

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних робіт
з дисципліни**

***“МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
ЕРС НА ЕОМ”***

Харків – 2015

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматизованих систем електричного транспорту 21 травня 2013 р., протокол №10.

Методичні вказівки призначено для студентів спеціальності 7.05070203 –"Електричний транспорт".

Укладач
доц. К.В. Ягуп

Рецензент
проф. М.Л. Лисиченко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

*“МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
ЕРС НА ЕОМ”*

Відповідальний за випуск Ягуп К.В.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 08.07.13 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,25. Тираж 25. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Українська державна академія залізничного транспорту

Кафедра "Автоматизовані системи електричного транспорту"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни

"Моделювання електромеханічних систем ЕРС на ЕОМ"

для студентів спеціальності

7.05070203 – "Електричний транспорт"

Харків, 2013

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматизованих систем електричного транспорту 21 травня 2013 р., протокол №10.

Методичні вказівки призначено для студентів спеціальності 7.05070203 –"Електричний транспорт".

Укладач:

доц. К.В. Ягуп

Рецензент

проф. М.Л. Лисиченко

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

Дослідження часових діаграм періодичних функцій (перевірка тригонометричних співвідношень)

1.1 Загальні відомості

Періодична функція – це така функція, що повторює свої значення через будь-який ненульовий проміжок часу – період T . Вона характеризується частотою $f = \frac{1}{T}$, що вимірюється у циклах в секунду (герцах).

До періодичних функцій можна віднести гармонійну функцію, що характеризується такими параметрами:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.1)$$

де A – амплітуда, максимальне значення;

φ – початкова фаза, може вимірюватися в радіанах або градусах, на часовій діаграмі, залежить від періоду T ;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклічна частота, рад/с.

Для переходу вимірювання фази із секунд в градуси можна використовувати таке співвідношення:

$$\varphi^{\circ} = \frac{\varphi^{\text{сек}} * 360^{\circ}}{T}. \quad (1.2)$$

Гармонійний аналіз процесів, що протікають в електричних колах несинусоїдних струмів, ґрунтується на розкладанні періодичних несинусоїдних ЕРС, ДС, струмів і напруг у ряд Фур'є. Якщо функція відповідає умовам Дирихле, а саме: рівномірно обмежена, має не більш ніж скінчену кількість точок розривів і всі вони 1-го роду і має не більш ніж скінчене число точок строгого екстремуму, то у будь-якій точці цього інтервалу, у якому функція неперервна, її можна розкласти в тригонометричний ряд Фур'є.

$$f(\omega t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t), \quad (1.3)$$

де коефіцієнти Фур'є, дійсні амплітуди A_k та B_k функції $f(\omega t)$ періоду 2π обчислюються за формулами

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t \, d\omega t \quad (k=0, 1, 2, \dots); \\ B_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t \, d\omega t \quad (k=1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (1.2)$$

A_0 називається сталою складовою або нульовою гармонікою, A_1 – основною складовою або першою гармонікою, всю решту гармонік називають вищими.

1.2 Мета роботи

Засвоїти навички моделювання тригонометричних функцій та арифметичних операцій над ними.

1.3 Попереднє розрахункове завдання

Перевести кут зсуву фази із градусів в радіани згідно із своїм варіантом (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Варіант	1	2	3	4	5	6
φ	15	30	45	60	90	120

Перевести кут зсуву фази із градусів в секунди у відповідності з періодом (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Варіант	1	2	3	4	5	6
φ	15	30	45	60	90	120
f	50	60	100	150	200	250

Визначити кругову частоту через заданий період (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3

Варіант	1	2	3	4	5	6
T	0.5	0.3	0.2	0.4	0.6	0.1

1.4 Робоче завдання

Змодельовати тригонометричну функцію згідно із своїм варіантом та виконати перевірку зсуву фази (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4

Варіант	Амплітуда	Період, с	Фаза, град
1	3	0,5	30
2	5	0,25	45
3	4	1	60
4	2	2	30
5	0,7	2,5	90
6	6	0,33	120

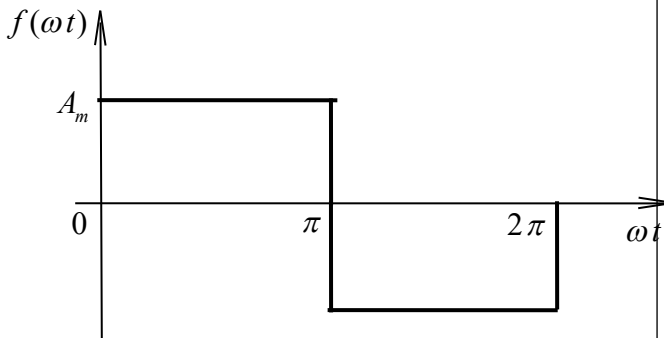
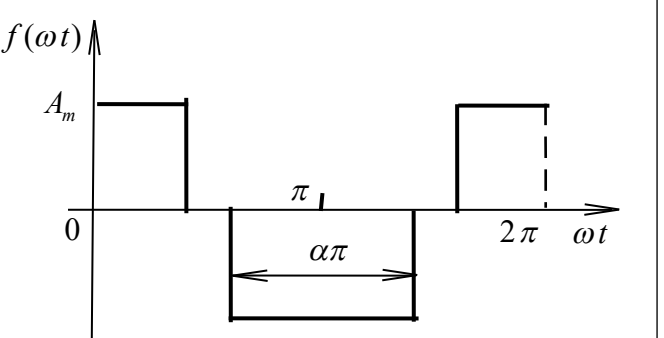
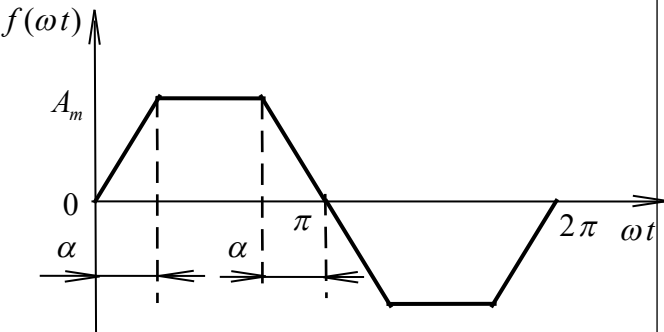
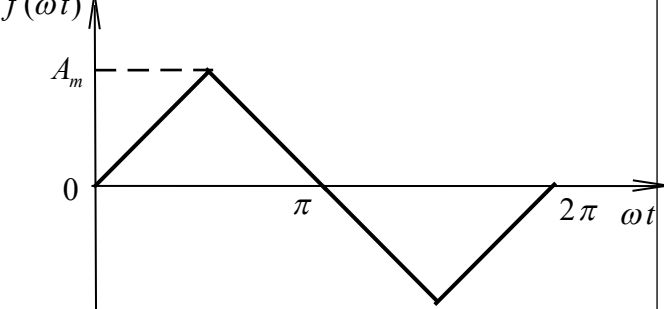
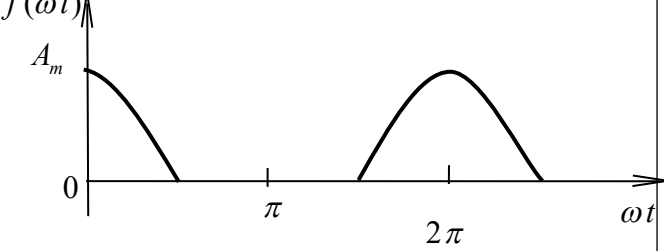
Перевірити тотожність тригонометричних виразів згідно із заданим варіантом в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Варіант	1, 4	2, 5	3, 6
вираз	$\sin 2t = 2 \sin t \cos t$	$\sin 3t = 3 \sin t - 4 \sin^3 t$	$\sin 4t = \cos t(4 \sin t - 8 \sin^3 t)$

