1. ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В ЦЕПЯХ С ОДНИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ПРИ НУЛЕВЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

1.1. Дифференциальные уравнения резистивно-индуктивных и резистивно-емкостных контуров

Рассмотрим процессы в простых RL-, RC- цепях постоянного тока (рис.1.1), вызванных подключением этих цепей к независимому источнику напряжения при нулевых начальных условиях $u_C(0_-)=0$ и $i_L(0_-)=0$.

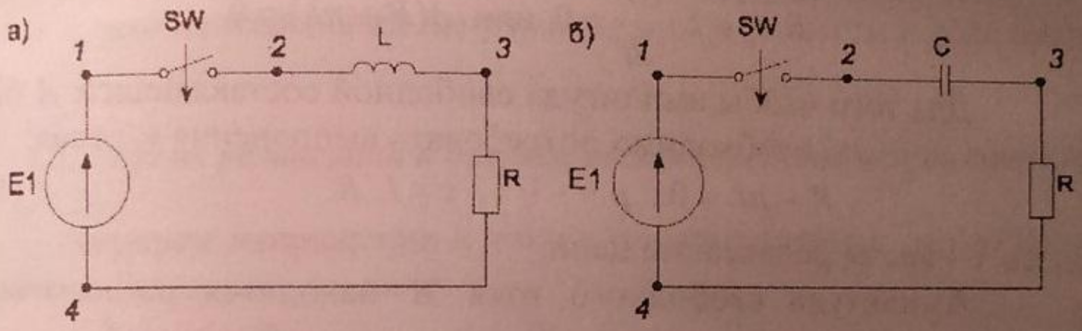

Рис.1.1 Последовательная RL– а) и последовательная RC–цепь – б)

Для последовательного RL-контура (рис.1.1а) дифференциальное уравнение вытекает из закона Кирхгоффа для напряжений (ЗКН) и связи между током и напряжением на индуктивности и на резисторе:

$$u_R + u_L = E\,,\ u_R = Ri\,,\ u_L = L\frac{di}{dt}$$

$$Ri + L\frac{di}{dt} = E\,,\ i(0_-) = 0 \qquad (1.1)$$

Решение уравнения $i = i_s + i_t$ ищется в виде наложения общего $i_t(t)$ и частного решения i_s. В электротехнике общее решение называется свободной составляющей, частное решение – принужденной составляющей. Вид частного решения определяется правой частью уравнения (1.1), т.е. зависимостью от времени напряжения независимого источника. В цепи постоянного тока $e(t) = E = const$ принужденная составляющая от времени не зависит

$i_s(t) = I_s = const$. Свободная изменяется по закону $i_t(t) = Ae^{pt}$. Искомое решение ищется в виде:

$$i(t) = I_s + Ae^{pt} \tag{1.2}$$

После подстановки вида частного решения $I_s = const$ в уравнение (1.1) находим принужденную составляющую I_s:

$$RI_s + 0 = E,\ I_s = E / R \tag{1.3}$$

Для определения параметра экспоненты p подставим свободную составляющую $i_t(t)$ в однородное уравнение:

$$R \cdot i_t + L \cdot \frac{di_t}{dt} = 0 \text{ или } A(R + pL) = 0$$

Для того чтобы амплитуда свободной составляющей A была отлична от нуля, необходимо потребовать выполнения условия:

$$R + pL = 0,\ p = -1/\tau,\ \tau = L/R \tag{1.4}$$

Здесь τ – время релаксации цепи.

Амплитуда свободного тока A находится по начальным условиям

$$i(0_+) = I_s + A = 0 \rightarrow A = -I_s = -E/R$$

Тогда ток индуктивности RL-цепи будет изменяться по закону

$$i(t) = E/R \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \tag{1.5}$$

Напряжения на $R-$ и $L-$элементах находятся по их вольт-амперным характеристикам

$$u_R(t) = Ri(t) = E(1 - e^{-t/\tau}),\ u_L = L\frac{di}{dt} = Ee^{-t/\tau} \tag{1.6}$$

Последовательный RC-контур

Для последовательного RC контура (рис 1.1б) по аналогии с предыдущим разделом имеем

$$\begin{gathered} u_R + u_C = E,\ u_R = R \cdot i_C,\ i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \\ u_C + CR \cdot \frac{du_C}{dt} = E,\ u_C(0_-) = 0 \end{gathered} \tag{1.7}$$

Запишем уравнение (1.1) для RL – контура в другом виде

$$i + \frac{L}{R}\frac{di}{dt} = \frac{E}{R}, \; i(0_-) = 0 \tag{1.8}$$

Из сравнения уравнений (1.7) и (1.8) видно, что одно уравнение переходит в другое, если сделать замену

$$i_L \leftrightarrow u_C\,; \;\; L \leftrightarrow C\,; \;\; R_{RL} \leftrightarrow 1/R_{RC}\,; \;\; E_{RC} \leftrightarrow E_{RL}/R_{RL}$$

Это позволяет записать решение уравнения (1.7) в виде

$$u_C(t) = E(1 - e^{-t/\tau}), \; i_C(t) = \frac{E}{R}e^{-t/\tau}, \; \tau = RC \tag{1.9}$$

Нетрудно видеть, что законы изменения напряжения емкости в RC – контуре и тока индуктивности в RL – контуре совпадают, так же как и законы изменения напряжения индуктивности и тока емкости.

