

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИИ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН**

**НУКУССКИЙ ФИЛИАЛ ТАШКЕНТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



*Факультет: Компьютер инжиниринг*

# ***Курсовая работа***

*По предмету: Теория электрической цепи*

*На тему: Операторный метод расчета переходных процессов*

*Выполнил:*

*Базарбаев К.*

*Приняла:*

*Алламуратова З.*

*НУКУС 2014*

## **Содержание:**

**Введение**

**Основная часть:**

### **1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

**1.1 Общие сведения**

**1.2 Расчет переходного процесса операторным методом**

### **2. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

**2.1 Определение начальных и конечных условий в цепях с ненулевыми начальными условиями**

**2.1.1 Расчёт начальных условий ПП при  $t = 0 -$**

**2.1.2 Расчёт начальных условий ПП при  $t = 0 +$**

**2.1.3 Расчёт конечных условий  $t = \infty$**

**2.2 Определение переходных процессов классическим методом**

**2.3 Построение графиков**

**2.4 Расчет графиков переходного процесса**

**2.5 Обобщенные характеристики цепи**

**Заключение**

**Список использованных источников**

## *Введение*

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.

При переходных процессах могут возникать большие перенапряжения, сверхтоки, электромагнитные колебания, которые могут нарушить работу устройства вплоть до выхода его из строя. С другой стороны, переходные процессы находят полезное практическое применение, например, в различного рода электронных генераторах. Все это обуславливает необходимость изучения методов анализа нестационарных режимов работы цепи

Нестационарные явления играют важную роль в работе многих устройств, применяемых в современной радиотехнике и электронике. Инженеру по направлению «Телекоммуникация» в своей повседневной деятельности приходится постоянно соприкасаться с переходными процессами и прохождением сигналов через линейные электрические цепи. Данная курсовая работа посвящена изучению переходных процессов.

Основной целью работы является приобретение навыков использования теоретических знаний на практике, при расчете переходных процессов, происходящих в линейных электрических цепях.

# ***1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ***

## ***1.1 Общие сведения***

Переходные процессы возникают в электрических цепях при различных воздействиях, приводящих к изменению их режима работы, т.е. при действии различного рода коммутационной аппаратуры, например ключей, переключателей для включения или отключения источника или приёмника энергии, при обрывах цепи, при коротких замыканиях отдельных участков цепи и т.д.

Физической причиной возникновения переходных процессов в цепях является наличие в них катушек индуктивности и конденсаторов, т.е. индуктивных и емкостных элементов в соответствующих схемах замещения. Объясняется это тем, что энергия магнитного и электрического полей этих элементов не может измениться скачком при коммутации в цепи.

Переходный процесс в цепи описывается дифференциальным уравнением - неоднородным или однородным, если её схема замещения содержит или не содержит источники ЭДС и тока. Переходный процесс в линейной цепи описывается линейными дифференциальными уравнениями, а в нелинейной – нелинейными.

Для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами разработаны различные аналитические методы: классический, оперативный, метод интеграла Фурье и другие, которые применяются и для расчета переходных процессов. Наиболее распространенными являются классический и оперативный методы. Первый обладает физической наглядностью и удобен для расчёта простых цепей, а второй упрощает расчёт сложных цепей.

## 1.2 Расчет переходного процесса операторным методом

Суть операторного метода заключается в том, что каждому числу из области функций действительной переменной  $t$  ставится во взаимно-однозначное соответствие с помощью операторного отображения по Лапласу некоторое число в области функций комплексной переменной частоты  $\omega$ . В дифференциальное уравнение или интегро-дифференциальное уравнения функции времени заменяется алгебраическим уравнением в функции частоты.

Операции в области отображений осуществляются с помощью простых алгебраических преобразований, а полученные результаты и помощью отображения Лапласа переводятся в область функций времени.

Отображением по Лапласу называется функция, которая получается в результате следующего интегрирования:

$$F(p) \rightarrow \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt$$

где

$$p = \alpha \pm j\omega (\alpha > 0)$$

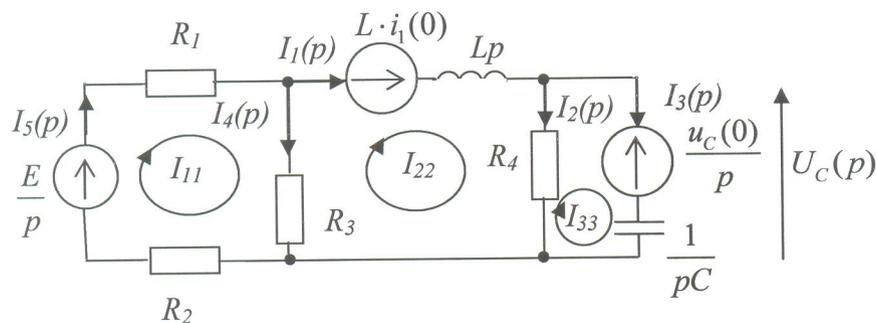
Операторная схема замещения индуктивности содержит операторное сопротивление  $pL$  и источник ЭДС  $L \cdot i(0)$ . Направление источника совпадает с направлением тока в цепи.

Операторная схема замещения емкости содержит операторное сопротивление

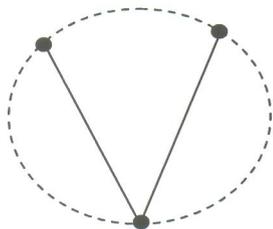
$\frac{1}{pC}$  и источник ЭДС  $\frac{u_C(0)}{p}$ , напряжение которого противоположно исходному напряжению на емкости.

Все источники заменяются своими операторными отображениями.

