

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

Мета роботи: вивчити перехідні процеси у колах першого порядку при підключенні кола до джерела імпульсних сигналів.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Перехідні процеси в R, C колі при дії постійної ЕРС. Перехідний режим відповідає випадку переходу кола від одного усталеного режиму до другого. Звичайно перехідний режим (процес) має місце при вмиканні або вимиканні кола, що утримує реактивні елементи, і обумовлений тим, що запас енергії в них не може змінюватись миттєво. Так, струм у котушці (перший закон комутації) і напруга на конденсаторі (другий закон комутації) не можуть змінюватись стрибкоподібно із-за кінцевого значення прикладеної ЕРС. У той же час стрибкоподібна зміна напруги на котушці і струму через конденсатор допустимі, оскільки вони не зв'язані із зміною запасів енергії у відповідних елементах ( $W_L = L i^2 / 2$ ;  $W_c = c U_c^2 / 2$ )

Нехай у колі з послідовно ввімкненими R і C в момент часу  $t = 0$  ключ K замикається на затискач "1" (рис.1,а). Згідно з другим законом Кірхгофа рівняння стану кола

$$RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = e \quad (1)$$

Рівняння (1) описує перехідний процес у колі R, C відносно напруги на конденсаторі  $U_c$ . Загальне розв'язання рівняння (1)

$$U_c = U_c' + U_c'' \quad (2)$$

де  $U_c'$  часткове рішення (1), коли невідома функція змінюється за таким же законом, як і прикладена ЕРС  $e$  (вимушений режим);  $U_c''$  відповідає розв'язанню однорідного рівняння, коли  $e = 0$  (вільний режим).

Якщо  $e = E$  (постійна ЕРС) і при нульових початкових умовах ( $U_c(0) = U_c(0) = U_c(0) = 0$ , тобто в момент замикання ключа конденсатор не заряджений), отримаємо:

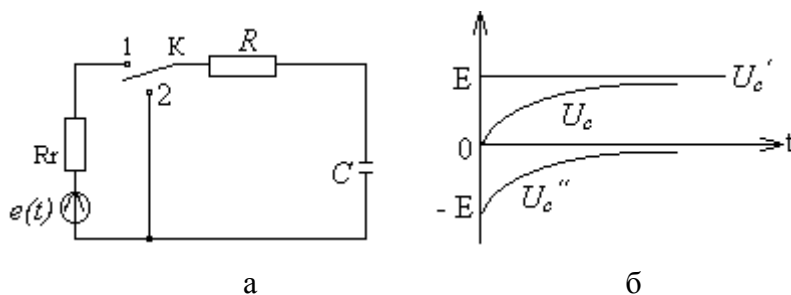


Рис.1

$$U_c' = E; U_c'' = -E \exp(-t/RC); U_c = E [1 - \exp(-t/RC)] \quad (3)$$

Як впливає з рівняння (3), швидкість наростання напруги (рис.1,б) залежить від величини

$$t_k = RC, \quad (4)$$

що має розмірність часу і називається постійною часу кола. Теоретично перехідний процес продовжується нескінченно довго, але практично можна вважати, що він закінчується через час  $t = 5t_k$  ( $U_c = 0,99E$ )

2. Перехідні процеси в R, C колі при короткому замиканні. Нехай конденсатор заряджений до напруги  $U_{c0}$ . Перекинемо ключ K з положення "1" у положення "2" (рис.1,а). Має місце режим короткого замикання кола ( $e = 0$ ) при ненульових початкових умовах ( $U_c(0) = U_c(0) = U_{c0}$ ). У цьому випадку, згідно з (1) і (2), перехідна напруга

$$U_c \llcorner = U_{c0} \exp \llcorner t / RC \llcorner \quad (5)$$

3. Перехідні процеси в R, C колі при дії імпульсної ЕРС. Нехай на вході R, C кола діє послідовність “ідеальних” (тривалість наростання і спадання імпульсів дорівнює нулю) прямокутних імпульсів:  $e \llcorner = E$ , якщо  $0 \leq t \leq t_u$ ;  $e \llcorner = 0$ , якщо  $t_u < t < T$ .