1.2. Время релаксации и длительность переходного процесса

Запишем напряжения и токи в простых цепях с одним накопителем в безразмерном виде

$$\hat{i}_C = i_C/i_C(0), \; \bar{u}_L = u_L/u_L(0), \; \bar{u}_C = u_C/U_{Cs},$$
$$\hat{i}_L = i_L/I_{Ls}, \; \hat{t} = t/\tau \tag{1.10}$$
$$\bar{u}_C = \hat{i}_L = 1 - e^{-\hat{t}}, \; \hat{i}_C = \bar{u}_L = e^{-\hat{t}}$$

Изменение реакций определяется поведением экспоненциальной функции. Значения относительных токов и напряжений для различных значений относительного времени приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Значения тока и напряжения

$\hat{t}$, о.е.	1	2	3	4	5
$\hat{i}$, %	36,8	13,5	5	1,8	0,7
$\bar{u}$, %	63,2	86,5	95	98,2	99,3

Под временем релаксации τ понимается время, за которое напряжение емкости или ток индуктивности возрастают до 63,2% от установившегося значения. За это время ток емкости или напряжение индуктивности уменьшается до 36,8% от максимального значения.

Формально, время установления принужденного режима является бесконечно большим. Под практической длительностью переходного процесса принимается время, по истечении которого отличие текущего значения переходного процесса от установившегося значения составляет 5% или 1%. В соответствии данными таблицы 1.1 имеем

$$t_s = (3 \div 5) \cdot \tau \tag{1.11}$$

Определим время релаксации по кривым тока и напряжения (рис.1.2), используя приближенный метод касательных. Запишем уравнения касательных к кривым напряжения и емкости в точке t_k

$$\begin{aligned} y_u(t,t_k) &= u(t_k) + u_t'(t_k)\cdot(t-t_k) \\ y_i(t,t_k) &= i(t_k) + i_t'(t_k)\cdot(t-t_k) \end{aligned} \tag{1.12}$$

где $u_t'(t_k), i_t'(t_k)$ – производные от напряжения и тока в момент t_k

$$\hat{u}'(\hat{t}_k) = e^{-t_k},\ \hat{i}'(t_k) = -e^{-t_k}$$

Касательные к кривым напряжения и тока в моменты времени $\hat{t}=0$ и $\hat{t}=2$ показаны на рис. 1.2.

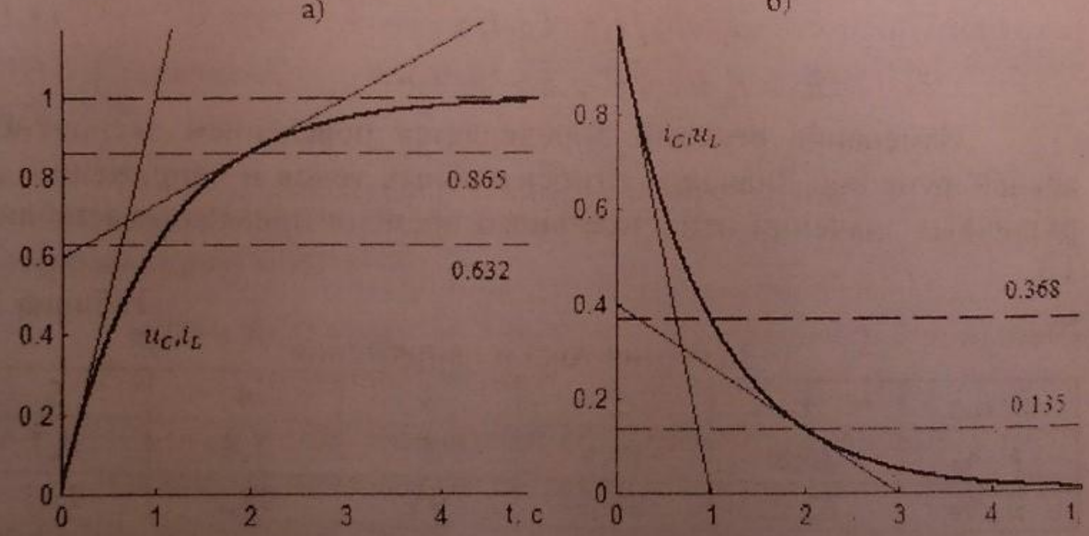

Рис.1.2 Напряжение емкости/ток индуктивности – а) и напряжение индуктивности/ток емкости – б)

Найдем точку пересечения прямой линии $\hat{u}=1$ и касательной к кривой напряжения в точке $t_k = 2$

$$1 = (1-e^{-2}) + e^{-2}(t_1 - 2) \ \rightarrow\ t_1 = 3,\ \Delta t = t_1 - t_k = 1$$

Из рассмотренного примера и графиков на рис.1.2 следует, что для определения времени релаксации необходимо найти интервал времени между точкой t_1 пересечения касательной с прямой $\tilde{u}=1$ и точкой t_k, в которой определен угловой коэффициент касательной.