Сделав все необходимые преобразования, получаем



Дерево графа цепи:



Составим систему из трех уравнений по методу контурных токов:

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_2 + R_3) - I_{22}R_3 = \frac{E}{p} \\ -I_{11}R_3 + I_{22}(R_3 + Lp + R_4) - I_{33}R_4 = L \cdot i(0) \\ -I_{22}R_4 + I_{33}\left(R_4 + \frac{1}{pC}\right) = -\frac{u_C(0)}{p} \end{cases}$$

Решим эту систему:

$$\begin{cases} 200I_{11} - 100I_{22} = \frac{120}{p} \\ -100I_{11} + I_{22}(200 + 10^{-2}p) - 100I_{33} = 6 \cdot 10^{-3} \\ -100I_{22} + I_{33}(100 + \frac{10^5}{p}) = -\frac{60}{p} \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} I_{22} = 2I_{11} - \frac{1.2}{p} \\ I_{33}(100 + \frac{10^5}{p}) - 200I_{11} + \frac{120}{p} = -\frac{60}{p} \\ -100I_{11} + 400I_{11} + 2 \cdot 10^{-2}I_{11}p - \frac{240}{p} - 1.2 \cdot 10^{-2} - 100I_{33} = 6 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

↓

$$\begin{aligned} \frac{I_{33}(100 + \frac{10^5}{p})(300 + 2 \cdot 10^{-2}p) + \frac{180}{p}(300 + 2 \cdot 10^{-2}p) - 3.6 + \frac{48 \cdot 10^3}{p} + 2 \cdot 10^{-2}I_{33}}{300 + 2 \cdot 10^{-2}p} &= \frac{3.6 + \frac{48 \cdot 10^3}{p} + 2 \cdot 10^{-2}I_{33}}{300 + 2 \cdot 10^{-2}p} \\ I_{33} &= \frac{-\frac{54 \cdot 10^3}{p} - 3.6 + 3.6 + \frac{48 \cdot 10^3}{p}}{3 \cdot 10^4 + 2p + \frac{3 \cdot 10^7}{p} + 2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4} = \frac{-6 \cdot 10^3}{p(2p + 12000 + \frac{3 \cdot 10^7}{p})} \\ &= \frac{-6 \cdot 10^3}{2p^2 + 12000p + 3 \cdot 10^7} \end{aligned}$$

Так как

$$U_C(p) = \frac{u_C(0)}{p} + \frac{I_3(p)}{pC}$$

$$I_3(p) = I_{33}$$

Тогда

$$U_C(p) = \frac{60}{p} - \frac{6 \cdot 10^8}{p(2p^2 + 12000p + 3 \cdot 10^7)}$$

Теперь необходимо найти оригинал данного отображения. Из таблиц

преобразования по Лапласу известно, что  $\frac{60}{p} \rightarrow 60$  ([2] стр. 255), поэтому главная сложность заключается в нахождении оригинала второго слагаемого.

$$2p^2 + 12000p + 3 \cdot 10^7 = 0$$

$$p_{1,2} = \frac{-12 \cdot 10^3 \pm \sqrt{144 \cdot 10^6 - 4 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^7}}{4} = -3000 \pm j2449.49$$

$$\Rightarrow U_C(p) = \frac{60}{p} - \frac{6 \cdot 10^8}{p(p-p_1)(p-p_2)} = \frac{60}{p} - \frac{F_1(p)}{p \cdot F_3(p)}$$

Чтобы найти оригинал второго слагаемого, воспользуемся теоремой разложения Хевисайда: если изображение имеет вид рациональной дроби, то оригинал определяется в зависимости от корней знаменателя. Так как в данном случае два корня комплексные сопряженные, а третий равен 0, то

$$\frac{60}{p} - \frac{F_1(p)}{p \cdot F_3(p)} \rightarrow 60 - \frac{F_1(0)}{F_3(0)} - \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} - \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t}$$

$$F_3'(p) = 4p + 10 \cdot 10^3$$

$$\frac{F_1(0)}{F_3(0)} = \frac{6 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^7} = 20$$

$$\begin{aligned}
\frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} e^{p_1 t} &= \frac{6 \cdot 10^8 e^{(-3000 + j2449.49)t}}{(-3000 + j2449.49) \cdot j9797.96} = \\
&= \frac{6 \cdot 10^8 e^{-3000t} (\cos(2449.49t) + j \sin(2449.49t))}{-24 \cdot 10^6 - j29.39 \cdot 10^6} = \\
&= \frac{6 \cdot 10^8}{1.439 \cdot 10^{15}} e^{-3000t} (-24 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - 29.39 \cdot 10^6 \sin(2449.49t) + \\
&+ j(29.39 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - 24 \cdot 10^6 \sin(2449.49t))) \\
\frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} &= \frac{6 \cdot 10^8 e^{(-3000 - j2449.49)t}}{(-3000 - j2449.49) \cdot (-j9797.96)} = \\
&= \frac{6 \cdot 10^8 e^{-3000t} (\cos(2449.49t) - j \sin(2449.49t))}{-24 \cdot 10^6 + j29.39 \cdot 10^6} = \\
&= 0.417 e^{-3000t} (-24 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - 29.39 \cdot 10^6 \sin(2449.49t) + \\
&+ j(-29.39 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) + 24 \cdot 10^6 \sin(2449.49t))) \\
\Rightarrow u_C(t) &= 60 - 20 - 0.417 e^{-3000t} (-24 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - 29.39 \cdot 10^6 \sin(2449.49t) - \\
&- 24 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - 29.39 \cdot 10^6 \sin(2449.49t) + j(29.39 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) - \\
&- 24 \cdot 10^6 \sin(2449.49t) - 29.39 \cdot 10^6 \cos(2449.49t) + 24 \cdot 10^6 \sin(2449.49t))) = \\
&= 40 + 0.417 e^{-3000t} (48 \cos(2449.49t) + 58.72 \sin(2449.49t)) = \\
&= 40 + 31.626 e^{-3000t} \sin(2449.49t + 50.73^\circ)
\end{aligned}$$

В результате получаем формулу для переходного напряжения на конденсаторе:

$$u_C(t) = 40 + 31.626 e^{-3000t} \sin(2449.49t + 50.73^\circ)$$

## 2. РАССЧЁТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

### 2.1 Определение начальных и конечных условий в цепях с нулевыми начальными условиями

В приведенной схеме (рисунок 2.1) определить начальные и конечные условия для всех токов и напряжений в цепи с нулевыми начальными условиями. Результаты вычислений внести в таблицу.

Данные для расчета приведены в таблице 2.1:

Таблица 2.1

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$C$ , Ф	$C_1$ , Ф	$L$ , Гн	$L_1$ , Гн	$E$ , В
4	12	1/12	-	6/5	-	8

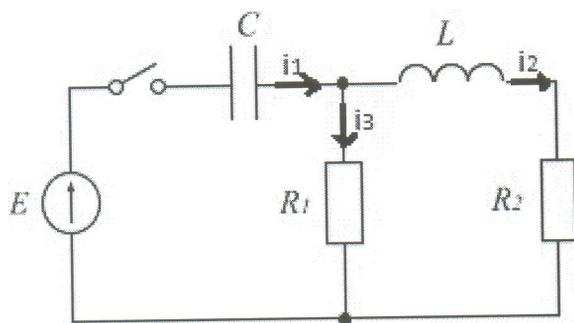


Рис. 2.1 Схема индивидуального варианта.

Решение.

