РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

Переходные процессы в нелинейных электрических цепях описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Методы решения могут быть разделены на три группы: аналитические, графоаналитические и численные методы.

В работе рассматривается метод кусочно-линейной аппроксимации, который относится к аналитическим методам. Метод основан на замене нелинейных характеристик элементов $u(i)$, $\psi(i)$ и $q(u)$ отрезками прямых линий. Такой замене соответствует переход от одного нелинейного дифференциального уравнения к нескольким линейным дифференциальным уравнениям по числу отрезков ломаной линии. Однотипные уравнения отличаются лишь параметрами и начальными условиями.

Следует иметь в виду, что каждое из линейных уравнений справедливо лишь для определенного интервала времени $t_k \le t \le t_{k+1}$, в течение которого рабочая точка находится на соответствующем линеаризованном участке нелинейной характеристики. Границы временного интервала определяются из условия достижения одной из переменных нелинейного элемента точек излома.

В соответствии с законами коммутации начальные условия для рассматриваемого линейного участка определяются значениями напряжения емкости или тока индуктивности в конце временного интервала пребывания рабочей точки на соседнем участке. Условие непрерывности переменных состояния позволяет находить амплитуды свободных составляющих на каждом из этапов переходного процесса.

Ниже рассматриваются примеры расчета переходных процессов в нелинейной цепи, содержащей линейный накопительный элемент и нелинейный резистор, и в цепи с нелинейным накопительным элементом и линейными резисторами.

Расчет переходного процесса в цепи с нелинейным резистором методом кусочно-линейной аппроксимации .

Рассмотрим процессы в цепи, схема которой показана на рис. 1-а. Параметры элементов имеют следующие значения: $R_1 = R_3 = 4$, $C = 10^{-3}$, $R_2 = 100$, $E = 240$.

Вольтамперная характеристика нелинейного резистора задана таблично

$I = [0 \quad 0.5 \quad 1 \quad 1.5 \quad 2 \quad 3 \quad 5 \quad 8]^T$, $U = [0 \quad 40 \quad 60 \quad 70 \quad 78 \quad 88 \quad 98 \quad 105]^T$

График ВАХ показан на рис. 1б.

а) б)

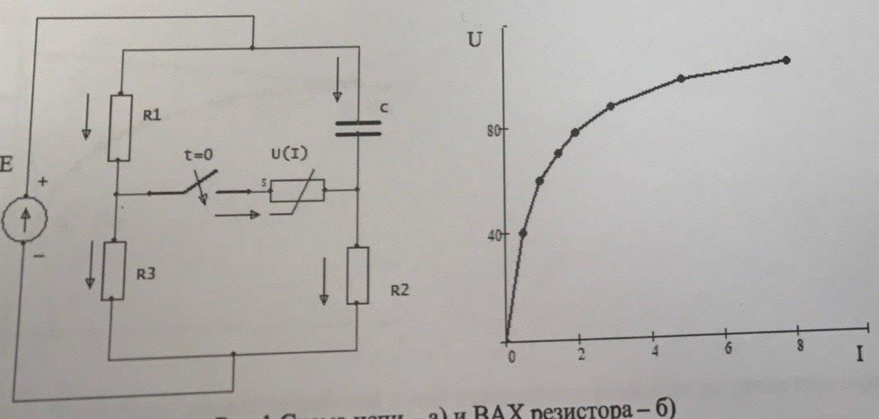


Рис.1.Схема цепи – а) и ВАХ резистора – б)

Переходной процесс начинается в момент $t = 0$ после замыкания ключа.

В исходном состоянии напряжение на емкости равно напряжению источника постоянного тока. Это дает независимое начальное $u_C(0-) = E = 240$.

Определение начального и конечного состояния нелинейного резистора.

При переходном процессе рабочая точка НР перемещается по кривой $U(I)$ от точки с координатами$[u_0 = u(0), i_o = i(0)]$ до точки установившегося режима $[u_s = u(\infty), i_s = i(\infty)]$. Найдем координаты этих точек из схем замещения цепи для момента $t = 0+$ и для установившегося режима $t \to \infty$ (рис.2). Режим НР найдем методом эквивалентного источника.

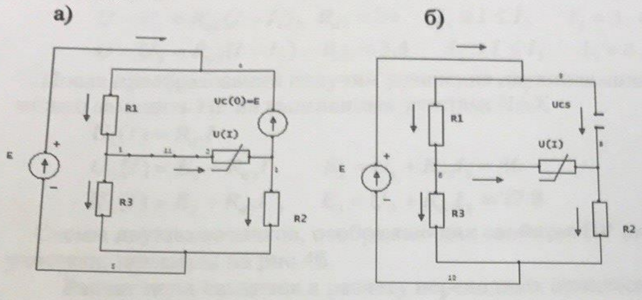


Рис.2 Расчетные схемы для начального момента – а) и конечного времени переходного процесса – б)

Из схемы для установившегося режима (рис.2а) находим параметры эквивалентного источника относительно точек подключения НР

$$U_{nl,1} = E \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 240 \cdot \frac{4}{4+4} = 120 \quad R_{i1} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 2$$

Из схемы для начального момента времени (рис. 2б) получим

$$U_{nl,2} = E \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 120 \quad R_{i2} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2 = 102$$

Внешние характеристики эквивалентных источников имеют вид.

$$U_{s1}(I) = 120 - 2I \quad , \quad U_{s2}(I) = 120 - 102I \qquad (1)$$

Пересечение этих прямых с ВАХ резистора дает начальное A и конечное положение рабочей точки B при ее движении вдоль ВАХ во время переходного процесса как показано на рис. 3.

