, R_r := 150 \text{ Ом.},$$

Выражения для расчёта корней характеристического уравнения:

$$R := R_r + R_g \text{ Ом.} \quad \delta := \frac{R}{2 \cdot L}, \quad \omega_0 := \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad j := \sqrt{-1}$$

$$\alpha_1 := -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad \alpha_2 := -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

Расчётные зависимости для напряжения на ёмкости.

- в интервале времени от 0 до t_u напряжение $u_C(t)$ рассчитывается по формуле:

$$U1c(t) := \frac{U_0}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot (\alpha_2 \cdot e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 t}) + U_0$$

- в интервале времени $t \geq t_u$, где $t_u = 0.5T$:

$$U2c(t) := \frac{-U_0}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot [\alpha_2 \cdot e^{\alpha_1(t-0.5T)} - \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2(t-0.5T)}]$$

- в интервале $0 \leq t \leq T$:

$$Uc(t) := \text{if}[(0) \leq t \leq 0.5 \cdot T, U1c(t), U2c(t)]$$

Создание матрицы мгновенных значений $u_c(t)$ по осциллограмме, скопированной с экрана осциллографа.

- в интервале времени от 0 до t_u :

$$U1c_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0 & 100 & 175 & 300 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 1000 \\ 0 & 31 & 41 & 20 & 22 & 32 & 30 & 26 & 29 & 28 & 28 \end{pmatrix}$$

- в интервале времени $t \geq t_u$:

$$U2c_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 1001 & 1050 & 1100 & 1150 & 1350 & 1400 & 1500 & 1600 & 1700 & 1800 & 1900 \\ 28 & 20 & -5 & -13 & 7 & 4 & -5 & 0 & 2.5 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- в интервале $0 \leq t \leq T$:

$$Uc_{\text{exp}} := \text{augment}(U1c_{\text{exp}}, U2c_{\text{exp}})$$

Сплайновая аппроксимация экспериментальных данных, представленных элементами матрицы Uc_{exp} .

В большинстве случаев желательно соединить экспериментальные точки не ломаной кривой, а гладкой кривой, для чего используется сплайн-интерполяция.

Введём данные для кубической сплайн – интерполяции:

$$x := (Uc_{\text{exp}}^T)^{\langle 0 \rangle} \quad y := (Uc_{\text{exp}}^T)^{\langle 1 \rangle} \quad S := \text{cspline}(x, y) \quad Uc_{\text{exp}}(t) := \text{interp}(S, x, y, t)$$

Здесь:

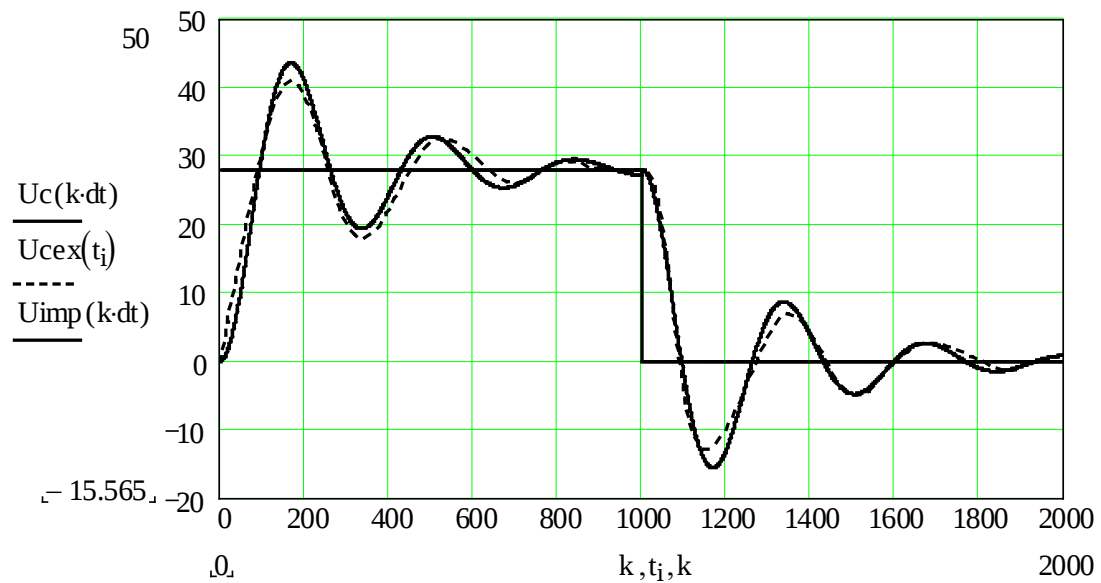
x – вектор опытных значений аргумента в интервале $0 \leq t \leq T$ (время в мкс.), расположенных в порядке возрастания;

y – вектор опытных значений функции ($u_c(t)$ в вольтах);

