

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ (КПІ)

Кафедра теоретичної електротехніки

Лабораторна робота №04_TR_03

з дисципліни "Основи електротехніки та електроніки"

**"Дослідження імпульсних і перехідних характеристик
електричних кіл"**

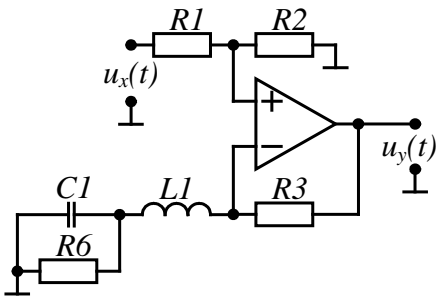
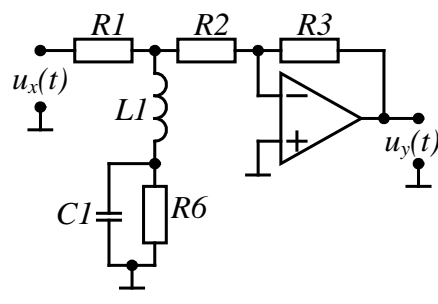
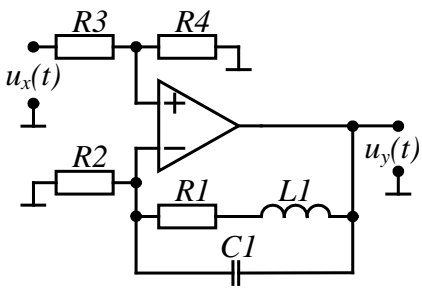
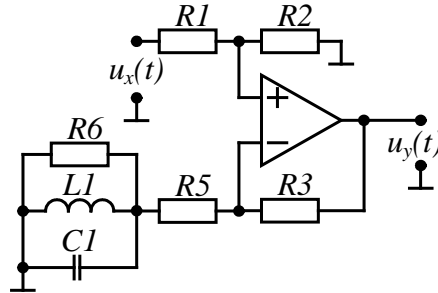
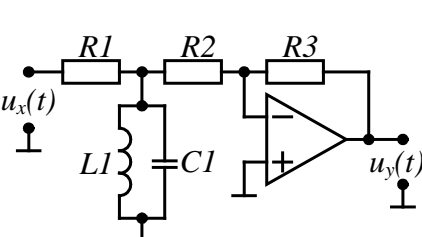
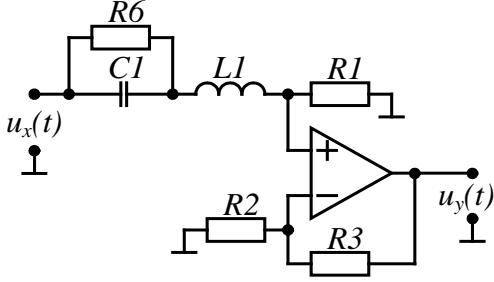
Київ —20__

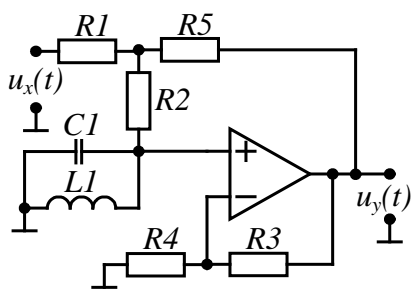
Мета роботи: Оволодіти операторним методом аналізу і отримати навички експериментального дослідження перехідних процесів в електричних колах другого порядку

Послідовність виконання

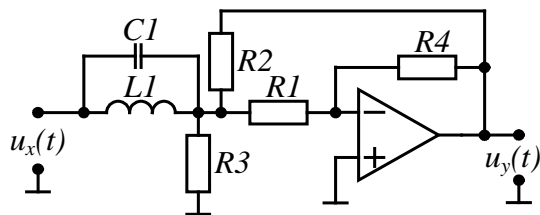
Вибрати електричне коло відповідно до заданого викладачем варіанту N , який визначається номером студента у журналі групи.

Варіанти індивідуального завдання

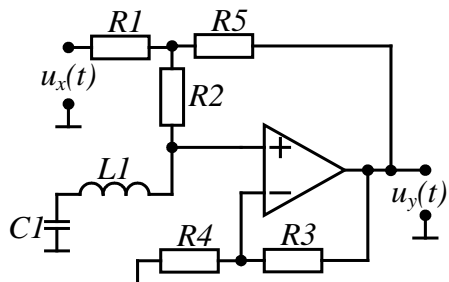
 <p>Варіант 1</p>	 <p>Варіант 2</p>
 <p>Варіант 3</p>	 <p>Варіант 4</p>
 <p>Варіант 5</p>	 <p>Варіант 6</p>



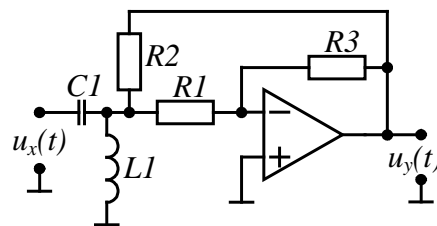
Вариант 7



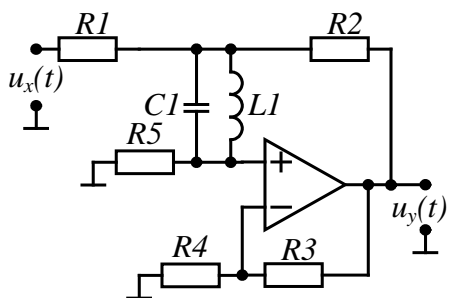
Вариант 8



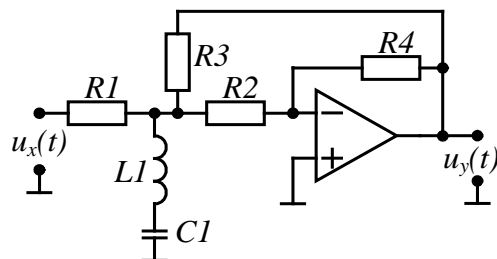
Вариант 9



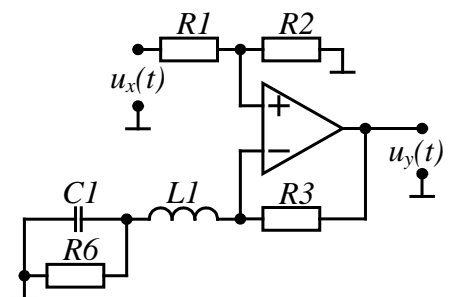
Вариант 10



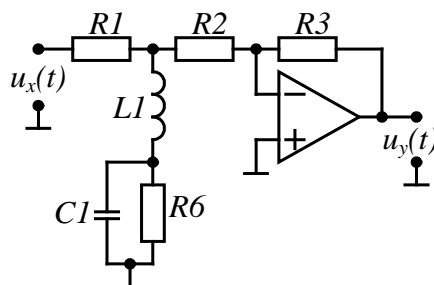
Вариант 11



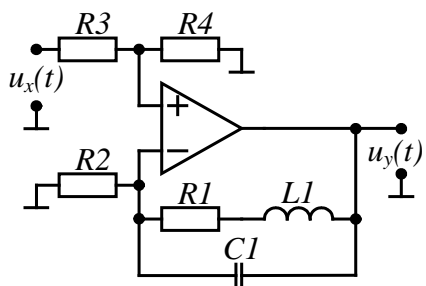
Вариант 12



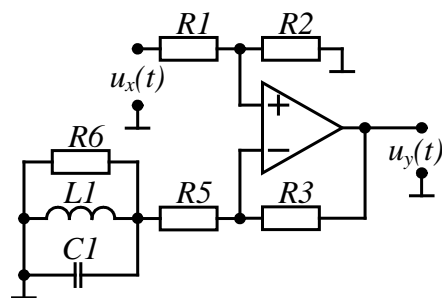
Вариант 13



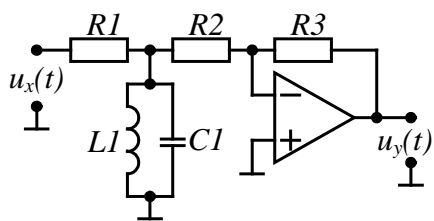
Вариант 14



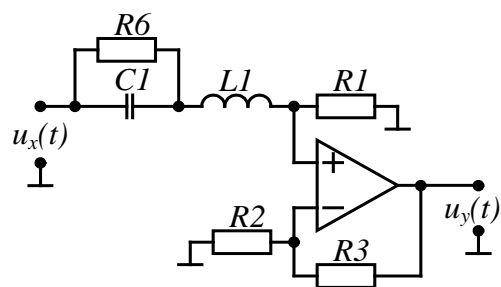
Вариант 15



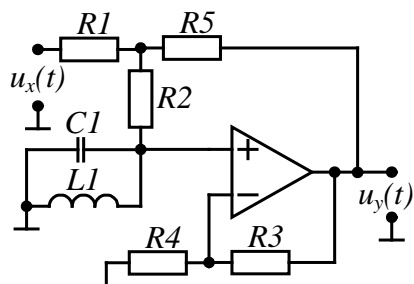
Вариант 16



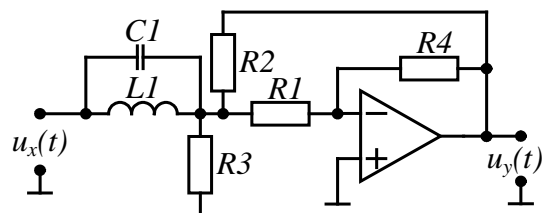
Варіант 17



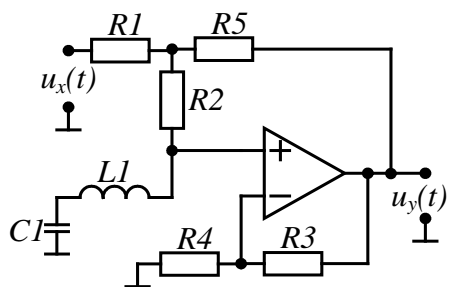
Варіант 18



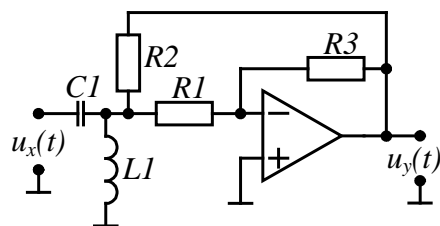
Варіант 19



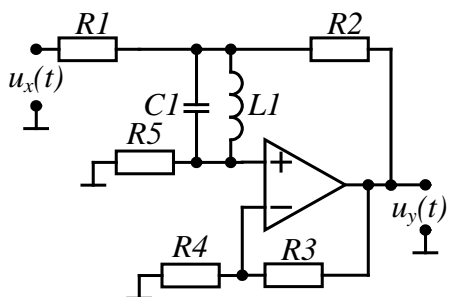
Варіант 20



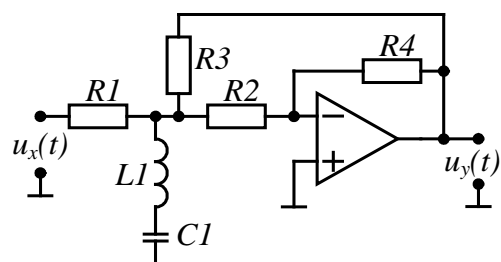
Варіант 21



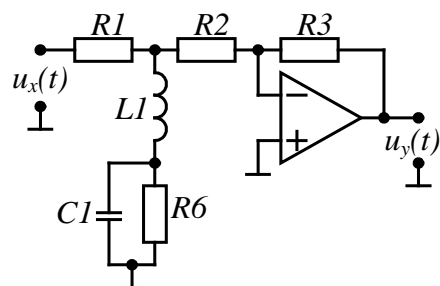
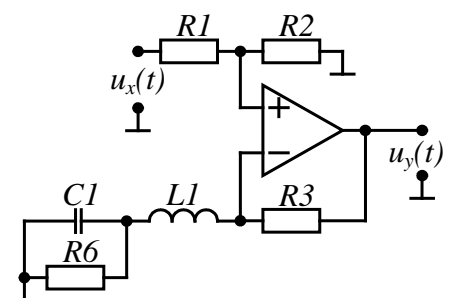
Варіант 22