1.3. Энергетические соотношения в накопительных элементах

Скорость запасания энергии в емкости и индуктивности $p_C(t)$ и $p_L(t)$ вычисляется в соответствии с определением этих величин:

$$p(t)=u(t)\cdot i(t),\ p(t)=P_{sc}\left[e^{-t/\tau}-e^{-2t/\tau}\right] \tag{1.13}$$

где $P_{scC}=U_{Cs}i_C(0)$, $P_{scL}=u_L(0)I_{Ls}$ – мощность источника конечной мощности с параметрами E, R, к которому подключен накопительный элемент

$$P_{scC}=P_{scL}=E^2/R$$

Изменение энергии накопительных элементов во время переходного процесса определяется формулами

$$W_C(t)=W_{Cs}\cdot\bar{u}_C(t)^2,\ W_{Cs}=CU_{Cs}/2\ ,U_{Cs}=E \tag{1.14}$$

$$W_L(t)=W_{Ls}\cdot\bar{i}_L(t)^2,\ W_{Ls}=LI_{Ls}/2,\ I_{Ls}=E/R \tag{1.15}$$

где W_{Cs}, W_{Ls} – запас энергии накопительных элементов в установившемся режиме.

Кривые напряжения, тока, мощности и запасаемой энергии емкости при нулевых начальных условиях показаны на рис. 1.3.

Из графиков видно, что кривая мощности $p(t)$ имеет экстремум. Анализ формулы (1.13) показывает, что максимальная скорость запасания энергии p_e имеет место в момент времени

$$t_e=\tau\ln 2=0{,}693\tau,\ p_e=P_{sc}/4 \tag{1.16}$$

Из формулы (1.16) видно, что значение мощности в точке экстремума составляет 25% от мощности источника $P_{sc}=E^2/R_i$. При этом значения напряжений и токов накопительных элементов составляют 50% от максимальных значений.

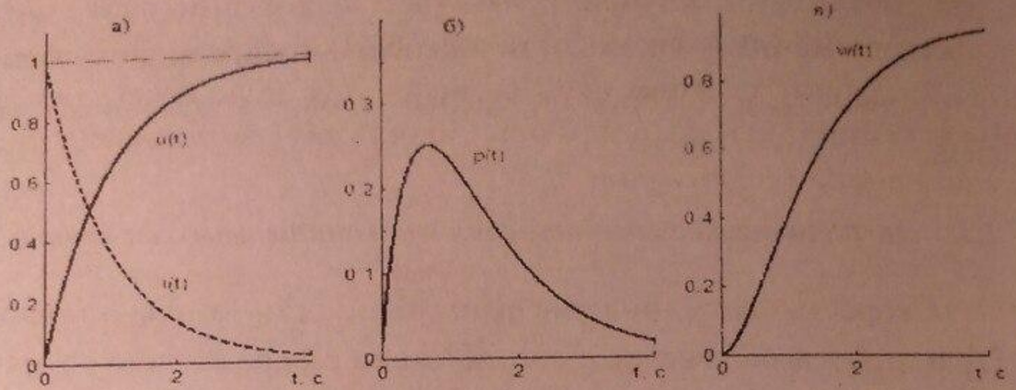

Рис.1.3 Изменение напряжения и тока емкости – а), мощности – б) и запасаемой энергии в емкостном элементе – в)

1.4. Разветвленная цепь первого порядка

Цепь, состоящую из нескольких резисторов и одного накопительного элемента, всегда можно привести к одному из вариантов цепей простой структуры помощью метода эквивалентного генератора.

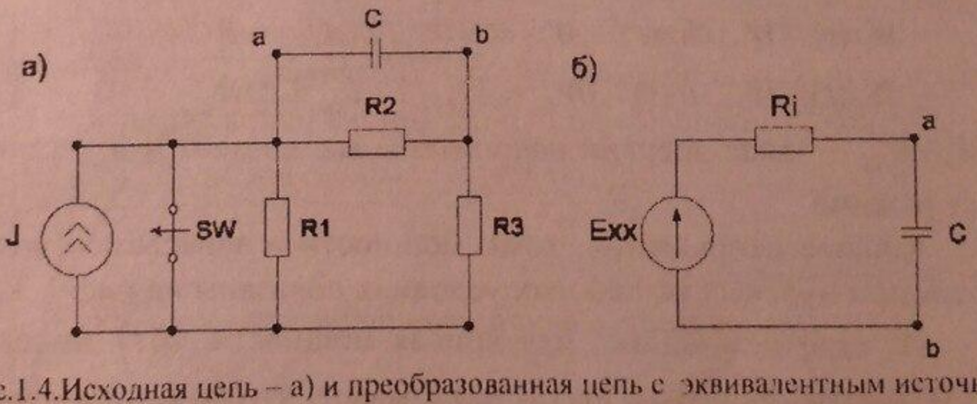

Рис.1.4.Исходная цепь – а) и преобразованная цепь с эквивалентным источником – б)

Рассмотрим пример эквивалентного преобразования цепи, показанной на рис.1.4а. Заменим часть цепи, состоящей из резисторов и независимого источника тока эквивалентным генератором (рис.1.4б).