#### 2.1.1 Начальные условия $t = (0-)$

Переходной процесс в схеме начинается в момент включения ключа К. До этого момента времени все токи и напряжения равны нулю.

### 2.1.2 Расчёт начальных условий $t = (0+)$ .

Изобразим эквивалентную схему цепи для времени  $t = (0+)$ . Так как это цепь с нулевыми начальными условиями, то индуктивность  $i_L$  заменим разрывом, а емкость – перемычкой (рисунок 2.2).

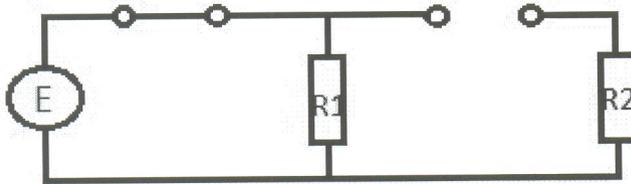


Рис. 2.2 Эквивалентная схема цепи для времени  $t = 0+$ .

В этой схеме

$$i_L(0+) = i_2(0+) = 0; u_C(0+) = 0.$$

Тогда по закону Ома:

$$i_1(0+) = i_3(0+) = \frac{E}{R_1} = \frac{8}{4} = 2A.$$

Напряжения на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$  :

$$u_{R_1}(0+) = i_1(0+)R_1 = 2 \cdot 4 = 8B,$$

$$u_{R_2}(0+) = 0.$$

Тогда напряжение на индуктивности:

$$u_L(0+) = u_{R_1}(0+) = 8B.$$

Контроль вычислений.

Формулы для контроля вычислений:

$$i_1 = i_2 + i_3; E = u_{R1} + u_{R2}; u_{R2} = u_L + u_C .$$

Тогда:

$i_1(0+) = i_2(0+) + i_3(0+) = 0 + 2 = 2A$	1-ый закон Кирхгофа выполняется
$E = u_C(0+) + u_{R1}(0+) = 0 + 8 = 8B$ $u_{R1}(0+) = u_L(0+) + u_{R2}(0+) = 8 + 0 = 8B$	2-ой закон Кирхгофа для 1-го и 2-го контуров выполняется.

### 2.1.3 Расчёт конечных условий $t = \infty$

После окончания переходного процесса все токи и напряжения в схеме (рисунок 2.1) будут постоянными. Тогда ёмкость  $C$  в эквивалентной схеме заменяется разрывом, а индуктивность  $L$  перемычкой (рисунок 2.3).

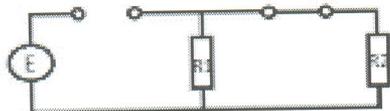


Рис. 2.3 Эквивалентная схема цепи для времени  $t = \infty$ .

$$i_1(\infty) = i_2(\infty) = i_3(\infty) = 0;$$

$$U_{R1}(\infty) = U_{R2}(\infty) = U_L(\infty) = 0;$$

$$U_C(\infty) = 8B;$$

Контроль вычислений.

$i_1(\infty) = i_2(\infty) + i_3(\infty) = 0 + 0 = 0A$	1-ый закон Кирхгофа выполняется
--	---------------------------------

$$\left. \begin{aligned} E = U_C(\infty) + u_{R1}(\infty) &= 8 + 0 = 8B \\ u_C(\infty) = u_{R2}(\infty) + u_L(\infty) &= 4 + 0 = 4B \end{aligned} \right\}$$

2-ой закон Кирхгофа для 1-го и 2-го контуров выполняется.

Таблица 2.2 Результаты вычислений

t	0-	0+	$\infty$
$i_1, A$	0	2	0
$i_2, A$	0	0	0
$i_3, A$	0	2	0
$u_L, B$	0	8	0
$u_C, B$	0	0	8
$u_{R1}, B$	0	8	0
$u_{R2}, B$	0	0	0

С учетом НУ и КУ можно качественно построить графики (рисунок 2.4).

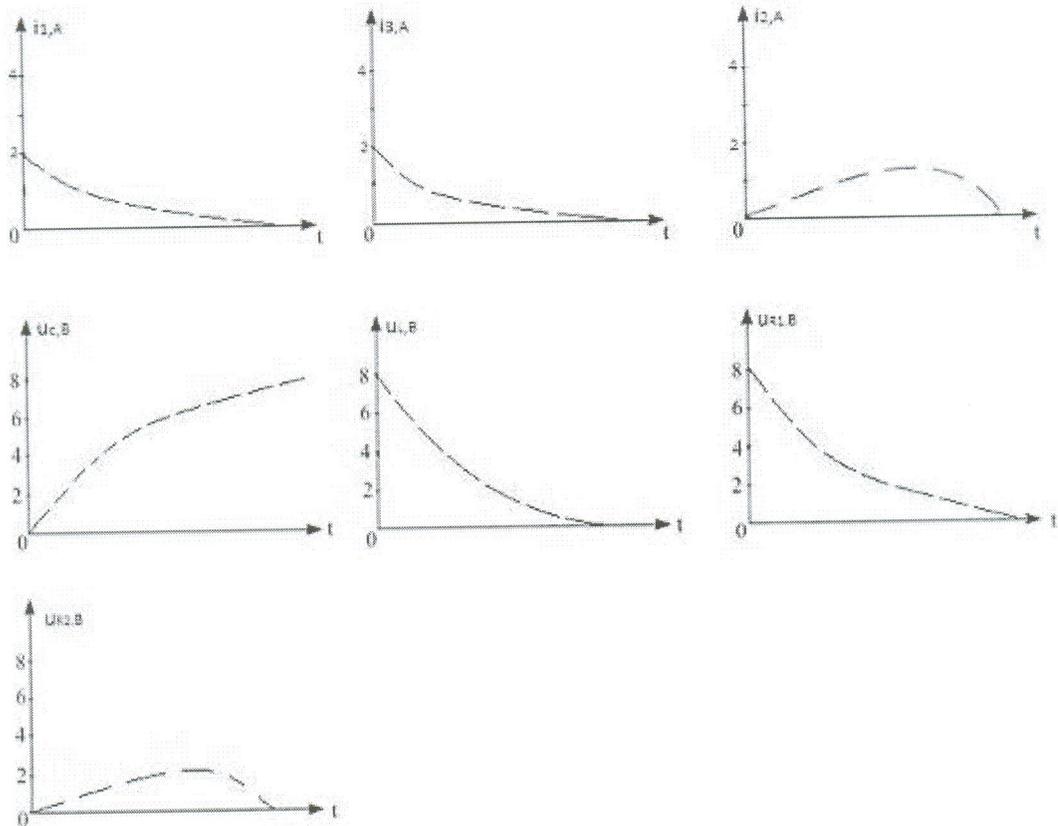


Рис. 2.4 Качественные графики.

