

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Цель работы. Исследование переходных процессов в цепях с конденсатором, характеризующихся дифференциальными уравнениями первого порядка.

Пояснения к работе

При всяком изменении режима работы цепи, содержащей хотя бы один накопитель электрической энергии (индуктивность L или емкость C) возникают переходные процессы – процессы перехода от одного установившегося режима к другому. Мощность реальных источников в цепи конечна, поэтому связанные с энергией величины – ток в индуктивности и напряжение на емкости – могут изменяться только плавно, без скачков. В этом суть законов коммутации.

Решение системы дифференциальных уравнений, характеризующих состояние цепи, может быть найдено в виде суммы принужденной и свободной составляющих. Например, для тока: $i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}$.

Принужденная составляющая при постоянных и периодических источниках определяется из расчета установившегося режима ($t \rightarrow \infty$) послекоммутационной цепи и вид ее соответствует характеру источников.

Свободная составляющая записывается в виде суммы экспонент $i_{\text{св}} = A_k e^{p_k t}$ при различных вещественных корнях характеристического уравнения p_k .

Постоянные интегрирования A_k определяются из начальных условий – зависимых и независимых.

Независимые условия (начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости) определяются по законам коммутации и требуют предварительного расчета установившегося режима докоммутационной цепи. Начальные же значения остальных величин (зависимые условия) определяются из уравнений, описывающих состояние послекоммутационной цепи в первый момент после коммутации ($t = +0$).

В цепи с одним накопителем свободная составляющая содержит только один корень и одну экспоненту. Например, для схемы рис. 11.1, а $i_{\text{св}} = A_k e^{p_k t}$, причем $i = i_{\text{св}}$, поскольку в установившемся режиме постоянный ток через конденсатор не течет и $i_{\text{пр}} = 0$. До коммутации конденсатор не был заряжен, так что по второму закону коммутации $u_C(+0) = u_C(-0) = 0$. Поэтому $A = i_{\text{св}}(0) = [U - u_C(+0)]/R$.

Тогда ток и напряжение при заряде конденсатора

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \\ u_C(t) &= U - i(t)R = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \end{aligned} \right\} \quad (11.1)$$

Здесь корень характеристического уравнения $p = -(RC)^{-1}$, а постоянная времени $\tau = \frac{1}{|p|} = RC$. Она может быть найдена по экспериментально полученной зависимости $i(t)$ как длина подкасательной (рис. 11.1, б).

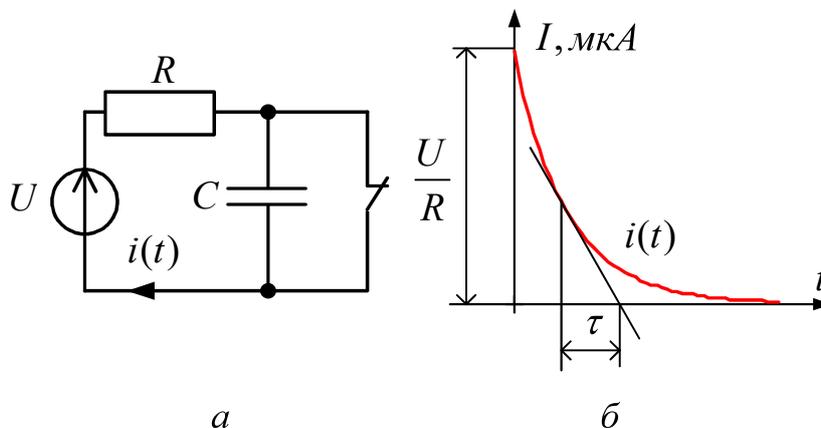


Рис. 11.1.