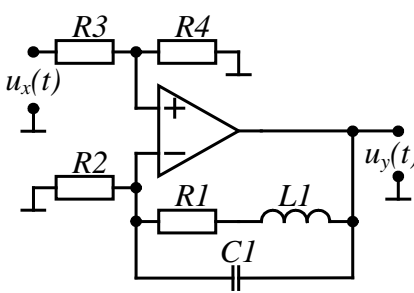
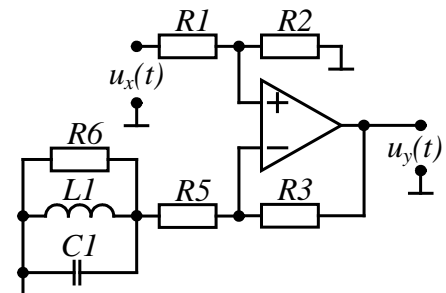
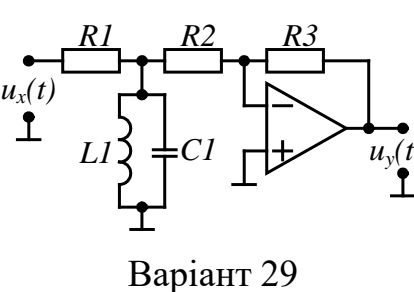
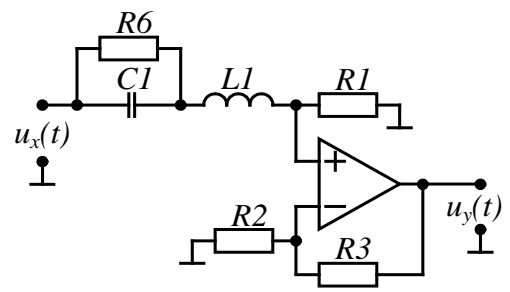
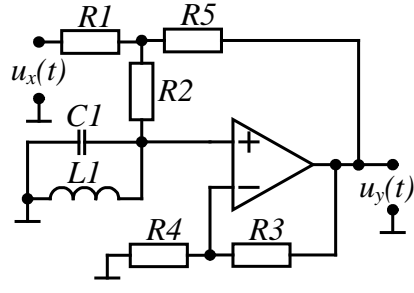
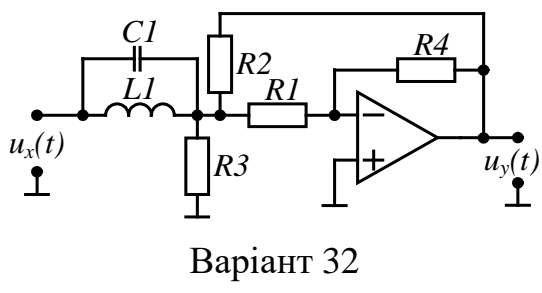


Варіант 23



Варіант 24



Варіант 25	Варіант 26
 <p>Варіант 27</p>	 <p>Варіант 28</p>
 <p>Варіант 29</p>	 <p>Варіант 30</p>
 <p>Варіант 31</p>	 <p>Варіант 32</p>

Задати параметри елементів заданого електричного кола відповідно до свого варіанта:

$R1 = 17\Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.012 \cdot \text{mH}$ $C1 = 170.219 \cdot \text{nF}$	$R1 = 19\Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.025 \cdot \text{mH}$ $C1 = 69.805 \cdot \text{nF}$
--	---

Варіанти 1,11, 21,31	Варіант 2, 12, 22,32
----------------------	----------------------

$R1 = 21\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.039 \cdot \text{mH}$ $C1 = 38.866 \cdot \text{nF}$ Варіант 3,13, 23,33	$R1 = 23\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.052 \cdot \text{mH}$ $C1 = 24.714 \cdot \text{nF}$ Варіант 4,14, 24,34
--	--

$R1 = 25\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.066 \cdot \text{mH}$ $C1 = 16.977 \cdot \text{nF}$ Варіант 5,15, 25,35	$R1 = 27\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.081 \cdot \text{mH}$ $C1 = 12.28 \cdot \text{nF}$ Варіант 6,16, 26,36
--	---

$R1 = 29\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.095 \cdot \text{mH}$ $C1 = 9.224 \cdot \text{nF}$ Варіант 7,17, 27,37	$R1 = 31\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.11 \cdot \text{mH}$ $C1 = 7.131 \cdot \text{nF}$ Варіант 8,18, 28,38
---	--

$R1 = 33\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.124 \cdot \text{mH}$ $C1 = 5.641 \cdot \text{nF}$ Варіант 9,19, 29,39	$R1 = 35\ \Omega$ $R2 := 2 \cdot R1$ $R3 := 3 \cdot R1$ $R4 := 4 \cdot R1$ $R5 := R1$ $R6 := 6 \cdot R1$ $L1 = 0.139 \cdot \text{mH}$ $C1 = 4.547 \cdot \text{nF}$ Варіант 0,10, 20,30
---	---

Розрахункова частина

1. Побудувати операторну еквівалентну схему заданого кола
2. Вважаючи, що зображення вхідного сигналу задане, визначити:
зображення вихідної напруги $U_y(s)$;
зображення напруги на ємнісному елементі $U_{C1}(s)$;
зображення струму в індуктивному елементі $I_{L1}(s)$;
3. За знайденими зображеннями $U_y(s)$, $U_{C1}(s)$, $I_{L1}(s)$ і визначити операторні передавальні функції: $K_y(s) = \frac{U_y(s)}{U_x(s)}$, $K_U(s) = \frac{U_{C1}(s)}{U_x(s)}$,
 $G_{IL}(s) = \frac{I_{L1}(s)}{U_x(s)}$.
4. За допомогою теореми розкладання знайти оригінали, тобто імпульсну і перехідну характеристики $g_y(t) = L^{-1}[K_y(s)]$, $h_y(t) = L^{-1}\left[\frac{K_y(s)}{s}\right]$, $g_U(t) = L^{-1}[K_U(s)]$, $h_U(t) = L^{-1}\left[\frac{K_U(s)}{s}\right]$, $g_{IL}(t) = L^{-1}[G_{IL}(s)]$, $h_{IL}(t) = L^{-1}\left[\frac{G_{IL}(s)}{s}\right]$, для чого:
 - визначити і обчислити корені знаменника;
 - знайти похідну від знаменника по s ;
 - підставити значення коренів у чисельник і похідну від знаменника і обчислити значення коефіцієнтів перехідної характеристики g_1, g_2, h_1, h_2 .
5. Записати вирази для $g_y(t)$, $h_y(t)$, $g_U(t)$, $h_U(t)$, $g_{IL}(t)$, $h_{IL}(t)$

Експериментальна частина

I. Дослідження перехідної характеристики за допомогою осцилографа

1. Побудувати симуляторами *Electronic Workbench* або *Multisim* електричне коло, відповідно до свого варіанту. Як приклад, на рис. TR-03-1 наведене електричне коло одного з варіантів.

На рис. TR-03-1 показані:

- А) Функціональний генератор (рис. TR-03-2), призначений для

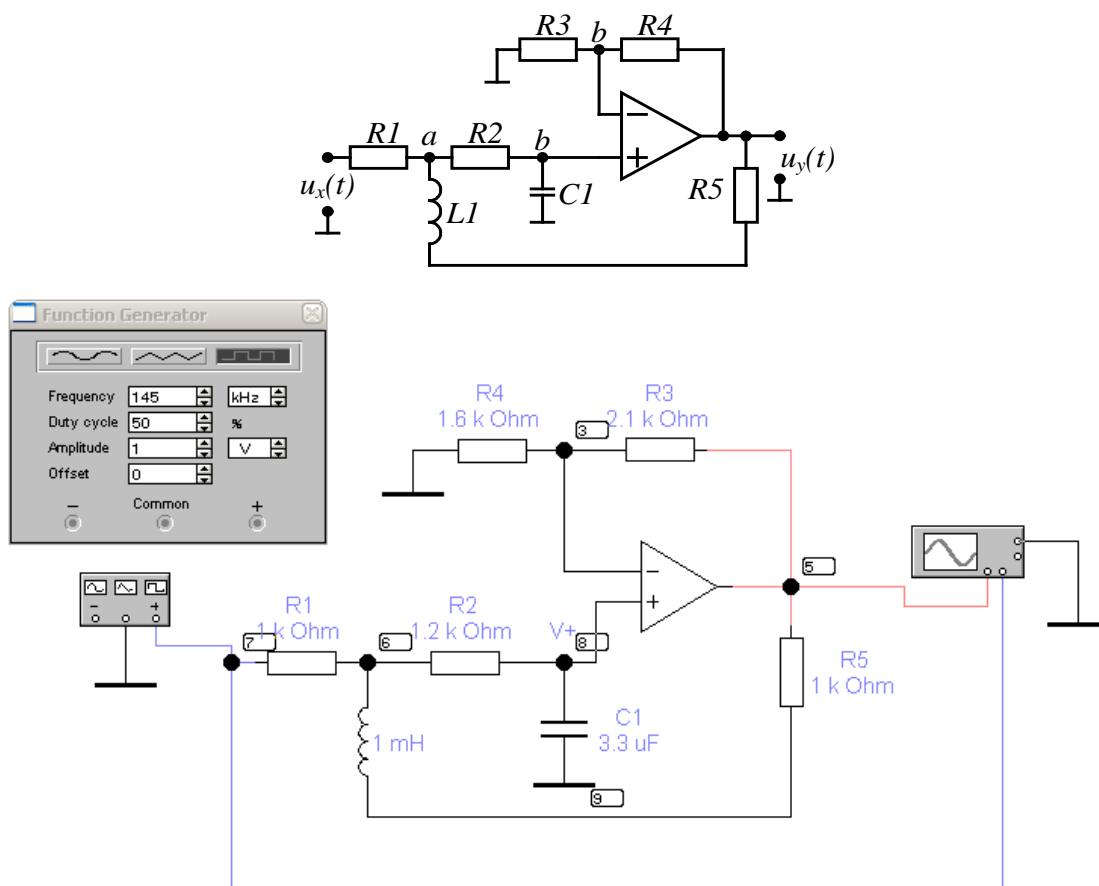


Рис. TR-03-1

генерування послідовності імпульсів синусоїдної, трикутної і прямокутної форми. Функціональний генератор знаходиться на вкладці *Instrument* (другий зліва);

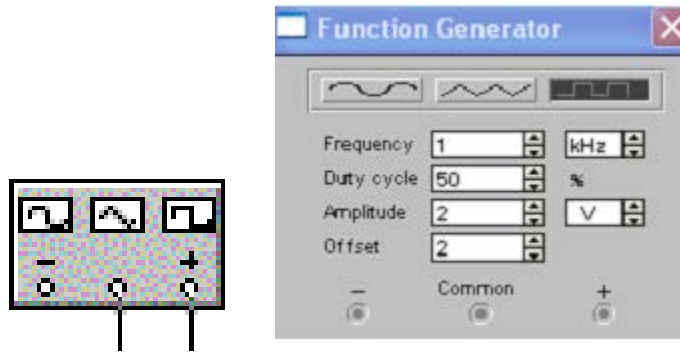


Рис. TR-03-2

• Б)Осцилограф (рис. TR-03-3), призначений для відображення графіків величин. На рис Осцилограф знаходиться на вкладці *Instrument* (третій зліва);

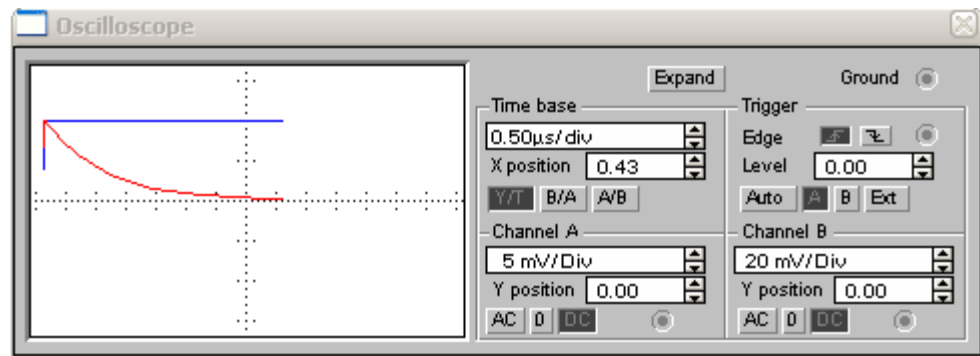
- R_1, \dots, R_6 — резистори;
- L_1 — індуктивний елемент;
- C_1 — конденсатор;

2.Задати значення параметрів елементів кола (R , L , C) відповідно до заданого варіанту.

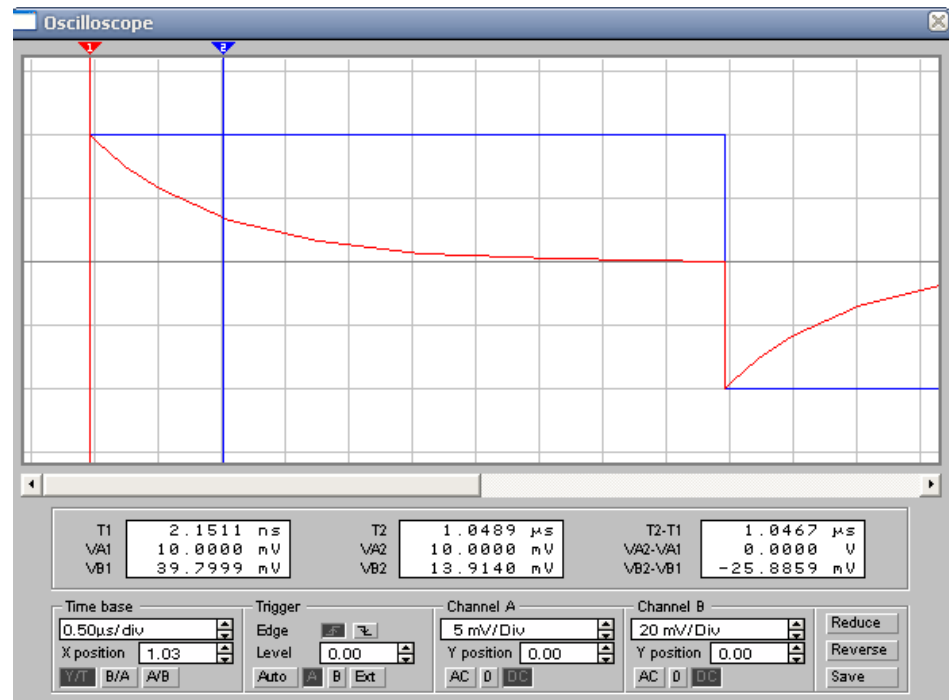
3.Задати прямокутну форму коливань на керівній панелі функціонального генератора .