## 2.2 Определение переходных процессов классическим методом

В приведенной схеме (рисунок 2.1) определить классическим методом напряжения и токи переходного процесса. Построить графики переходных процессов.

### 2.2.1 Решение дифференциального уравнения для тока на емкости $u_L$

$$i_L(t) = I_{Lnp} + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t}$$

Принужденная составляющая тока на индуктивности  $i_{Lnp} = i_L(\infty) = 0$ , поэтому

$$i_L(t) = A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t}$$

### 2.2.2 Определение корней $P_1$ и $P_2$

Для определения корней характеристического уравнения  $P_1$  и  $P_2$  составляется эквивалентная операторная схема цепи (рисунок 2.5), далее находится операторное входное сопротивление и приравнивается к нулю ( $Z_{вх}(P) = 0$ ).

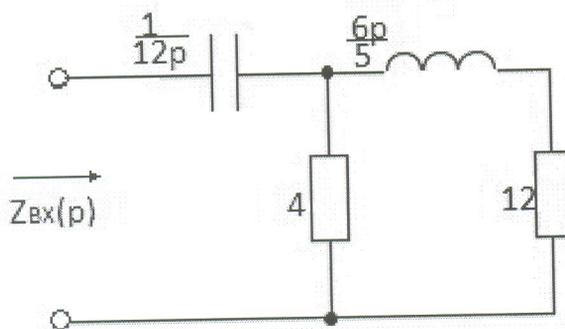


Рисунок 2.5 Эквивалентная операторная схема цепи.

Операторное сопротивление емкости  $Z_C(P) = \frac{1}{pC}$ , а индуктивности

$Z_L(P) = pL$ , тогда

$$Z_{\text{эк}}(p) = \frac{1}{pC} + \frac{R_1(R_2 + pL)}{R_1 + R_2 + pL} = \frac{R_1 + R_2 + pL + R_1R_2pC + R_1p^2LC}{pC(R_1 + R_2 + pL)}$$

Условие  $Z_{\text{эк}}(P) = 0$  выполняется, если числитель равен нулю:

$$R_1 + R_2 + pL + R_1R_2pC + R_1p^2LC = 0$$

$$2p^2 + 26p + 80 = 0$$

корни этого уравнения:

$$p_1 = -5; p_2 = -8$$

Подставим значения  $P_1$  и  $P_2$  в уравнение для  $i_L(t)$ :

$$i_L(t) = A_1e^{-5t} + A_2e^{-8t}$$

### 2.2.3 Определение произвольных постоянных $A_1$ и $A_2$

Используем значение самой функции  $i_L$  и ее производной  $\frac{di_L}{dt}$  при  $t=0$ ,

т.е. учтем начальные условия. Учитывая, что  $i_L(0+) = 0$  :

$$i_L(t)|_{t=0} = i_L(0+) = A_1e^0 + A_2e^0 = 0,$$

откуда получаем первое уравнение для нахождения произвольных постоянных:

$$A_1 + A_2 = 0$$

Для получения второго уравнения найдем (при  $t = 0$ ) значение  $u_L(0)$ :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{6}{5} (-5A_1 e^{-5t} - 6A_2 e^{-8t}),$$

$$u_L(0+) = E = 8B$$

$$-6A_1 e^0 - \frac{48}{5} A_2 e^0 = 8$$

откуда получаем второе уравнение для нахождения произвольных постоянных:

$$-6A_1 - \frac{48}{5} A_2 = 8$$

Совместное решение двух уравнений

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = -4 \\ -A_1 - 3A_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 = -6, \\ A_2 = 2. \end{cases}$$

дает значения произвольных постоянных:

После подстановки произвольных постоянных в выражение для  $u_c(t)$  получаем:

$$i_2 = i_L = 2.22e^{-5t} - 2.22e^{-8t}$$

Контроль вычислений

$$\text{При } t = 0, i_L(0+) = 0$$

$$\text{При } t = \infty, i_L(\infty) = 0$$

Это соответствует данным таблицы 1.

Расчет остальных токов и напряжений:

А) Напряжение

$$u_L : u_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{6}{5} \left( (-5) * 2.22e^{-5t} + 8 * 2.22e^{-8t} \right) = 21.33e^{-8t} - 13.33e^{-5t}.$$

Контроль вычислений:  $u_L(0+) = 8V$ ;  $u_L(\infty) = 0V$ .

Б) Напряжение  $u_{R2}$ :

$$u_{R2} = i_2 * R_2 = 26.64e^{-5t} - 26.64e^{-8t}$$

Контроль вычислений:  $u_{R2}(0+) = 0V$ ;  $u_{R2}(\infty) = 0V$ .

В) Напряжение  $u_{R1}$ :

$$u_{R1} = u_{R2} + u_L = 13.31e^{-5t} - 5.31e^{-8t}.$$

Контроль вычислений:  $u_{R1}(0+) = 8V$ ;  $u_{R1}(\infty) = 0V$ .

Г) Ток  $i_3$ :

$$i_3 = \frac{u_{R1}}{R_1} = 3.33e^{-5t} - 1.33e^{-8t}.$$

Контроль вычислений:  $i_3(0+) = 2A$ ;  $i_3(\infty) = 0A$ .

Д) Ток  $i_1 = i_C$ :

$$i_1 = i_2 + i_3 = 5.55e^{-5t} - 3.55e^{-8t}.$$

Контроль вычислений:  $i_1(0+) = 2A$ ;  $i_1(\infty) = 0A$ .

Е) Напряжение  $u_C$ :

$$u_C = E - u_{R1} = 8 - 13.31e^{-5t} + 5.31e^{-8t}.$$

Контроль вычислений:  $u_C(0+) = 0B$ ;  $u_C(\infty) = 8B$ .

Результаты вычислений:

$$i_1 = 5.55e^{-5t} - 3.55e^{-8t},$$

$$i_2 = i_L = 222e^{-5t} - 222e^{-8t},$$

$$i_3 = 3.33e^{-5t} - 1.33e^{-8t},$$

$$u_{R1} = 13.31e^{-5t} - 5.31e^{-8t},$$

$$u_{R2} = 26.64e^{-5t} - 26.64e^{-8t},$$

$$u_L = 21.33e^{-8t} - 13.33e^{-5t},$$

$$u_C = 8 - 13.31e^{-5t} + 5.31e^{-8t}.$$

### 2.3 Построение графиков

Для построения графиков переходного процесса воспользуемся ЭВМ.