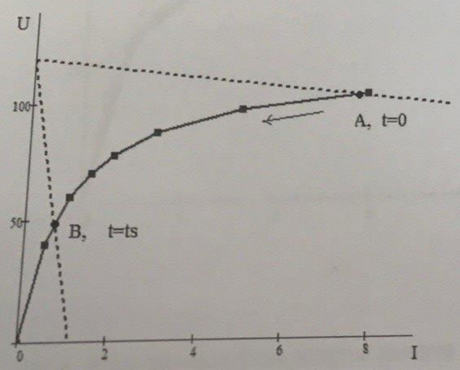


Рис.3. Траектория движения рабочей точки нелинейного резистора во время переходного процесса.

.Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ

Представим ВАХ с помощью ломаной линией, проходящей через точки [1,60], [3,88] [8,105], как показано на рис.4а.

На $k-$*ом* отрезке уравнение прямой линии записывается в виде

$$U-U_k=\frac{\Delta U_k}{\Delta I_k}\cdot(I-I_k),\ \Delta U_k=U_{k+1}-U_k,\ \ \Delta I_k=I_{k+1}-I_k \quad (2)$$

Здесь индекс k относится к началу отрезка.

Запишем уравнения для выделенных отрезков

$$\begin{aligned}
&U=R_{d1}I, && R_{d1}=60, && 0\le I\le I_1 && I_1=1,\ U_1=60\\
&U-U_1=R_{d2}(I-I_1), && R_{d2}=14 && I_1\le I\le I_2 && I_2=3,\ U_2=88\\
&U-U_2=R_{d3}(I-I_2), && R_{d3}=3.4 && I_2\le I\le I_3 && I_3=8,\ U_3=105
\end{aligned} \quad (3)$$

После преобразований получим уравнения двухполюсников, с помощью которых можно заменить НР на выделенных участках ВАХ

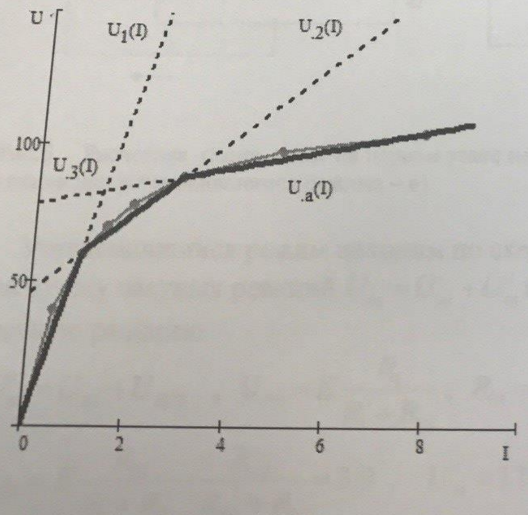
$$\begin{aligned}
&U_1(I)=R_{d1}I\\
&U_2(I)=E_2+R_{d2}I, && E_2=U_1+R_{d2}I_1=46\\
&U_3(I)=E_3+R_{d3}I, && E_3=U_2+R_{d3}I_2=77.8
\end{aligned} \quad (4)$$

Схемы двухполюсников, отображающих свойства НР на выделенных линейных участках, показаны на рис.4б.

Расчет цепи сводится к расчету переходных процессов в линейных цепях с $C-$элементом, соответствующих схемам замещении НР, показанным на рис.5. Для сопряжения решений в точках излома кусочно-линейной ВАХ используется условие непрерывности напряжения на емкости в моменты перехода с одного участка аппроксимации на другой.

$$U_c(0_-)=U_c(0_+),\qquad U_c(t_1-0)=U_c(t_1+0),\qquad U_c(t_2-0)=U_c(t_2+0)$$

а)



б)

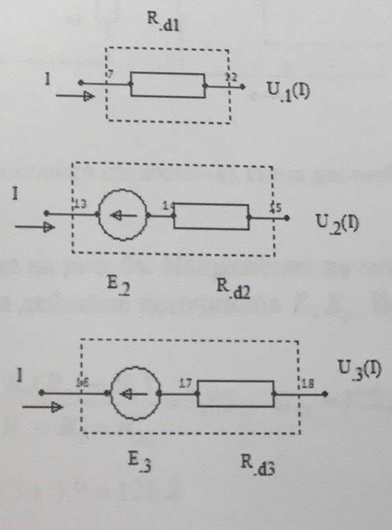


Рис.4. Кусочно-линейная аппроксимация вольтамперной характеристики – а) и схемы замещения НР на различных участках ВАХ

Расчет реакций на кусочно-линейных участках ВАХ

Решение на интервале $0 \le t \le t_1$,

На первом временном интервале НР замещается двухполюсником с характеристикой

$$U_3(I) = E_3 + R_{d3}I = 77.8 + 3.4I$$

Расчетная схема цепи показана на рис.5-а. На том же рисунке показана схема для свободных токов (рис. 5-б) и схема для установившегося режима цепи (рис.6в). Любая реакция является наложением свободной и принужденной составляющей. Для напряжения на емкости и тока НР имеем

$$u_C(t) = u_{ct}(t) + U_{cs}, \quad u_{ct}(t) = A_1 \cdot e^{-t/\tau}, \; U_C = const$$
$$i(t) = i_t(t) + I_s, \quad u_t(t) = B_1 \cdot e^{-t/\tau}, \; I_s = const \qquad (5)$$

Для вычисления времени релаксации $\tau_1 = CR_{e1}$ по расчетной схеме для свободных токов достаточно найти эквивалентное сопротивление пассивного R – двухполюсника относительно его точек подключения к емкости C в соответствии со схемой на рис.5б.

