

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ
з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки”
(Розділ “Перехідні процеси”)**

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ**

з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки”

(Розділ “Перехідні процеси”)

для студентів всіх форм навчання

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено

методичною радою університету,

протокол № __ від _____ 2020 р.

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До друку та в світ дозволяю

Перший проректор

С.Я. Ходирев

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ
з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки”
(Розділ “Перехідні процеси”)**

Всі цитати, цифровий,
фактичний матеріал
та бібліографічні
відомості перевірені,
написання одиниць
відповідає стандартам

Затверджено
методичною радою університету,
Протокол № __ від ____ 2020 р.

Укладачі:

О. П. Смирнов

А.О. Борисенко

Відповідальний за випуск

О. В. Бажинов

Харків 2020

Укладачі:

О. П. Смирнов

А.О. Борисенко

Кафедра Автомобільної електроніки

Вступ

Для засвоєння теоретичного і практичного матеріалу з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» виконується курсова робота, що складається з завдань по розділу «Перехідні процеси».

Виконання курсової роботи включає розрахунок законів зміни струму та напруги у перехідному режимі кіл постійного струму. Метою курсової роботи є перевірка освоєння студентами розділу «Перехідні процеси» дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

Предметом навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» є поняття та закони з області електромагнітних явищ, на основі яких викладаються властивості та методи розрахунку електромагнітних кіл.

При вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» і виконанні розрахунково-графічних завдань курсової роботи студенти здобувають необхідні знання про основні методи розрахунку електричних кіл і практичні навички розрахунку та побудови часових графіків.

Розрахунково-графічне завдання курсової роботи складається з 50 варіантів. Номер варіанта відповідає порядковому номеру прізвища студента в журналі для першої навчальної групи. Для студентів другої навчальної групи номер варіанта відповідає порядковому номеру прізвища студента в журналі з додаванням цифри 25. Так для першого з списку студента в журналі з другої навчальної групи варіант обирається під номером 26 і т.д.

При оформленні кожного завдання варто приводити коротку умову, розрахункову схему з прийнятими літерними позначеннями і вихідні дані відповідно до свого варіанта. У ході рішення давати короткі словесні пояснення виконуваних дій, записувати розрахункові формули, указувати розмірності всіх знайдених значень.

На титульному листі курсової роботи повинне бути зазначене найменування університету, факультету і кафедри, прізвище, ініціали викладача, що перевіряє завдання, прізвище, ініціали, номер групи і варіант студента. Наприкінці роботи необхідно

привести список використаної літератури, поставити дату закінчення роботи і свій підпис.

При виконанні розрахунково-графічних завдань курсової роботи з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» рекомендується використовувати математичний пакет Mathcad.

Курсова робота розрахована на 10 годин самостійної роботи.

Основні критерії оцінки роботи студента

Основні критерії оцінки роботи студента в результаті виконання курсової роботи з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» та переведення показників успішності знань студентів наведено у табл.

Таблиця - Основні критерії оцінки роботи студента

Роз'яснення оцінки	Кількість балів	Оцінка за	
		шкалою ECTS	національною шкалою
1	2	3	4
Відмінне виконання завдання курсової роботи без помилок. Вірно виконаний розрахунок законів зміни струму та напруги у перехідному режимі кіл постійного струму, побудовані необхідні часові графіки. Вільне володіння основними методами та законами розрахунку електричних кіл, чітке пояснення вирішеної задачі, акуратне її оформлення, упевнена робота на ПК.	90 - 100	A	відмінно (зараховано)
Вище середнього рівня виконане завдання курсової роботи з незначними помилками. Вірно виконаний розрахунок законів зміни струму та напруги у перехідному режимі кіл постійного струму, побудовані необхідні часові графіки. Студент володіє класичним методом розрахунку електричних кіл у перехідних режимах, упевнено пояснює рішення задачі, акуратний в оформленні, має відмінні навички роботи на ПК.	80 - 89	B	добре (зараховано)

продовження табл.

1	2	3	4
<p>Загалом завдання курсової роботи виконані правильно, але з певною кількістю помилок. Вірно виконанні розрахунку законів зміни струму та напруги у перехідному режимі кіл постійного струму, побудовані необхідні часові графіки з певною кількістю помилок. Студент повинний знати та уміти користатися класичним методом розрахунку електричних кіл у перехідних режимах.</p>	75 - 79	C	добре (зараховано)
<p>Непогане виконання завдань курсової роботи, але зі значною кількістю помилок. Правильне виконаний розрахунок законів зміни струму та напруги у перехідному режимі кіл постійного струму, побудовані необхідні часові графіки зі значною кількістю помилок. Студент повинний уміти користатися класичним методом розрахунку електричних кіл у перехідних режимах, але допускає неточності при поясненні задачі.</p>	67 - 74	D	задовільно (зараховано)
<p>Виконання завдань курсової роботи задовольняє мінімальні критерії. Недбалість у оформленні курсової роботи.</p>	60 - 66	E	задовільно (зараховано)
<p>Потрібне повторне перескладання</p>	35 - 59	FX	не задовільно (не зараховано)
<p>Повторне вивчення дисципліни</p>	1 – 34	F	не задовільно (не зараховано)

Теоретичні положення

1. Визначення перехідних процесів

Під перехідними процесами розуміють процеси переходу від одного сталого режиму роботи електричного кола (звичай періодичного) до іншого (також періодичного), що відрізняється від попереднього, наприклад, величиною струму, напруги, амплітуди, фази, формою або частотою діючої в схемі ЕРС, значеннями параметрів схеми і внаслідок зміни конфігурації кола.

Періодичними режимами є режим синусоїдального струму, режим постійного струму та режим відсутності струму на ділянках кола. Перехідні процеси викликаються комутацією в колі. Комутація – це процес замикання або розмикання рубильників або вимикачів (рис. 1).