S – вектор вторых производных, созданный функцией $S := \text{cspline}(x, y)$;

t – значение аргумента, при котором вычисляется интерполирующее значение функции.

Построение графиков переходного напряжения $u_c(t)$ и напряжения $U_{imp}(t)$ прямоугольного импульса.



Для построения графика по данным эксперимента необходимо ввести число расчётных точек и значение аргумента, при котором вычисляется интерполирующее значение $U_{сех}(t)$:

$$i := 0, 1 \dots 100 \quad t_i := \min(x) + i \frac{(\max(x) - \min(x))}{100}$$

Расчёт и построение эквивалентных характеристик нелинейной цепи и передаточной характеристики параметрического стабилизатора с использованием математического пакета Mathcad

1. Формирование матрицы и построение вольтамперной характеристики нелинейного элемента по данным измерений

Составим матрицу по результатам измерений, представленных в таблице 9. Элементы первой строки матрицы соответствуют напряжениям на стабилитроне, элементы второй строки – напряжениям на сопротивлении R4:

$$U_H := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.81 & 4.7 & 5 & 5.2 & 5.5 & 6.2 & 6.3 & 6.4 & 6.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0002 & 0.42 & 0.8 & 0.9 & 1 & 1.6 & 3.6 & 10 & 17.4 \end{pmatrix}$$

Доступ к любому элементу матрицы осуществляется через имя матрицы с двумя индексами. Первый индекс обозначает номер строки, второй – номер столбца. Элемент вектора задается одним индексом. Для набора индекса можно использовать клавишу [(открывающая квадратная скобка). Порядком нумерации элементов матрицы управляет встроенная переменная ORIGIN. По умолчанию ORIGIN = 0. Это значит, что первый член массива имеет номер 0.

Приведём нумерацию элементов матрицы U_H :

$U_{H_{0,j}}$ - напряжение на нелинейном элементе;

$U_{H_{1,j}}$ - напряжение на резисторе R4, В.

$j := 0..13$ - номер столбца в матрице.

Для построения графика вольтамперной характеристики (ВАХ) стабилизатора $I_H(U_H)$ введём следующие данные:

$R4 := 99 \text{ Ом}$ - сопротивление резистора R4;

$I_{Hj} := \frac{U_{H_{1,j}}}{R4}$ - ток нелинейного элемента, А .

Для построения графика надо выполнить следующую процедуру:

- установить курсор в то место, где должен быть построен график;
- на математической панели (*График*) щелкнуть на кнопке X-Y ;
- в появившемся на месте курсора шаблоне графика ввести на оси абсцисс имя аргумента, на оси ординат – имя функции;
- щелкнуть мышью вне шаблона графика – для заданного диапазона изменения аргумента график будет построен.

График вольтамперной характеристики стабилизатора показан на рисунке 1.