Аналогичным образом могут быть получены выражения для тока и напряжения при разряде конденсатора на сопротивление R :

$$i(t) = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}; \quad u_C(t) = U e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (11.2)$$

Схема электрической цепи

Для исследования процессов заряда и разряда конденсатора используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 11.2. Питание цепи осуществляется от источника постоянного напряжения, величина которого U , а также значения R и C выбираются в соответствии с вариантом из табл. 11.1. Время срабатывания ключей должно быть больше длительности переходного процесса ($5\tau = 5 \cdot RC$).

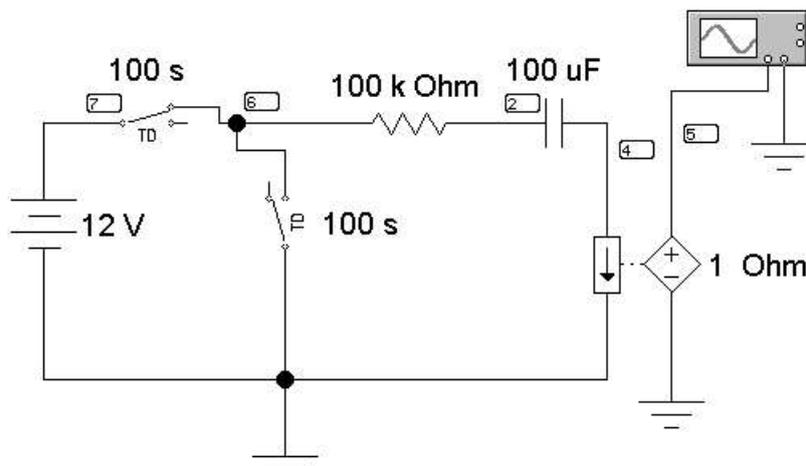


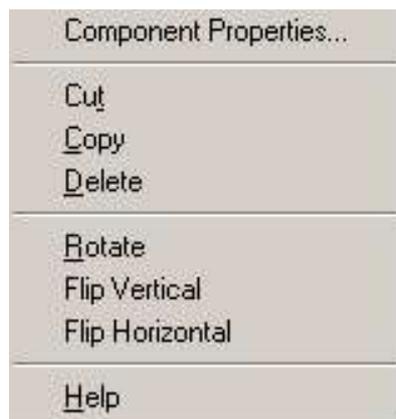
Рис. 11.2.

Таблица 11.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U	В	10	11	12	13	14	3	4	4	5	6
R	кОм	100	122	133	147	200	22	22	33	33	47
C	мкФ	100	100	100	100	100	470	470	470	470	470

Исследование переходных процессов в среде *Electronics Workbench*

Процесс создания схемы начинается с выбора элементов и приборов из библиотек программы (перетаскиванием мышью необходимых элементов на рабочий стол), расположение компонентов схемы в соответствии подготовленным эскизом. При размещении компонентов на рабочем поле можно воспользоваться динамическим меню, всплывающим после щелчка правой кнопки мыши по компоненту, с помощью которого можно копировать (*Copy*), удалять (*Delete*), вырезать (*Cut*), вставлять (*Paste*) и поворачивать элемент (*Rotate*) и менять его параметры (*Component Properties*), отобразить по вертикали или по горизонтали (*Flip Vertical, Flip Horizontal*).



После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. Курсор мыши подводится к выводу компонента, и после появления жирной черной точки (узла) нажимается левая кнопка мыши и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такой же жирной точки, после чего левая кнопка мыши опускается и соединение готово. Подключение измерительных приборов выполняется аналогично подключению компонентов схемы. При этом можно использовать цветные проводники, которые выделяют подключенный прибор и окрашивают в соответствующий цвет выводимые графики. Для изменения цвета проводника нужно два раза щелкнуть левой кнопкой мыши на изображение и в открывшемся окне выбрать нужный цвет. Для начала анализа схемы системой необходимо активизировать схему нажатием кнопки 6, для остановки анализа – кнопку 7. Чтобы сохранить рабочий лист (документ) под нужным названием, необходимо щелкнуть мышью по третьей кнопке в третьей строке сверху – пиктограмме с изображением дискеты. Появится диалоговое окно *Save as* (Сохранение). В текстовом поле *File name* (Имя файла) нужно дать имя файлу (документу). Система автоматически добавит расширение *.ewb*.