4.Задати частоту (Frequency) прямокутної форми коливань на керівній панелі функціонального генератора як величину, обернену до періоду коливань, тобто $f=1/T$. Приблизне значення періоду коливань T оцінюється за такою формулою $T \approx 3\tau_m$. Уточнене значення періоду коливань T потрібно встановити за допомогою вікна Time base осцилографа таке, щоб на його екрані розміщувалося 1,5...2 періоди коливань.

5.Задати амплітуду (Amplitude) і зміщення відносно нуля (Offset) прямокутного коливання у відповідності з формою вхідного сигналу $u_x(t)$. Наприклад, якщо вхідний сигнал має форму і $U_0=13\text{mV}$, то діапазон сигналу від максимального $2U_0$ до мінімального $-3U_0$ дорівнює $5U_0=5 \times 13\text{mV}=65\text{mV}$. Тоді амплітуду (Amplitude) функціонального генератора слід задати $65\text{mV}/2=32,5\text{mV}$, а зміщення відносно нуля (Offset) задати $-U_0/2=-13\text{mV}/2=-6,5\text{mV}$



a




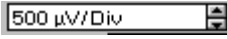
б

Рис. TR-03-3

6. Запустити процес моделювання, натиснувши на кнопку I/O у верхньому правому куті екрану.
7. За допомогою осцилографа зняти графіки струму у колі та напруг на вході кола, а також на резистивному, індуктивному, ємнісному елементах. Отримані осцилограми включити до протоколу лабораторної роботи.
8. Користуючись візирними лініями зняти з отриманих осцилограм миттєві значення вихідної напруги, струму в індуктивності і напруги на ємності у тих самих 10 моментах часу, які обчислені у розрахунковій частині.

9. Порівняти розрахункові і експериментальні результати і зробити висновки.

При роботі з осцилографом дотримуватися таких рекомендацій:

- Масштаб за часом (Time base) встановити такий, щоб на екрані осцилографа розміщувалося 1,5...2 періоди коливань.
- Запуск осцилографа (Triger) встановити від зовнішнього сигналу (Ext), наростанням імпульсу  з нулевим (0,0) рівнем запуску (Level).
- Масштаб напруг  у каналі А (Chanel A) і у каналі В (Chanel B) встановити такий, щоб подвійна амплітуда коливань становила не менше 3/4 екрану.

II. Дослідження перехідної характеристики за допомогою опції

Analysis-Transient Response

Побудувати засобами *Electronic Workbench* лінійний перетворювач

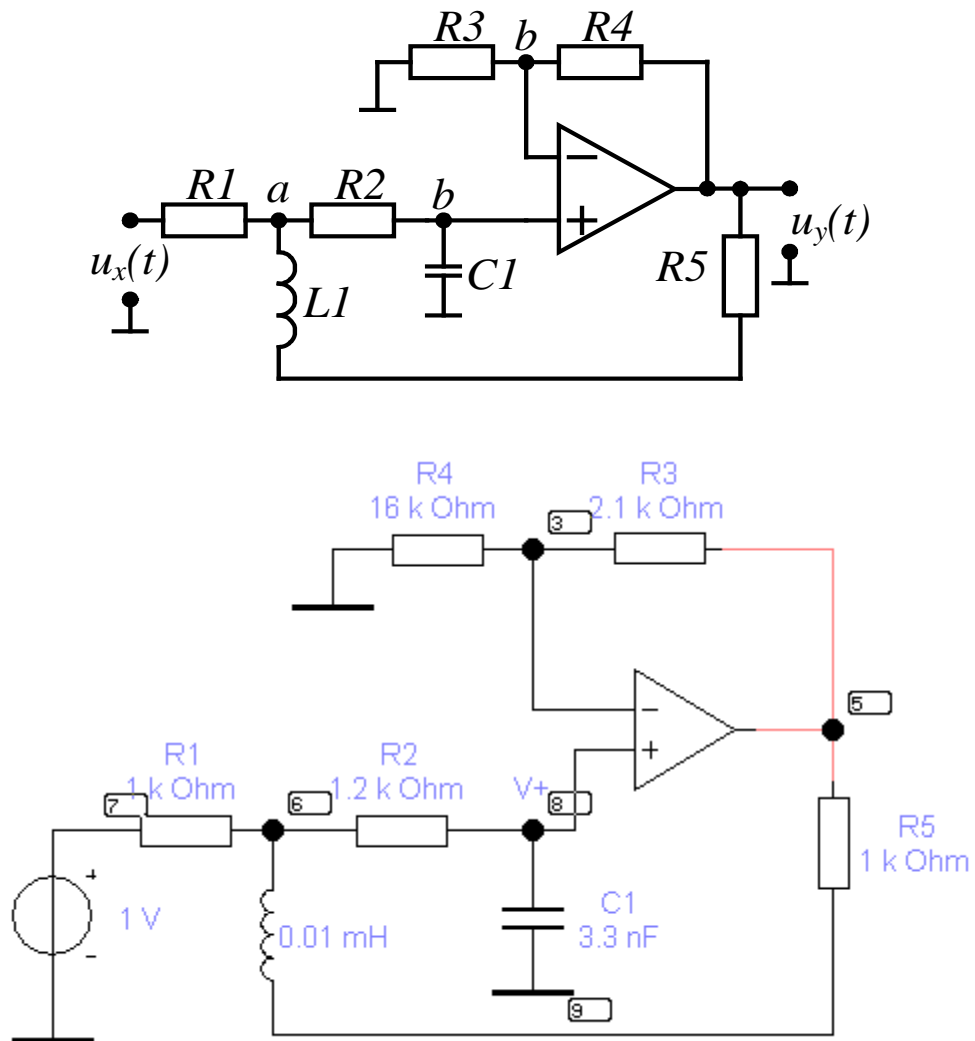


Рис. TR-03-4

відповідно до варіанту і встановити значення заданих параметрів елементів. Операційний підсилювач взяти на вкладці *Analog IC* у розділі 3-термінальний (3-*T*). Приклад такої побудови наведений на рис. TR-03-4. Для коректного відображення перехідних характеристик як за напругою, так і за струмом,

Зняти експериментально перехідну характеристики лінійного перетворювача. Для цього перейти у меню *Analysis* у режим *Transient*.

У діалоговому вікні, що з'явиться (рис. TR-03-5), вибрати:

- нульові початкові умови (*Set to Zero*);

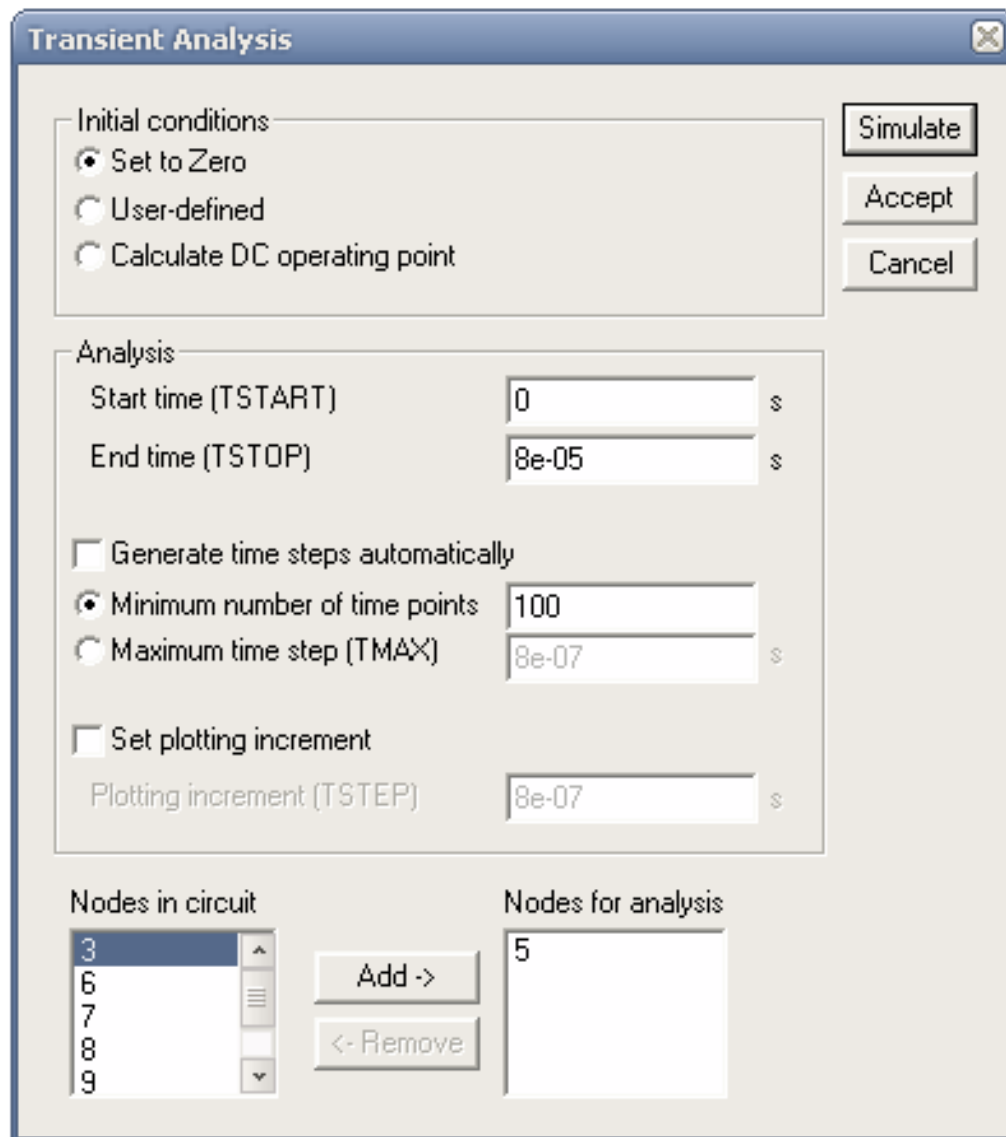


Рис. TR-03-5

- початок (*Start time* — $TSTART$) і кінець (*End time* — $TSTOP$) інтервалу часу;
- кількість точок розрахунку (*Number point*);
- вузол електричного кола для аналізу (*Node for analysis*). Для візуалізації вузлів електричного кола на екрані потрібно у меню *Circuit* вибрати пункт *Schematic Options* і у діалоговому вікні, що з'явиться (рис. TR-03-5), вибрати опцію *Show nodes* (показати вузли).

Запустити процес моделювання кнопкою *Simulate*. Результат моделювання, тобто перехідна характеристика, з'явиться в окремому вікні (рис. TR-03-7).