Змодельовати тригонометричний вираз розкладання функції в ряд Фур'є – у результаті складання гармонійних функцій повинна утворитися періодична функція, наведена в останньому стовпці таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

№	Ряд Фур'є	Функція
1	$f(\omega t) = \frac{4A_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$	
2	$f(\omega t) = \frac{4A_m}{\pi} \left(\sin \frac{\alpha\pi}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\alpha\pi}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\alpha\pi}{2} \cos 5\omega t + \dots \right)$	
3	$f(\omega t) = \frac{4A_m}{\alpha\pi} \left(\sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right)$	
4	$f(\omega t) = \frac{8A_m}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots \right)$	
5	$f(\omega t) = \frac{2A_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos 3\omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$	

Продовження таблиці 1.6

№	Ряд Фур'є	Функція
6	$f(\omega t) = \frac{2A_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$	

1.5 Методика виконання робочого завдання

Для моделювання гармонійного сигналу необхідно скористуватися блоком SineWave, що знаходиться у розділі Sources. Для дослідження часової діаграми застосувати блок Scope із розділу Sinks.

Для перевірки зсуву фази рекомендується вивести на осцилограф дві синусоїди з однаковими амплітудами та частотами, але різними фазами: фаза одної синусоїди повинна дорівнювати заданому значенню, а фаза другої – нулю. Скориставшись масштабуванням у вікні Scope, заміряти зсув із точністю до четвертого знака, а потім перевести його із секунд у градуси.

Для додавання або віднімання необхідно скористатися блоком Sum із розділу Math Operations. Для множення або ділення застосувати блок Product. Для розрахунку синуса або косинуса заданого кута необхідно в блоці SineWave викликати вікно параметрів і встановити параметр Time рівним Use external signal, після чого підвести до входу блока константу із значенням, що відповідає заданому куту.

Для перевірки тотожності необхідно змоделювати обидва вирази, що знаходяться у лівій і правій частині тотожності, і порівняти їх часові діаграми на віртуальному осцилографі.

1.6 Зміст звіту

Розрахункова частина попереднього розрахункового завдання (п. 1.2).

Моделі, що відповідають завданню 1.4 і відповідні осцилограми.

Перевірка зсуву фази гармонійного сигналу у завданні відповідно до таблиці 1.6 та висновки до завдань п. 1.4.

1.7 Контрольні питання

Якими основними параметрами характеризується гармонійний сигнал?

Як можна розрахувати кругову частоту?

Як у Matlab задаються частота і зсув фази гармонійної функції?

Як можна перевести зсув фази із секунд у градуси?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

Розв'язання СЛАР за допомогою сигнальних графів Мейсона та графів Коутса

2.1 Загальні відомості

Моделювання електромеханічних систем пов'язано із застосуванням сигнальних графів, які відповідають системам алгебраїчних рівнянь, що описують математичну модель системи.

Сигнальний граф складається з точок, що називаються вузлами, і ліній, що їх з'єднують, – віток.

Для системи алгебраїчних рівнянь змінні відображаються на графі у вигляді залежних вузлів, а константи – вузлами-джерелами, а коефіцієнтам при змінних ставляться у відповідність передачі віток графів. Для моделей електромеханічних систем вузлам відповідають струми, напруги та ЕРС, а віткам – кількісні відношення між ними. При моделюванні сигнального графа необхідно керуватися правилом, що відповідний вузлу сигнал, у який входять вітки, дорівнює сумі сигналів, помножених на коефіцієнти передачі відповідних віток. Тобто напрямок віток залежить від вигляду рівняння, залежно від якого можна скласти сигнальний граф Мейсона або Коутса.

Якщо ми перенесемо усі змінні, окрім однієї, у праву частину рівняння, то ми можемо побудувати граф Мейсона. Для

такого графа всі змінні та константи, що знаходяться в правій частині рівняння, на графі відображаються вузлами, вітки яких із відповідними передачами входять в вузол, що відповідає змінній, яка знаходиться в лівій частині цього рівняння.

Якщо всі доданки рівняння перенести у ліву частину та прирівняти праву частину до нуля, то можна побудувати граф Коутса. У такому графі всі вітки, що виходять з вузлів, які відповідають доданкам одного з рівнянь системи, будуть входити в залежний вузол, який відповідає одній із змінних рівняння, утворюючи таким чином петлю.

Розглянемо приклад складання графів Мейсона та Коутса.

Необхідно скласти сигнальний граф Мейсона для системи з двох лінійних алгебраїчних рівнянь.

$$\begin{cases} 5x_1 + 2x_2 = 9; \\ 7x_1 - 3x_2 = 1. \end{cases} \quad (2.1)$$

Попередньо з кожного рівняння виділимо кожен залежний змінну.

$$\begin{cases} x_1 = \frac{9}{5} - \frac{2}{5}x_2; \\ x_2 = -\frac{1}{3} + \frac{7}{3}x_1. \end{cases} \quad (2.2)$$

Змоделюємо граф Мейсона для СЛАР. Зобразимо змінні відповідними вузлами x_1 і x_2 , константу вузлом джерелом із сигналом 1. У вузол x_1 направимо вітки з двох інших вузлів x_2 та 1 із передачами, що відповідають коефіцієнтам при цих доданках $-2/5$ та $9/5$ в першому рівнянні, потім аналогічним способом у вузол направимо вітки з вузлів x_1 та 1 із коефіцієнтами $7/3$ та $-1/3$ (рисунок 2.1).