Параметрами генератора являются напряжение холостого хода E_{xx} и внутреннее сопротивление R_i.

$$E_{ul} = J \cdot R_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, \; R_i = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Напряжение и ток емкости в схеме 1.4б определяется формулой (1.9). Другие реакции цепи вычисляются в соответствии с расчетной схемой (рис.1.5), в которой емкость заменена компенсационным источником напряжения $u_C(t)$.

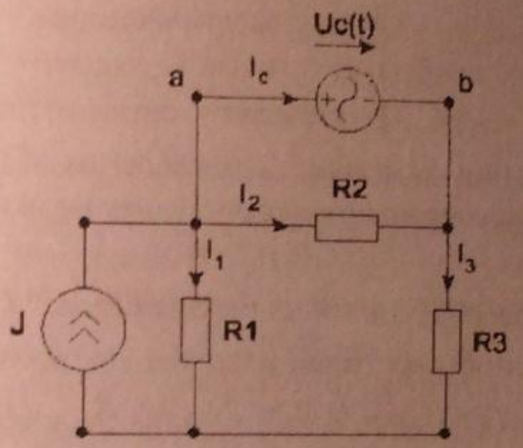

Рис.1.5. Расчетная схема с независимым источником тока и компенсационным источником напряжения.

В качестве примера найдем напряжение источника тока как сумму частных реакций на действие независимого источника тока J и действие компенсационного источника напряжения $u_C(t)$

$$u_1(t) = J \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + u_C(t) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

1.5. *Определение реакций цепи по расчетным схемам*

В цепях первого и второго порядка переходной процесс можно получить и без составления дифференциальных уравнений, используя лишь известный вид их решения. Для цепей постоянного тока с одним накопителем энергии любая реакция ищется в виде

$$x(t) = X_s + Ae^{-t/\tau} \tag{1.17}$$

Здесь A – амплитуда свободной составляющей,

$\tau = 1/|p|$ –время релаксации, p – корень характеристического уравнения, $X_s = const$ – установившееся значение реакции.

Параметры переходного процесса X_s, A, τ определяют по расчетным схемам для вынужденных и свободных токов, а также по схеме цепи для момента времени $t = 0_+$. В схеме для вынужденных токов и напряжений $I_s = const$, $U_s = const$ емкость заменяется разрывом, а индуктивность - коротким замыканием.

В схеме для свободных токов С-элемент заменяется сопротивлением $Z_C(p) = 1/pC$, L-элемент – сопротивлением $Z_L(p) = pL$. Источник напряжения заменяется элементом КЗ, источник тока – элементом XX. Характеристическое уравнение вытекают из ЗКН

$$AZ(p) = 0,$$

где A – амплитуда свободной составляющей, $Z(p)$ – входное сопротивление относительно точек разрыва какой-либо ветви

$$Z(p) = R_e + pL \text{ или } Z(p) = R_e + 1/pC,$$

где R_e – эквивалентное сопротивление резистивного двухполюсника, подключенного к накопительному элементу.

Для того, чтобы амплитуда свободного тока была отлична от нуля $A \neq 0$, необходимо потребовать, чтобы сопротивление $Z(p)$ было равно нулю

$$R_e + pL = 0 \text{ или } R_e + 1/pC = 0$$

Из полученного характеристического уравнения находится параметр p и время релаксации τ

$$p = -R/L,\ p = -1/RC \text{ и } \tau = RC,\ \tau = L/R$$

Расчетная схема цепи для момента времени $t = 0_+$ необходима для определения зависимых начальных условий $x(0_+)$ для токов R – элементов, тока емкости и напряжения индуктивности. Амплитуды свободных составляющих переходного процесса находятся из уравнения

$$x(0_+) = X_s + A$$

При нулевых независимых начальных условиях $u_C(0_+) = 0$ и $i_L(0_+) = 0$ расчетная схема цепи для момента времени $t = 0_+$ получается из исходной схемы заменой индуктивного элемента разрывом, емкостного элемента - коротким замыканием.

Указанные типы расчетных схем для цепи, показанной на рис.1.4, представлены на рис.1.6.

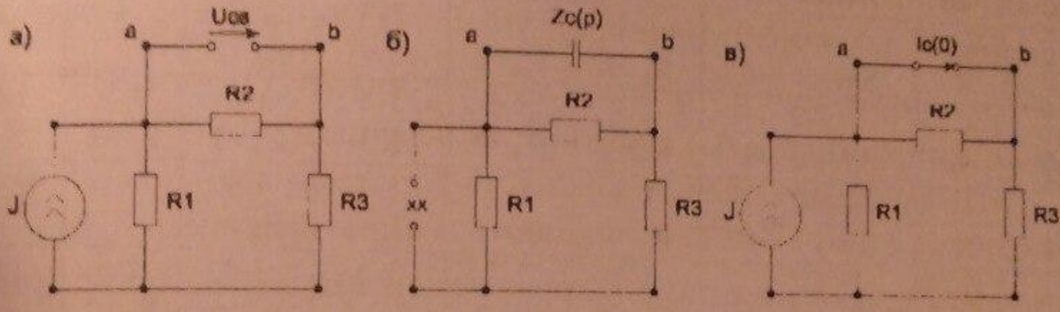

Рис. 1.6. Расчетные схемы для принужденного режима – а), свободных токов – б) и начального момента времени – в).