Тут  $t_u$  – тривалість імпульсу, T- період повторення імпульсів (рис.2).

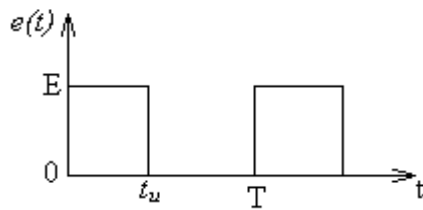


Рис.2

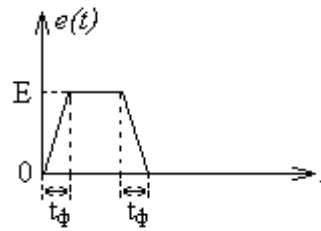


Рис.3

В інтервалі часу  $0 \leq t \leq t_u$  справедливе рівняння (3), а в інтервалі часу  $t_u < t < T$  (режим короткого замикання при ненульових початкових умовах)

$$U_c \llcorner = E \llbracket \exp \llcorner t_u / RC \llcorner - 1 \rrbracket \exp \llcorner t / RC \llcorner \quad (6)$$

Рівняння (3) і (6) будуть справедливі і для реальної послідовності прямокутних імпульсів, якщо тривалість переднього і заднього фронтів значно менше тривалості імпульсу (рис.3).

Якщо відома перехідна величина  $U_c \llcorner$ , то можна визначити інші перехідні величини такі як струм  $U \llcorner = cdU_c / dt$  і напруга  $U_R \llcorner = RU \llcorner$ . У випадку імпульсної ЕРС

$$U_R \llcorner = E \llbracket - \exp \llcorner t_u / RC \llcorner \rrbracket \exp \llcorner t / RC \llcorner \quad (7)$$

для інтервалу часу  $t_u < t < T$  і

$$U_R \llcorner = E \exp \llcorner t / RC \llcorner \quad (8)$$

якщо  $0 \leq t \leq t_u$ .

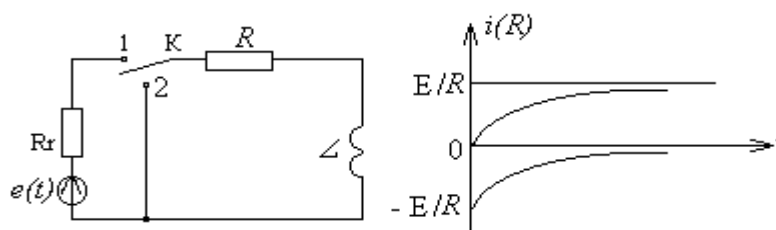
4. Перехідні процеси в R, L колі при дії постійної ЕРС. При замиканні ключа К в положення “1” (рис.4,а) рівняння стану кола має вигляд

$$Ri + L \frac{di}{dt} = e \llcorner \quad (9)$$

Перехідний струм

$$i \llcorner = i' + i'', \quad (10)$$

де  $i'$  - вимушена,  $i''$  - вільна складова струму.



а

б

Рис.4

У випадку, коли  $e \llcorner = E$  (постійна ЕРС) і при нульових початкових умовах  $\llcorner = 0, i = 0 \llcorner$ ; одержимо (рис.4, б)

$$i' = E/R; i'' = -\llcorner/R \llcorner \exp \llcorner Rt/L \llcorner; i \llcorner = \llcorner/R \llcorner - \exp \llcorner Rt/L \llcorner \llcorner \quad (11)$$

З рівняння (11) випливає, що швидкість перехідного процесу залежить від величини

$$t_k = L/R, \quad (12)$$

що має розмірність часу і називається постійною часу кола.