Рисунок 1 – Комутація електричних схем

Фізично перехідні процеси представляють собою процеси переходу від одного енергетичного стану, відповідного докомутаційному режиму, до другого енергетичного стану, відповідному післякомутаційному режиму. Перехідні процеси у електричних колах звичайно швидко протікають; тривалість їх складає долі секунди. Проте вивчення перехідних процесів дуже важливо, тому що воно дозволяє виявити можливі перевищення напруги на окремих ділянках кола, які можуть виявитися небезпечними, з'ясувати можливі збільшення амплітуд струму усталеного періодичного процесу.

2. Приведення завдання про перехідний процес до вирішення лінійного диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для схеми, яка наведена на рис.1 при замиканні вимикача

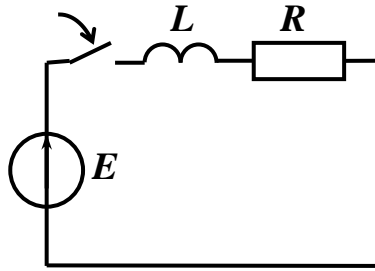


Рисунок 2 – Схема електрична RL кола

Сума падіння напруги на індуктивності L та опорі R дорівнює ЕРС E

$$U_L + Ri = E \quad (1)$$

або

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E \quad (2)$$

Як відомо з курсу математики, рівняння, що містить невідому функцію (у нашому випадку струм i) і її похідні ($L \frac{di}{dt}$), називають диференціальним рівнянням. Таким чином, визначення струму як функції часу фактично є рішенням диференціального рівняння. Відомо, що рішення диференціального рівняння – це пошук функції, яка задовольняє диференціальне рівняння. Підстановка цієї функції і її похідних дає нам тотожність.

Рішення лінійних диференціальних рівнянь ми будемо проводити класичним методом. Але перед цим ми розглянемо загальні властивості лінійних кіл при перехідних процесах, а також загальні закони, яким підкоряються перехідні процеси в лінійних електричних колах.

3. Примушені і вільні складові струмів і напруги

Відомо, що загальний інтеграл лінійного диференціального рівняння дорівнює сумі частинного рішення неоднорідного рівняння та загального рішення однорідного рівняння. У нашому прикладі частинне рішення рівняння дорівнює $i = \frac{E}{R}$.

Однорідне рівняння одержуємо з рівняння (2), якщо в ньому взяти праву частину рівною нулю. У нашому випадку

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0 \quad (3)$$

Рішенням однорідного рівняння є показова функція виду Ae^{pt} .

Умовимося, що для всіх перехідних процесів момент часу $t = 0$ відповідає моменту комутації. А i і p – деякі постійні числа, що не залежать від часу.

$$A = -\frac{E}{R} \text{ и } p = -\frac{R}{L} \quad (4)$$

Отже, рішення рівняння буде мати вигляд

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (5)$$

У ньому доданок $\frac{E}{R}$ – це частинне рішення неоднорідного рівняння, а доданок $-\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$ – загальне рішення однорідного рівняння. Підстановка i дасть нам тотожність.

Частинне рішення неоднорідного диференціального рівняння будемо називати примусовою складовою струму, а повне рішення однорідного рівняння – вільною складовою. У нашому прикладі примусова складова струму дорівнює $i_{np} = \frac{E}{R}$, а вільна –

$i_{\text{в}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$. Повна величина струму має вигляд

$$i = i_{\text{св}} + i_{np} \quad (6)$$

Примусова складова струму чи напруги фізично являє собою складову, яка змінюється з тією ж частотою, що діюча в схемі ЕРС, а вільна складова згасає за показовим законом $-\frac{E}{R}e^{-\frac{R}{L}t}$. Зі

збільшенням часу t множник $e^{-\frac{R}{L}t}$ швидко зменшується. Назва «вільна» пояснюється тим, що ця складова є рішенням рівняння, вільного від сили, яка змушує (однорідне рівняння (2) без правої частини).

З трьох струмів (повного, примусового і вільного) основне значення має повний струм. Повний струм є тим струмом, який у дійсності протікає по тій чи іншій гілці кола під час перехідного процесу. Аналогічно і повне напруга. Примусові і вільні складові струмів або напруг під час перехідного процесу відіграють допоміжну роль, вони є тими розрахунковими компонентами, сума яких дає дійсні величини.

При будь-яких перехідних і сталих процесах треба дотримувати двох основних положень: струм через індуктивність і напруга на ємності не можуть змінюватися стрибком.

4 Закони комутації

4.1 Перший закон комутації. Струм через індуктивність безпосередньо до комутації $i_L(0-)$ дорівнює струму через ту ж індуктивність одразу після комутації $i_L(0+)$

$$i_L(0-) = i_L(0+). \quad (8)$$

Отримана рівність називається першим законом комутації. В рівнянні (8) час $t = 0 -$ являє собою час безпосередньо до комутації, а час $t = 0 +$ безпосередньо після комутації.

4.2 Другий закон комутації. Напруга на ємності безпосередньо до комутації $U_C(0-)$ дорівнює напруги на цієї ж ємності одразу після після комутації $U_C(0+)$

$$U_C(0-) = U_C(0+) \quad (9)$$

Отримана рівність називається другим законом комутації. В рівнянні (9) час $t = 0 -$ являє собою час безпосередньо до комутації, а час $t = 0 +$ безпосередньо після комутації.

5. Варіанти завдань

Варіанти завдань наведені у табл. 2, а відповідні схеми для розрахунку – на рис. 3-21.