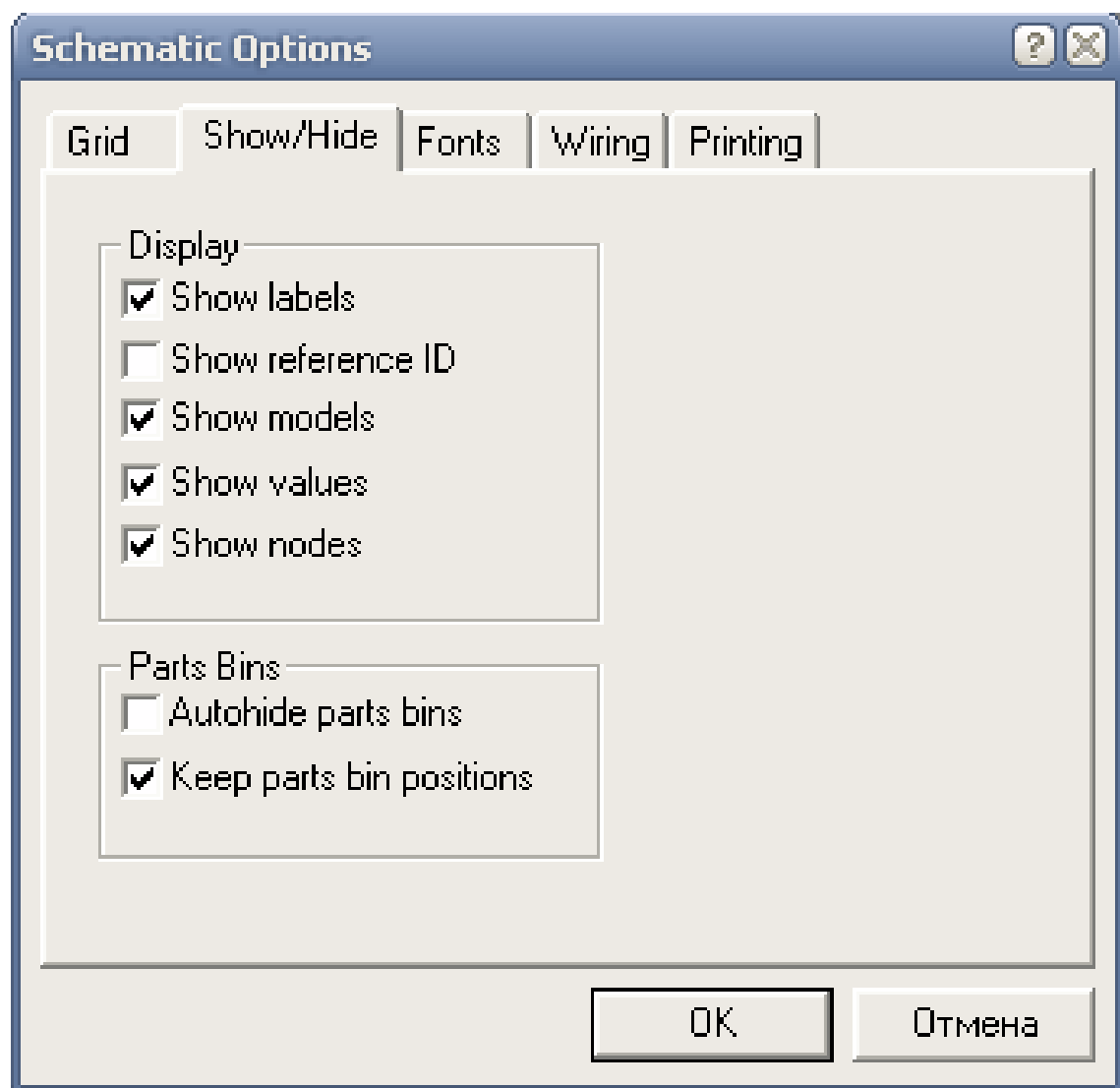


Рис. TR-03-6

Порівняти розрахункові дані і результати моделювання і зробити висновки.

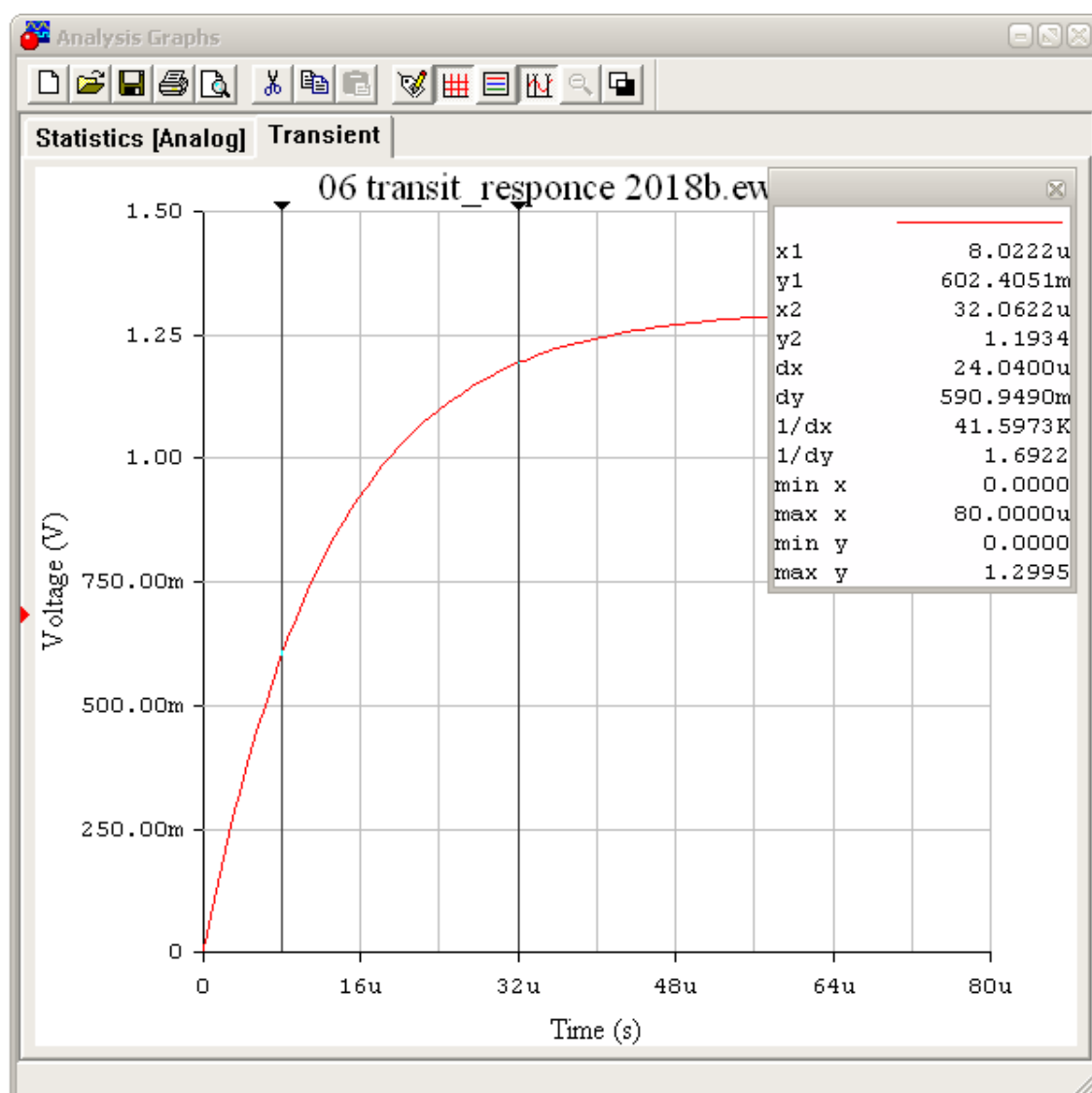


Рис. TR-03-7



НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ (КПІ)

Кафедра теоретичної електротехніки

Зразок

Лабораторна робота №03_TR_02

з дисципліни "Основи електротехніки та електроніки"

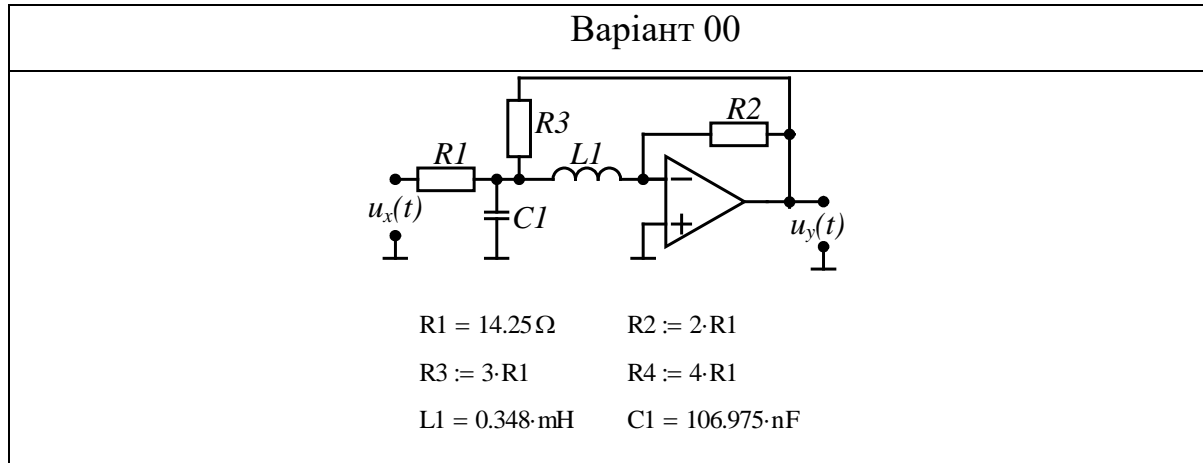
**Дослідження імпульсних і перехідних характеристик електричних
пристроїв "**

Виконав:
Студент групи ЕЕ-00
Петренко П.П.
Перевірив:
доц. Коваленко К.К.

Київ —20__

Мета роботи: Оволодіти методами аналізу і отримати навички експериментального дослідження перехідних процесів в електричних колах другого порядку

Завдання для варіанту 00



Розрахункова частина

1. Визначасмо операторні опори елементів кола

$$Z_{R1} = R1 \quad Z_{R2} = R2 \quad Z_{R3} = R3 \quad Z_{R4} = R4$$

$$Z_{L1} := s \cdot \mathbf{L1} \quad Z_{C1} := \frac{1}{(s \cdot \mathbf{C1})}$$

2. Будуємо операторну еквівалентну схему (рис. TR-03-6)

3. Складаємо систему рівнянь за методом вузлових потенціалів для двох вузлів a та y

$$U_a \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{Z_{C1}} \right) = U_x \cdot \left(\frac{1}{R1} \right) + (-U_y) \cdot \left(\frac{1}{R3} \right)$$

$$(-U_y) \cdot \left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) = U_a \cdot \left(\frac{1}{R3} \right)$$

4. Розв'язуємо отриману систему рівнянь

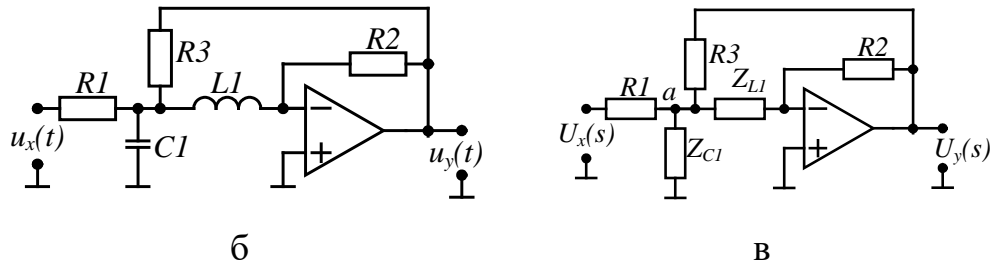


Рис. TR-03-8. Операторна еквівалентна схема

$$U_a(s) = \frac{5 \cdot L1 \cdot U_x \cdot s}{5 \cdot C1 \cdot L1 \cdot R1 \cdot s^2 + 6 \cdot L1 \cdot s + 5 \cdot R1}$$

$$U_y(s) = -\frac{2 \cdot L1 \cdot U_x \cdot s}{5 \cdot C1 \cdot L1 \cdot R1 \cdot s^2 + 6 \cdot L1 \cdot s + 5 \cdot R1}$$

5. Операторний потенціал вузла а дорівнює зображенню напруги на ємнісному елементі

$$U_C(s) = U_a(s) = \frac{\left(\frac{U_x}{C1 \cdot R1} \right) \cdot s}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

6. Операторний потенціал вузла у дорівнює зображенню напруги на індуктивному елементі

$$U_L(s) = U_a(s) = \frac{\left(\frac{U_x}{C1 \cdot R1} \right) \cdot s}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

7. Зображення струму у індуктивному елементі знаходимо за законом Ома

$$I_L(s) = \frac{U_a(s)}{Z_{L1}} = \frac{\frac{U_x}{C1 \cdot L1 \cdot R1}}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

8. За зображеннями струмів і напруг знаходимо передавальні функції

$$G_Y(s) = \frac{U_Y(s)}{U_X(s)} = \frac{\left[\left(\frac{-2}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s \right]}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

$$G_C(s) = \frac{U_C(s)}{U_X(s)} = \frac{\left(\frac{1}{C1 \cdot R1} \right) \cdot s}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

$$G_L(s) = \frac{I_L(s)}{U_X(s)} = \frac{\frac{1}{C1 \cdot L1 \cdot R1}}{\left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

9. Зображення перехідних характеристик визначаємо за формулами

$$H_Y(s) = \frac{G_Y(s)}{s} = \frac{\left(\frac{-2}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s}{s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

$$H_C(s) = \frac{G_C(s)}{s} = \frac{\left(\frac{1}{C1 \cdot R1} \right) \cdot s}{s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

$$H_L(s) = \frac{G_L(s)}{s} = \frac{\frac{1}{C1 \cdot L1 \cdot R1}}{s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]}$$

10. Знаменники у всіх трьох виразах $U_Y(s)$, $U_C(s)$, $I_L(s)$ однакові

$$D_Y(s) = D_C(s) = D_L(s) = s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right]$$

11. Прирівнявши знаменники до нуля

$$s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{6}{5 \cdot C1 \cdot R1} \right) \cdot s + \frac{1}{C1 \cdot L1} \right] = 0$$

знаходимо і обчислюємо їх корені

$$p_1 := -\frac{3}{5 \cdot C_1 \cdot R_1} - \sqrt{\frac{4 \cdot (9 \cdot L_1 - 25 \cdot C_1 \cdot R_1^2)}{25 \cdot L_1}} = -7.514 \times 10^5 \frac{1}{s}$$

$$p_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot (9 \cdot L_1 - 25 \cdot C_1 \cdot R_1^2)}{25 \cdot L_1}} - \frac{3}{5 \cdot C_1 \cdot R_1} = -3.579 \times 10^4 \frac{1}{s}$$

$$p_3 := 0$$

12. Знаходимо похідну від знаменника

$$dD(s) = \frac{d}{ds} \cdot D(s) = 3 \cdot s^2 + \left(\frac{12}{5 \cdot C_1 \cdot R_1} \right) \cdot s + \frac{1}{C_1 \cdot L_1}$$