5. Перехідні процеси в R, L колі при короткому замиканні. Нехай у колі R, L під дією ЕРС протікає струм  $I_0 = E/R$ . Перекинемо ключ К з положення “1” у положення “2” (рис.4,а). Має місце режим короткого замикання кола  $\llcorner = 0 \llcorner$ . При ненульових початкових умовах  $\llcorner_- \llcorner = i \llcorner_+ \llcorner = I_0 \llcorner$ . У цьому випадку, на підставі рівняння (9) і (10), перехідний струм

$$i \llcorner = I_0 \exp \llcorner Rt/L \llcorner \quad (13)$$

6. Перехідні процеси в R, L колі при дії імпульсної ЕРС. У випадку дії на коло R, L імпульсної ЕРС (рис.2) перехідні процеси аналізуються подібно випадку R, C кола. Напряга на окремих елементах кола описується рівняннями:

а)  $0 \leq t \leq t_u$

$$U_R \llcorner = E \llcorner \exp \llcorner Rt/L \llcorner; U_L \llcorner = E \exp \llcorner Rt/L \llcorner \llcorner \quad (14)$$

б)  $t_u < t < T$

$$\left. \begin{aligned} U_R \llcorner = E \llcorner - \exp \llcorner Rt/L \llcorner \exp \llcorner R(-t_u) \llcorner L \llcorner \\ U_L \llcorner = E \llcorner - \exp \llcorner Rt_u/L \llcorner \exp \llcorner Rt/L \llcorner \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Постійну часу кола можна визначити із графіка будь-якої перехідної функції. Наприклад, якщо перехідна функція зменшується в часі, то вимірюючи її амплітуду в момент початку перехідного процесу  $U_0$  і в будь-який інший відомий момент часу  $t'$ , одержимо  $U' = U_0 \exp \llcorner t'/t_k \llcorner$ , звідси

$$t_k = t' / \ln \llcorner U_0 / U' \llcorner \quad (16)$$

7. Диференціюючі та інтегруючі кола. Кола R, C і R, L часто використовують для перетворення форми імпульсних коливань.

Нехай при дії на R, C коло прямокутних імпульсів  $t_u > t_k$ . Тоді за час дії імпульсу перехідні процеси близькі до завершення, а тому в рівнянні (1) можна нехтувати першим членом у лівій частині:  $U_c = e \llcorner$ . Враховуючи, що  $U_c = \llcorner/c \llcorner \int i dt$  одержимо  $i = c \llcorner e / dt \llcorner$ , а падіння напруги на резисторі

$$U_R \llcorner = CR \frac{de \llcorner}{dt} \quad (17)$$

пропорційно похідній від вхідного сигналу. А тому таке коло називають диференціюючим, а напругу  $U_R \llcorner$  – диференціюючим імпульсом (рис.5,а).

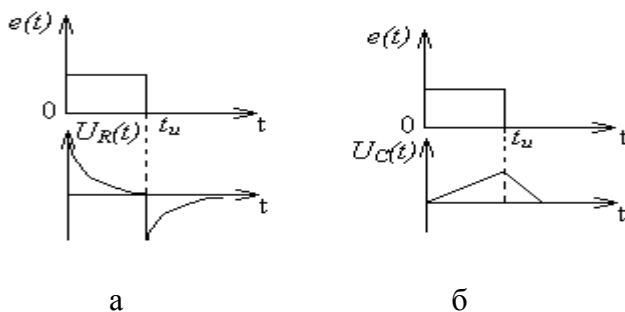


Рис.5

Якщо  $t_u < t_k$ , перехідні процеси далекі від завершення і тому в рівнянні (1) можна нехтувати другим членом у лівій частині:  $RC \frac{dU_c}{dt} \approx e$ . Звідси

$$U_c \approx \frac{1}{RC} \int e dt, \quad (18)$$

тобто, напруга на конденсаторі пропорційна інтервалу від вхідної напруги. А тому таке коло називають інтегруючим, а напругу  $U_c$  – інтегруючим імпульсом (рис.5,б).

При дії на  $R, L$  коло прямокутних імпульсів  $t_u \gg t_k$  із рівняння (9):  $i \approx e/R$ , а  $U_L \approx L \frac{di}{dt}$  – диференціюючий імпульс, аналогічний рис.5,а. Якщо  $t_u \ll t_k$ , то  $U_R \approx R/L \int e dt$  – інтегруючий імпульс, аналогічний рис.5,б.