$$R_{\cdot 13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 2, \; R_{13d} = R_{13} + R_{d3} = 5.4, \; R_{e1} = \frac{R_{13d}R_2}{R_2 + R_{13d}} = 5.123, \; \tau_1 = CR_{e1} = 5.123\,мс \quad (6)$$

а) б) в)

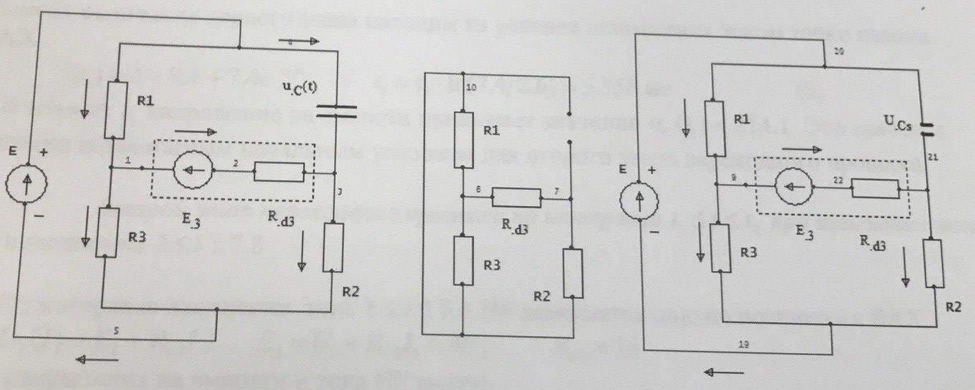


Рис.5 Расчетная схема цепи на первом этапе переходного процесса – а), схема для свободных токов –б) и схема для установившегося режима – в)

Установившийся режим находим по схеме на рис. 5в. Напряжение на емкости находим как сумму частных реакций $U_{cs} = U'_{cs} + U''_{cs}$ на действие источников E, E_3. Находим первую частную реакцию

$$U'_{cs} = U_{R1} + U_{Rd3}, \quad U_{R1} = E\frac{R_1}{R_1 + R_{01}}, \quad R_{01} = \frac{R_3(R_{d3} + R_2)}{R_3 + R_2 + R_{d3}} = 3{,}85, \quad U_{R1} = 122.3,$$

$$U_{Rd3} = E\frac{R_{01}}{R_1 + R_{01}} \cdot \frac{R_{d3}}{R_{d3} + R_2} = 3.9, \quad U'_{cs} = 122.3 + 3.9 = 126.2$$

Вторая частная реакция и результирующее напряжение

$$U''_{Cs} = E_3 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{d3} + R_1R_3/(R_1 + R_3)} = 73.8, \quad U_{Cs} = 126.2 + 73.8 = 200$$

Аналогично находим установившийся ток НР

$$I_s = I_s' + I_s'' = \frac{E_s}{R_1 + R_{01}} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_{d3} + R_2} - \frac{E_3}{R_2 + R_{d3} + R_1 R_3/(R_1 + R_3)} = 1.138 - 0.738 = 0.4$$

Для определения амплитуды свободного тока B_1 необходимо знать начальное значение тока $i(0+) = i_0$. Величина i_0 находится из расчетной схемы для момента времени $t = 0+$, которая получается из исходной схемы заменой емкости источником напряжения $U_{C0} = u_C(0+) = 240$ как показано на рис 2а. Приравнивая выражения для внешней характеристики эквивалентного источника $U_{s1}(I)$ (1) и ВАХ двухполюсника $U_3(I)$ (4), замещающего НР, получим уравнение для определения тока

$$U_{s1}(I) = U_3(I) \quad \rightarrow \quad 120 - 2I = 77.8 + 3.4I \quad \rightarrow \quad I_{\cdot 0} = 7.8$$

Начальная точка переходного процесса $[7.8, 104.5]$ показана на рис.3.

Из полученных начальных условий находим амплитуды свободного тока и свободного напряжения

$$u_C(0) = 240 = 200 + A_1 \quad \rightarrow \qquad A_1 = 40$$

$$i(0) = 7.8 = 0.4 + B_1 \quad \rightarrow \qquad B_1 = 7.4$$

Напряжение на емкости и ток НР на первом этапе переходного процесса изменяются по закону

$$u_C(t) = 200 + 40e^{-t/\tau_1} \qquad i(t) = 0.4 + 7.4e^{-t/\tau_1} \quad (7)$$

Момент окончания первого этапа находим из условия достижения током точки излома ВАХ

$$i(t_1) = 3 = 0.4 + 7.4e^{-t_1/\tau_1} \;\rightarrow\; t_1 = \tau_1 \cdot \ln(7.4/2.6) = 5.358\,мс \qquad (8)$$

В момент t_1 напряжение на емкости принимает значение $u_C(t_1) = 214.1$. Это значение является независимым начальным условием для второго этапа переходного процесса.