Можна виразити змінні й іншим способом, а саме з першого рівняння виразити x_1 , а з другого x_2 (рисунок 2.2), при цьому в результаті розв'язання обох графів результати будуть однакові.

$$\begin{cases} x_2 = \frac{9}{2} - \frac{5}{2}x_1; \\ x_1 = \frac{1}{7} + \frac{3}{7}x_2; \end{cases} \quad (2.3)$$

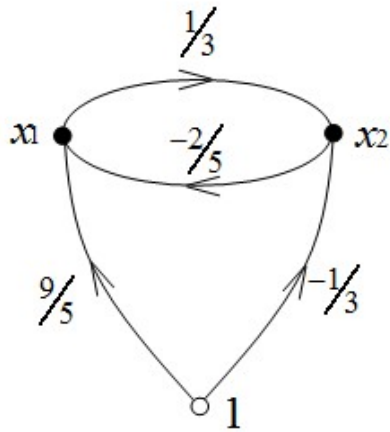


Рисунок 2.1

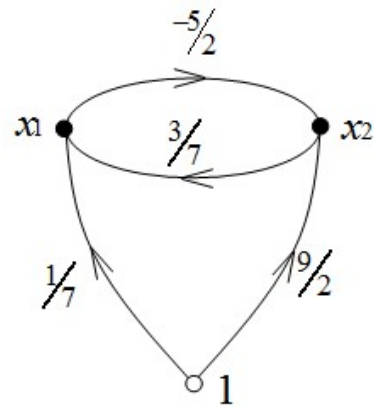


Рисунок 2.2

Складемо за рівняннями (2.1) сигнальний граф Коутса. Для цього перенесемо всі доданки у ліву частину, а праву частину прирівняємо до нуля. Одержимо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} 5x_1 + 2x_2 - 9 = 0; \\ 7x_1 - 3x_2 - 1 = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Сигнальний граф Коутса для системи рівнянь (2.4) буде мати такий вигляд, як на рисунку 2.3.

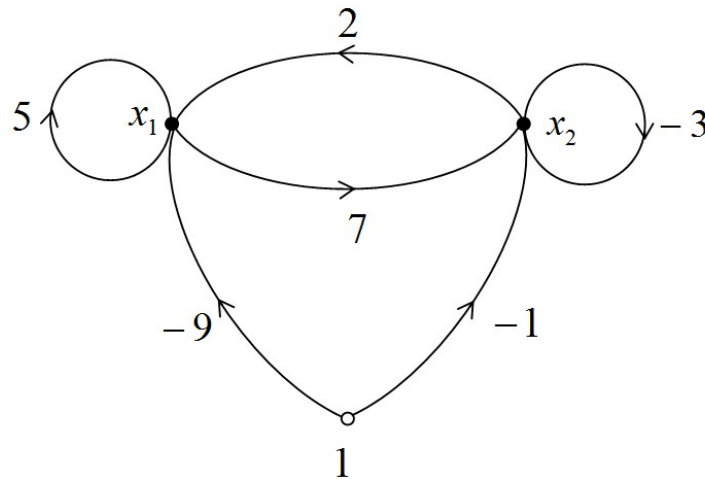


Рисунок 2.3

2.2 Мета роботи

Засвоїти навички роботи моделювання сигнальних графів Мейсона та Коутса.

2.3 Попереднє розрахункове завдання

Побудувати графи Мейсона для СЛАР у відповідності із заданим варіантом (таблиця 2.1).

Побудувати графи Коутса для СЛАР у відповідності із заданим варіантом (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Варіант	Система рівнянь	Варіант	Система рівнянь
1	$\begin{cases} 2x_1 - 4x_2 + 7x_3 = 37; \\ x_1 + x_2 - 5x_3 = 22; \\ 7x_1 - 6x_2 + 3x_3 = -25. \end{cases}$	4	$\begin{cases} 6x_1 - 7x_2 - 8x_3 = 37; \\ -x_1 + 2x_2 + 4x_3 = 22; \\ 4x_1 - 5x_2 - 7x_3 = -25. \end{cases}$
2	$\begin{cases} 6x_1 - 4x_2 + 8x_3 = 6; \\ -9x_1 - 3x_2 + 2x_3 = -9; \\ x_1 + 5x_2 + 9x_3 = 39. \end{cases}$	5	$\begin{cases} 7x_1 + 5x_2 - x_3 = 6; \\ -2x_1 - 3x_2 + 6x_3 = -9; \\ 3x_1 + 9x_2 + 12x_3 = 39. \end{cases}$
3	$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 = 6; \\ -2x_1 + 5x_2 = -9; \\ 5x_1 - 4x_2 = 39. \end{cases}$	6	$\begin{cases} 3x_1 + 5x_2 - x_3 = 6; \\ -2x_1 - 3x_2 + 6x_3 = -9; \\ 3x_1 + 9x_2 + 12x_3 = 39. \end{cases}$

2.4 Робоче завдання

Виконати моделі сигнальних графів СЛАР Мейсона та Коутса та визначити за їх допомогою значення змінних. Виконати перевірку одержаних результатів, підставивши їх у СЛАР.

2.5 Методика виконання робочого завдання

Для побудови моделі за сигнальним графом Мейсона рекомендується використовувати такі блоки: вузли графа – суматори Sum, зовнішнє джерело – константа Const, передачі графа – підсилювачі Gain, для дослідження значень змінних скористуватися блоком Display. При моделюванні графа Коутса рекомендується скористуватися блоком Algebraic Constraint для відображення залежних вузлів.

2.6 Зміст звіту

Відповідно до варіанта СЛАР та складені графи Мейсона і Коутса до них.

Моделі побудованих графів Мейсона і Коутса із розв'язанням рівнянь.

Перевірка одержаних значень змінних.

2.7 Контрольні питання

Що являє собою сигнальний граф і з яких елементів він складається?

Чому можна поставити у відповідність елементи сигнального графа?

Як можна побудувати за заданою СЛАР граф Мейсона?

Як можна побудувати за заданою СЛАР граф Коутса?

Якими блоками можна скористуватися при моделюванні графів Мейсона та Коутса?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

Моделювання неоднорідних лінійних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами

3.1 Загальні відомості

Моделювання динамічних процесів в електричних системах з реактивними елементами пов'язано із формуванням і розв'язанням диференціальних рівнянь. Диференціальні рівняння можна розв'язати класичним методом та операторним із застосуванням оператора Лапласа.

Розглянемо методику розв'язання лінійних диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами.

Загальний вигляд однорідного рівняння (права частина якого дорівнює нулю) має вигляд

$$y'' + py' + qy = 0. \quad (3.1)$$

Якщо k_1 та k_2 – корені характеристичного рівняння (3.2)

$$\varphi(k) = k^2 + pk + q = 0, \quad (3.2)$$

то загальний розв'язок y може мати один із видів:

а) $y = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{k_2 x}$, якщо k_1 та k_2 – дійсні числа та $k_1 \neq k_2$;

б) $y = e^{k_1 x} (C_1 + C_2 x)$, якщо k_1 та k_2 – дійсні числа та $k_1 = k_2$;

в) $y = e^{ax} (C_1 \cos bx + C_2 \sin bx)$, якщо k_1 та k_2 – уявні числа та $k_1 = a + jb$ і $k_2 = a - jb$ ($b \neq 0$).