### Контрольні запитання

1. Чому у колі з послідовно ввімкненими  $R$  і  $C$  при дії постійної ЕРС вимушена складова струму дорівнює нулю?
2. Яку форму має імпульс напруги на опір  $R$  у колі  $R, C$  при дії прямокутного імпульсу тривалістю  $t_u = 5 t_k$ ?
3. Чи можна у колі з послідовним сполученням  $R$  і  $L$  спостерігати стрибок струму?
4. Як впливає на перехідні процеси у колі з послідовно ввімкненими  $R$  і  $C$  або  $R$  і  $L$  внутрішній опір джерела ЕРС?
5. Як далекі від завершення перехідні процеси у колі з послідовно ввімкненими  $R$  і  $L$ , якщо  $t_u = 3 t_k$ ?
6. Чому дорівнює струм у колі з послідовно ввімкненими  $R$  і  $C$  в момент умикання імпульсної ЕРС з амплітудою  $E$ ?
7. Яку форму має імпульс напруги на резистор  $R$  у колі з послідовно ввімкненими  $R$  і  $L$  при дії прямокутного імпульсу тривалістю  $t_k = 5 t_u$ ?

### Домашнє завдання

1. Вивчити короткі теоретичні відомості про перехідні процеси в колах першого порядку.
2. Дати відповіді на контрольні запитання в письмовій формі.
3. Розрахувати і побудувати зміни з часом амплітуди напруг  $U_R$  і  $U_C$  у колі  $R, C$  при дії імпульсних коливань прямокутної форми, якщо  $R = 10$  кОм,  $C = 2500$  пф. Значення  $E$  і  $t_u$  – згідно з вашим варіантом завдань.
4. Розрахувати і побудувати зміни з часом амплітуди напруги  $U_R$  і  $U_L$  у колі  $R, L$  при дії імпульсних коливань прямокутної форми, якщо  $R = 300$  Ом,  $L = 0,15$  Гн, а значення  $E$  і  $t_u$  – згідно вашого варіанту завдань.

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$E, В$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5
$t, мкс$	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350

### Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з принципом дії приладів, які використовуються в роботі: генератор GFG-8210, осцилограф.
2. Ознайомитись з макетом. Підключити прилади до кола  $R, C$ . Увімкнути прилади для прогріву. На виході генератора установити амплітуду і тривалість прямокутних імпульсів згідно варіанту завдання. Параметри імпульса проконтролювати за допомогою осцилографа.
3. Для різних значень ємності  $C$  (дивіться макет) розрахувати постійну часу кола. Оцінити, для яких ємностей кола буде мати диференціюючий або інтегруючий характер.

Примітка. При розрахунку постійних часу кола потрібно врахувати вихідний опір генератора.

4. Зарисувати осцилограми напруг на резисторі і конденсаторі при різних значеннях ємності  $C$ :  $U_R = F(\omega)$ ,  $U_C = F(\omega)$ . За зовнішнім виглядом осцилограм виділити диференціюючі і інтегруючі імпульси напруг.
5. За осцилограмами, що відповідають умові диференціювання, визначити амплітуди напруг  $U_R(\omega)$  і  $U_C(\omega)$  і зрівняти з даними розрахунків (п.3 домашнього завдання). За осцилограмою визначити постійну часу кола.
6. Для різних значень опору резистора  $R$  кола  $R$ ,  $L$  розрахувати постійну часу кола з урахуванням вихідного опору генератора. Оцінити, для яких комбінацій елементів кола буде мати диференціюючий або інтегруючий характер.
7. Зарисувати осцилограми напруг на індуктивній котушці і резисторі при різних значеннях опорів  $R$ :  $U_D = F(\omega)$ ,  $U_R = F(\omega)$ . За зовнішнім виглядом осцилограм установити диференціюючі та інтегруючі імпульси напруг.
8. За осцилограмами, що відповідають умові інтегрування, визначити амплітуди напруг  $U_D(\omega)$  і  $U_R(\omega)$  і зрівняти з розрахунковими даними (п.4 домашнього завдання). За осцилограмою визначити постійну часу кола.
9. У звіті привести: схеми для вимірювань, таблиці розрахункових і експериментальних даних, графіки і осцилограми. Дати пояснення отриманих результатів.

#### Список літератури

1. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высш. шк., 1985.-496 с.
2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972.-816 с.