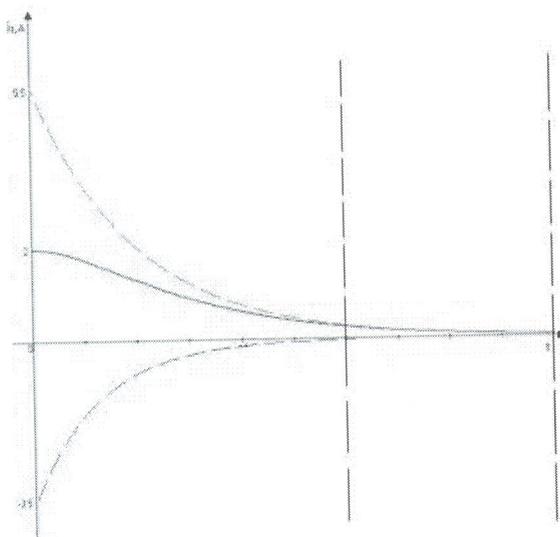


Рис. 2.6 Зависимость тока  $i_1$  от времени.

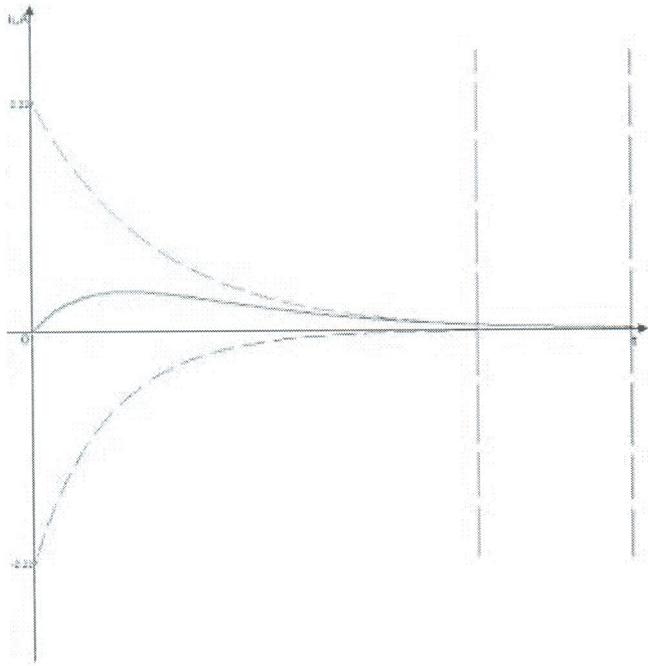


Рис. 2.7 Зависимость тока  $i_L$  от времени.

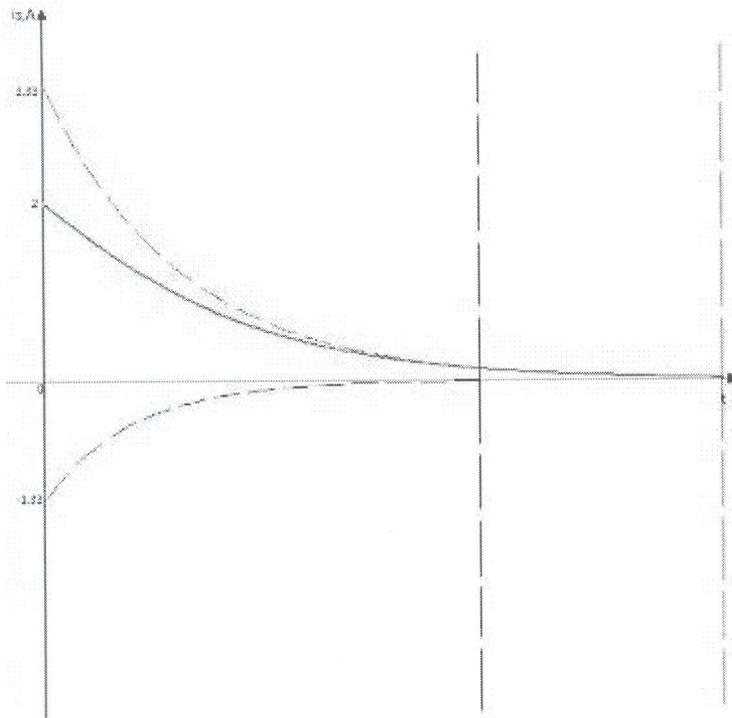


Рис. 2.8 зависимость тока  $i_3$  от времени.

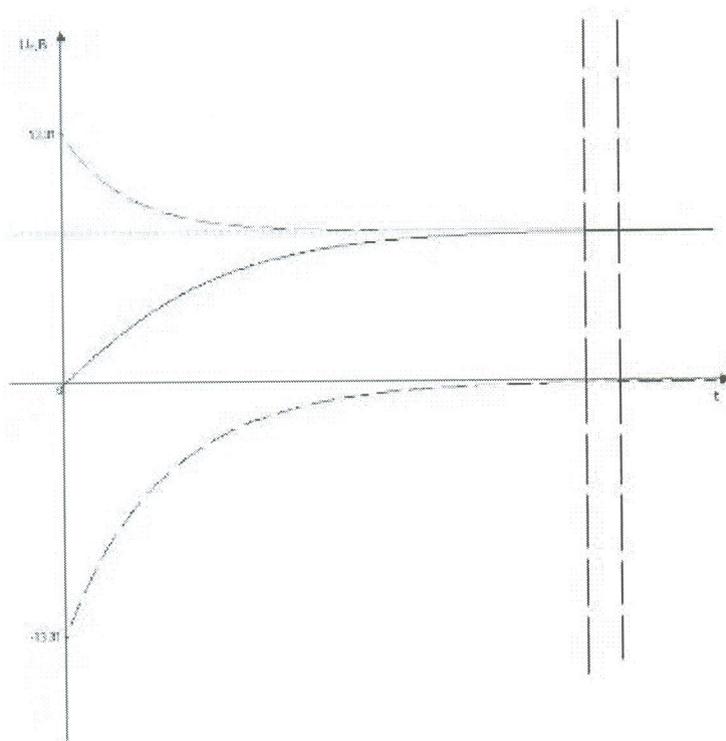


Рис. 2.9 Зависимость напряжения на ёмкости  $U_C$  от времени.