Второй этап переходного процесса на интервале $t_1 \le t \le t_2$ при изменении тока НР в диапазоне $3 \le i \le 7.8$

На интервале изменения тока $3 \le i \le 7.8$ НР заменяется двухполюсником с ВАХ

$$U_2(I) = E_2 + R_{d2} I\,, \qquad E_2 = U_1 + R_{d2} I_1 = 46\,, \qquad R_{d2} = 14$$

Для напряжения на емкости и тока НР имеем

$$u_C(t) = u_{ct}(t) + U_{cs}\,, \quad u_{ct}(t) = A_2 \cdot e^{-t/\tau_2}\,, \; U_{Cs2} = const \qquad t' = t - t_1$$

$$i(t) = i_t(t) + I_s\,, \quad u_t(t) = B_2 \cdot e^{-t/\tau_2}\,, \; I_s = const$$

Для вычисления времени релаксации $\tau_2 = CR_{e2}$ по расчетной схеме для свободных токов найдем эквивалентное сопротивление пассивного $R-$двухполюсника относительно его точек подключения к емкости C в соответствии со схемой на рис.5б.

$$R_{\cdot 13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 2\,, \quad R_{13d2} = R_{13} + R_{d2} = 16\,, \quad R_{e2} = \frac{R_{13d2} R_2}{R_2 + R_{13d2}} = 13.8\,, \quad \tau_2 = CR_{e2} = 13.8\,мс$$

Установившееся значение напряжения и тока определяются по формулам (8) и (9) с учетом параметров формулы (10) : $U_{Cs} = 176.3$, $I_s = 0.64$.

Находим амплитуды свободных составляющих A_2, B_2 из начальных условий

$$u_C(0) = 214.1 = 176.3 + A_2 \quad \rightarrow \qquad A_2 = 37.8$$

$$i(0) = 3 = 0.64 + B_2 \quad \rightarrow \qquad B_2 = 2.36$$

Напряжение на емкости и ток НР на втором этапе переходного процесса изменяются по закону

$$u_C(t) = 176.3 + 37.8e^{-t/\tau_2} \qquad i(t) = 0.64 + 2.36e^{-t/\tau_2} \quad (9)$$

Момент окончания второго этапа находим из условия достижения током следующей точки излома ВАХ

$$i(t'=0) = 1 = 0.64 + 2.36e^{-t_2/\tau_2} \rightarrow t_2' = \tau_{21} \cdot \ln(2.36/0.36) = 26\,мс,$$

$$t_{\cdot 2} = t_1 + t_2' = 31.358 \quad (10)$$

В момент t_2 напряжение на емкости принимает значение $u_C(t_2) = 182.1$.

Третий этап переходного процесса на интервале $t_2 \le t \le t_s$ при изменении тока НР в интервале $0.74 \le i \le 7.8$.

На последнем интервале НР заменяется двухполюсником с ВАХ

$$U_1(I) = R_{d1}I, \qquad R_{d1} = 60 \quad (11)$$

В интервале времени $t = t'' - t_2$ напряжение на емкости и ток НР ищутся в виде

$$u_C(t) = u_{ct}(t) + U_{cs}, \quad u_{ct}(t) = A_3 \cdot e^{-t/\tau_3}, \; U_{Cs3} = const \quad t'' = t - t_2$$

$$i(t) = i_t(t) + I_s, \quad i_t(t) = B_3 \cdot e^{-t/\tau_3}, \; I_{s3} = const$$

Для вычисления времени релаксации $\tau_3 = CR_{e3}$ найдем эквивалентное сопротивление пассивного R – двухполюсника относительно его точек подключения к емкости C в соответствии со схемой на рис.5б.

$$R_{\cdot 13} = \frac{R_1R_3}{R_1+R_3} = 2, \quad R_{13d3} = R_{13} + R_{d3} = 62, \quad R_{e3} = \frac{R_{13d3}R_2}{R_2 + R_{13d3}} = 38.2, \quad \tau_2 = CR_{e2} = 38.2\,мс$$

Установившееся значение напряжения и тока определяются по формулам (8) и (9) с учетом параметров формулы (10): $U_{Cs} = 166$, $I_s = 0.74$.

Находим амплитуды свободных составляющих A_3, B_3 из начальных условий

$$u_C(0) = 182.1 = 166 + A_3 \rightarrow \qquad A_3 = 16.1$$

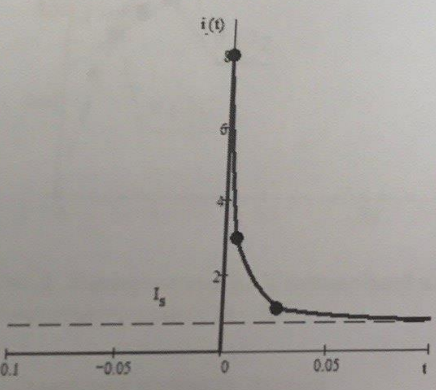
$$i(0) = 1 = 0.74 + B_3 \quad \rightarrow \qquad B_3 = 0.26$$

Напряжение на емкости и ток НР на третьем этапе переходного процесса изменяются по закону

$$u_C(t) = 166 + 16.1e^{-t/\tau_3} \qquad i(t) = 0.74 + 0.26e^{-t/\tau_3} \quad (12)$$

Графики переходного процесса показаны на рис. 7, на котором точками обозначены границы интервалов, которым соответствуют различные схемы замещения НР.

а)



б)

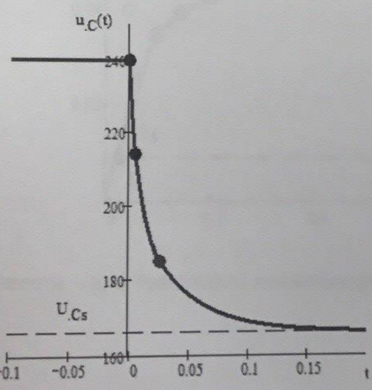


Рис. 7. Изменение тока НР – а) и напряжения емкости – б) во время переходного процесса

Расчет переходного процесса в цепях с нелинейным накопительным элементом

Схема цепи и вебер-амперная характеристика нелинейной индуктивности показана на рис.8. График характеристики $\psi(i)$ построен по табличным данным.