Однорідні рівняння характеризують динамічні процеси в системі без зовнішнього впливу.

Якщо на систему здійснюється зовнішній вплив, то в правій частині диференціального рівняння з'являється замість нуля функція $f(x)$ і рівняння набуває вигляду

$$y'' + py' + qy = f(x). \quad (3.3)$$

Розв'язок неоднорідного рівняння (3.3) буде складатися з суми загального розв'язку однорідного рівняння y_0 та окремого розв'язку Y :

$$y = y_0 + Y. \quad (3.4)$$

Частинний розв'язок може бути знайдений методом невизначених коефіцієнтів у залежності. Для цього залежно від вигляду правої частини конструюють частинний розв'язок, знаходять його першу та другу похідну і підставляють у ліву частину диференціального рівняння. Потім прирівнюють коефіцієнти при однакових степенях змінної x .

Частинний розв'язок неоднорідного рівняння конструюють таким чином:

а) $f(x) = e^{ax} P_n(x)$, де $P_n(x)$ – многочлен n міри.

Якщо a не є коренем характеристичного рівняння (3.2), тобто $\varphi(a) \neq 0$, то $Y = e^{ax} Q_n(x)$, де $Q_n(x)$ – многочлен міри n з невизначеними коефіцієнтами.

Якщо a є коренем характеристичного рівняння (3.2), тобто $\varphi(a) = 0$, то $Y = x^r e^{ax} Q_n(x)$, де r – кратність кореня a , може дорівнювати або 1 або 2;

б) нехай $f(x) = A(x) \cos bx + B(x) \sin bx$, тоді частинний розв'язок неоднорідного рівняння слід шукати у вигляді

$$Y = x^s (c_1 \cos bx + c_2 \sin bx),$$

де $s=1$, якщо одночасно $p=0, q>0, b=\sqrt{q}$, і $s=0$ в інших випадках;

в) нехай $f(x) = e^{ax}(P_n(x)\cos bx + Q_m(x)\sin bx)$, де $P_n(x)$ і $Q_m(x)$ – многочлени ступенів n і m відповідно. Частинний розв'язок матиме вигляд

$$Y = x^s e^{ax} [(A_0 x^k + A_1 x^{k-1} + \dots + A_k) \cos bx + (B_0 x^k + B_1 x^{k-1} + \dots + B_k) \sin bx],$$

де $s=1$, якщо одночасно $p=0, q>0, b=\sqrt{q}$, і $s=0$ в інших випадках, а $k=n$, якщо $n>m$, і $k=m$, якщо $n<m$.

Для розв'язання диференціальних рівнянь можна скористатися методом операційного числення, який дає можливість розв'язати рівняння в алгебраїчному вигляді і таким чином спростити обчислення. Метод операційного числення базується на проведенні інтегрального перетворення Лапласа функції за формулою

$$F(p) \rightarrow \int_0^{\infty} e^{-p \cdot t} \cdot f(t) dt, \quad (3.5)$$

де $p \rightarrow \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа;

$F(p)$ – зображення функції;

$f(p)$ – оригінал функції.

Як правило, оригінал функції замінюють її зображенням, використовуючи таблицю оригіналів і скористувавшись теоремою диференціювання. Далі усі коефіцієнти із оператором Лапласа переносять у праву частину, приводять праву частину до загального знаменника і здійснюють розклад правої частини на елементарні дроби. Після чого знаходять коефіцієнти методом прирівнювання коефіцієнтів при однакових степенях. Підставивши знайдені коефіцієнти у рівняння, здійснюють зворотне перетворення Лапласа.

Формування сигнальних графів диференціальних рівнянь формується за тими самими принципами, як і для лінійних. Щодо похідних, то необхідно вузли, що відповідають найвищим похідним, з'єднувати з вузлами, відповідними похідним на

порядок нижчим віткам, передачі яких дорівнюють $\frac{1}{p}$. Такі вітки із передачами, відповідними оператору Лапаласа, знижують порядок похідних до тих пір, поки не буде одержана змінна-вузол.

Приклад 3.1. Формування сигнального графа диференціального рівняння

$$y'' - 4y' + 5y = \sin t; \quad . \quad (3.6)$$

Залишимо у лівій частині похідну від функції найвищого порядку, а всі інші доданки перенесемо в праву частину.

$$y'' = 4y' - 5y + \sin t; \quad . \quad (3.7)$$

Сформуємо граф для цього рівняння (рисунок 3.1).

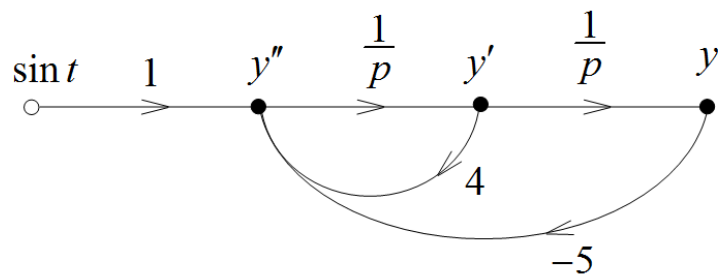


Рисунок 3.1 – Граф диференціального рівняння (3.7)

3.2 Мета роботи

Засвоїти навички моделювання диференціальних рівнянь.

3.3 Попереднє розрахункове завдання

Розв'язати диференціальне рівняння, що відповідає заданому варіанту, класичним методом або за допомогою оператора Лапласа.

Скласти сигнальний граф для заданого диференціального рівняння.

3.4 Робоче завдання

Змодельовати диференціальні рівняння та перевірити їхні розв'язки.

Ва-рі-ант	Рівняння	Розв'язок	Початков і умови
1	$y'' + y = \sin 2t$	$y = \frac{1}{3}(2 \sin t - \sin 2t)$	$y(0) = 0;$ $y'(0) = 0;$
2	$y'' + 4y = \sin t$	$y = \cos 2t + \frac{1}{3}(\sin 2t + \sin t)$	$y(0) = 1;$ $y'(0) = 1;$
3	$y'' - y = -2 \cos t$	$y = \cos t$	$y(0) = 1;$ $y'(0) = 0;$
4	$y'' + 4y = 4 \sin t$	$y = \frac{1}{3}(4 \sin t + 12 \cos 2t - 2 \sin 2t)$	$y(0) = 4;$ $y'(0) = 0;$
5	$y'' + y = 2 \cos t$	$y = \cos t + t \sin t$	$y(0) = 0;$ $y'(0) = -2;$
6	$y'' + 2y' + 5y = 4 \cos 2t + \sin 2t$ при $t \rightarrow \infty$	$y = \sin 2t$	$y(0) = 1;$ $y'(0) = 0;$

3.5 Методика виконання робочого завдання

При формуванні моделі диференціального рівняння за сигнальним графом необхідно скористуватися такими блоками: у якості вузлів графа взяти суматори Sum, зовнішнє синусоїдальне джерело – Sine Wave, для оператора Лапласа скористуватися блоком Integrator, що знаходиться у розділі Continuous, для дослідження значень змінних скористатися осцилографом Scope.