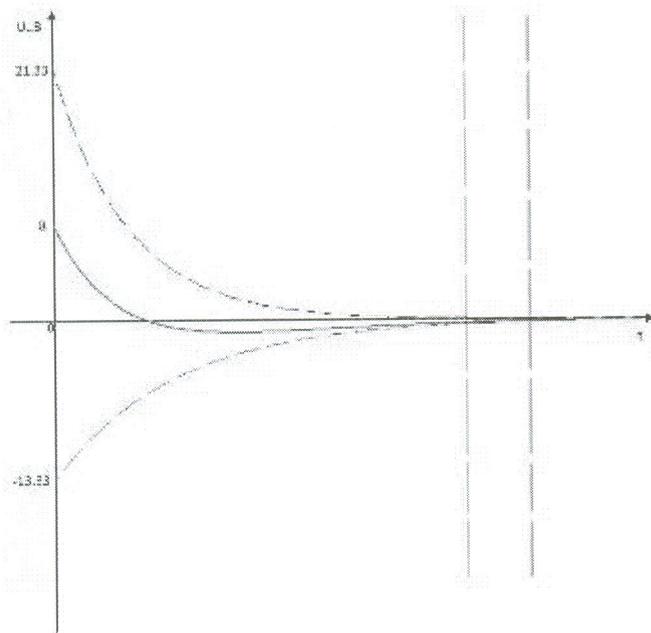
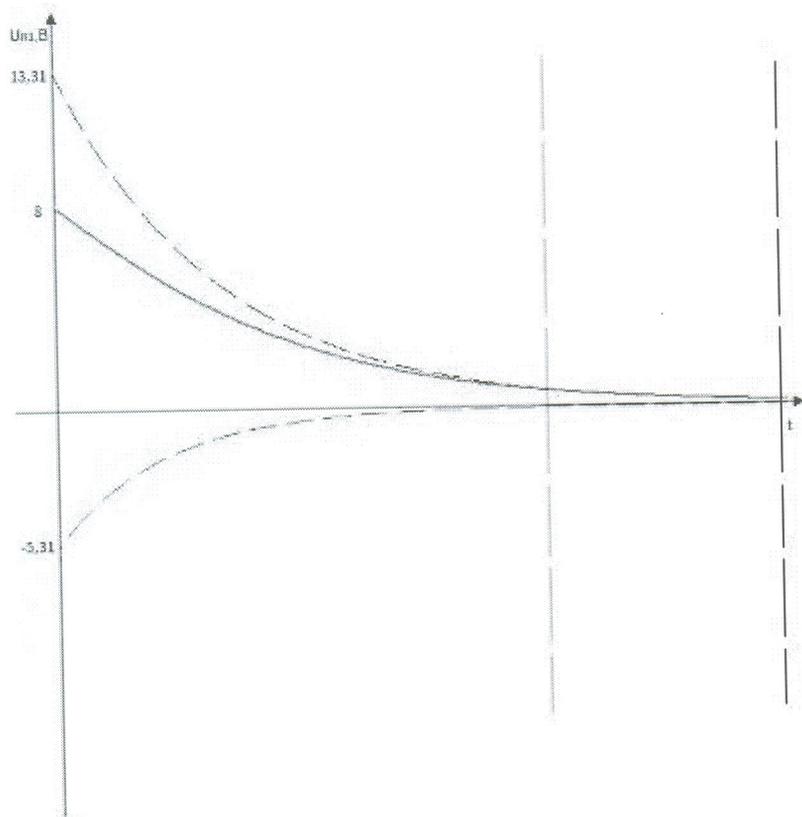
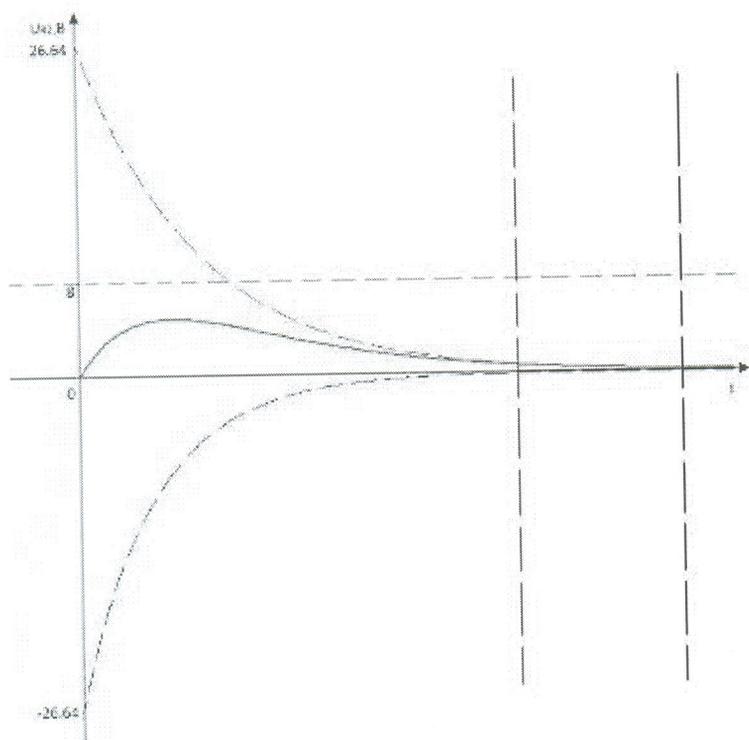


Рис. 2.10 Зависимость напряжения на индуктивности  $U_L$  от времени.



**Рис. 2.11** Зависимость напряжения на резисторе UR1 от времени.



**Рис. 2.12** Зависимость напряжения на резисторе UR2 от времени.

## 2.4 Расчет графиков переходного процесса

### А) Определение экстремумов и точки перегиба $u_L$ .

Наиболее сложную форму имеет график  $u_L$ . Для него необходимо рассчитать экстремум и точку перегиба.

Продифференцируем выражение

$$u_L = 21.33e^{-8t} + 13.33e^{-5t} \text{ В},$$

$$\frac{du_L}{dt} = 66.65e^{-5t} - 170.64e^{-8t}.$$

Найдем значение производной при  $t = 0$ :

$$\left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=0} = -104.$$

Производная для  $t = 0$  меньше нуля, следовательно кривая  $u_L$  в окрестности данной точки убывает.

Приравняем производную  $\frac{du_L}{dt}$  нулю и найдем максимальное значение функции:

$$\frac{170.64e^{-8t}}{66.65e^{-5t}} = 1$$

$$e^{-3t} = 0.391$$

$$t = \frac{\ln 0.391}{-3} = 0.313$$

Максимум напряжения функция принимает при  $t = 0,313 \text{ с}$ .