$$I_e = [0 \quad 0.06 \quad 0.095 \quad 0.145 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.5 \quad 0.8]^T$$

$$\psi_e = [0 \quad 2{,}6 \quad 3.45 \quad 3{,}94 \quad 4{,}3 \quad 4.7 \quad 5.3 \quad 6.1]^T \cdot 10^{-2}$$

Расчет производится при следующих параметрах элементов цепи:

$E = 120,\ R_1 = 120,\ R_3 = 40,\ R_2 = 1$

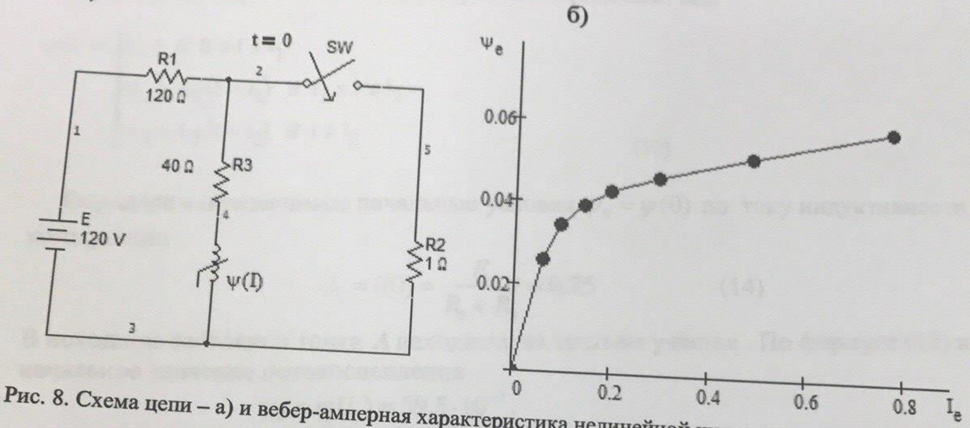


Рис. 8. Схема цепи – а) и вебер-амперная характеристика нелинейной индуктивности – б)

Линеаризация ВАХ

Аппроксимируем ВАХ индуктивности тремя отрезками прямых линий, как показано на рис. 9-а.

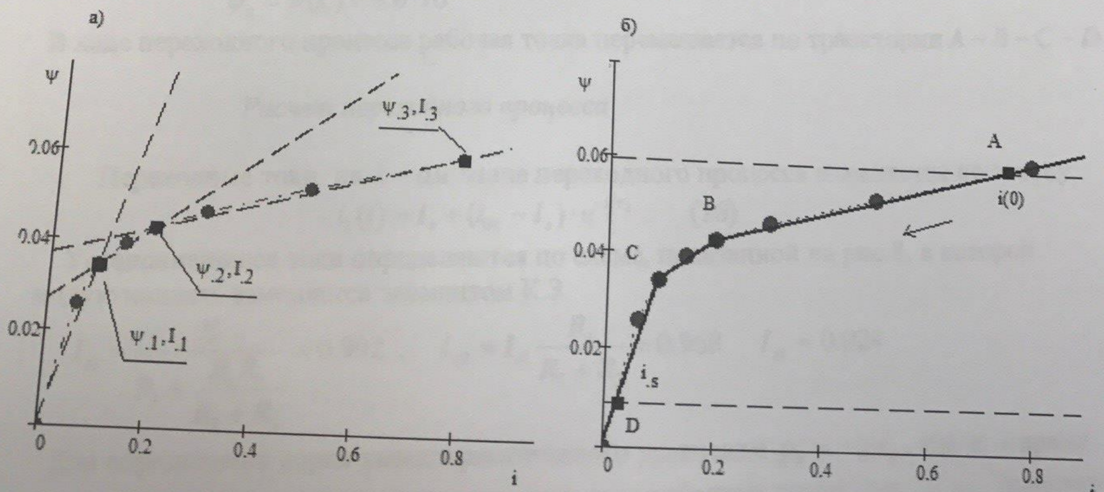


Рис.9. Линеаризация ВАХ нелинейной индуктивности – а) и траектория движения рабочей точки во время переходного процесса – б)

Уравнения прямых линий

$$y_j(x) = y_{j-1} + k_j(x - x_{j-1})$$

где j – номер отрезка прямой, x_{j-1}, y_{j-1} – координаты точки излома, соответствующей началу отрезка, k_j – угловой коэффициент

$$k_j = \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}$$

Запишем координаты начальных и конечных точек отрезков и динамические индуктивности ВАХ, соответствующие линеаризованным участкам

$$[0,0] \qquad [\psi_1 = 0.0345, I_1 = 0.095], L_1 = 0.363$$

$$[\psi_2 = 0.043, I_2 = 0.2], L_2 = 0.081 \qquad [\psi_3 = 0.061, I_3 = 0.8], L_3 = 0.03$$

Уравнение линеаризованной характеристики принимает вид

$$\psi(i) := \begin{cases} L_1 \cdot i & \text{if } 0 \le i \le I_1 \\ \psi_1 + L_2 \cdot (i - I_1) & \text{if } I_1 \le i \le I_2 \\ \psi_2 + L_3 \cdot (i - I_2) & \text{if } i \ge I_2 \end{cases} \qquad (13)$$

Определим независимые начальные условия $\psi_0 = \psi(0)$ по току индуктивности до коммутации

$$i_0 = i(0) = \frac{E}{R_1 + R_3} = 0.75 \qquad (14)$$

В исходном состоянии точка A находится на третьем участке . По формуле (13) находим начальное значение потокосцепления

$$\psi_0 = \psi(i_0) = 59.5 \cdot 10^{-3}.$$

В установившемся режиме ток индуктивности равен

$$i_s = E \frac{R_{23}}{R_1 + R_{23}} \cdot \frac{1}{R_3}, \quad R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}, \quad i_s = 24 \cdot 10^{-3} \qquad (15)$$

Потокосцепление в точке D (рис.9-б) определяется по формуле (13)

$$\psi_s = \psi(i_s) = 8.8 \cdot 10^{-3}$$

В ходе переходного процесса рабочая точка перемещается по траектории $A - B - C - D$.