Итак, перед нами готовая схема (рис. 11.3).

Если переходный процесс возникает в результате включения схемы, как в данном случае, то никаких коммутаторов не требуется.

Сначала необходимо установить нумерацию контрольных точек в схеме. Для этого необходимо раскрыть диалоговое окно *Show Hide* (по пути *Circuit > Schematic Options > Show/Hide*). Окно показано на рис. 11.4. В окошке *Show nodes* курсором мыши необходимо сделать отметку. Щелкнуть кнопку *OK*, после чего появится нумерация точек соединения элементов.

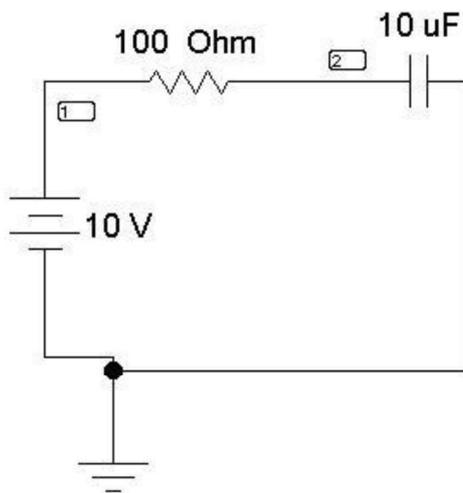


Рис. 11.3

Наиболее быстрый способ пронумеровать узлы – кликнуть правой клавишей мыши на свободном участке рабочего поля, в выпавшем меню выбрать пункт *Schematic Options*, что приведёт к открытию окна показанного на рис. 11.4. Необходимо поставить маркер рядом с пунктом *Show nodes* и нажать ОК.

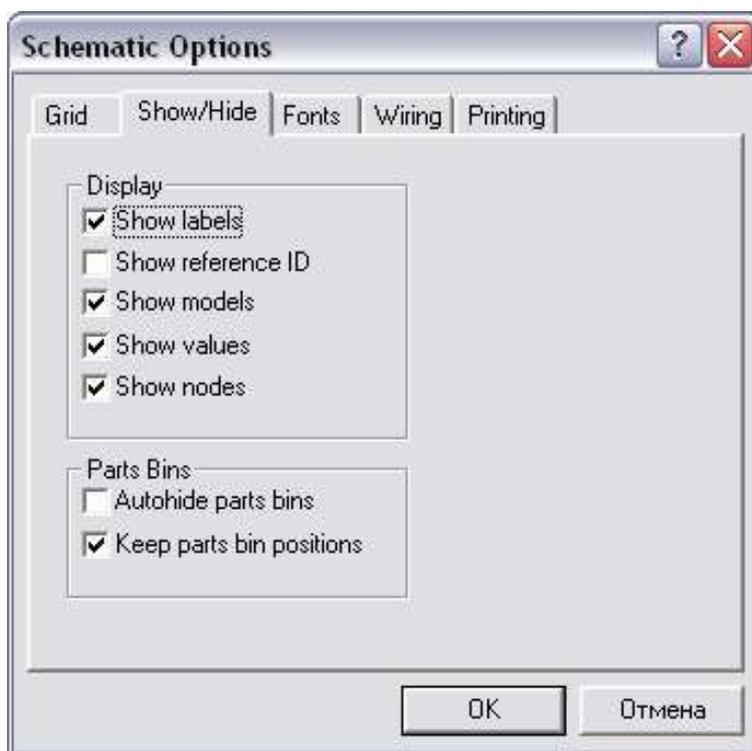


Рис. 11.4

Следующий необходимый шаг для проведения расчёта переходного режимов – это открытие диалогового окна команды *Transient Analysis* (рис. 11.5) по пути *Analysis < Transient*.