Найдем точку перегиба кривой  $u_L$ . Для этого определим вторую производную и приравняем ее к нулю:

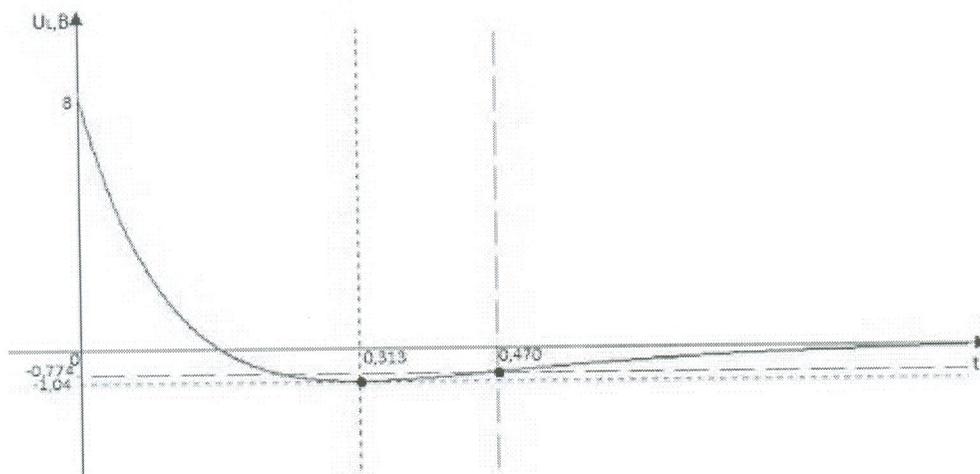
$$\frac{d^2 u_L}{dt^2} = 1365.12e^{-8t} - 333.25e^{-5t} = 0,$$

$$e^{-3t} = 0.244$$

$$t = \frac{\ln 0.244}{-3} = 0.47$$

$$u_L|_{t=0.47} = -0.774$$

График для  $u_L(t)$  приведен ниже.



**Рисунок 2.13** График переходного процесса напряжения на катушке.

Определим и построим (качественно) график переходного процесса для тока через индуктивность:

$$i_L = 2.22e^{-5t} - 2.22e^{-8t} \text{ A}$$

Начальные и конечные значения известны:  $i_L(0+) = 0 \text{ A}$ ,  $i_L(\infty) = 0 \text{ A}$ .

Найдем экстремальное значение  $i_L(t)$ :

$$\frac{di_L}{dt} = 17.76e^{-8t} - 11.1e^{-5t}$$

При  $t = 0$  производная  $\frac{di_L}{dt} = 6.66 > 0$  (имеет положительное значение

), т.е. кривая  $i(t)$  при  $t = 0$  от значения  $i_L(0) = 0 \text{ A}$  пойдет вверх.

Приравняем производную  $\frac{di_L}{dt}$  нулю и найдем максимальное значение функции:

$$17.76e^{-8t} - 11.1e^{-5t} = 0$$

$$e^{-3t} = 0.625$$

$$t = 0,157c$$

Максимум тока  $i_L$  функция принимает при  $t = 0,275c$ .

Определим вторую производную и приравняв ее к нулю найдем точку перегиба тока  $i_L(t)$ :

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} = 55.5e^{-5t} - 142.08e^{-8t},$$

$$e^{-3t} = \frac{1}{2.56}$$

$$t = 0,313c,$$

$$i_L \Big|_{t=0,313} = 0.283A.$$

Максимум напряжения  $u_L$  совпал с точкой перегиба кривой  $i_L$  при  $t = 0.313c$ .

График для  $i_L(t)$  приведен ниже.

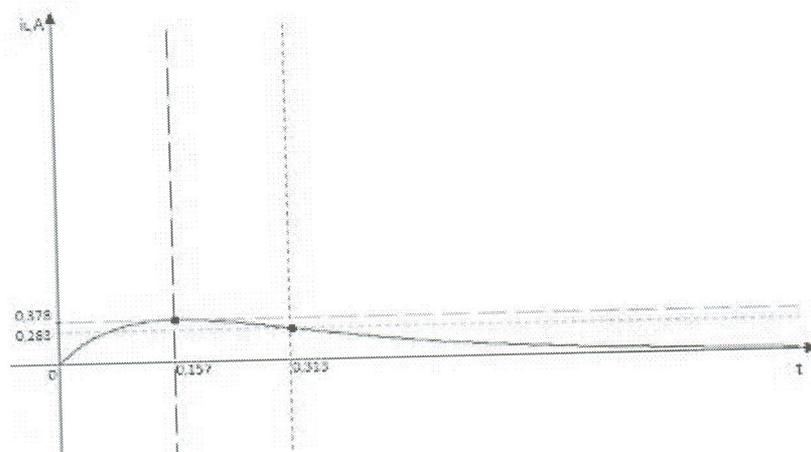


Рисунок 2.14 График переходного процесса тока на индуктивности.

## 2.5 Обобщенные характеристики цепи

Определим обобщенные характеристики цепи:

$$K(p) = \frac{U_{\text{ВЫЛ}}(p)}{E(p)}, \quad \dot{K}(\omega) = K(p)|_{p=j\omega}, \quad h(t) = \frac{U_{\text{ВЫЛ}}(t)}{E}, \quad g(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

Для схемы такой структуры коэффициент передачи можно найти по типовой формуле. Он будет равен

$$K = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_4}.$$

Для заданной схемы

$$K = \frac{48}{\frac{12 \cdot 6p}{5p} + \frac{48}{p} + \frac{144}{p} + \frac{24p}{5} + 48} = \frac{48 \cdot 5p}{24p^2 + 312p + 960} = \frac{240p}{p^2 + 13p + 40}$$

Найдём изображение переходной характеристики  $H(p)$ :

$$H(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{240p}{p(p^2 + 13p + 40)} = \frac{240}{p^2 + 13p + 40} = \frac{A}{p+5} + \frac{B}{p+8} = \frac{p(A+B) + 8A + 5B}{(p+5)(p+8)}$$

;

$$\begin{cases} A + B = 0, \\ 8A + 5B = 240; \end{cases} \quad \begin{cases} A = -B, \\ -8B + 5B = 240; \end{cases} \quad \begin{cases} A = 80, \\ B = -80; \end{cases}$$

Тогда

$$H(p) = \frac{80}{p+5} - \frac{80}{p+8};$$

$$h(t) = 80e^{-5t} - 80e^{-8t}$$

Найдём предельные значения переходной характеристики:

$$h(t)|_{t=0} = h(0) = 0; \quad h(t)|_{t=\infty} = h(\infty) = 0$$

Определим импульсную характеристику цепи  $g(t)$ .