Таблиця 2 – Варіанти завдань

Варіант	Схема	E, В	L, мГн	C, мкФ	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	Визначити
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	100	1	10	20	15	5	2	i_1
2	2	150	2	5	8	10	5	2	i_1
3	19	100	1	10	2	2	-	-	i_1
4	10	120	1	10	3	0	1	1	i_1
5	3	100	5	50	2	8	6	-	i_1
6	1	50	1	1500	2	13	1	4	i_1
7	11	120	10	10	10	90	1000	1000	i_1
8	18	200	1	20	41	4	2	-	i_3
9	4	100	1	10	50	25	25	-	u_C
10	17	300	5	4	10	20	10	20	u_C
11	20	100	1	10	20	20	10	2	u_{R3}
12	15	150	4	5	6	10	5	4	u_C
13	6	30	1	2,5	10	10	10	-	u_C
14	7	200	10	10	100	0	50	100	i_1
15	12	100	1	10	10	10	4	-	i_1
16	16	50	2	1670	1	2	1	5	i_1
17	8	120	10	10	10	90	1000	1000	i_1
18	13	120	1	10	8	8	8	4	i_1
19	9	200	1	10	10	20	50	20	i_1
20	14	50	1	100	2	8	10	10	i_1
21	5	100	1	10	20	20	0	2	u_L
22	2	150	2	5	5	10	5	5	i_2
23	19	100	1	10	1	3	-	-	i_3
24	10	120	1	10	1	2	1	1	i_2
25	3	100	5	50	3	8	5	-	u_C
26	1	50	1	1500	2	13	2	3	i_2
27	11	120	10		20	80	1000	1000	i_3
28	18	200	1	10	6	6	3	-	i_1

Продовження табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
29	4	100	1	20	50	20	30	-	u_L
30	17	300	5	10	15	20	5	20	i_2
31	20	100	1	4	10	10	5	2	i_1
32	15	150	4	10	9	10	5	1	u_L
33	6	30	1	5	5	10	15	-	i_3
34	7	200	10	2,5	50	50	50	100	u_{R3}
35	12	100	1	10	5	15	4	-	u_L
36	16	50	2	1670	1	2	2	4	i_2
37	8	120	10	10	20	80	1000	1000	i_2
38	13	120	1	10	12	6	8	4	i_3
39	9	200	1	10	10	10	50	30	i_2
40	14	50	1	100	3	7	10	10	i_2
41	5	100	1	10	20	2	18	2	u_C
42	2	150	2	5	4	10	5	6	i_3
43	19	100	1	10	1,5	2,5	-	-	i_2
44	10	120	1	10	2	1	1	1	u
45	3	100	5	50	6	8	2	-	i_{R3}
46	1	50	1	1500	2	13	3	2	u_L
47	11	120	10	10	30	70	1000	1000	i_2
48	18	200	1	20	12	12	6	-	i_2
49	4	100	1	10	50	10	40	-	i_3
50	17	300	5	4	3	20	17	20	i_1