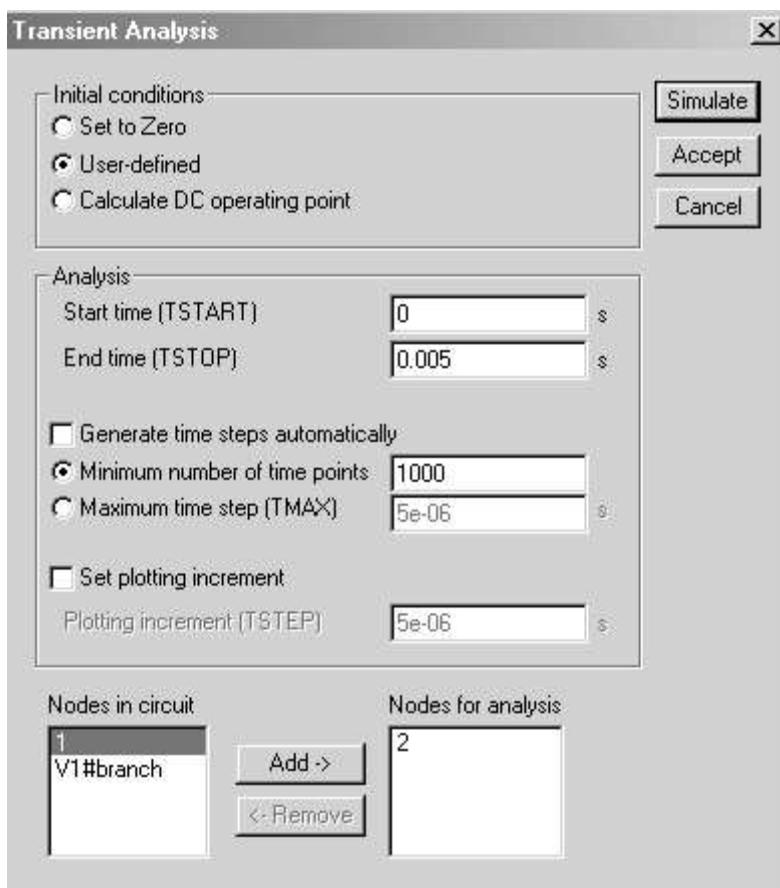


Рис. 11.5

Диалоговое окно команды содержит следующие данные:

- *Initial conditions* – установка начальных условий моделирования (*Set to Zero* – установка в нулевое исходное состояние контрольно-измерительных приборов перед началом моделирования, *User-defined* – управление процессом моделирования проводится пользователем, *Calculate DC operating point* – выполнение расчета режима по постоянному току).
- *Analysis* – параметры анализа (*TSTART* – время начала анализа переходных процессов; *TSTOP* – время окончания анализа; *Generate time steps automatically* – расчет переходных процессов с переменным шагом, выбираемым автоматически в соответствии с допустимой относительной ошибкой *RELTOL*, задаваемой в окне *Analysis Options*);
- *Nodes in circuit* – список всех узлов цепи;

- *Nodes for analysis* – номера узлов, для которых рассчитывается переходные процессы, перечень таких узлов устанавливается нажатием кнопок *Add* >(добавить) и *Rename* (удалить), предварительно выделив курсором выбранный узел.

Для анализа переходного процесса:

Прежде всего, должен быть отмечен пункт *User-defined* в разделе *Initial conditions*. В полях *Start time* и *End time* задаём необходимое нам время начала и конца анализа переходного процесса в *секундах*. (Для данной схемы – начало переходного процесса – 0; Время окончания переходного процесса – $5\tau = 5 \cdot RC$). Далее указать анализируемые узлы (потенциал узла 2 на схеме рис. 11.3 определяет напряжение конденсатора $U_C = \varphi_2 - 0$, т.к. потенциал заземленной точки схемы равен нулю).