Ее можно найти двумя методами:

Первый: дифференцируя значение  $h(t)$ :

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt};$$

$$g(t) = \frac{d}{dt} [80e^{-5t} - 80e^{-8t}] = 640e^{-8t} - 400e^{-5t}$$

Второй: по изображению импульсной характеристики  $G(p)$ :

$$G(p) = K(p) = \frac{240p}{p^2 + 13p + 40}$$

$$\begin{cases} A + B = 240, \\ 8A + 5B = 0; \end{cases} \begin{cases} B = 240 - A, \\ 8A + 1200 - 5A = 0; \end{cases} \begin{cases} B = 640, \\ A = -400; \end{cases}$$

$$G(p) = \frac{640}{p+8} - \frac{400}{p+5}$$

$$g(t) = 640e^{-8t} - 400e^{-5t}$$

Определим комплексный коэффициент передачи  $\dot{K}(\omega)$ :

$$\dot{K}(\omega) = K(p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{240j\omega}{(j\omega)^2 + 13j\omega + 40}$$

Предельные значения:

$$K(\omega) \Big|_{\omega=0} = K(0) = 0, \quad K(\omega) \Big|_{\omega=\infty} = K(\infty) = 0.$$

Графики переходной, импульсной характеристик и комплексного коэффициента передачи представлены на рисунках 2.14-2.16.

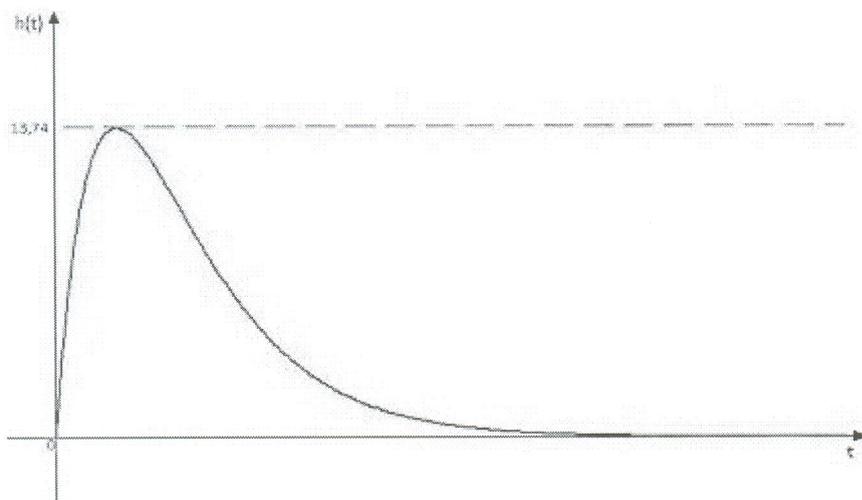


Рисунок 2.15. График функции переходной характеристики  $h(t)$ .

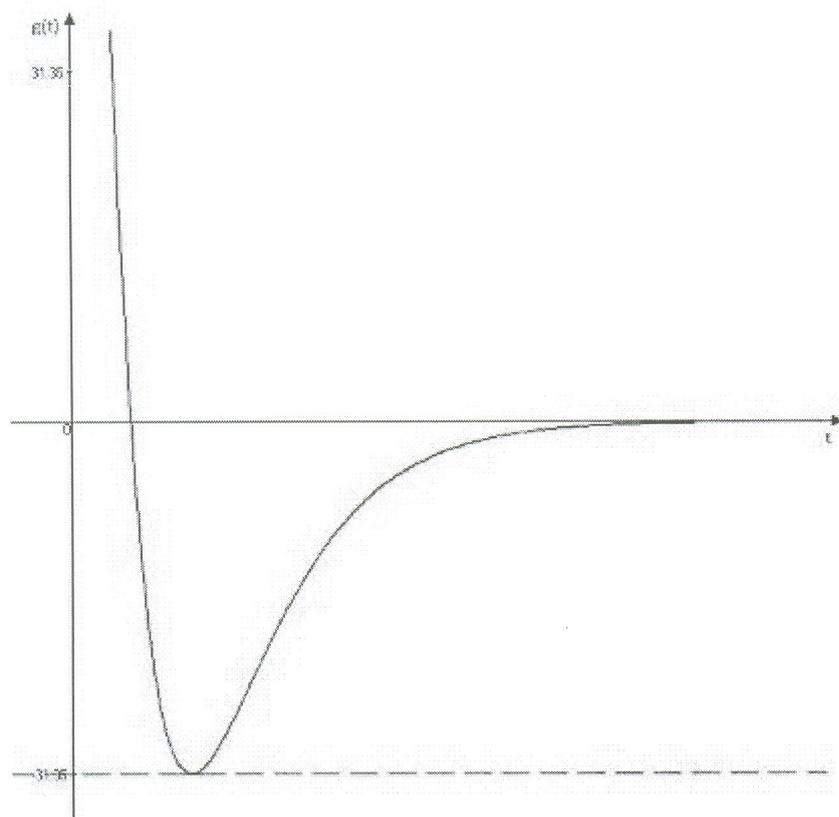


Рисунок 2.16. График функции импульсной характеристики  $g(t)$ .

## *Заключение*

Данная курсовая работа помогает закрепить знания о переходных процессах в электрических цепях и наглядно увидеть физическую природу явления. В результате проделанной работы были практически рассчитаны начальные и конечные значения всех токов и напряжений в цепи, и построены графики изменения токов и напряжений, а так же графики функций переходной и импульсной характеристик.

При переходных процессах могут возникать большие перенапряжения, сверхтоки, электромагнитные колебания, которые могут нарушить работу устройства вплоть до выхода его из строя. С другой стороны, переходные процессы находят полезное практическое применение, например, в различного рода электронных генераторах. А значит проделанная работа имеет не только теоретическую ценность, но и не малое значение при расчете той или иной конкретной практической задачи.

## *Список использованной литературы*

1. Белов С.П., Прохоренко Е.И. «Учебно-методическое пособие по расчету переходных процессов в электрических цепях для студентов специальностей 210406 «Сети связи и системы коммутации» и 210405 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение». Изд-во БелГУ. Белгород 2006.
2. Фриск В.В. «Основы теории цепей». Солон-Пресс. Москва 2004.
3. Бычков Ю.А., Золотницкий В.М., Чернышев Э.П. «Основы теории электрических цепей». Лань. Москва 2002.
4. Борисова Л.Ф. Конспект лекций по курсу "Основы теории цепей". – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2007 г. – 157 с.
5. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. Учеб. пособ. для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов. – 4е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 379 с.