Расчет переходного процесса

Переходные токи на $k-ом$ этапе переходного процесса изменяется по закону

$$i_k(t) = I_s + (i_{0k} - I_s) \cdot e^{-t/\tau_k} \qquad (16)$$

Установившиеся токи определяются по схеме, показанной на рис.8, в которой индуктивность заменяется элементом К.З.

$$I_{s1} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = 0.992, \quad I_{s2} = I_{s1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.968 \quad I_{sL} = 0.024$$

Для определения корня характеристического уравнения $p_k = -1/\tau_k$, где τ_k – время релаксации, используется расчетная схема для свободных токов (рис.10-а). Зависимые начальные условия $i_k(0)$ находятся по расчетной схеме для момента времени $t = 0+$ (рис. 10-б).

Время релаксации $\tau_k = L_k / R_e$ определяется динамической индуктивностью L_k и эквивалентным сопротивлением резистивной цепи R_e относительно точек подключения нелинейного L – элемента

$$R_e = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 41$$

Время τ зависит от того, какому из линеаризованных участков ВАХ соответствует тот или иной этап переходного процесса:

$\tau_1 = L_3/R_e = 0.732 \cdot 10^{-3}$, $\quad 0 \le t \le t_1$, $\quad i_o \ge i \ge I_2 = I_B = 0.2$

$\tau_2 = L_2/R_e = 1.97 \cdot 10^{-3}$, $\quad t_1 \le t \le t_2$, $\quad I_2 \ge i \ge I_1 = I_C = 0.099$

$\tau_3 = L_1/R_e = 8.86 \cdot 10^{-3}$, $\quad t \ge t_2$, $\quad I_1 \ge i \ge I_D = I_s = 0.024$

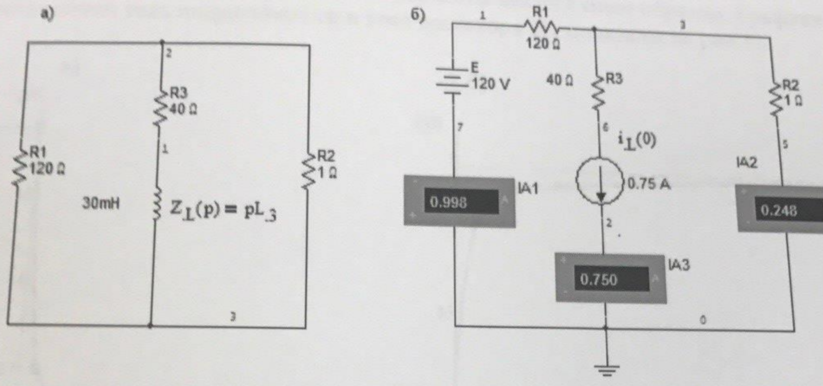


Рис.10. Расчетная схема для свободных токов – а) и определения зависимых начальных условий – б)

Из приведенных данных следует, что скорость протекания переходного процесса изменяется в зависимости от положения рабочей точки на ВАХ нелинейной индуктивности.

Начальные значения токов резисторов R_1 и R_2 находятся по схеме для момента времени $t = 0+$. В этой схеме независимые условия учтены источником тока i_{0k}

$$i_{20k} = i_{2k}(0) = \frac{E}{R_1 + R_2} - i_{0k} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad i_{10k} = i_{k1}(0) = i_{0k} + i_{20k}$$

Запишем начальные значения тока индуктивности на различных этапах переходного процесса

$i_{01} = i_L(t = 0+) = 0.75$, $\quad 0 \le t \le t_1$

$i_{02} = i_L(t' = 0+) = I_2 = 0.2$, $\quad t' = t - t_1 \quad t_1 \le t \le t_2 \quad 0 \le t' \le t_2'$

$i_{03} = i_L(t'' = 0+) = I_1 = 0.099 \quad t'' = t - t_2 = t' - t_2' \quad t \ge t_2$

Моменты перехода рабочей точки с одного участка на другой определяются из условия непрерывности тока индуктивности

$$I_s + (i_0 - I_s)e^{-t_1/\tau_1} = I_2 \quad \rightarrow \quad t_1 = \tau_1 \cdot \ln\frac{i_0 - I_s}{I_2 - I_s} = 1.04 \cdot 10^{-3}$$

$$I_s + (I_1 - I_s)e^{-(t_2 - t_1)/\tau_2} = I_1 \quad \rightarrow \quad t_2 = t_1 + \tau_2 \cdot \ln\frac{I_2 - I_s}{I_1 - I_s} = 2.84 \cdot 10^{-3}$$

Закон изменения тока индуктивности можно представить в виде

$$i_L(t) := \begin{cases} I_{Ls} + A_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}} & \text{if } 0 \le t \le t_1 \qquad A_1 = i_L(0) - I_s \\ I_{Ls} + A_2 \cdot e^{\frac{-(t-t_1)}{\tau_2}} & \text{if } t_1 \le t \le t_2 \qquad A_2 = I_2 - I_s \\ I_{Ls} + A_3 \cdot e^{\frac{-(t-t_2)}{\tau_3}} & \text{if } t \ge t_2 \qquad A_3 = I_1 - I_s \end{cases}$$

Зависимости токов других ветвей записываются аналогичным образом. Графики зависимостей тока индуктивности и тока резистора R_2 показаны на рис.11.