13. Знаходимо коефіцієнти при експоненціальних функціях оригіналів

$$\begin{array}{lll} \frac{N_Y(p_1)}{dD(p_1)} = 0.367 & \frac{N_Y(p_2)}{dD(p_2)} = -0.367 & \frac{N_Y(p_3)}{dD(p_3)} = 0 \\ \frac{N_C(p_1)}{dD(p_1)} = -0.917 & \frac{N_C(p_2)}{dD(p_2)} = 0.917 & \frac{N_C(p_3)}{dD(p_3)} = 0 \\ \frac{N_L(p_1)}{dD(p_1)} = 1.22 \times 10^{-6} s & \frac{N_L(p_2)}{dD(p_2)} = -2.561 \times 10^{-5} s & \frac{N_L(p_3)}{dD(p_3)} = 2.439 \times 10^{-5} s \end{array}$$

14. Записуємо вирази для оригіналів, тобто залежності від часу перехідних характеристик напруги на ємнісному елементі, струму в індуктивному елементі і вихідної напруги

$$h_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dD(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dD(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} + \frac{N_L(p_3)}{dD(p_3)} \cdot e^{p_3 \cdot t}$$

$$h_C(t) := \frac{N_C(p_1)}{dD(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_C(p_2)}{dD(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} + \frac{N_C(p_3)}{dD(p_3)} \cdot e^{p_3 \cdot t}$$

$$h_Y(t) := \frac{N_Y(p_1)}{dD(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_Y(p_2)}{dD(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} + \frac{N_Y(p_3)}{dD(p_3)} \cdot e^{p_3 \cdot t}$$

15. Підставляємо обчислені значення величин і будуємо графіки залежності величин від часу

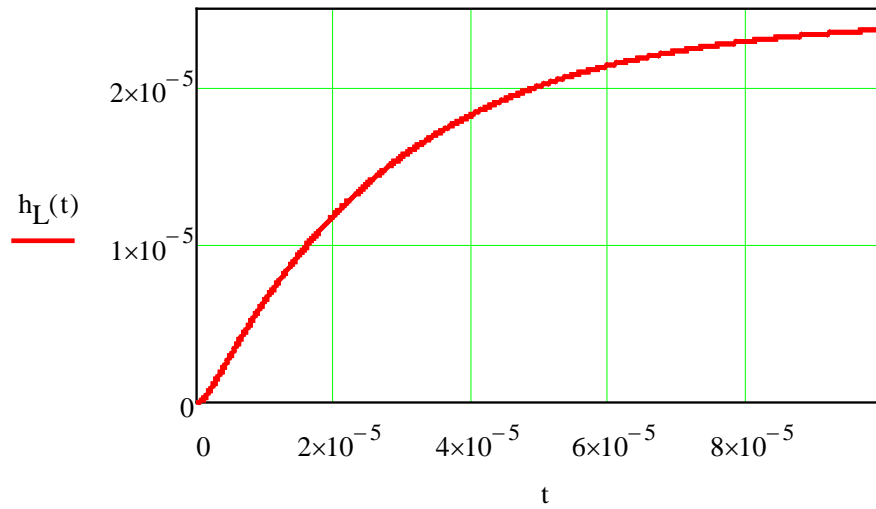


Рис. TR-03-9. Залежності від часу перехідної характеристики струму в індуктивному елементі

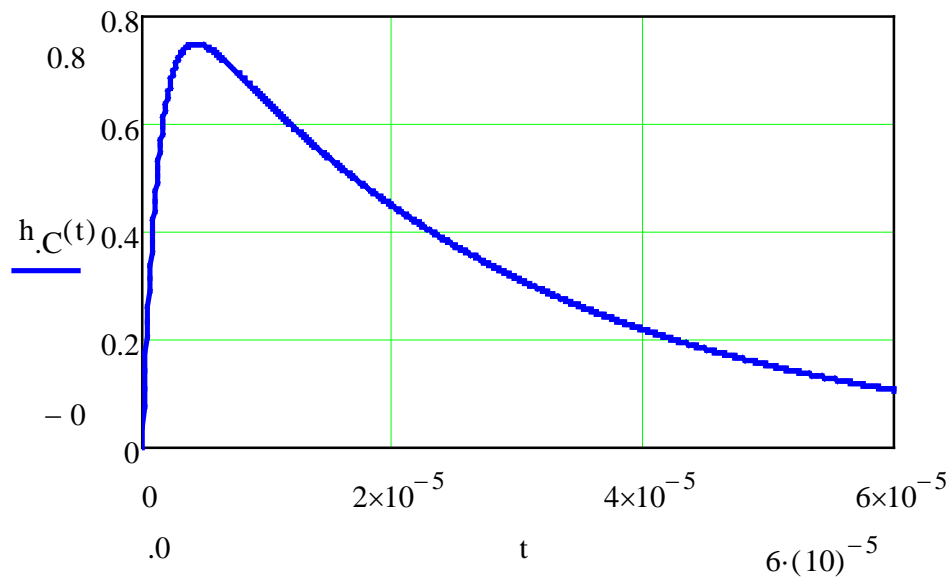


Рис. TR-03-10. Залежності від часу перехідної характеристики напруги на ємнісному елементі

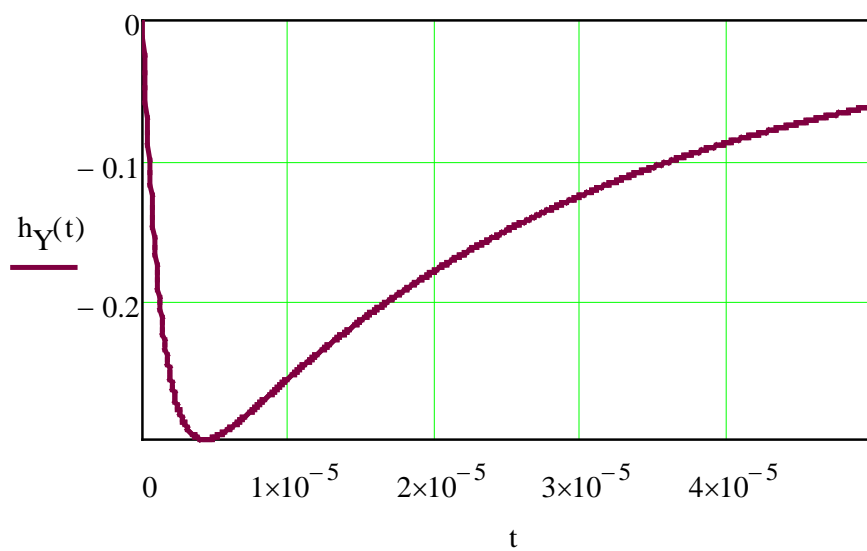


Рис. TR-03-11. Залежності від часу перехідної характеристики
вихідної напруги

Експериментальна частина

I. Дослідження перехідної характеристики за допомогою осцилографа

1. Будуємо симулятором *MultiSIM* електричне коло, відповідно до свого варіанту. Як приклад, на рис. TR-03-12 наведене електричне коло одного з варіантів.

2. На рис. TR-03-12 показані:

3. А) Функціональний генератор (рис. TR-01-3), призначений для

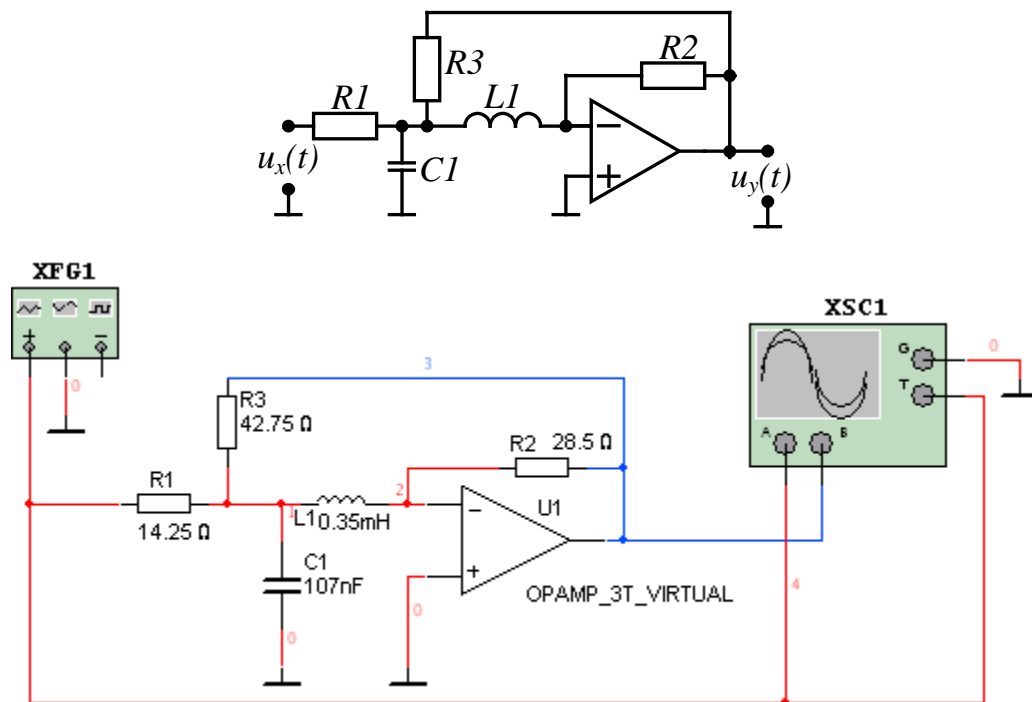


Рис. TR-03-12

генерування послідовності імпульсів синусоїдної, трикутної і прямокутної форми. Функціональний генератор знаходиться на вкладці *Instrument* (другий зліва) (рис. TR-03-14);

4. Б) Осцилограф (рис. TR-03-15), призначений для відображення графіків величин. На рис Осцилограф знаходиться на вкладці *Instrument* (третій зліва) (рис. TR-03-13);

5. $R1, \dots, R6$ — резистори;

6. $L1$ — індуктивний елемент;

7. $C1$ — конденсатор;



Рис. TR-03-13

8. Задати значення параметрів елементів кола (R, L, C) відповідно до заданого варіанту.

9. Задати прямокутну форму коливань на керівній панелі функціонального генератора .

10. Задати частоту (Frequency) прямокутної форми коливань на керівній панелі функціонального генератора як величину, обернену до періоду коливань, тобто $f=1/T$. Приблизне значення періоду коливань T оцінюється за такою формулою $T \approx 3\tau_m$. Уточнене значення періоду коливань T потрібно встановити за допомогою вікна Time base осцилографа таке, щоб на його екрані розміщувалося 1,5...2 періоди коливань.

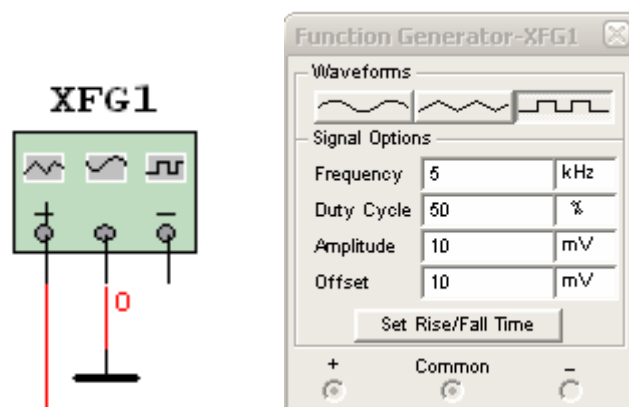
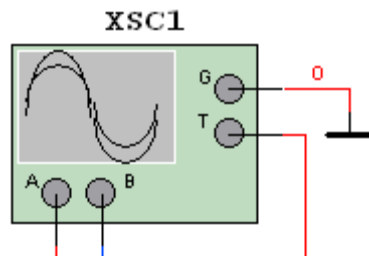
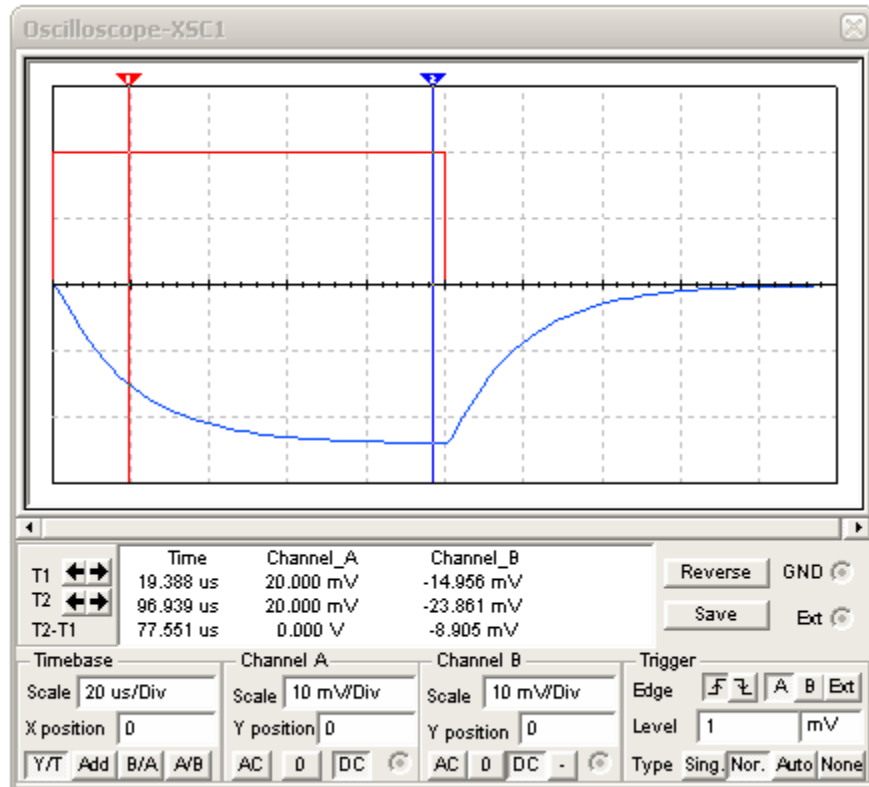