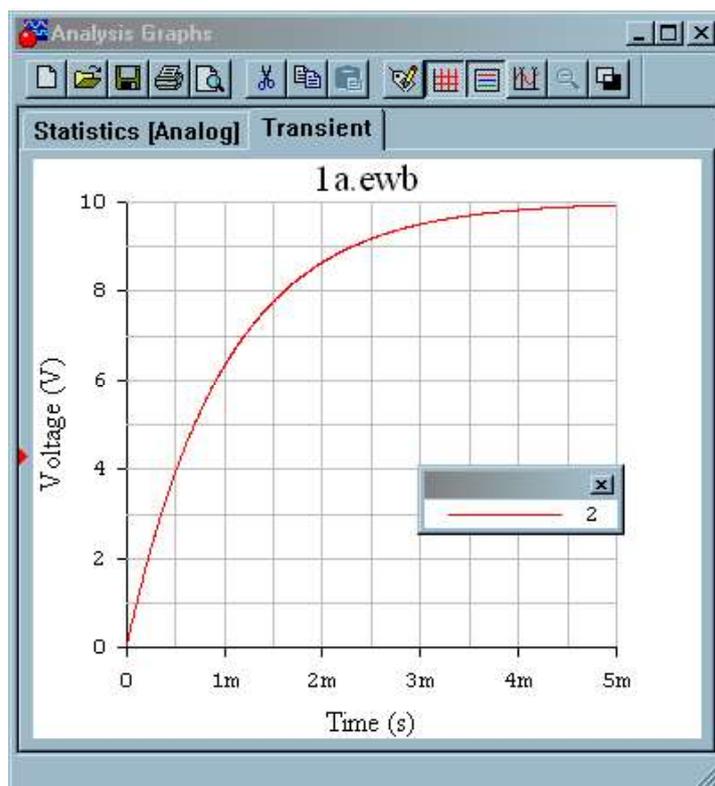


Рис. 11.6

Так же есть возможность определить количество рассчитываемых точек – можно задать минимальное значение количества расчётных точек или же определить максимальный шаг времени до следующей расчётной точки, пункты *Minimum number of time points* и *Maximum time step (TMAX)* соответственно. По умолчанию выбор количества точек происходит автоматически.

Анализ переходных процессов инициализируется нажатием кнопки *Simulate*, после чего на экране появляются осциллограммы переходных

процессов в уменьшенном масштабе. Увеличенное изображение графиков можно получить, нажав кнопку увеличения размера изображения.

Для удобства обработки результатов переходных процессов в верхней части окна имеется ряд функциональных кнопок. Укажем на важнейшие из них.

Кнопка 1 раскрывает диалоговое окно (рис. 11.7), позволяющее при закладке *General* установить ряд опций:

- *Font* – выбрать шрифт надписей;
- *Grid* – ширину сетки экрана и ее цвет;
- *Grid on; Cursors on* – удаление сетки и визиров с экрана;
- *Single Trace* – выбор для анализа отдельного графика, при этом номер графика выбирается установкой его номера в окошке *Trace*;
- *All Traces* – одновременный анализ всех графиков.

Кнопка 2 устанавливает и удаляет сетку экрана.

Кнопка 3 выводит информационное окно с номерами узлов и цветом соответствующих графиков (верхний правый угол экрана). Курсором мыши это окно можно переместить в любое место экрана.