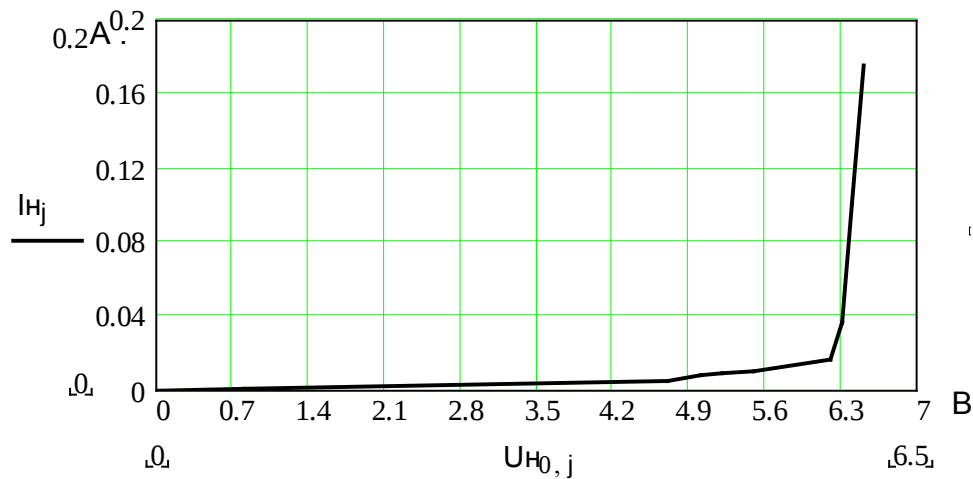


Рис. 1

2. Формирование матрицы и построение эквивалентной ВАХ нелинейной цепи при последовательном соединении элементов

Составим матрицу по результатам измерений, представленных в таблице 9. Элементы первой строки матрицы соответствуют напряжениям на входных полюсах цепи, элементы второй строки – напряжениям на сопротивлении R4:

$$U_{вх} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0004 & 0.06 & 1.8 & 3.4 & 5.3 & 7.2 & 13 & 15.8 & 17 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 4 & 8 & 10 & 12 & 14 & 20 & 23 & 24 \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы:

$U_{вх1,j}$ - напряжение на входных зажимах, В;

$U_{вх0,j}$ - напряжение на резисторе R4, В;

$I_{вхj} := \frac{U_{вх0,j}}{R4}$ - ток нелинейного элемента, А.

На основании матрицы $U_{вх}$ производится построение графика опытной эквивалентной ВАХ последовательной цепи.

Введём исходные данные для построения эквивалентной характеристики по результатам расчёта графическим методом:

$I_{r4j} := I_{nj}$ - ток в ветви с резистором R4,

$U_{r4j} := R4 \cdot I_{r4j}$ - расчетное падение напряжения на резисторе R4,

$I_j := I_{r4j}$ - ток на входе последовательной цепи,

$U_j := U_{n0,j} + U_{r4j}$ - расчетное напряжение на входе последовательной цепи.

Ниже, на рис. 2 приведены вольтамперные характеристики нелинейного элемента $I_{nj}(U_{n0,j})$, линейного резистора $I_{r4j}(U_{r4j})$, расчётная

$I_j(U_j)$ и опытная $I_{вхj}(U_{вх1,j})$ эквивалентные характеристики последовательной цепи.

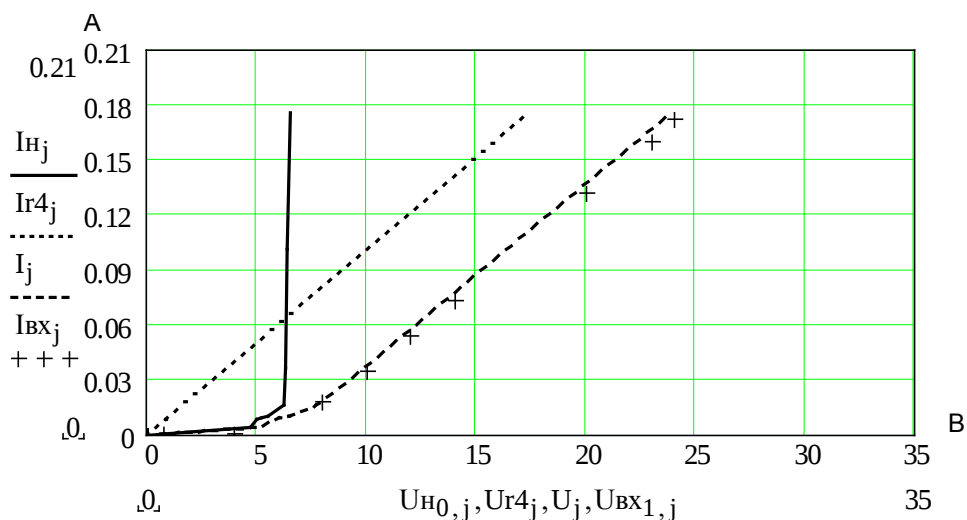


Рис. 2

3. Формирование матрицы и построение эквивалентной ВАХ нелинейной цепи при параллельном соединении элементов