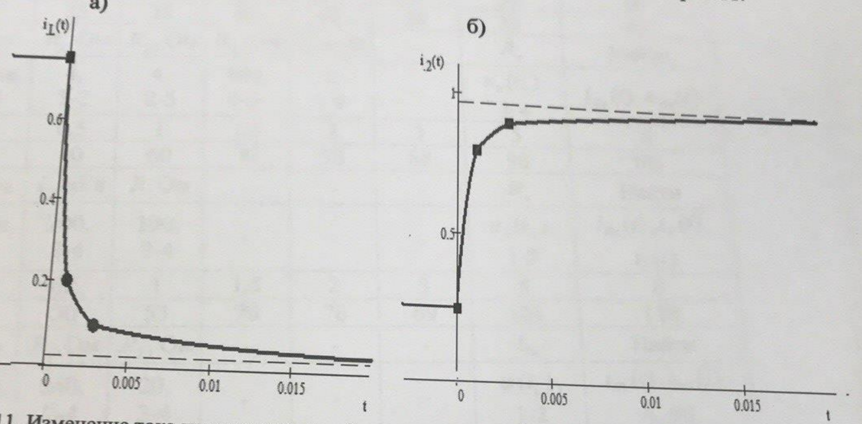


Рис.11. Изменение тока индуктивности – а) и тока резистора R_2 - б) во время переходного процесса.

Из графиков видно, что аппроксимация ВАХ нелинейной индуктивности тремя отрезками прямых линий дает приемлемо плавную картину переходного процесса.

Таблица вариантов заданий.

Таблица 1.

Исходные данные для расчета

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	U, В	Ключ	L, мГн	R, Ом	-	-	-	R_n	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 1-2	400, 3-4	190, 3-4	-	-	-	$u(i)$, 2-3	$i_{Rn}(t), i_L(t), i_R(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	4	8
	u, В	0	30	52	68	80	92	106	120
						-	-		

2	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	$U_{C(0)}$, В			C_n	Найти
	180, 1-4	зам-ся, 1-2	120, 2-3	60, 3-4	10	-	-	$q(u)$, 3-4	$i_{R_1}(t)$, $i_{R_2}(t)$, $u_{R_2}(t)$
	u, В	0	5	10	15	20	30	50	80
	q, мК	0	1,5	2,7	3,5	4	4,5	5,3	6
3	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	$U_{C(0)}$, В	C_n	Найти
	150, 1-5	зам-ся, 2-3	4, 1-2	12, 2-5	12, 1-4	4, 4-5	10	$q(u)$, 3-4	$q(t)$, $u_c(t)$, $i_c(t)$
	u, В	0	5	10	15	20	30	50	80
	q, мК	0	25	35	40	43	48	55	63
4	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	С,мкФ	-	R_n	Найти
	240, 1-5	зам-ся, 2-3	4, 1-2	4, 2-5	100, 4-5-	1, 1-4-	-	$u_n(i_n)$, 3-4	$i_{Rn}(t)$, $u_{Rn}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	40	60	70	78	88	98	105
5	U, В	Ключ	L, мГн	R, Ом	-	-	-	R_n	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	200, 3-4	190, 2-4	-	-	-	$u_n(i_n)$, 1-2	$i_{Rn}(t)$, $i_R(t)$, $i_L(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	30	53	70	78	89	104	118
6	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	-	-	-	L_n	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	240, 2-4	20, 3-4	-	-	-	$\psi(i_n)$, 1-2	$i_{R1}(t)$, $i_{R2}(t)$, $i_{Ln}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	ψ, Вб	0	0,24	0,34	0,38	0,42	0,45	0,49	0,55
7	U, В	Ключ	R, Ом	С,мкФ	$U_{C(0)}$, В	-	-	R_n	Найти
	100, 1-4	зам-ся, 2-3	120, 2-4	0,25, 3-4	-20	-	-	$u_n(i_n)$, 1-2	$i_{Rn}(t)$, $u_c(t)$ $i_R(t)$
	i, А	0	0,5	1,0	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	40	66	80	88	100	115	126
8	U, В	Ключ	R_1,Ом	R_2,Ом	-	-	-	L_n	Найти
	180, 1-4	зам-ся, 1-2	30, 2-3	60, 3-4	-	-	-	$\psi(i_L)$, 3-4	$i_{R1}(t)$, $i_{R2}(t)$ $\psi(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	ψ, Вб	0	0,25	0,33	0,4	0,43	0,47	0,53	0,57
9	U, В	Ключ	R_1,Ом	R_2,Ом	R_3,Ом	R_4,Ом	$U_{C(0)}$, В	C_n	Найти
	60, 1-4	зам-ся, 4-5	12, 1-2	12, 1-3	12, 2-3	12, 2-4-	- 30	$q(U_C)$, 3-5	$q(t)$, $u_c(t)$, $i_c(t)$
	i, А	0	5	10	15	20	30	50	80
	q, мК	0	25	35	40	43	48	55	63
10	U, В	Ключ	R_1,Ом	R_2,Ом	R_3,Ом	С,мкФ -	-	R_n	Найти