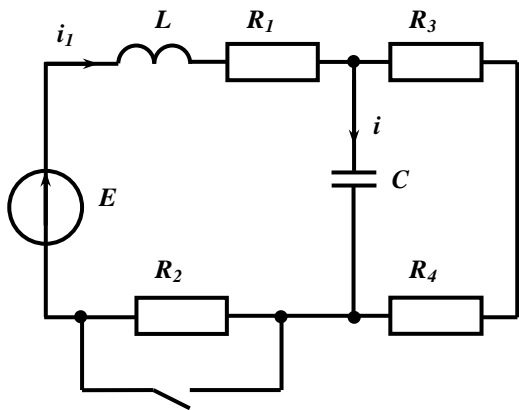


Рисунок 3 – Схема 1

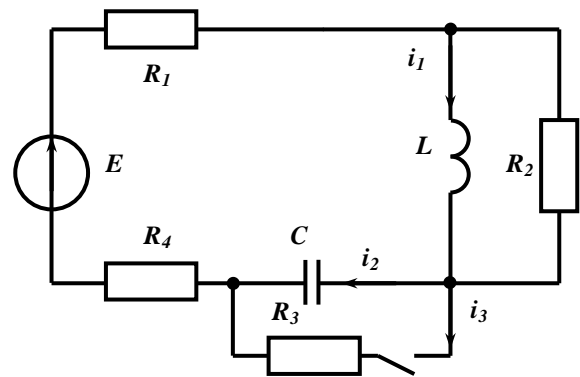


Рисунок 4 – Схема 2

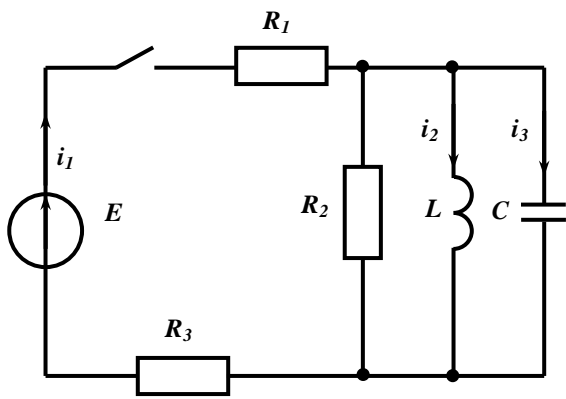


Рисунок 5 – Схема 3

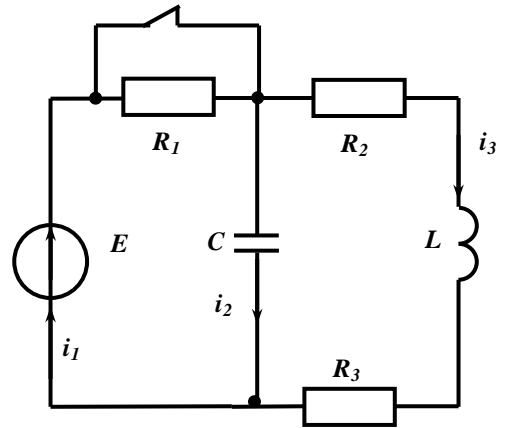


Рисунок 6 – Схема 4

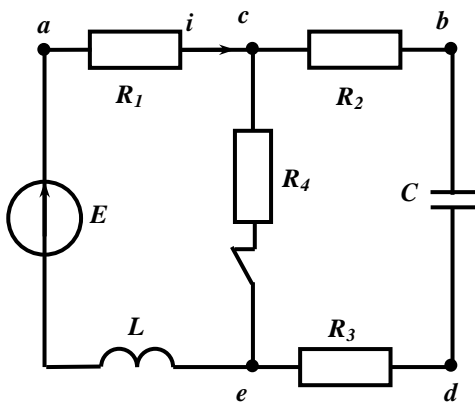


Рисунок 7 – Схема 5

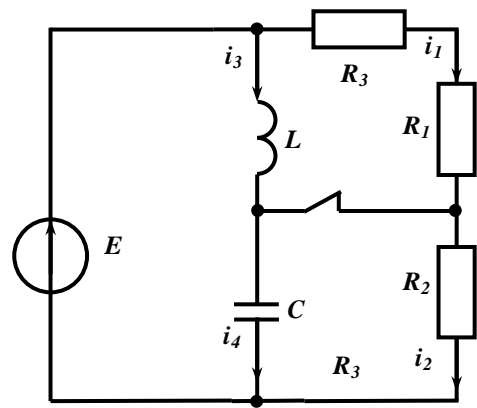


Рисунок 8 – Схема 6

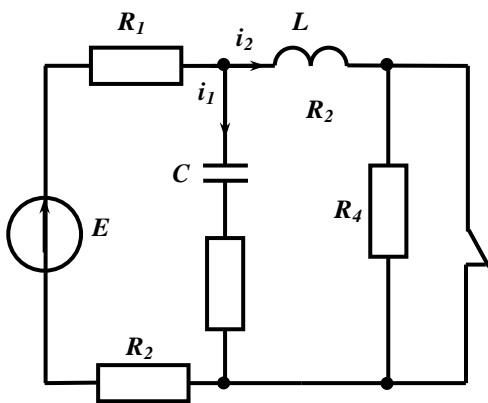


Рисунок 9 – Схема 7

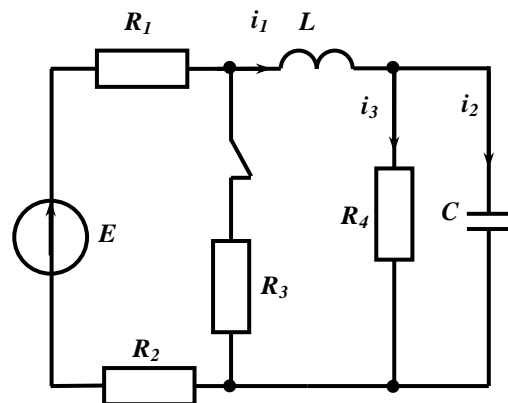


Рисунок 10 – Схема 8

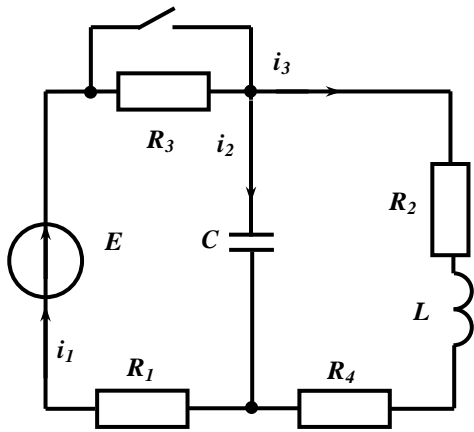


Рисунок 11 – Схема 9

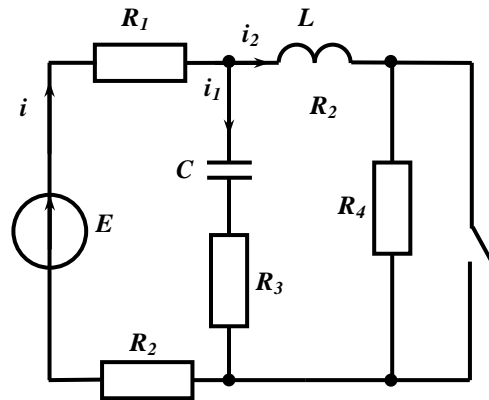


Рисунок 12 – Схема 10

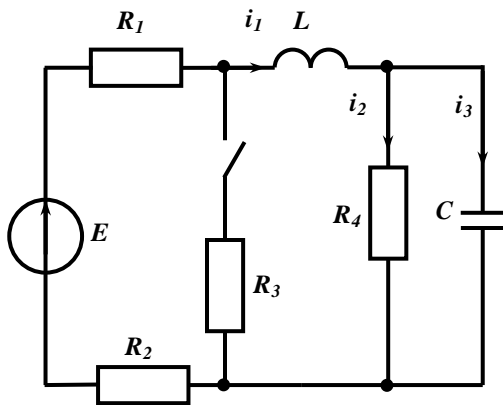


Рисунок 13 – Схема 11