Також необхідно зібрати модель для розв'язання диференціального рівняння та порівняти осцилограми диференціального рівняння.

3.6 Зміст звіту

Розв'язання диференціального рівняння з поясненнями.

Сигнальний граф диференціального рівняння, модель диференціального рівняння та модель його розв'язання.

Пояснення та висновки до складання систем рівнянь.

Аналіз результатів розрахунку і відповідні висновки.

3.7 Контрольні питання

Якими способами можна розв'язати диференціальне рівняння?

Як можна змоделювати похідну першого порядку в сигнальному графі?

Як можна змоделювати похідну другого порядку в сигнальному графі?

Яким блоком слід скористуватися для моделювання похідної?

Як можна задати початкові значення в моделі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

Моделювання динамічної системи другого порядку

4.1 Загальні відомості

Динамічна система другого порядку являє собою електричну систему з двома реактивними елементами, динамічні процеси в яких описуються такими диференціальними рівняннями відповідно для конденсатора та індуктивності:

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} i_C; \quad (4.1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_C; \quad (4.2)$$

де V_C та i_L – змінні стану (напруга на конденсаторі та струм в індуктивності).

Повна система рівнянь, що описує динамічні процеси електричної системи, складається з топологічних і компонентних рівнянь. Топологічні рівняння відображають зв'язок між компонентами і являють собою для електричних систем I та II закони Кірхгофа. Компонентні рівняння описують поведінку кожного компонента, взятого окремо від схеми. Для електричних систем такі рівняння представляють закон Ома та диференціальні рівняння (4.1) та (4.2), що описують динамічні процеси реактивних елементів.

Для зручності складання системи топологічних рівнянь використовують матрицю "контур-вітка". Для цього попередньо необхідно скласти граф електричної схеми і дерево. Дерево – це зв'язана сукупність ребер, що охоплює всі вузли та не утворює контурів. Ребра, що входять у дерево, називаються вітками і зображуються суцільними лініями, ребра, що не увійшли в дерево, називаються зв'язками і зображуються пунктирними лініями. Існує пріоритет включення ребер у вітки або у зв'язки для електричних схем: до віток обов'язково включають ребра, що відповідають джерелам напруг і конденсаторам, а до зв'язків – джерела струмів та індуктивності; ребра, що відповідають опорам, включають або до зв'язків, або до віток таким чином, щоб утворилося дерево згідно з його визначенням.

Строки матриці "контур-вітка" являють собою зв'язки дерева, а стовпці – вітки. Складання матриці "контур-вітка" засноване на утворенні контурів зв'язком у дереві. Якщо напрямок вітки співпадає із напрямком зв'язка, то у відповідній комірці матриці ставимо +1, якщо напрямки протилежні, то ставимо -1, а якщо вітка не входить в утворений зв'язком контур, то ставимо 0.

Топологічні рівняння із використанням матриці "контур-вітка" утворюються за такими формулами:

$$V^{3\phi} = -FV^e; \quad (4.3)$$

$$i^e = F^T i^{3\phi}; \quad (4.4)$$

де $V^{3\phi}$ та $i^{3\phi}$ – відповідно вектори напруг і струмів зв'язків;

V^e та i^e – вектори напруг і струмів віток;

F^T – транспонована матриця "контур-вітка".

У сигнальному графі повної системи топологічних і компонентних рівнянь вузли являють собою електричні величини напруги, струми та джерела е.р.с. і струмів. Для розміщення вузлів площину поділяють на чотири квадранти: у верхній півплощині розміщують напруги, у нижній – струми, зліва розміщують вузли, які відповідають величинам, що являють собою вітки, у лівій – величини-зв'язки. При з'єднанні вузлів графа по горизонталі використовують топологічні рівняння, при з'єднанні по вертикалі – компонентні рівняння.

Для подання диференціальних рівнянь у нормальній формі (формі задачі Коші) для електричної системи необхідно похідні від змінних стану виразити через самі змінні стану та задавальні величини. Такий вид рівняння одержують шляхом чергування підстановки топологічних і компонентних рівнянь у диференціальні рівняння реактивних елементів електричної системи. Прирівнявши у системі диференціальних рівнянь, приведеній до нормальної форми, похідні нулю, можна визначити значення змінних стану у сталому режимі.

4.2 Мета роботи

Засвоїти навички моделювання сигнальних графів динамічної системи другого порядку.

4.3 Попереднє розрахункове завдання

Скласти граф, дерево та матрицю "контур-вітка" для схеми згідно з заданим варіантом (таблиця 4.1).

Записати систему топологічних і компонентних рівнянь у відповідності з матрицею "контур-вітка".

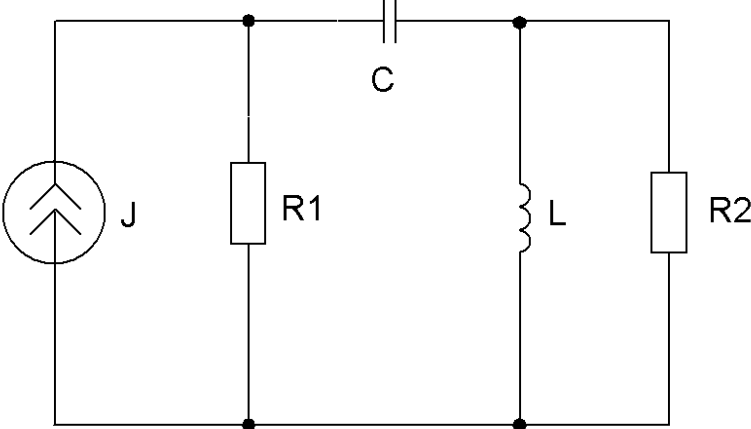
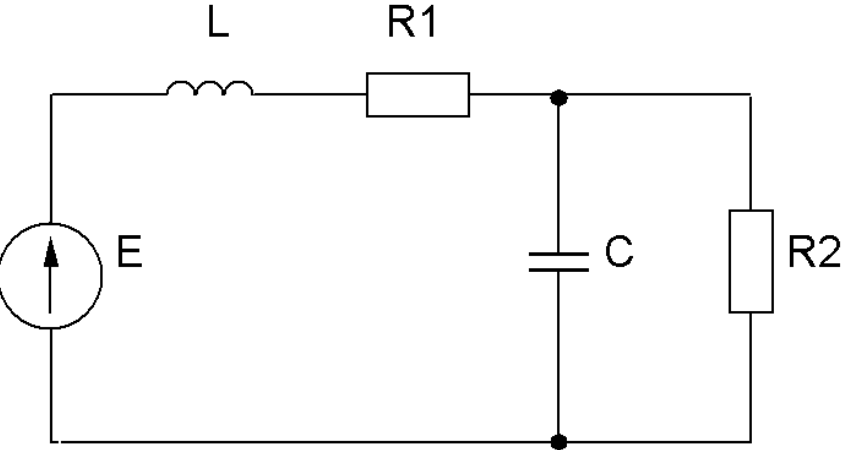
Скласти сигнальний граф для системи топологічних і компонентних рівнянь.