	130, 1-4	зам-ся, 4-5	12, 1-2	6, 2-4	100, 1-3	1, 2-3	-	$u_н(i_н)$, 3-5	$i_{Rн}(t)$, $u_{Rн}(t)$
	i, А	0	1	1,5	2,0	2,5	3	5	8
	u, В	0	52	7	80	86	92	106	120
11	U, В	Ключ	L, мГн	R, Ом	-	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	25, 3-4	4, 1-2	-	-	-	$u_н(i_н)$, 2-4	$i_R(t)$, $i_L(t)$, $i_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	30	52	68	78	90	104	120
12	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	-	-	-	$C_н$	Найти
	80, 1-4	зам-ся, 2-3	150, 1-2	10, 3-4	-	-	-	$q(U_C)$, 2-4	$i_{R1}(t)$, $i_{R2}(t)$, $q_c(t)$
	i, А	0	5	10	15	20	30	50	80
	q, мК	0	25	35	40	43	45	50	5,6
13	U, В	Ключ	L, мГн	R, Ом	-	-	-	$R_н$	Найти
	100, 1-4	зам-ся, 2-3	25, 1-2	4, 3-4	-	-	-	$u_н(i_н)$, 2-4	$i_R(t)$, $i_L(t)$, $i_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3	5	8
	u, В	0	40	60	70	80	88	97	102
14	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	-	-	-	$L_н$	Найти
	18, 1-4	зам-ся, 2-3	3, 1-2	6, 2-4	-	-	-	$\psi(i)$, 3-4	$i_{R1}(t)$ $i_{R2}(t)$ $\psi(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	ψ, мВб	0	25	35	41	44	48	52	58
15	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	L, мГн -	-	$R_н$	Найти
	240, 1-4	зам-ся, 4-5	6, 1-2	6, 2-4	100, 1-3	100, 2-3	-	$u_н(i_н)$, 3-5	$i_{Rн}(t)$, $u_{Rн}(t)$
	i, А	0	1	1,5	2,0	2,5	3	5	8
	u, В	0	52	70	80	86	92	106	120
16	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	L, мГн -	-	$R_н$	Найти
	240, 1-5	зам-ся, 2-3	4, 1-2	4, 2-5	100, 4-5	100, 1-4	-	$u_н(i_н)$, 3-4	$i_{Rн}(t)$, $u_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	40	60	70	78	88	98	105
17	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	-	$L_н$	Найти
	60, 1-4	зам-ся, 4-5	12, 1-2	12, 1-3	12, 2-3	12, 2-4-	-	$\psi(i_н)$, 3-5	$i_{Rн}(t)$, $\psi_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1,0	1,5	2,0	4	6	8
	ψ, мВб	0	25	35	40	44	50	54	58
18	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	C_1, мкФ	C_2, мкФ	-	$R_н$	Найти
	120, 1-5	зам-ся, 2-3	120, 1-4	120, 2-5	2,42, 1-2	2,42, 4-5	-	$u_н(i_н)$, 3-4	$i_{Rн}(t)$, $u_{Rн}(t)$
	i, А	0	1	1,5	2	2,5	3	5	8

	u, В	0	56	75	85	92	97	108	120
19	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	$U_{C(0)}$, В	-	-	$C_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	40, 1-2	80, 2-4	-10	-	-	$q(U_C)$, 3-4	$i_{R1}(t)$, $i_{R2}(t)$, $q_{Cн}(t)$
	i, А	0	5	10	15	20	30	50	80
	q, мК	0	2,5	3,5	4	4,3	4,6	5,1	5,6
20	U, В	Ключ	R, Ом	С, мкФ	-	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	80, 1-2	0,4, 2-4	-	-	-	$u_н(i_н)$, 3-4	$i_R(t)$, $i_{Rн}(t)$, $u_C(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	26	48	62	3	86	105	125
21	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	L, мГн -	-	$R_н$	Найти
	120, 1-5	зам-ся, 1-2	100, 1-3	100, 3-5	50, 3-4	100, 4-5	-	$u_н(i_н)$, 2-4	$i_{Rн}(t)$, $u_{Rн}(t)$
	i, А	0	1	1,5	2	2,5	3	5	8
	u, В	0	56	75	85	92	97	108	120
22	U, В	Ключ	R_1, Ом	R_2, Ом	L_1, мГн	L_2, мГн	-	$R_н$	Найти
	120, 1-5	зам-ся, 1-2	12, 3-5	12, 2-4	100, 2-3	100, 4-5-	-	$u_н(i_н)$, 3-4	$i_{Rн}(t)$, $i_{R1}(t)$ $i_{L1}(t)$
	i, А	0	1	1,5	2	2,5	3	5	8
	u, В	0	60	77	87	93	98	109	120
23	U, В	Ключ	R, Ом	С, мкФ	-	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 3-4	4, 1-2	4, 2-3	-	-	-	$u_н(i_н)$, 2-3	$i_R(t)$, $i_C(t)$, $i_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2,0	3	5	8
	u, В	0	40	64	80	88	100	115	132
24	U, В	Ключ	L, мГн	R, Ом	-	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	330, 1-2	200, 2-4	-	-	-	$u_н(i_н)$, 3-4	$i_L(t)$, $i_R(t)$, $i_{Rн}(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	24	46	60	72	85	103	122
25	U, В	Ключ	R, Ом	С, мкФ	-	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 1-2	120, 3-4	1,54, 3-4	-	-	-	$u_н(i_н)$, 2-3	$i_{Rн}(t)$, $i_R(t)$, $u_C(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8
	u, В	0	25	46	62	74	88	104	120
26	U, В	Ключ	R, Ом	С, мкФ	$U_{C(0)}$, В	-	-	$R_н$	Найти
	120, 1-4	зам-ся, 2-3	4, 1-2	4, 3-4	-20	-	-	$u_н(i_н)$, 2-4	$i_{Rн}(t)$, $i_R(t)$, $u_c(t)$
	i, А	0	0,5	1	1,5	2	3	5	8