1.6. *Задание.*

1. Восстановить схему исследуемой цепи по данным таблицы вариантов. В таблице 1.2. сокращение КЗ означает элемент короткого замыкания. Коммутация обозначается символами 0→1 или 1→0, где «0» – разомкнутое состояние, «1» – замкнутое состояние ключа, символ «→» означает перевод ключа из одного состояния в другое.

2. С помощью расчетных схем цепи для вынужденных/свободных составляющих переходного процесса и схемы цепи для момента $t = 0_+$ найти напряжение/ ток накопительных элементов и реакцию, указанную в таблице вариантов.

3. По найденным выражениям определить запасаемую энергию и скорость ее изменения.

4. Построить и объяснить графики полученных зависимостей. На графиках указать время переходного процесса.

Таблица 1.2

Варианты заданий

№	1	2	3	4	5	6	7	Найти
1	1-5 $U_1=30$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-5 $R_4=2$	3-4 $C_5=5$	3-4 $R_6=2$	4-5 $R_7=2$	$i_7(t)$
2	3-1 $J_1=4$	1-3 $SW_2\ 1\to 0$	1-3 $R_3=1$	1-2 $R_4=1$	2-3 $L_5=2$	2-3 $R_6=2$	-	$u_4(t)$
3	1-4 $U_1=6$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-4 $R_4=2$	3-5 КЗ	4-5 $C_6=3$	4-5 $R_7=2$	$i_5(t)$
4	3-1 $J_1=4$	1-2 $SW_2\ 1\to 0$	1-3 $R_3=1$	1-2 $R_4=2$	2-4 $C_5=1$	4-3 $R_6=1$	-	$u_{23}(t)$
5	1-5 $U_1=18$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-4 $R_3=4$	2-3 $R_4=1$	3-5 $R_5=2$	3-4 $L_6=6$	4-5 $R_7=2$	$i_3(t)$
6	3-1 $J_1=15$	1-3 $SW_2\ 1\to 0$	1-3 $R_3=2$	1-2 $R_4=2$	1-2 $C_5=3$	2-3 $R_6=2$	-	$u_6(t)$
7	1-5 $U_1=12$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-5 $R_4=2$	3-4 $L_5=1$	4-5 $R_6=2$	-	$i_4(t)$
8	4-1 $J_1=15$	1-4 $SW_2\ 1\to 0$	1-2 $L_3=10$	1-3 $R_4=2$	2-3 $R_5=2$	2-4 $R_6=2$	3-4 $R_7=2$	$i_6(t)$
9	1-5 $U_1=15$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-4 $R_3=1$	2-3 $R_4=2$	3-4 $C_5=3$	3-5 $R_6=1$	4-5 $R_7=2$	$u_7(t)$
10	3-1 $J_1=4$	1-3 $SW_2\ 1\to 0$	1-3 $R_3=2$	1-2 $R_4=1$	2-4 $C_5=2$	2-5 $R_6=4$	4-3 $R_7=1$	$i_{14}(t)$
11	1-5 $U_1=24$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-5 $R_4=2$	3-4 $R_5=2$	4-5 $L_6=6$	4-5 $R_7=2$	$i_5(t)$
12	4-1 $J_1=15$	1-4 $SW_2\ 0\to 1$	1-4 $R_3=2$	1-3 $R_4=2$	1-2 $C_5=3$	2-3 $R_6=2$	3-4 $R_7=2$	$u_4(t)$
13	1-5 $U_1=18$	2-3 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=1$	2-4 $R_4=4$	3-4 $C_5=2$	3-5 $R_6=2$	4-5 $R_7=2$	$u_6(t)$
14	4-1 $J_1=30$	1-4 $SW_2\ 1\to 0$	1-4 $R_3=2$	1-4 $R_4=2$	2-4 $R_5=2$	2-3 $L_6=10$	3-4 $R_7=2$	$u_5(t)$
15	1-5 $U_1=6$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-5 $R_4=2$	3-4 КЗ	4-5 $C_6=2$	4-5 $R_7=2$	$i_5(t)$
16	1-5 $U_1=15$	1-2 $SW_2\ 0\to 1$	2-3 $R_3=2$	3-5 $R_4=2$	3-4 $R_5=2$	4-5 $C_6=5$	4-5 $R_7=2$	$u_5(t)$
17	2-1 $U_1=12$	2-3 $SW_2\ 0\to 1$	6-1 $R_3=1$	3-4 $R_4=1$	4-5 $R_5=2$	5-6 $C_6=2$	4-6 $R_7=2$	$u_{35}(t)$
18	3-1 $J_1=8$	1-3 $SW_2\ 1\to 0$	1-3 $R_3=2$	1-2 $R_4=1$	2-4 $R_5=4$	2-4 $L_6=2$	4-3 $R_7=1$	$u_{14}(t)$