Подати систему диференціальних рівнянь, що описують динамічну систему, у нормальній формі (формі задачі Коші).

Скласти сигнальний граф для системи диференціальних рівнянь.

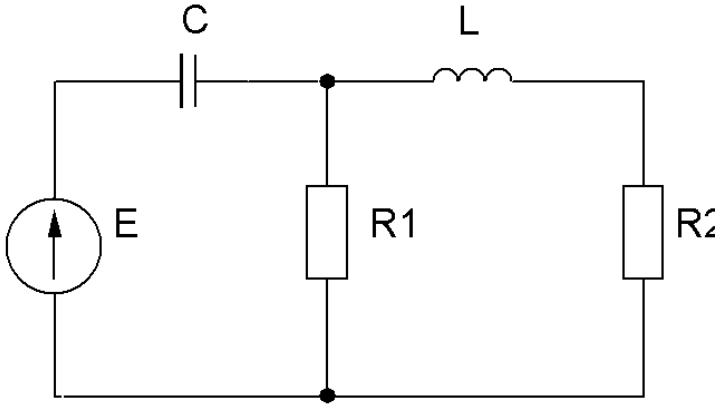
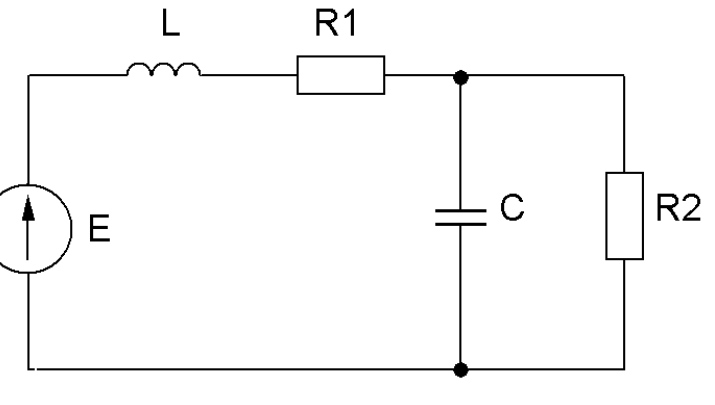
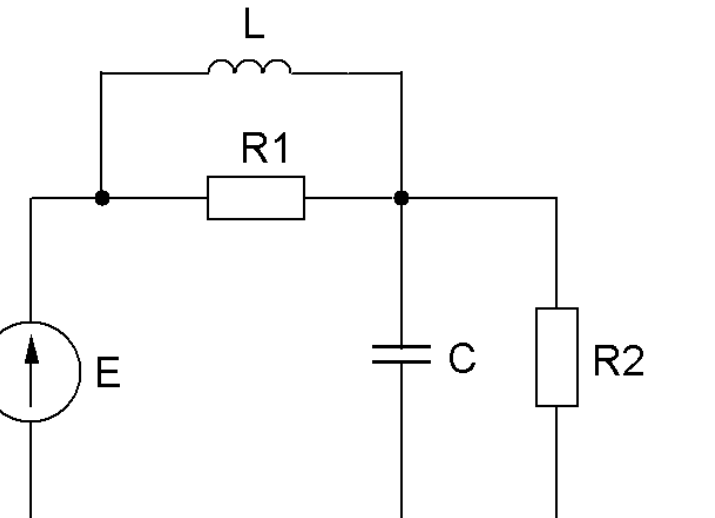
Розрахувати значення змінних стану у сталому режимі.

Таблиця 4.1

Ва-рі-ант	Схема	Параметри схеми
1		$J = 100 \text{ A};$ $f = 100;$ $R_1 = 1 \text{ Ом};$ $R_2 = 100 \text{ Ом};$ $L = 0.2 \text{ Гн};$ $C = 0.02 \text{ Ф}.$
2		$E = 1 \text{ В};$ $f = 150;$ $R_1 = 2 \text{ Ом};$ $R_2 = 300 \text{ Ом};$ $L = 0.5 \text{ Гн};$ $C = 0.05 \text{ Ф}.$

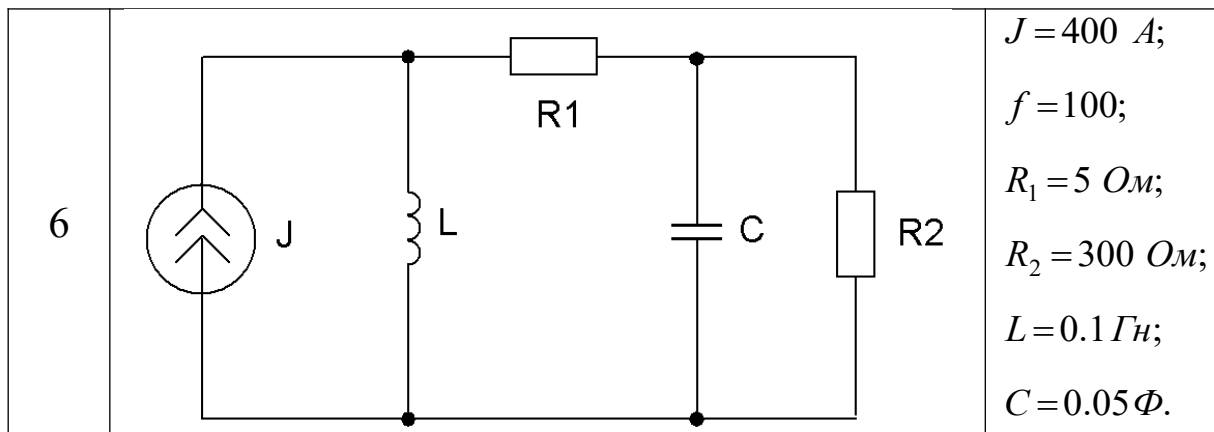
Продовження таблиці 4.1

Ва-рі-ант	Схема	Параметри схеми
-----------	-------	-----------------

3		$A_m = 200 \text{ B};$ $f = 50;$ $R_1 = 5 \text{ Ом};$ $R_2 = 100 \text{ Ом};$ $L = 0.3 \text{ Гн};$ $C = 0.05 \text{ Ф}.$
4		$A_m = 300 \text{ B};$ $f = 150;$ $R_1 = 1 \text{ Ом};$ $R_2 = 200 \text{ Ом};$ $L = 0.5 \text{ Гн};$ $C = 0.01 \text{ Ф}.$
5		$A_m = 500 \text{ B};$ $f = 200;$ $R_1 = 10 \text{ Ом};$ $R_2 = 200 \text{ Ом};$ $L = 0.1 \text{ Гн};$ $C = 0.05 \text{ Ф}.$

Продовження таблиці 4.1

Ва- рі- ант	Схема	Параметри схеми
-------------------	-------	--------------------



4.4 Робоче завдання

Сформувати модель для сигнального графа, що відображає систему топологічних і компонентних рівнянь для динамічної системи другого порядку.