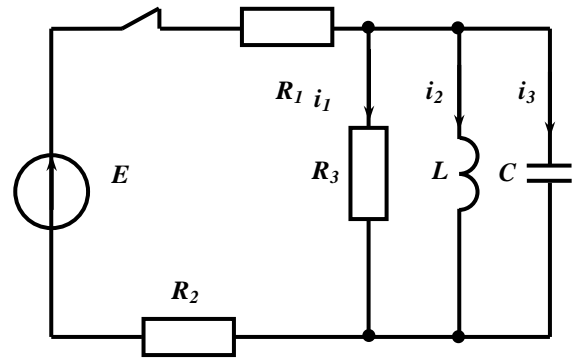


Рисунок 14 – Схема 12

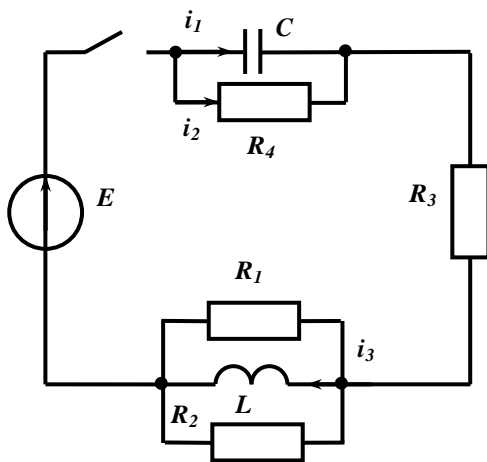


Рисунок 15 – Схема 13

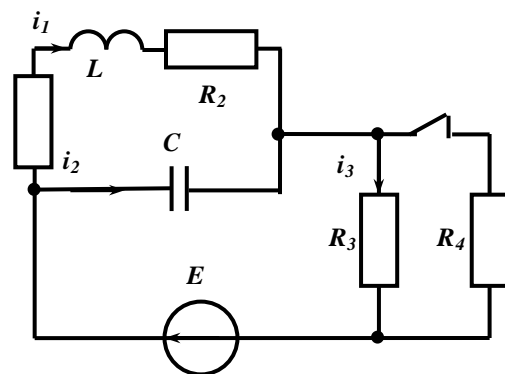


Рисунок 16 – Схема 14

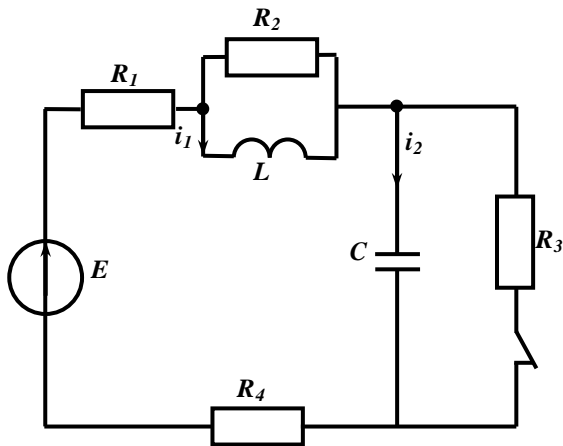


Рисунок 17 – Схема 15

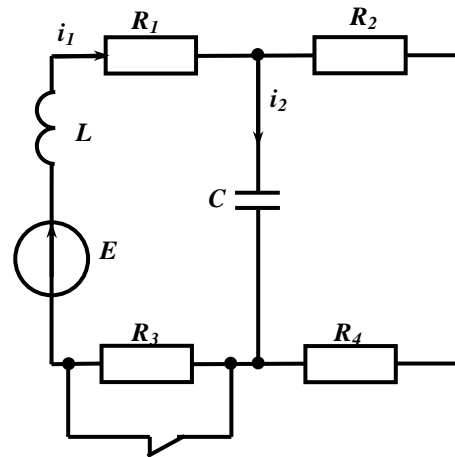


Рисунок 18 – Схема 16

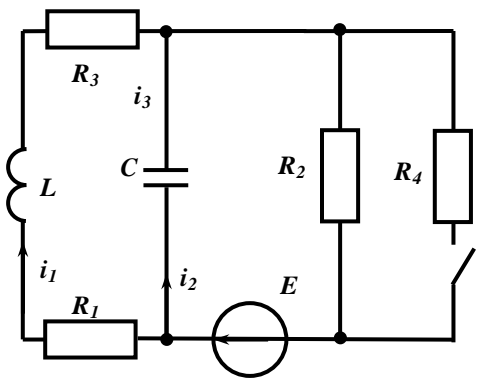


Рисунок 19 – Схема 17

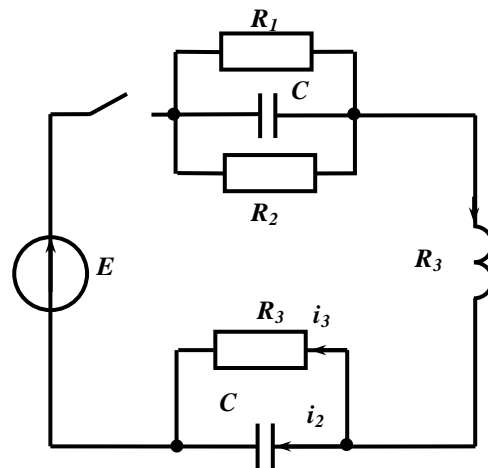


Рисунок 20 – Схема 18

6. Приклади рішення задач

Проведемо дослідження законів зміни струму та напруги у перехідних режимах. Приклад розрахункової схеми наведена на рис. 21. Дано: $E=100$ В, $L=0.001$ Гн, $C=0.00001$ Ф, $R1=R2=2$ Ом. Знайти: закон зміни струму $i_1(t)$.