Окончание таблицы 1.2

№	1	2	3	4	5	6	7	Найти
19	2-1 $U_1=6$	2-3 SW_2 0→1	3-5 $R_3=2$	3-4 $C_4=1$	4-5 $R_5=2$	5-1 $R_6=2$	-	$u_3(t)$
20	4-1 $J_1=15$	1-4 SW_2 1→0	1-4 $R_3=2$	1-2 $R_4=2$	2-3 $L_5=10$	1-3 $R_6=2$	3-4 $R_7=2$	$i_7(t)$
21	2-1 $U_1=18$	5-1 SW_2 0→1	2-4 $R_3=4$	3-4 $L_4=1$	3-5 $R_5=2$	4-5 $R_6=2$	2-3 $R_7=1$	$i_3(t)$
22	4-1 $J_1=3$	1-4 SW_2 1→0	1-2 $C_3=3$	1-3 $R_4=2$	2-3 $R_5=2$	2-4 $R_6=2$	3-4 $R_7=2$	$u_6(t)$
23	4-1 $J_1=8$	1-4 SW_2 1→0	1-2 $R_3=1$	1-3 $R_4=3$	2-3 $L_5=2$	2-4 $R_6=2$	3-4 $R_7=2$	$u_6(t)$
24	4-1 $J_1=30$	1-4 SW_2 1→0	1-4 $R_3=2$	1-2 $R_4=2$	2-3 $R_5=2$	3-4 $C_6=3$	2-4 $R_7=2$	$u_7(t)$

1.7. Пример решения

Структура цепи задана таблицей 1.3. Схема цепи показана на рис. 1.7.

Таблица 1.3

Структура цепи и параметры элементов

№	1	2	3	4	5	6	7	Найти
42	1-5 $U_1=6$	1-2 SW_2 0→1	2-3 $R_3=2$	3-4 $L_4=4$	3-4 $R_5=2$	4-5 $R_6=2$	-	$u_{35}(t)$

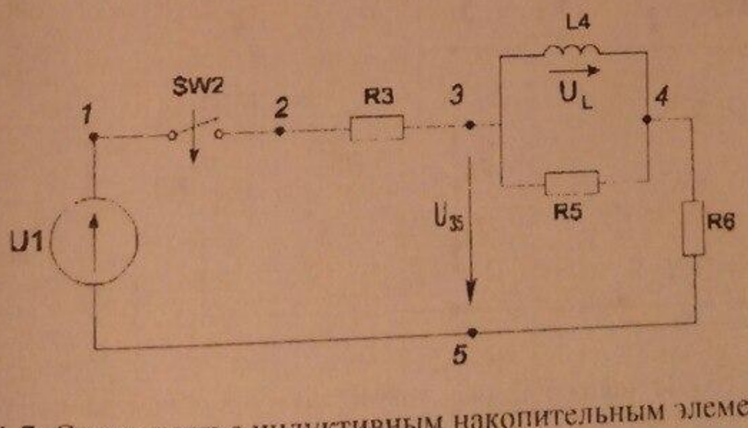

Рис. 1.7. Схема цепи с индуктивным накопительным элементом

Искомые реакции цепи $i_L(t)$, $u_L(t)$ и $u_{35}(t)$ изменяются по закону:

$$x(t) = X_s + X_t e^{pt}$$

Параметры реакций X_s, X_t и p находим по расчетным схемам.

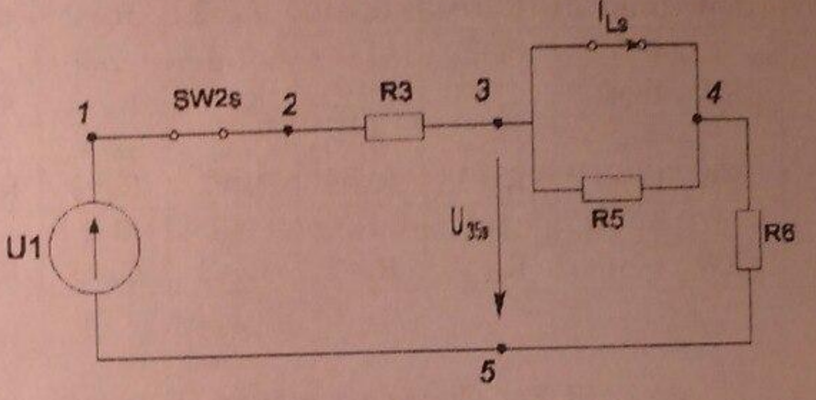

Рис. 1.8. Расчетная схема для установившегося режима

Установившееся значение X_s определяем по схеме, показанной на рис. 1.8, в которой индуктивность заменена элементом КЗ:

$$U_{Ls} = 0,\ I_{Ls} = \frac{U_1}{R_3 + R_6} = 1{,}5\ ,\ U_{35s} = U_1 \frac{R_6}{R_3 + R_6} = 3$$