Сформувати модель для сигнального графа, що відображає систему диференціальних рівнянь, приведену до нормальної форми, для системи другого порядку.

Виконати дослідження системи при синусоїдальному зовнішньому впливі.

4.5 Методика виконання робочого завдання

При складанні моделі рекомендується використовувати такі блоки: вузли напруги та вузли струми – блоки суматори Sum, для зниження порядку похідної слід скористуватися блоком інтегрування Integrator із розділу Continuous, для відображення постійних параметрів опорів, конденсаторів, індуктивностей використовувати блоки констант Const.

4.6 Зміст звіту

Електричні схеми з зазначенням заданих параметрів, утворені для них графи та дерева.

Пояснення та висновки щодо складання матриці "контур-вітка", системи топологічних і компонентних рівнянь, системи диференціальних рівнянь, приведених до нормальної форми.

Сигнальні графи для системи топологічних і компонентних рівнянь і системи рівнянь, приведених до нормальної форми.

Розрахунок значень змінних стану в усталеному режимі.
Моделі сигнальних графів та осцилограми змінних стану для динамічної системи другого порядку та висновки.

4.7 Контрольні питання

- Яким чином складається матриця "контур-вітка"?
- Що являють собою змінні стану?
- Що описують топологічні та компонентні рівняння?
- Як зображується сигнальний граф для системи топологічних і компонентних рівнянь?
- Що являють собою диференціальні рівняння, приведені до нормальної форми?
- Як можна привести систему диференціальних рівнянь до нормальної форми?
- Як можна розрахувати значення змінних стану у сталому режимі?
- Які блоки використовують при складанні моделі сигнального графа, відповідного системі топологічних і компонентних рівнянь?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

Моделювання динамічної системи четвертого порядку та дослідження її динамічних властивостей за системною матрицею. Дослідження резонансних явищ у динамічній системі

5.1 Загальні відомості

Для зручності подальших обчислень та аналізу системи систему диференціальних рівнянь, що приведена до нормальної форми, необхідно привести до матричного вигляду.

$$\frac{dX}{dt} = AX + BQ, \quad (5.1)$$

де $\frac{dX}{dt}$ – вектор похідних змінних стану;

A – системна матриця;

X – вектор змінних стану;
 B – матриця зв'язку;
 Q – вектор задавальних величин.

Матриця A є основною матрицею системи. Її елементи відповідають значенням коефіцієнтів, що стоять перед відповідними змінними стану в диференціальних рівняннях. Елементи матриці B відповідають коефіцієнтам, що стоять перед задавальними величинами.

Для визначення властивостей системи необхідно визначити власні числа системної матриці A . Залежно від вигляду коренів характеристичного рівняння можна визначити характер перехідних процесів системи. Якщо корені дійсні, то для реальної системи вони є від'ємними, що відповідає аперіодичному процесу, тобто із відсутністю коливань. Від'ємний знак вказує на те, що експоненціальні складові будуть загасати, що характерно для систем із втратами електричної енергії. Якщо корені мають також і уявну складову, то процеси мають коливальний характер.

Стала часу зворотно-пропорційна дійсній частині комплексного числа, а уявна частина відповідає власній частоті системи.

5.2 Мета роботи

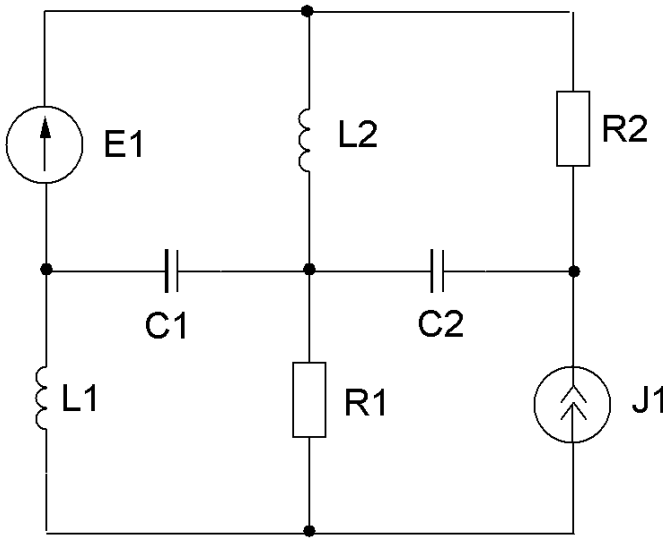
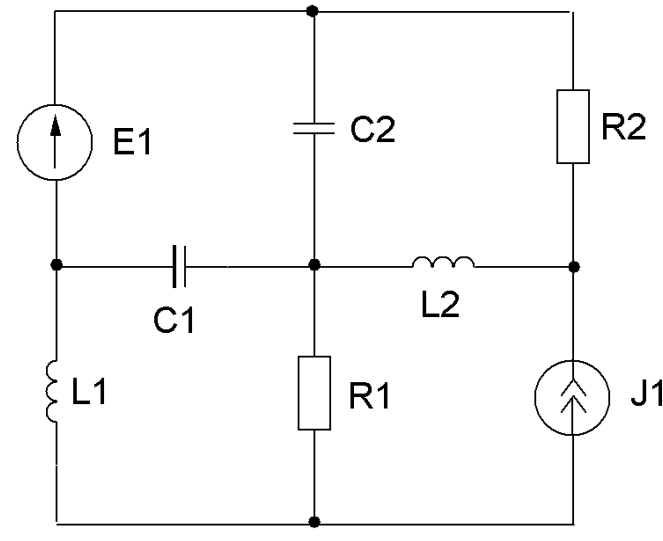
Засвоїти навички аналізу та дослідження динамічних властивостей електричної системи за її системною матрицею.

5.3 Попереднє розрахункове завдання

Скласти систему диференціальних рівнянь для електричної схеми згідно з заданим варіантом (таблиця 5.1) і привести її до нормальної форми.

Записати систему диференціальних рівнянь у матричному вигляді.