Рішення: складемо рівняння за законами Кирхгофа

$$U_c + U_L = E$$

$$i_3(R_1 + R_2) - U_c = 0$$

$$i_1 = i_2 + i_3$$

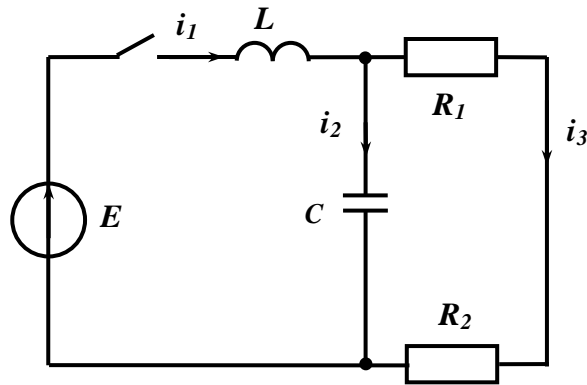


Рисунок 21 – Схема електрична розрахункова

Для спрощення розрахунку приймемо, що $R_e = R_1 + R_2$.

Перепишемо рівняння для післякомутаційної схеми, тобто для моменту часу $t = 0_+$

$$U_c(0_+) + U_L(0_+) = E$$

$$i_3(0_+)R_e - U_c(0_+) = 0$$

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+)$$

З умови напруга на ємності у момент часу безпосередньо до комутації дорівнює нулю $U_c(0_-) = 0$, але по другому закону комутації $U_c(0_-) = U_c(0_+) = 0$. Отже, система одержить наступний вигляд

$$U_L(0_+) = E$$

$$i_3(0_+)R_e = 0$$

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+)$$

Знайдемо початкові значення повних струмів перехідного процесу в момент часу безпосередньо після комутації $t = 0_+$.

$$i = i_e + i_{np}.$$

Із системи рівнянь одержуємо

$$i_3(0_+) = 0;$$

$$i_2(0_+) = i_1(0_+).$$

За першим законом комутації $i_1(0_-) = i_1(0_+) = 0$, тоді система прийме наступний вигляд

$$i_1(0_-) = i_2(0_+) = i_1(0_+) = 0.$$

Знайдемо початкові значення вимушених складових струмів, А

$$i_{2np} = 0;$$

$$i_{3np} = i_{1np} = \frac{E}{R_1 + R_2} = 25.$$

Струм $i_{2np} = 0$, тому що в колі діє джерело постійної ЕРС, а для постійного струму ємність являє собою розрив кола.

Знайдемо початкові значення вільних складових струмів безпосередньо після комутації, А.

$$i_{1в}(0_+) = i_1(0_+) - i_{1np}(0_+);$$

$$i_{1в}(0_+) = 0 - 25 = -25.$$

$$i_{3в}(0_+) = i_3(0_+) - i_{3np}(0_+);$$

$$i_{3в}(0_+) = 0 - 25 = -25.$$

$$i_{2в}(0_+) = i_2(0_+) - i_{2np}(0_+);$$

$$i_{2в}(0_+) = 0.$$

Для перебування закону зміни в часі струму i_1 , знайдемо функцію зміни вільної складової струму. Для визначення виду функції вільної складової (в залежності від кількості і виду коренів (комплексні, дійсні)) складемо характеристичне рівняння

$$z(p) = pL + \frac{R_3 \cdot \frac{1}{pc}}{R_3 + \frac{1}{pc}}.$$

Прирівнюємо рівняння до нуля

$$pL + \frac{R_3 \cdot \frac{1}{pc}}{R_3 + \frac{1}{pc}} = 0;$$

$$pLR_3 + \frac{L}{C} + \frac{R_3}{pC} = 0.$$

У результаті перетворень одержуємо значення показників загасання, s^{-1}

$$0,004p^2 + 100p + 400000 = 0;$$

$$p_1 = -5000 \quad p_2 = -20000.$$

Ми одержали два дійсних нерівних корені (приклад для комплексних коренів дивися нижче). Отже, рівняння для вільної складової буде таким

$$\begin{cases} i_{1\epsilon} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}; \\ i'_{1\epsilon} = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}. \end{cases}$$

Знайдемо постійні інтегрування при $t=0$

$$e^{p_1 t} = e^{p_2 t} = 1$$

$$i_{1\epsilon}(0_+) = A_1 + A_2;$$

$$i'_{1\epsilon}(0_+) = \frac{di_{1\epsilon}}{dt} = A_1 p_1 + A_2 p_2.$$

З урахування того, що $U_L = L \frac{di}{dt}$ маємо

$$\frac{di_{1\epsilon}}{dt} = \frac{U_{L\epsilon}(0_+)}{L}.$$

Для визначення напруги $U_{L\epsilon}(0_+)$ (В) та швидкості наростання струму i_1 (А/с) складемо рівняння за другим законом Кирхгофа для вільних складових контуру, утворених першою і третьою гілками кола.

$$U_{L\epsilon}(0_+) + i_{3\epsilon}(0_+)R_9 = 0;$$

$$U_{L\epsilon}(0_+) = -i_{3\epsilon}(0_+)R_9;$$

$$U_{L\epsilon}(0_+) = 100;$$

$$\frac{di_{1\epsilon}}{dt} = 100000.$$

Підставимо отримане значення в систему рівнянь вільних складових

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = -25 \\ A_1 p_1 + A_2 p_2 = 100000 \end{cases}$$

Вирішивши систему рівнянь, одержимо

$$A_1 = -\frac{80}{3}; \quad A_2 = \frac{5}{3}.$$

Підставивши отримані значення A та p у формулу струмів одержуємо повний струм перехідного процесу

$$i_1 = 25 - \frac{80}{3} e^{-5000t} + \frac{5}{3} e^{-20000t}.$$

Залежність струму перехідного процесу i_1 від часу t наведена на рис. 22.