Рис. TR-03-14



a



б

Рис. TR-03-15

11. Задати амплітуду (Amplitude) і зміщення відносно нуля (Offset) прямокутного коливання у відповідності з формою вхідного сигналу $u_x(t)$. Наприклад, якщо вхідний сигнал має форму і $U_0=13\text{mV}$, то діапазон сигналу від максимального $2U_0$ до мінімального $-3U_0$ дорівнює $5U_0=5\times 13\text{mV}=65\text{mV}$. Тоді амплітуду (Amplitude) функціонального генератора слід задати $65\text{mV}/2=32,5\text{mV}$, а зміщення відносно нуля (Offset) задати $-U_0/2=-13\text{mV}/2=-6,5\text{mV}$

12. Запустити процес моделювання, натиснувши на кнопку I/O у верхньому правому куті екрану.

13. За допомогою осцилографа зняти графіки струму у колі та напруг на вході кола, а також на резистивному, індуктивному, ємнісному елементах.

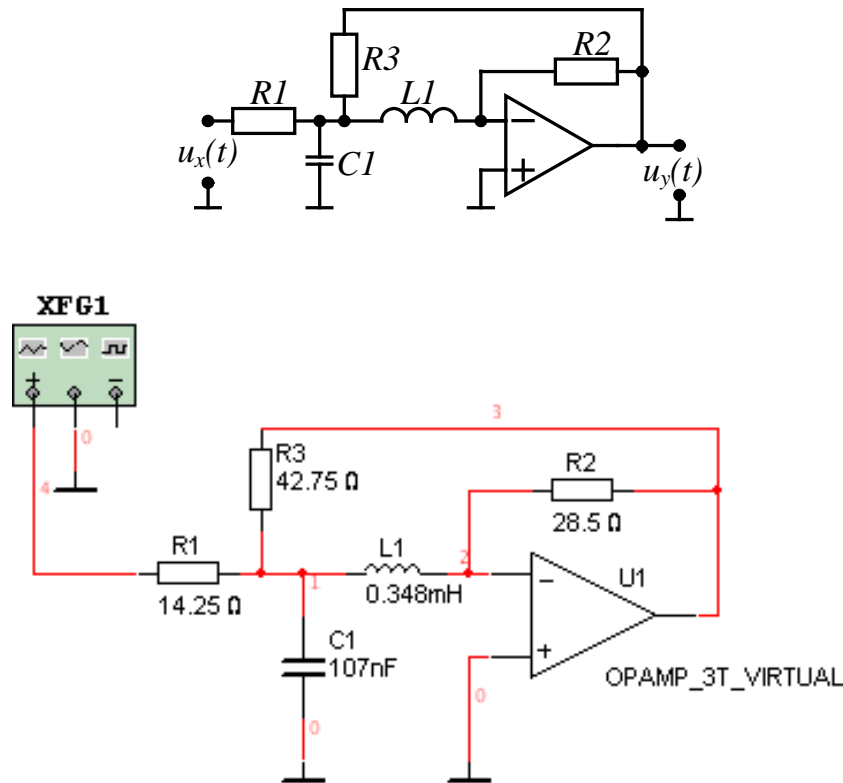



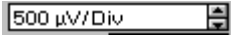
Рис. TR-03-16

Отримані осцилограми включити до протоколу лабораторної роботи.

14. Користуючись візирними лініями зняти з отриманих осцилограм миттєві значення вихідної напруги, струму в індуктивності і напруги на ємності у тих самих 10 моментах часу, які обчислені у розрахунковій частині.

15. Порівняти розрахункові і експериментальні результати і зробити висновки.

16. При роботі з осцилографом дотримуватися таких рекомендацій:

- Масштаб за часом (Time base) встановити такий, щоб на екрані осцилографа розміщувалося 1,5...2 періоди коливань.
- Запуск осцилографа (Trigger) встановити від зовнішнього сигналу (Ext), наростанням імпульсу  з нулевим (0,0) рівнем запуску (Level).
- Масштаб напруг  у каналі А (Chanel A) і у каналі В (Chanel B) встановити такий, щоб подвійна амплітуда коливань становила не менше 3/4 екрану.

II. Дослідження перехідної характеристики за допомогою програми Transient Analysis

1. Будуємо симулятором *Multisim* модель заданого електронного пристрою відповідно до варіанту (рис. TR-01-1). На рис. TR-01-1 наведено приклад такої побудови для одного з варіантів. На рис. TR-01-1 показані:

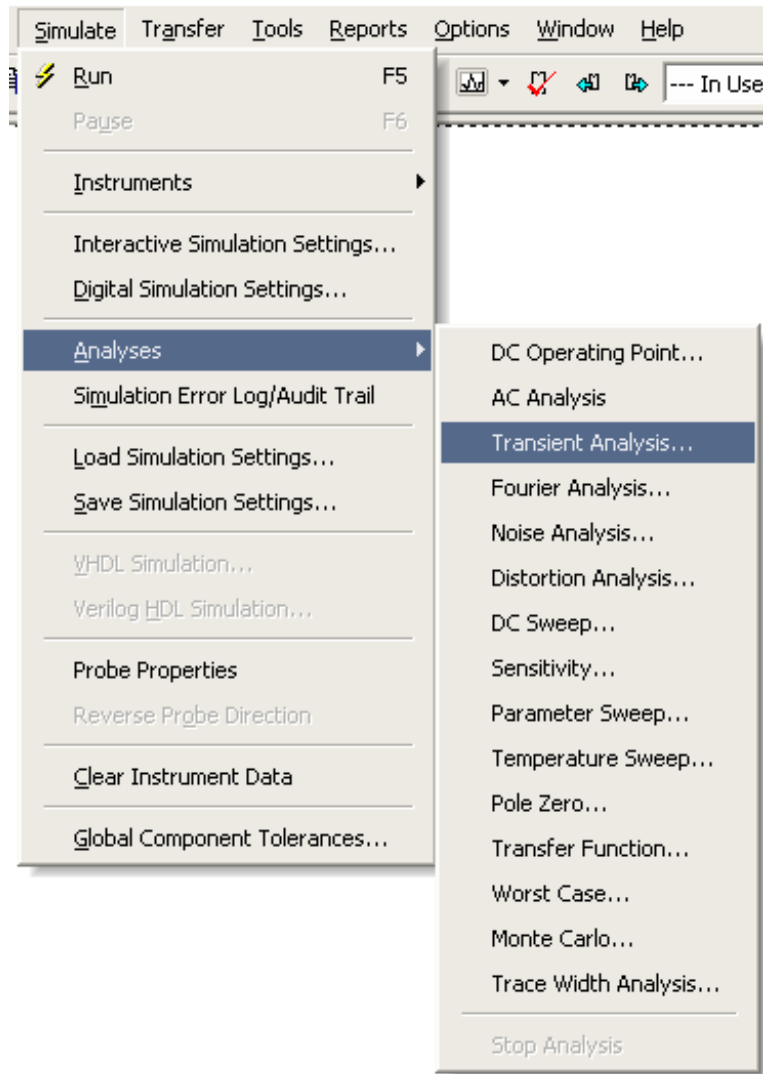


Рис. TR-03-17

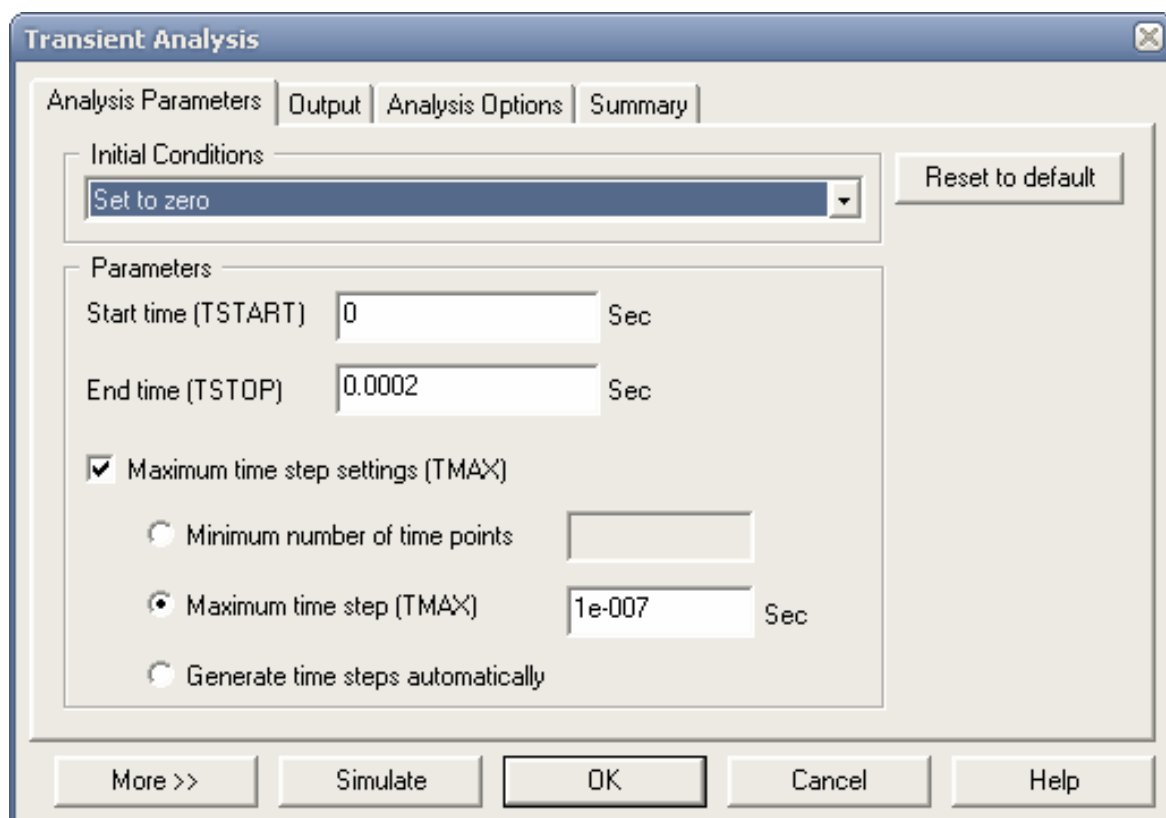


Рис. TR-03-18

- Функціональний генератор (рис. 3.2), призначений для генерування послідовності імпульсів синусоїдної, трикутної і прямокутної форми. У цій лабораторній роботі використовується імпульси прямокутної форми.;

- R1, ..., R6 — резистори. Резистори знаходяться на вкладці *Basic*;
- L1 — індуктивний елемент, знаходиться на вкладці *Basic*;
- C1 — конденсатор, знаходиться на вкладці *Basic*;

Задати значення параметрів елементів кола відповідно варіанта.

Задати прямокутну форму коливань на керівній панелі функціонального генератора.

Задати частоту (Frequency) прямокутної форми коливань на керівній панелі функціонального генератора як величину, обернену до періоду коливань, тобто $f=1/T$. Приблизне значення періоду коливань T оцінюється за такою формулою $T \approx 3\tau_{\max}$.