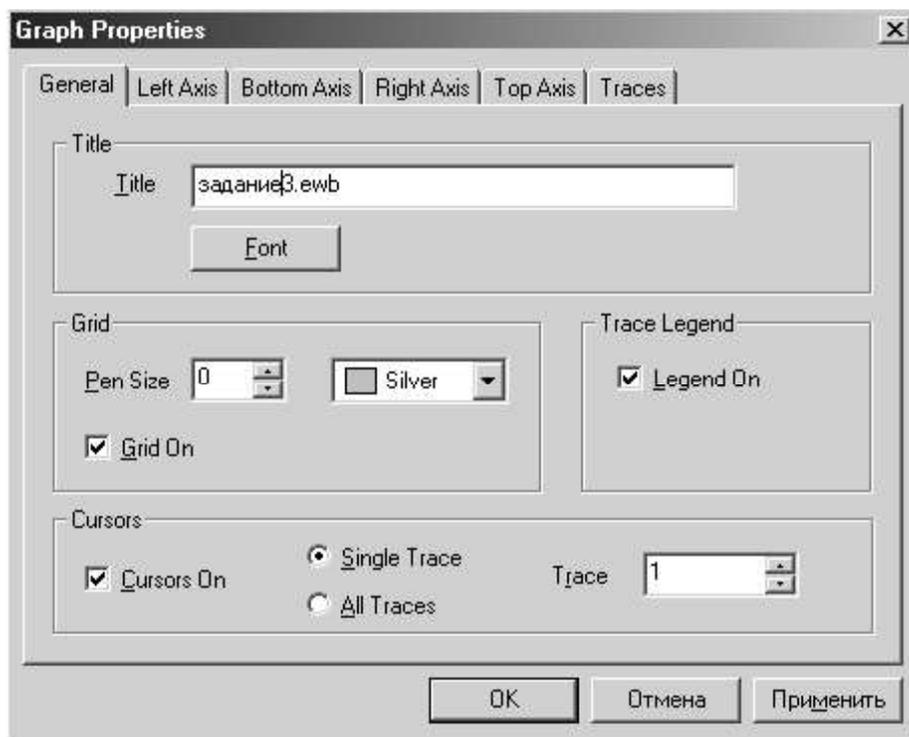


Рис. 11.7

Кнопка 4 выводит на экран два измерительных визира (рис. 11.9). За верхние треугольники визеры можно перемещать курсором мыши в любое место графиков и измерять значение координат графика.

Кнопка 5 изменяет цвет фона экрана.

На экран (правый верхний угол) выводится также цифровая информация о точках графика, на которые установлены визиры. Информация помещается в отдельном окне, содержание которого изменится в зависимости от положения визиров.

Обозначения переменных величин информационного окна следующие:

- x_1, y_1 – координаты точки графика для первого визира;
- x_2, y_2 – координаты точки графика для второго визира;
- $\min x, \max x$; $\min y, \max y$ – минимальные и максимальные значения координат графика на интервале времени переходного процесса.