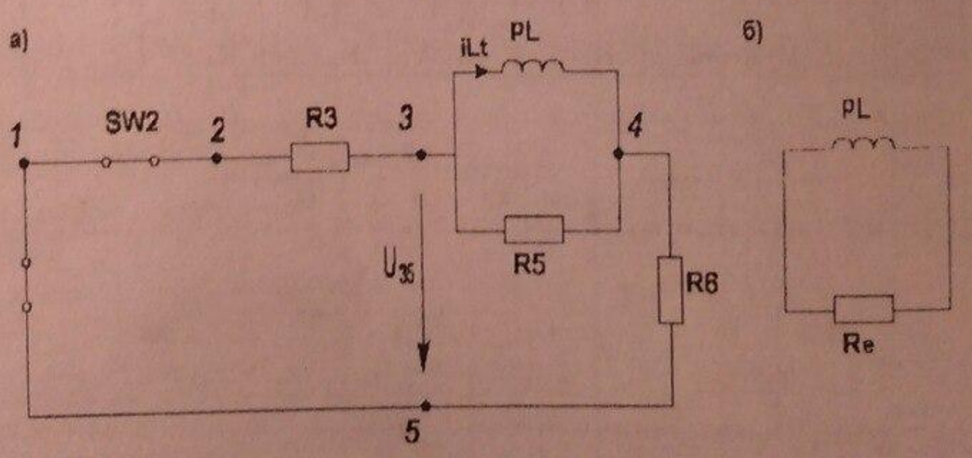

Рис. 1.9. Схема для свободных токов – а) и преобразованная схема – б)

Характеристическое уравнение получаем с помощью схемы для свободных токов (рис. 1.9а). Из ЗКН для преобразованной цепи (рис.1.9б) получим:

$$I_t(R_e + pL) = 0,$$

где R_e – эквивалентное сопротивление резистивного двухполюсника относительно точек подключения индуктивности.

Для того, чтобы амплитуда свободной составляющей была отлична от нуля $I_t \neq 0$, необходимо выполнение условия

$$R_e + pL = 0.$$

Из характеристического уравнения находим корень $p = -R_e / L = -1/3$ и время релаксации цепи $\tau = 1/|p| = 3$.

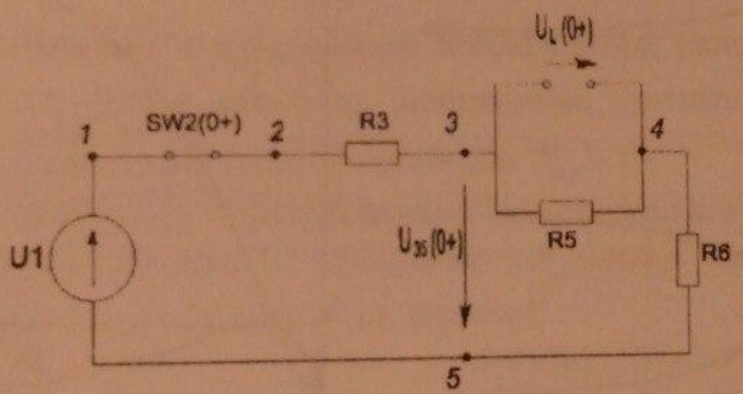

Рис. 1.10. Схема цепи для момента времени t = 0.

Начальные значения величин $U_{35}(0_+)$ и $U_L(0_+)$ находятся из расчетной схемы для момента времени $t = 0_+$ (рис. 1.10). В этой схеме индуктивность при нулевом начальном условии заменена разрывом.

$$U_L(0_+) = U_1 \frac{R_5}{R_3 + R_5 + R_6} = 2, \quad U_{35}(0_+) = U_1 \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_5 + R_6} = 4$$

Постоянные интегрирования I_{Lt}, U_{Lt}, U_{35t} определяются из уравнений:

$$I_s + I_t = i_L(0_+) = 0 \rightarrow I_t = -I_s = -1.5,$$

$$0 + U_{Lt} = u_L(0_+) = 2 \rightarrow U_{Lt} = 2$$

$$U_{35s} + U_{35t} = u_{35}(0_+) = 4 \rightarrow U_{35t} = 4 - 3 = 1$$

Искомые реакции цепи имеют вид:

$$i_L(t) = 1{,}5(1 - e^{-\frac{t}{3}}); \quad u_L(t) = 2e^{-\frac{t}{3}}; \quad u_{35}(t) = 3 + e^{-\frac{t}{3}} \qquad (1.18)$$

Запасаемая энергия w_L и скорость ее изменения p_L определяется по формулам:

$$w_L(t) = \frac{L \cdot i^2(t)}{2}; \qquad p_L(t) = u_L(t) \cdot i_L(t) \qquad (1.19)$$

Графики искомых реакций показаны на рис.1.11.