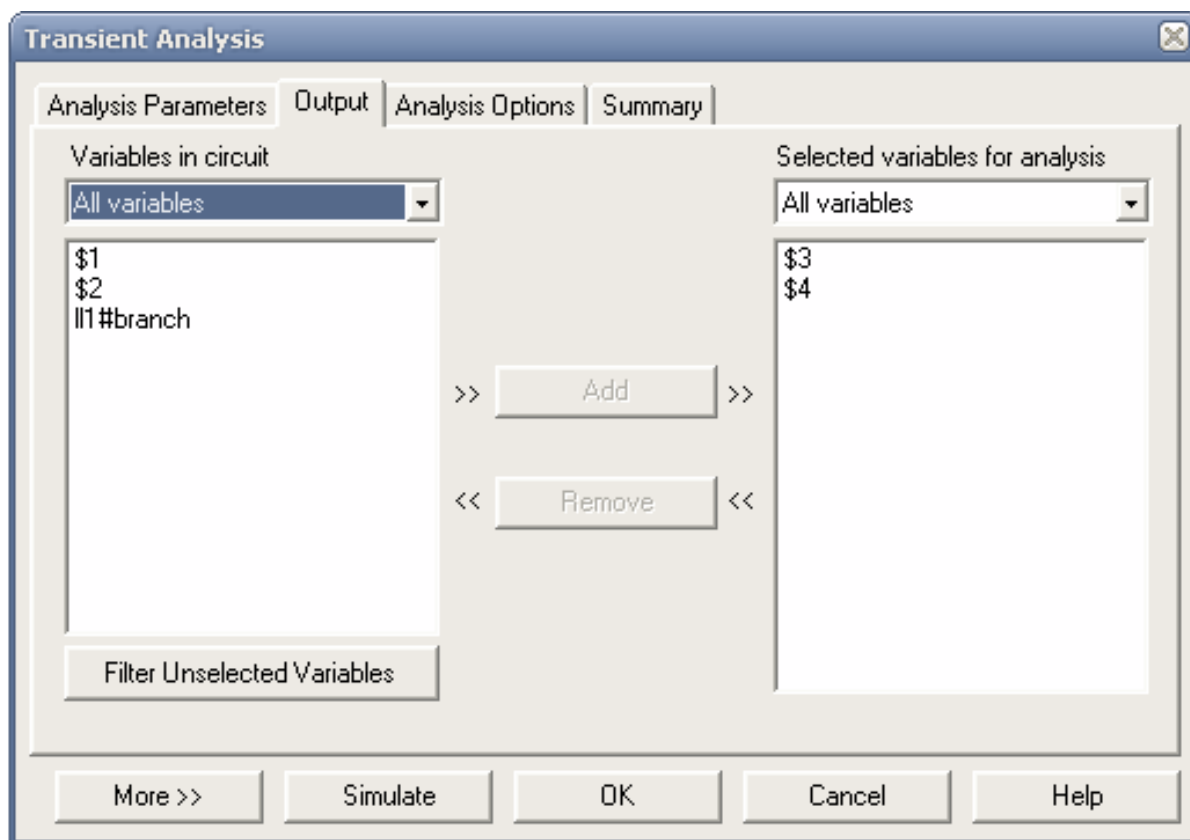


Рис. TR-03-19

Зняти експериментально перехідну характеристики лінійного перетворювача. Для цього перейти у меню *Analysis* у режим *Transient* (рис. TR-01-7).

У діалоговому вікні, що з'явиться (рис. TR-01-8), вибрати:

початкові умови (*Initial condition*). При знятті перехідної характеристики слід вибрати нульові початкові умови (*Set to zero*);

початок (*Start time — TSTART*) і кінець (*End time — TSTOP*) інтервалу часу аналізу. Тривалість аналізу слід вибрати таким, щоб кінцеві значення аналізованих електричних величин відрізнялися від усталених значень не більш ніж 1%;

мінімальна кількість точок розрахунку (*Minimum number of time point*). Мінімальну кількість точок слід вибрати такою, щоб криві на графіку мали плавну форму і при прийнятній тривалості аналізу;

вузли електричного кола для аналізу (*Node for analysis*) на вкладці *Output* (рис. TR-01-8). Вихідна напруга пристрою визначається потенціалом вузла 3

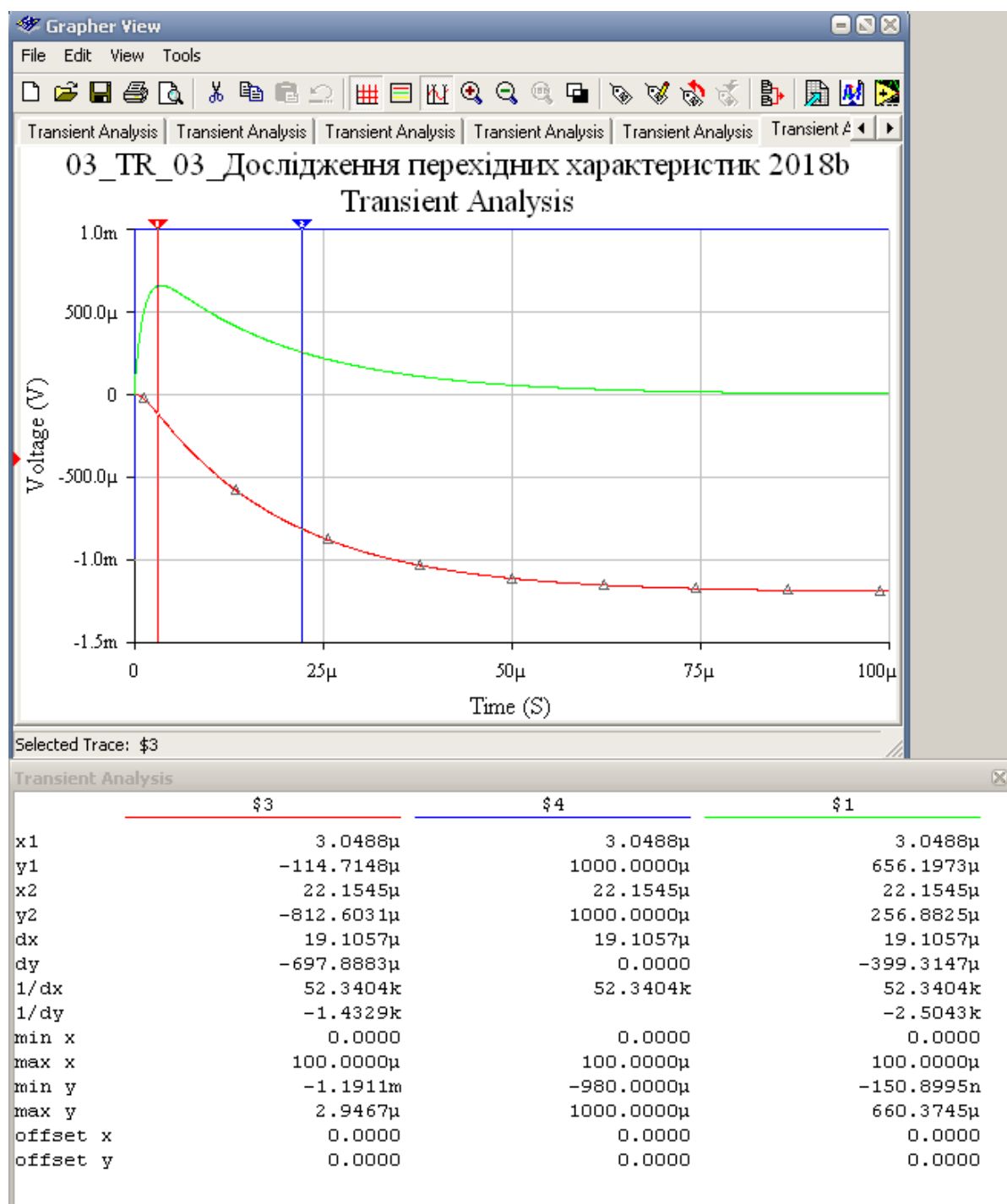


Рис. TR-03-20

відносно нуля. Для наочності доцільно візуалізувати вхідну напругу, вибравши для аналізу вузол 4.

Запустити процес моделювання кнопкою Simulate. Результат моделювання, тобто залежність електричних напруг від часу, з'явиться в окремому вікні. На рис. TR-01-9 показані графіки залежностей вихідної і вхідної напруг електронного пристрою. Оскільки амплітуда вхідного

ступінчатого сигналу дорівнює одиниці, то вихідна напруга пристрою є перехідною характеристикою

Порівнявши розрахункові дані і результати моделювання бачимо, що різниця між ними не перевищує заданого порога..

Теоретичні відомості

1. Перехідні характеристики електричних кіл

Перехідна характеристика ланцюга (як і імпульсна) відноситься до тимчасових характеристиках кола, тобто виражає певний перехідний процес при заздалегідь встановлених впливах і початкових умовах.

Для порівняння електричних кіл з їхньою реакції до цих впливів, необхідно кола поставити в однакові умови. Найбільш простими і зручними є нульові початкові умови.

Перехідною характеристикою ланцюга називають відношення реакції ланцюга на поетапне вплив до величини цього впливу при нульових початкових умовах.

За визначенням

$$h(t) = \frac{f_2(t)}{A},$$

де $f_2(t)$ - Реакція ланцюга на поетапне вплив;

A - Величина ступеневої впливу [В] або [А].

Так як $f_1(t) = A$ і $f_2(t)$ ділиться на величину впливу (це дійсне число), то фактично $h(t)$ - Реакція ланцюга на одиничне поетапне вплив.

Якщо перехідна характеристика ланцюга відома (або може бути обчислена), то з формули можна знайти реакцію цьому ланцюгу на поетапне вплив при нульових НУ

$$f_2(t) = A \cdot h(t).$$

Встановимо зв'язок між операторної передавальної функцією ланцюга, яка часто відома (або може бути знайдена), та перехідною характеристикою цього ланцюга. Для цього використовуємо введені поняття операторної передаточної функції:

$$T(p) = \frac{L[f_2(t)]}{L[A]} = \frac{f_2(p)}{\frac{A}{p}} = p \cdot \frac{f_2(p)}{A}.$$

Ставлення перетвореної по Лапласа реакції ланцюга до величини впливу A являє собою операторну перехідну характеристику ланцюга:

$$h(p) = \frac{f_2(p)}{A}.$$

Отже
$$h(p) = \frac{T(p)}{p}.$$

Звідси знаходиться операторна перехідна характеристика ланцюга по операторній передаточній функції.

Для визначення перехідної характеристики кола необхідно застосувати зворотне [перетворення Лапласа](#):

$$h(t) = h(p),$$

скориставшись [таблицею](#) відповідностей або (попередньо) теоремою розкладання.

Приклад: визначити перехідну характеристику для реакції напруга на ємності в послідовній RC -Ланцюга (рис. 1):

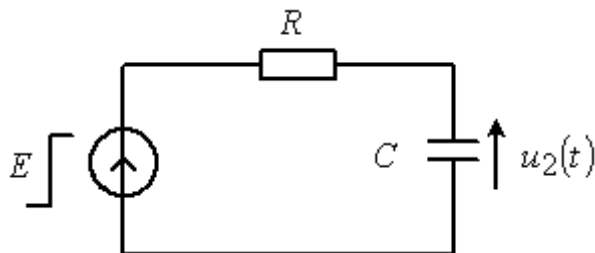


Рис. 1

Тут реакція на поетапне вплив величиною E :

$$U_2(t) = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right),$$

звідки перехідна характеристика:

$$h_{u_2}(t) = \frac{u_2(t)}{E} = 1 - e^{-t/\tau}.$$

Перехідні характеристики найбільш часто зустрічаються ланцюгів знайдені й дані в довідковій літературі.

2. Інтеграли Дюамеля

Перехідну характеристику часто використовують для знаходження реакції ланцюга на складне вплив. [Встановимо](#) ці співвідношення.

Домовимось, що вплив $f_1(t)$ є безперервною функцією і підводиться до ланцюга в момент часу $t = 0$, А початкові умови - нульові.

Заданий вплив $f_1(t)$ можна представити як суму ступеневої впливу $f_1(0)$ прикладеної до ланцюга в момент $t = 0$ і нескінченно великого числа нескінченно малих східчастих впливів, безупинно наступних один за одним. Одне з таких елементарних дій, [відповідних](#) моменту додатка $t = x$ показано на малюнку 2.

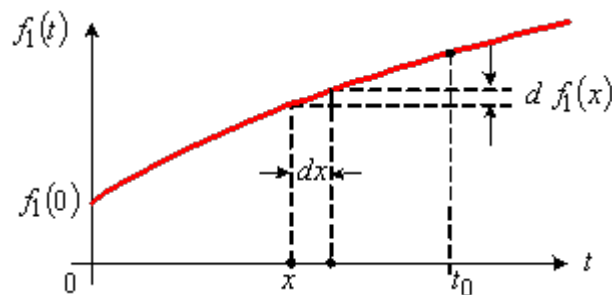


Рис. 2

Знайдемо значення реакції ланцюга в деякий момент часу $t_0 > x$.