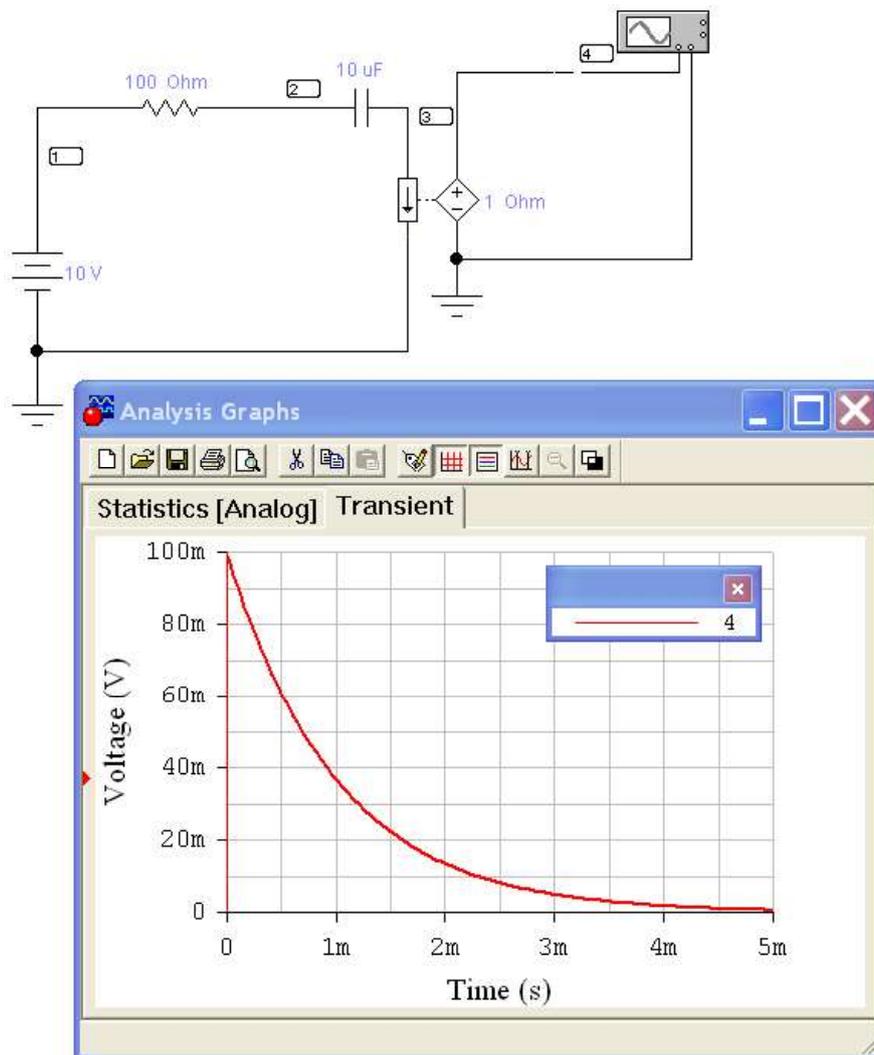


Рис. 11.8

Для получения осциллограмм тока (в данном случае $i(t)$) ввести последовательно в цепь источник напряжения, управляемый током, напряжение на котором пропорционально проходящему по нему току

(*Current-Controlled Voltage Source*). Выставить переходное сопротивление (*Transresistance*) источника, которое является коэффициентом между входным током и выходным напряжением данного источника. Получим схему, представленную на рис. 11.8, и соответствующую осциллограмму тока.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на вопросы и выполнить задания.

1. В чем причина возникновения переходных процессов?
2. Сформулировать законы коммутации.
3. Как определить независимые и зависимые начальные условия, принужденные величины?
4. Как определить постоянные интегрирования в классическом методе расчета переходных процессов?
5. Что такое постоянная времени в цепи первого порядка и как ее определить графически по экспериментальным кривым тока (напряжения)?
6. Чему равна постоянная времени в исследуемой цепи R, C ? A в цепи R, L ?
7. Вывести формулы (11.2) для расчета тока и напряжения при разряде конденсатора.
8. Как рассчитать сопротивление R в цепи рис. 11.2 по результатам измерений в начальный момент времени напряжения при разряде и тока при заряде конденсатора?

Программа работы

1. Собрать цепь по схеме рис. 11.2.
2. Определить временные зависимости напряжения на конденсаторе (узел 2) и тока (точка 5) в цепи в переходных режимах зарядки и разрядки конденсатора, используя диалоговое окно команды *Transient Analysis* (рис. 11.5) по пути *Analysis < Transient*. Результаты измерений внести в табл. 11.2., используя визир (рис. 11.9, пиктограмма ).