Составим матрицу по результатам измерений, представленных в таблице 9. Элементы первой строки матрицы соответствуют напряжениям на стабилитроне, элементы второй строки – напряжениям на сопротивлении R4:

$$U_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0.13 & 1.4 & 2.6 & 3.9 & 5 & 5.8 & 6.2 & 6.3 & 6.4 & 6.41 & 6.44 & 6.5 & 6.4 & 6.42 \\ 0.7 & 0.7 & 1.3 & 2 & 3 & 4.3 & 5.8 & 7.6 & 9.8 & 11.8 & 13.8 & 17.2 & 11.1 & 12.6 \end{pmatrix}$$

где $U_{\text{exp}0,j}$ - напряжение на нелинейном элементе (стабилитроне), В;

$U_{\text{exp}1,j}$ - напряжение на сопротивлении R4, В;

$I_{\text{exp}j} := \frac{U_{\text{exp}1,j}}{R4}$ - измеренный ток на входе параллельной цепи А.

На основании матрицы U_{exp} производится построение графика опытной эквивалентной ВАХ параллельной цепи.

Введём исходные данные для построения эквивалентной характеристики по результатам расчёта графическим методом:

$R5 := 199 \text{ Ом}$. - сопротивление, включенное параллельно нелинейному элементу;

$U_{r5j} := U_{n0,j}$ - напряжение на резисторе R5 и нелинейном элементе, В;

$I_{r5j} := \frac{U_{r5j}}{R5}$ - расчетный ток в ветви с резистором R5, А;

$I_j := I_{Hj} + I_{r5j}$ - расчетный ток на входе параллельной цепи, А .

Ниже, на рисунке 3 приведены вольтамперные характеристики нелинейного элемента $I_{Hj}(U_{H0,j})$, линейного резистора $I_{r5j}(U_{r5j})$, расчётная $I_j(U_j)$ и опытная $I_{expj}(U_{exp0,j})$ эквивалентные характеристики параллельной цепи.

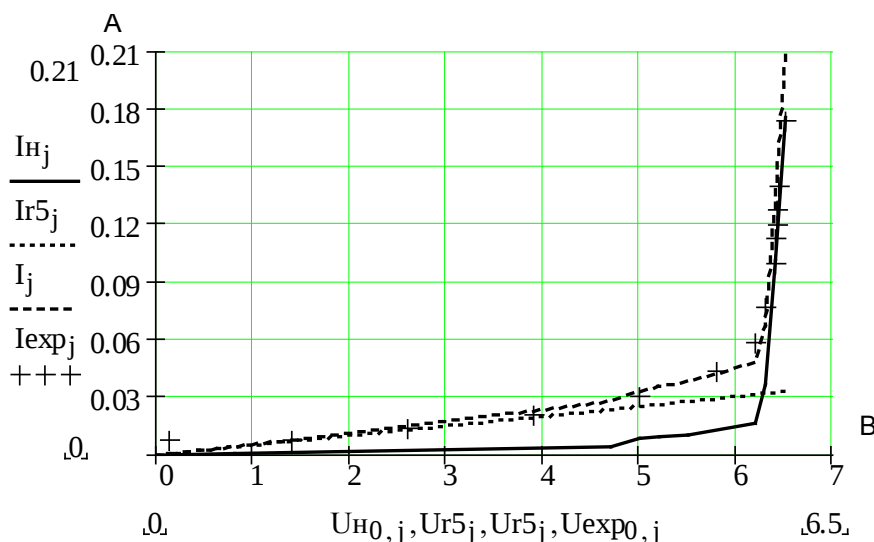


Рис. 3

4. Формирование матрицы и построение передаточной характеристики параметрического стабилизатора

Составим матрицу по результатам измерений, представленных в таблице 9. Элементы первой строки матрицы соответствуют напряжениям на входе цепи, элементы второй строки – напряжениям на сопротивлении нагрузки:

$$U := \begin{pmatrix} 0.17 & 2.5 & 3.5 & 4.6 & 5.7 & 7 & 8.9 & 11.5 & 11.6 & 7.8 & 8.4 & 10 & 11.7 & 13 \\ 0.16 & 2.3 & 3.25 & 4.45 & 5.2 & 6.2 & 6.5 & 6.55 & 6.5 & 6.5 & 6.5 & 6.55 & 6.55 & 6.6 \end{pmatrix}$$

Обозначим: $k := 0..13$ - номер столбца в матрице,

$U_{вхexpk} := U_{0,k}$ - измеренное напряжение на входе цепи,

$U_{выхexpk} := U_{1,k}$ - измеренное напряжение на сопротивлении нагрузки.