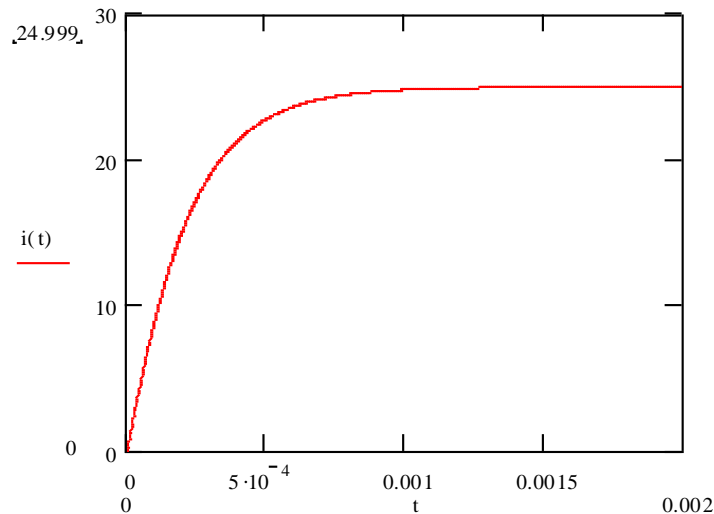


Рисунок 22 – Графічне зображення перехідного процесу

Задача вирішена.

Розглянемо далі приклад рішення, в якому корені характеристичного рівняння є комплексними числами. Розрахункова схема наведена на рис. 23.

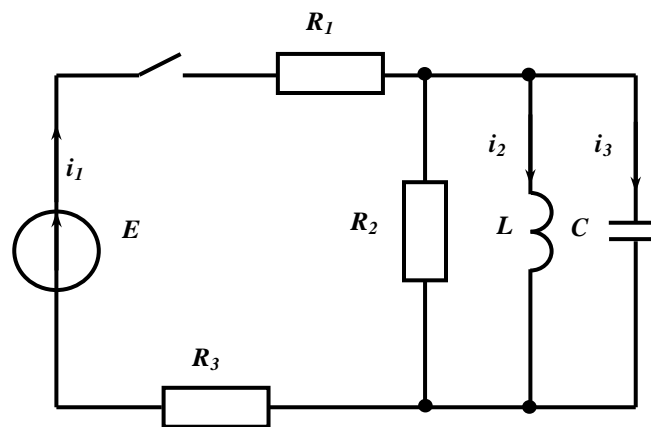


Рисунок 23 – Схема електрична розрахункова

Дано: $E=100$ В, $L=0.005$ Гн, $C=0.00005$ Ф, $R1=2$ Ом, $R2=8$ Ом, $R3=6$ Ом.

Знайти: закон зміни струму $i_1(t)$.

Рішення: складемо рівняння за законами Кирхгофа

$$i_1(R_1 + R_2 + R_3) = E$$

$$U_L - U_C = E$$

$$i_2 R_2 + U_L = 0$$

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4$$

Перепишемо рівняння для після комутаційної схеми, тобто для моменту часу $t = 0_+$.

$$i_1(0_+) R_{\Sigma} = E$$

$$U_L(0_+) - U_C(0_+) = 0$$

$$i_2(0_+) R_2 + U_L(0_+) = 0$$

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+) + i_4(0_+)$$

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3$$

З умови напруга на ємності, у момент часу безпосередньо до комутації, дорівнює нулю $U_C(0_-) = 0$, але за другим законом комутації

$$U_C(0_-) = U_C(0_+) = 0,$$

отже, система прийме наступний вигляд

$$i_1(0_+) R_{\Sigma} = E$$

$$U_L(0_+) = 0$$

$$i_2(0_+) R_2 + U_L(0_+) = 0$$

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+) + i_4(0_+)$$

Спростимо систему

$$i_1(0_+)R_3 = E$$

$$U_L(0_+) = 0$$

$$i_2(0_+)R_2 = 0$$

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+) + i_4(0_+)$$

Знайдемо початкові значення повних струмів перехідного процесу в момент часу безпосередньо після комутації $t = 0_+$.

$$i = i_e + i_{np}.$$

Із системи рівнянь одержуємо

$$i_2(0_+) = 0$$

$$i_3(0_-) = i_3(0_+) = 0$$

$$i_1(0_+) = i_4(0_+)$$

Знайдемо початкові значення примушених складових струмів. $i_{4np}(0_+) = 0$, тому що у колі діє джерело постійної ЕРС, а для постійного струму ємність являє собою розрив кола

$$i_{1np}(0_+) = \frac{E}{R_1 + R_3} = 12,5 \text{ (A)}.$$

i_{1e} знайдемо з рівняння

$$i_{4e}(0_+) = i_{1e}(0_+) + i_{1np}(0_+)$$

$$i_{1e}(0_+) = i_{4e}(0_+) - i_{1np}(0_+);$$

$$i_{1e}(0_+) = -12,5 \text{ A.}$$

$$i_{4e}(0_+) = -ke^{pt} = 0$$

$$k = \frac{E}{R} = \frac{U_C}{\frac{1}{j\omega C}} = U_C j\omega C = 0$$

Для перебування закону зміни в часі струму i_1 , знайдемо функцію зміни вільної складової струму.