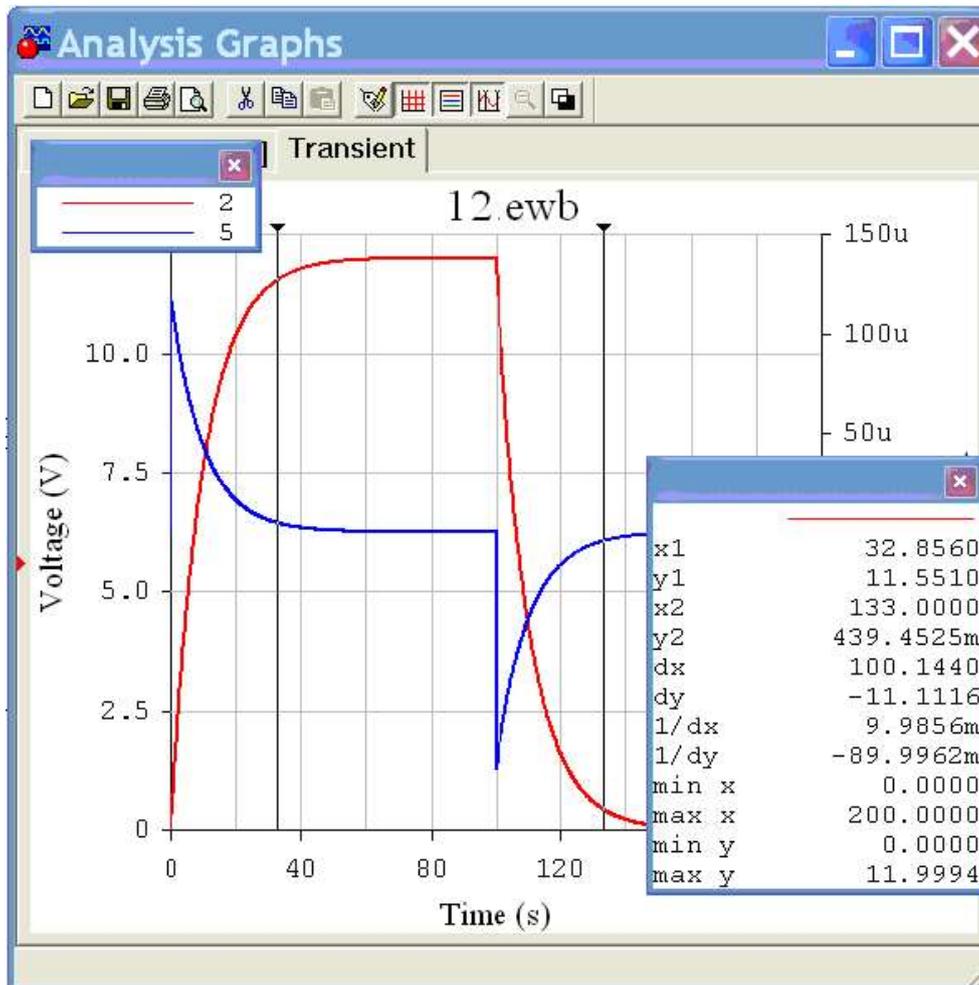


Рис. 11.9.

3. Перенести кривые $i(t)$ и $u_C(t)$ в отчёт. Графически определить постоянную времени τ для каждой кривой.

4. Вычислить постоянную времени $\tau = RC$ и сравнить полученное значение со средним значением τ в п.3.

5. Аналитически рассчитать зависимости $i(t)$ и $u_C(t)$ по формулам (11.1) и (11.2).

Указание. Целесообразно числовые значения тока и напряжения найти в моменты времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau$. Результаты расчета внести в табл. 11.2.

6. Построить расчетные кривые $i(t)$ и $u_C(t)$ в тех же осях, что и кривые п.3.

7. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы по работе.

Таблица 11.2

Результаты расчета $\tau = \dots c$					
Заряд			Разряд		
t	i	u_c	t	i	u_c
c	мкА	В	c	мкА	В
0					
τ					
2τ					
3τ					
4τ					

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема электрической цепи.
3. Ответы на вопросы подготовки к работе.
4. Экспериментальные кривые $i(t)$ и $u_c(t)$ и расчётные кривые, построенные в одних осях, с графическим определением постоянной времени. Пример расчёта одной точки для каждой кривой $i(t)$ и $u_c(t)$ заряда и разряда конденсатора.
5. Выводы.

Рекомендуемая литература: [2, с. 5–10], [4, с. 282–298], [6, с. 231–246], [7, с. 234–249]