Поетапне вплив з перепадом $f_1(0)$ на момент часу t_0 обумовлює реакцію, рівну добутку перепаду $f_1(0)$ на значення перехідної характеристики ланцюга при $t = t_0$, Тобто дорівнює:

$$f_2(t_0) = f_1(0) \cdot h(t_0).$$

Нескінченно мале ж поетапне вплив з перепадом $df_1(x)$, Обумовлює нескінченно малу реакцію $df_1(x) \cdot h(t_0 - x)$, Де $t_0 - x$ є час, що минув від моменту прикладання впливу до моменту спостереження. Оскільки за умовою [функція](#) $f_1(x)$ неперервна, то:

$$[df_1(x)] \cdot h(t_0 - x) \frac{dx}{dx} = f_1'(x) dx \cdot h(t_0 - x)$$

Відповідно до принципу накладення реакції $f_2(t_0)$ буде дорівнює сумі реакцій, обумовлених сукупністю впливів, що передують моменту спостереження t_0 , Т. е.

$$f_2(t_0) = f_1(0) \cdot h(t_0) + \int_0^{t_0} f_1'(x) h(t_0 - x) dx$$

Зазвичай в останній формулі t_0 замінюють просто на t , Оскільки знайдена формула вірна за будь-яких значеннях часу t_0 :

$$f_2(t) = f_1(0) \cdot h(t) + \int_0^t f_1'(x) h(t - x) dx$$

Або, після нескладних перетворень:

$$f_2(t) = f_1(0) \cdot h(t) + \int_0^t f_1'(t - x) h(x) dx$$

Будь-яке з цих співвідношень і вирішує завдання обчислення реакції $f_2(t)$ лінійної електричного кола на заданий безперервна дія $f_1(t)$ за відомою перехідної характеристики ланцюга $h(t)$. Ці співвідношення називають інтегралами Дюамеля.

3. Імпульсні характеристики електричних ланцюгів

Імпульсною характеристикою ланцюга $g(t)$ називають відношення реакції ланцюга на імпульсний вплив до площі цього впливу при нульових початкових умовах.

За визначенням

$$g(t) = \frac{f_2(t)}{S_u},$$

де $f_2(t)$ - Реакція ланцюга на імпульсний вплив;

S_u - Площа імпульсу впливу.

За відомою імпульсною характеристикою ланцюга можна знайти реакцію ланцюга на заданий вплив: $f_2(t) = g(t) \cdot S_u$.

Як функції впливу часто використовується одиничне імпульсний вплив зване також дельта-функцією або функцією Дірака.

Дельта-функція - це функція всюди рівна нулю, крім $t = 0$, А площа її дорівнює одиниці ($S_u = 1$):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \infty, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}.$$

До поняття дельта-функція можна прийти, розглядаючи межа прямокутного імпульсу висотою $\frac{1}{t_u}$ і тривалістю t_u , Коли $t_u \rightarrow 0$ (Рис. 3):

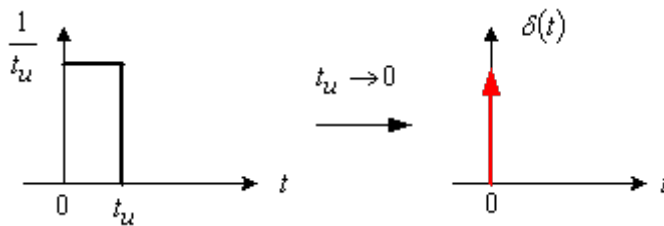


Рис. 3

Встановимо зв'язок між функцією передачі ланцюга та її імпульсною характеристикою, для чого використовуємо операторний метод.

За визначенням:

$$T(p) = \frac{\text{опер. реакція}}{\text{опер. возд.}}.$$

Якщо вплив (оригінал) розглядати для найбільш загального випадку у вигляді добутку площі імпульсу на дельта-функцію, тобто у вигляді $S_u \cdot \delta(t)$, То зображення цього впливу згідно таблиці відповідностей має вигляд:

$$T(p) = \frac{L[f_2(t)]}{L[S_u \delta(t)]} = \frac{f_2(p)}{S_u}.$$

Тоді з іншого боку, ставлення перетвореної по Лапласа реакції ланцюга до величини площі імпульсу впливу, являє собою операторну імпульсну характеристику ланцюга:

$$g(p) = \frac{f_2(p)}{S_u}.$$

Отже, $T(p) = g(p)$.

Для знаходження імпульсної характеристики ланцюга $g(t)$ необхідно застосувати зворотне [перетворення](#) Лапласа: $g(t) \stackrel{.}{=} g(p)$, Тобто фактично $g(t) \stackrel{.}{=} T(p)$.

Узагальнюючи формули, отримаємо зв'язок між операторної передавальної функцією ланцюга $T(p)$ і операторними перехідної та імпульсної характеристиками ланцюга:

$$T(p) = ph(p) = g(p).$$

Таким чином, знаючи одну з характеристик ланцюга, можна визначити будь-які інші.

Зробимо тотожне перетворення рівності, додавши до середньої частини $h(0) - h(0)$.

Тоді будемо мати $g(p) = ph(p) - h(0) + h(0)$.

Оскільки $ph(p) - h(0)$ являє собою зображення похідної перехідної характеристики, то початковий рівність можна переписати у вигляді:

$$g(p) = h(0) + L[h'_t(t)].$$

Переходячи в область оригіналів, одержуємо формулу, що дозволяє визначити імпульсну характеристику ланцюга за відомою її перехідною характеристикою:

$$g(t) = h(0)\delta(t) + h'_t(t).$$

Якщо $h(0) = 0$, То $g(t) = h'_t(t)$.

Зворотне співвідношення між зазначеними характеристиками має вигляд:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt$$

За передавальної функції $T(p)$ легко [встановити](#) наявність у складі функції $g(t)$ доданка $h(0)\delta(t)$.

Якщо ступеня чисельника і знаменника $T(p)$ однакові, то розглядається доданок буде присутній. Якщо ж функція $T(p)$ є правильною дробом, то цього доданка не буде.

Приклад: визначити імпульсні характеристики для напружень U_R і U_C в послідовній RC -Ланцюга, показаної на малюнку 4.

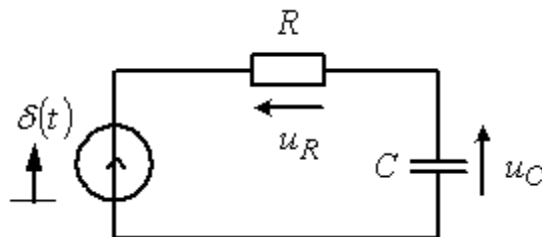


Рис. 4

Визначимо $T_{U_C}(p)$:

$$T_{U_C}(p) = \frac{U_C(p)}{e(p)} = \frac{e(p)}{e(p) \left(R + \frac{1}{pC} \right)} \cdot \frac{1}{pC} = \frac{1}{1 + pRC} = \frac{1}{RC} \cdot \frac{1}{p + \frac{1}{RC}} = g_{U_C}(p)$$

По таблиці відповідностей перейдемо до оригіналу:

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

Графік цієї функції зображений на малюнку 5.

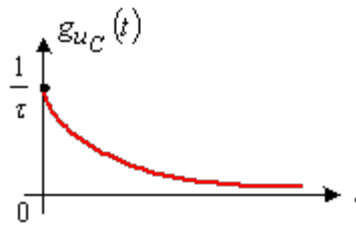


Рис. 5

Передавальна функція $T_{U_R}(p)$:

$$T_{U_R}(p) = \frac{U_R(p)}{e(p)} = \frac{e(p) \cdot R}{e(p) \left(R + \frac{1}{pC} \right)} = \frac{pRC}{1 + pRC} = \frac{p}{p + \frac{1}{RC}} = 1 - \frac{\frac{1}{RC}}{p + \frac{1}{RC}} = g_{U_R}(p)$$

Згідно таблиці відповідностей маємо:

$$g_{u_R}(t) = \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = \delta(t) - \frac{1}{\tau} \cdot e^{-t/\tau}$$

Графік отриманої функції показаний на малюнку 6.

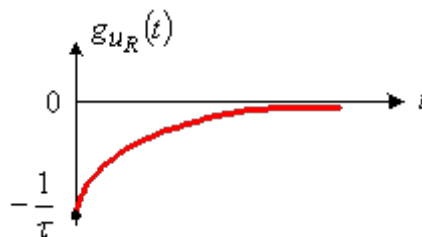


Рис. 6

Зазначимо, що такі самі висловлювання можна було отримати за допомогою співвідношень, що встановлюють зв'язок між $g(t)$ і $h(t)$.

Імпульсна характеристика по фізичній змісту відображає собою процес вільних коливань і з цієї причини можна стверджувати, що в реальних ланцюгах завжди повинна виконуватися умова:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

Інтеграли згортки (накладення)

Розглянемо порядок визначення реакції лінійної електричного кола на складне вплив, якщо відома імпульсна характеристика цього ланцюга $g(t)$.

Будемо вважати, що вплив є кусково-безперервну функцію $f_1(t)$, Показану на малюнку 7.

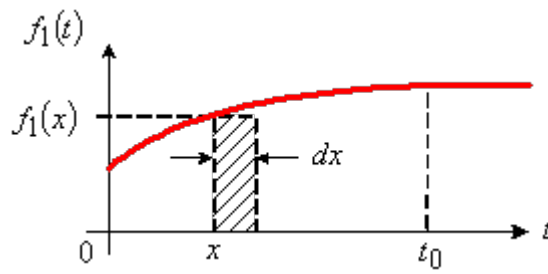


Рис. 7

Нехай потрібно знайти значення реакції $f_2(t)$ в деякий момент часу $t = t_0$.
Вирішуючи це завдання, представимо вплив $f_1(t)$ у вигляді суми прямокутних імпульсів нескінченно малої тривалості, один з яких, відповідний моменту часу $t = x$, Зображений на малюнку 7. Цей імпульс характеризується тривалістю dx і висотою $f_1(x)$.

З раніше розглянутого матеріалу відомо, що реакцію ланцюга на короткий імпульс можна вважати рівними добутку імпульсної характеристики ланцюга на площу імпульсного впливу. Отже, нескінченно мала складова реакції, обумовлена цим імпульсним впливом, в момент часу t_0 буде рівною:

$$d f_2(t_0) = f_1(x) dx \cdot g(t_0 - x),$$

оскільки площа імпульсу дорівнює $f_1(x) dx$, А від моменту його застосування $t = x$ до моменту спостереження проходить час $t_0 - x$.

Використовуючи принцип накладення, повну реакцію ланцюга $f_2(t_0)$ можна визначити як суму нескінченно великого числа нескінченно малих складових $d f_2(t_0)$, Викликаних послідовністю нескінченно малих за площею імпульсних впливів, що передують моменту часу t_0 .

Таким чином:

$$f_2(t_0) = \int_0^{t_0} f_1(x) g(t_0 - x) dx.$$

Ця формула вірна для будь-яких значень t_0 , Тому зазвичай змінну t_0 позначають просто t . Тоді:

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(x)g(t-x)dx$$

Отримане співвідношення називають інтегралом згортки або інтегралом накладення. Функцію $f_2(t)$, Яка перебуває у результаті обчислення інтеграла згортки, називають згорткою $f_1(t)$ і $g(t)$.

Можна знайти іншу форму інтеграла згортки, якщо в отриманому виразі для $f_2(t)$ здійснити заміну змінних:

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(t-x)g(x)dx$$

Приклад: знайти напруга на ємності послідовної RC -Ланцюга (рис. 8), якщо на вході діє експонентний імпульс види:

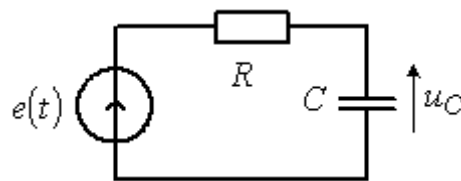
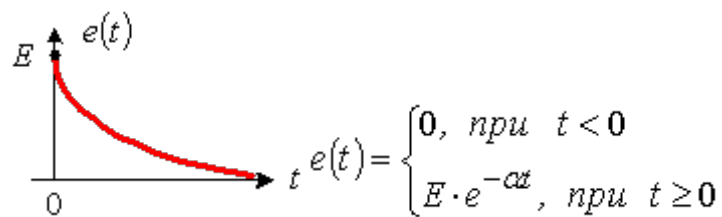


Рис. 8

Скористаємося інтегралом згортки:

$$u_C(t) = \int_0^t e(x)g_{U_C}(t-x)dx$$

Вираз для $g_{u_C}(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}$ було отримано раніше.

Отже, $e(x) = E \cdot e^{-\alpha x}$, і $g_{U_C}(t-x) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t-x}{\tau}}$ dx

Тоді

$$\begin{aligned}u_C(t) &= \int_0^t E \cdot e^{-\alpha x} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t-x}{\tau}} dx = \frac{E}{\tau} \int_0^t e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot e^{\left(\frac{1}{\tau} - \alpha\right)x} dx = \frac{E}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau} - \alpha} \cdot e^{\left(\frac{1}{\tau} - \alpha\right)x} \bigg|_0^t = \\&= \frac{E}{1 - \alpha\tau} \left(e^{-\alpha t} - e^{-\frac{1}{\tau}t} \right)\end{aligned}$$

[Такий](#) же результат можна отримати, застосувавши інтеграл Дюамеля.

Література:

Білецький А. Ф. [Теорія](#) лінійних електричних ланцюгів. - М.: Радіо і зв'язок, 1986. ([Підручник](#))

Бакалов В. П. та ін [Теорія електричних ланцюгів](#). - М.: Радіо і зв'язок, 1998. (Підручник);

Качанов Н. С. та ін Лінійні радіотехнічні пристрої. М.: Воен. издат., 1974. (Підручник);

Попов В. П. [Основи теорії ланцюгів](#) - М.: Вища [школа](#), 2000. (Підручник)