Для цього складемо характеристичне рівняння

$$z(p) = R_1 + R_3 + \frac{R_2 \cdot pL}{pL + R_2 + R_2 + p^2 LC};$$

Прирівняємо рівняння до нуля

$$R_1 + R_3 + \frac{R_2 \cdot pL}{pL + R_2 + R_2 + p^2 LC} = 0$$

У результаті перетворень одержуємо

$$2000p^2 + 10p + 8 = 0$$

$$p_1 = -0,0025 - j0,0632 \quad p_2 = -0,0025 + j0,0632$$

Корені характеристичного рівняння є комплексними числами.

$$i_e = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + V),$$

$$\text{де } \delta = -0,0025 \text{ і } \omega_0 = 0,0632$$

Постійну A та кут V визначимо за значеннями вільної складової і її похідної при $t = 0_+$.

$$\begin{cases} i_e(0_+) = A \sin V \\ i'_e = -\delta A \sin V + \omega_0 A \cos V \end{cases}$$

Визначимо похідну від $i_{1\epsilon}$ за часом

$$i'_{1\epsilon}(0_+) = \frac{di_{1\epsilon}}{dt}$$

$$\frac{di_{1\epsilon}}{dt} = \frac{U_{L\epsilon}(0_+)}{L}$$

Для визначення напруги $U_{L\epsilon}(0_+)$ (В) та швидкості наростання струму i_l (А/с) складемо рівняння за другим законом Кирхгофа

$$U_{L\epsilon}(0_+) + i_{1\epsilon}(0_+)R_{\Sigma} = 0$$

$$U_{L\epsilon}(0_+) = -i_{1\epsilon}(0_+)R_{\Sigma}$$

$$U_{L\epsilon}(0_+) = 110$$

$$\frac{di_{1\epsilon}}{dt} = 20$$

$$i_{\epsilon}(0_+) = -12,5, \text{ чи } A \sin V = -12,5$$

$$i'_{\epsilon} = 20, \text{ чи } -\delta A \sin V + \omega_0 A \cos V = 20$$

Для визначення A і V маємо наступну систему

$$\begin{cases} A \sin V = -12,5 \\ -\delta A \sin V + \omega_0 A \cos V = 20; \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = \frac{-12,5}{\sin V} \\ A(-0,0025 \sin V + 0,0632 \cos V) = 20; \end{cases}$$

$$0,03125 - \text{ctg} V 0,79 = 20;$$

$$\text{ctg} V = -25,277;$$

$$V = -0,472;$$

$$A = -1516,72 \text{ А.}$$

Підставимо отримані значення у формулу для вільної складової у комплексному вигляді

$$i_{1B} = -1516,72e^{-0,0025t} \sin(0,0632t - 0,47).$$

Отриманні значення вільної і вимушеної складової підставимо у формулу для повного струму

$$i_1 = -12,5 - 1516,72e^{-0,0025t} \sin(0,0632t - 0,47).$$

Залежність струму перехідного процесу i_1 від часу t наведена на рис. 24.

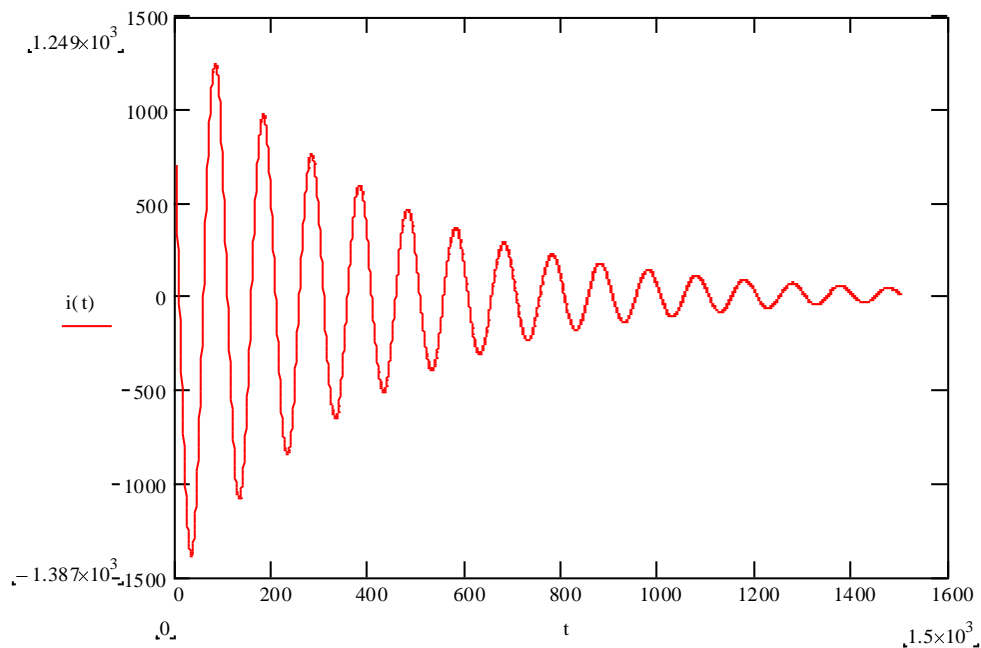


Рисунок 24 – Графічне зображення перехідного процесу

Задача вирішена.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: Підручник для бакалаврів. М. Видавництво “Юрайт”, 2016. – 702 с.
2. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола. Навчальний посібник. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
3. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами: підручник / Ю.О. Карпов, С.Ш. Кацив, В. В. Кухарчук, Ю.Г. Ведміцький ; під ред. проф. Ю.О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.
4. Малинівський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 640 с.
5. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн. 1. Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область: Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Спивак; За ред. М.Б. Ігумен. – К.: Вища шк., 2003. – 399 с.
6. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн. 2. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область: Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Спивак; За ред. М.Б. Ігумен. – К.: Вища шк., 2003. – 358 с.
7. Теорія електричних і магнітних кіл. Соколов Ю.В., Бабаєв М.М., Давиденко М.Г. – Харків: ХФВ "Транспорт України", 2002. – 264 с.
8. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” (Розділ “Перехідні процеси”). Смирнов О.П., Борисенко А.О., Харків, ХНАДУ, 2020, 40с. . <http://files.khadi.kharkov.ua>
9. Методичні вказівки до курсової роботи з “Теоретичні основи електротехніки” (Розділ “Розрахунок кіл постійного, синусоїдального та трифазного струму”) Смирнов О.П., Борисенко А.О., Харків, ХНАДУ, 2020, 32 с. <http://files.khadi.kharkov.ua>