Введём исходные данные для построения передаточной характеристики по результатам расчёта графическим методом:

$R_{балл} := 35$ - балластное сопротивление, Ом.

$R_2 := 199$ - сопротивление нагрузки, Ом.

$U_{r2j} := U_{H0,j}$ - напряжение на сопротивлении нагрузки и нелинейном элементе, В.

$I_{r2j} := \frac{U_{r2j}}{R_2}$ - расчетный ток в ветви с резистором R_2 (ток нагрузки), А.

$I_j := I_{n_j} + I_{r2j}$ - расчетный ток на входе цепи (ток в балластном сопротивлении), А.

$U_{выхрасчj} := U_{н0,j}$ - расчетное напряжение на выходе стабилизатора, В.

$U_{баллj} := R_{балл} \cdot I_j$ - расчетное напряжение на балластном сопротивлении стабилизатора, В.

$U_{вхрасчj} := U_{выхрасчj} + U_{баллj}$ - расчетное напряжение на входе стабилизатора, В.

Передаточные характеристики параметрического стабилизатора, полученные по результатам опыта и расчёта, приведены на рисунке 4.

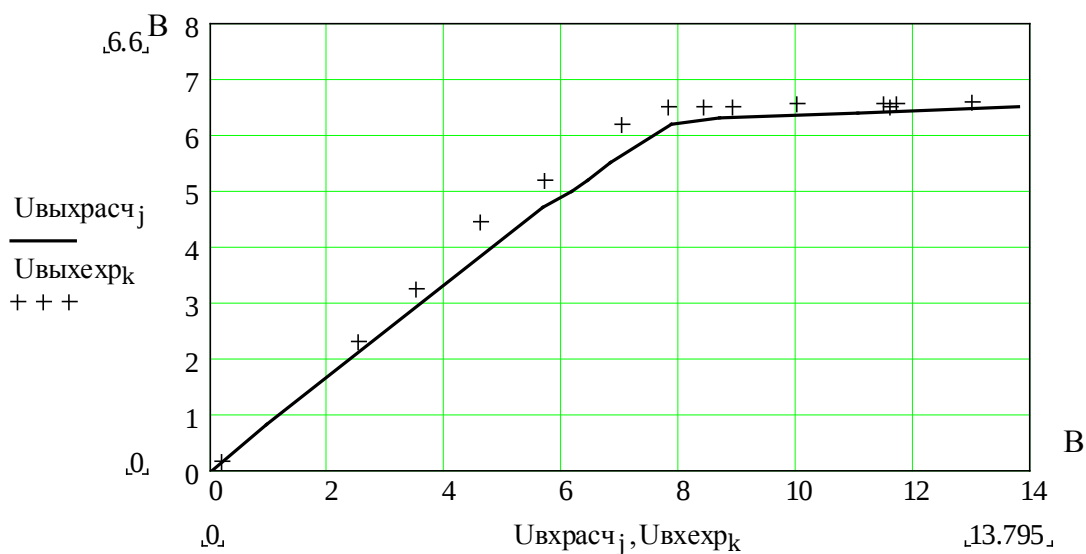


Рис. 4

Содержание

Введение.....	3
Лабораторная работа. Исследование электрической цепи при несинусоидальной форме напряжения и тока.....	5
Лабораторная работа. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях первого и второго порядка.....	10
Лабораторная работа. Исследование нелинейной цепи постоянного тока....	24
Приложение 1.....	34
Приложение 2.....	40
Приложение 3.....	47

Подписано в печать 23.06.2014. Усл. печ. л. 3,1. Тираж экз.
Печать офсетная. Бумага офисная. Заказ № _____

Отпечатано: РИО ВоГУ, г. Вологда, ул. С. Орлова, 6