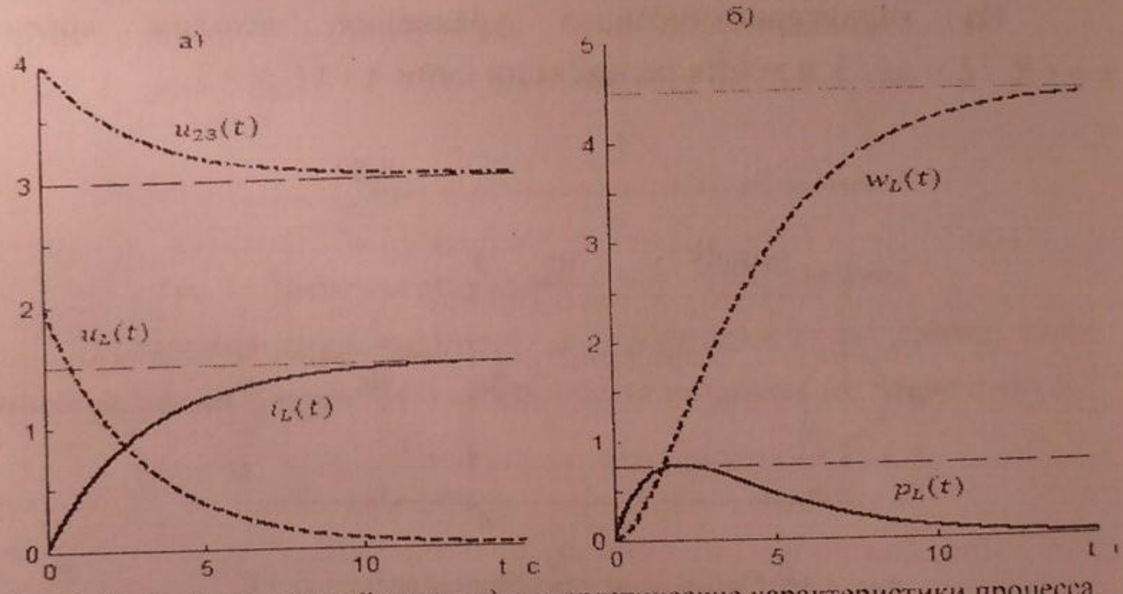

Рис. 1.11. Графики реакций цепи - а) и энергетические характеристики процесса - б)

Ток индуктивности изменяется непрерывно, напряжение индуктивности и напряжение u_{35} изменяются скачком. Время переходного процесса по уровню 5% составляет $t_s = 3\tau = 9$. Энергия, запасенная в индуктивности в установившемся режиме, составляет

$$W_{Ls} = \frac{L \cdot I_{Ls}^2}{2} = 4{,}5$$

Мощность эквивалентного источника относительно точек подключения индуктивности определяется произведением напряжения ХХ и тока КЗ, которым соответствует напряжение на индуктивности в начальный момент времени $u_L(0)$ и установившееся значение тока I_{Ls}

$$P_{sc} = I_{Ls} \cdot u_L(0) = 3 .$$

Зависимость $p_L(t)$ (рис.1.11б) имеет экстремум $p_L(t_e) = P_{sc} / 4 = 0,75$ в точке $t_e = \tau \ln 2 = 2,08$.

1.8. Контрольные вопросы

1. Ток индуктивности $L = 0,5$ изменяется по закону: $i_L(t) = 100t$. Определите потокосцепление $\psi(t)$ и напряжение $u_L(t)$.

2. Энергия индуктивности $L = 2$ составляет $W_L = 200$. Определите ток.

3. Энергия и напряжение конденсатора равны $W_C = 200$, $U_C = 1000$. За какое время t_1 напряжение снизится до уровня $u_C(t_1) = 50$, если сопротивление изоляции $R_{из} = 10^6$.

4. Мощность эквивалентного генератора, к которому подключена индуктивность L, составляет $P_{sc} = 100$. Чему равняется максимальная скорость запасания энергии?

5. Постоянная времени последовательного RC-контура $\tau = 1$. При подключении цепи к источнику E=50 ток $t = 0_+$ равен $i(0_+) = 5$. Чему равна емкость C?

6. При нулевых начальных условиях RL/RC-цепь подключается к источнику напряжения/тока. Каким элементом заменяется индуктивность/емкость в момент $t = 0_+$ и при условии $t \to \infty$?

7. Как определяются параметры эквивалентного источника относительно точек подключения накопительного элемента?

8. Как получить характеристическое уравнение для разветвленной цепи первого порядка?

9. Чему равен свободный ток $i_t(t)$ в момент времени $t_1 = \tau$ относительно начального значения $i_t(0_+) = 5$?

10. Определить угловой коэффициент касательной переходного процесса $u_C(t)$ в RC-цепи постоянного тока в момент времени $t = 0_+$?

11. Источник постоянного напряжения E=180 подключается к цепи, образованной последовательным соединением двухполюсников $R_1 = 12$ и $R_2 \| L$, где $R_2 = 6$, $L = 4$. Определите время релаксации τ и напряжение на индуктивности в момент $t = 0_+$

12. Запишите выражение для тока индуктивности параллельной RL цепи, питаемой от источника тока $J = const$.

13. Определите время релаксации RL-цепи, если $R = 50$ и $L = 0{,}15$?

14. Индуктивность $L = 0{,}2$ в момент $t = 0$ подключается к идеальному источнику напряжения $E = 6$. Запишите закон изменения тока $i_L(t)$.

15. Как изменится зависимость $i_L(t)$, полученная в пункте 14, если цепь содержит реальный источник напряжения мощностью $P_{sc} = 18$ и реальную катушку индуктивности $L = 0{,}2$, $R_L = 4$?

16. В установившемся режиме цепи с параметрами $E = 50$, $R = 5$, $L = 0{,}1$ в момент времени $t = 0_+$ сопротивление увеличилось до значения $R = 30$. Определить напряжения на L-элементе в первый момент после коммутации.