Таблиця 5.1 – Електричні системи четвертого порядку

Варіант	Електрична система	Параметри системи
1		$A_m = 200 \text{ В};$ $f = 50;$ $R_1 = 5 \text{ Ом};$ $R_2 = 100 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.3 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.3 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.05 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.05 \text{ Ф};$
2		$A_m = 500 \text{ В};$ $f = 100;$ $R_1 = 10 \text{ Ом};$ $R_2 = 50 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.1 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.3 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.09 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.04 \text{ Ф};$

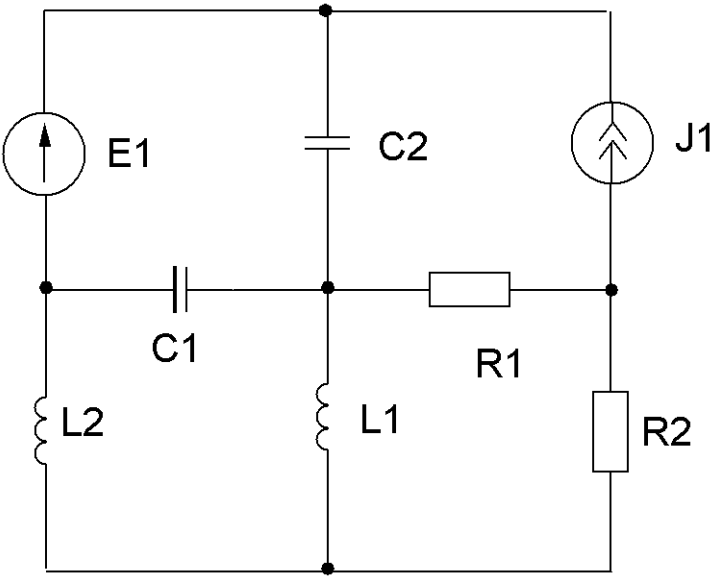
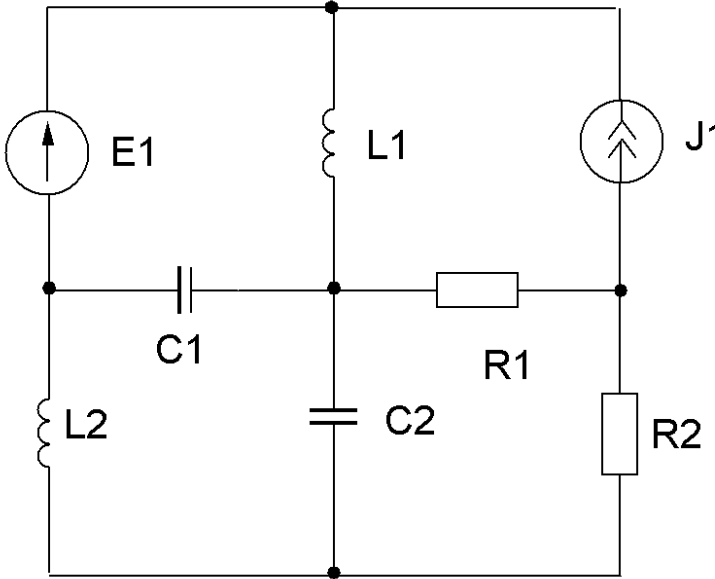
Продовження таблиці 5.1

Варіант	Електрична схема	Параметри системи
---------	------------------	-------------------

3		$A_m = 300 \text{ B};$ $f = 50;$ $R_1 = 1 \text{ Ом};$ $R_2 = 50 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.1 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.2 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.06 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.04 \text{ Ф};$
4		$A_m = 100 \text{ B};$ $f = 150;$ $R_1 = 6 \text{ Ом};$ $R_2 = 100 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.1 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.2 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.01 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.01 \text{ Ф};$

Продовження таблиці 5.1

Варіант	Електрична схема	Параметри системи
---------	------------------	-------------------

5		$A_m = 400 \text{ B};$ $f = 50;$ $R_1 = 10 \text{ Ом};$ $R_2 = 200 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.2 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.1 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.03 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.03 \text{ Ф};$
6		$A_m = 300 \text{ B};$ $f = 100;$ $R_1 = 15 \text{ Ом};$ $R_2 = 150 \text{ Ом};$ $L_1 = 0.3 \text{ Гн};$ $L_2 = 0.3 \text{ Гн};$ $C_1 = 0.02 \text{ Ф};$ $C_2 = 0.02 \text{ Ф};$

5.4 Робоче завдання

Скласти модель для сигнального графа, складеного за системою диференціальних рівнянь, що приведені до стандартної форми, і дослідити часові діаграми змінних стану схеми на ній.

Визначити із використанням функції eig власні числа електричної системи та порівняти їх із відповідними параметрами змінних стану на віртуальному осцилографі.

Дослідити електромагнітні процеси в електричній системі при підключенні джерела із частотою, що дорівнює власній частоті електричної системи.

5.5 Методика виконання робочого завдання

Скласти модель електричної схеми для сигнального графа, що відповідає системі топологічних і компонентних рівнянь. Перевірити адекватність моделі склавши модель для сигнального графа, що відповідає системі диференціальних рівнянь, приведених до нормальної форми. (Дивись методичні вказівки до лабораторної роботи 4).

Створити m-файл і записати в нього вихідні параметри електричної системи та їх значення. Записати системну матрицю, у якій числа відокремлюються одне від одного пробілами, а рядки знаком ";". Сама матриця береться у квадратні дужки. Для визначення значень власних чисел необхідно будь-якій змінній присвоїти функцію aig від системної матриці.

Підключити, залежно від заданого варіанта замість постійного джерела струму або напруги синусоїдальне джерело із частотою, що відповідає власній частоті електричної системи.

5.6 Зміст звіту

Електричні схеми з зазначенням заданих параметрів.

Пояснення та висновки до складання систем рівнянь.

Віртуальні моделі електричної схеми та результати дослідження – осцилограми змінних стану.

Текст програми розрахунку власних чисел, значення власних чисел, розрахунок із поясненнями постійних часу та частот змінних стану.

Осцилограми змінних стану електричної системи, до якої підключено джерело із частотою, що дорівнює власній частоті.

Порівняння амплітуд змінних стану при підключенні постійних джерел і синусоїдальних джерел із частотою, що дорівнює власній.

5.7 Контрольні питання

Як можна скласти системну матрицю електричної системи?

Що являють собою власні числа системної матриці?

Яким величинам електричної системи відповідають дійсні та уявні частини власних чисел системної матриці?

Як впливає на електричну систему підключення до неї джерела із частотою, що дорівнює власній частоті системи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

Дослідження нелінійних діаграм системи

6.1 Загальні відомості

До систем, які мають нелінійні діаграми, можна віднести системи, що включають до свого складу нелінійні елементи, а саме діоди, тиристори та інші. Одним із найпоширеніших у використанні таких елементів є випрямляч, що включає в себе діод. При складанні дерева нелінійної системи ребро, відповідне діоду, як і опір, можна включити або до віток, або до зв'язків.

При моделюванні діоди, як правило, розглядаються як елементи, що можуть мати два стани – закритий і відкритий. Такі стани можна відобразити вольт-амперною характеристикою діода, що має такий вигляд, як на рисунку 6.1.

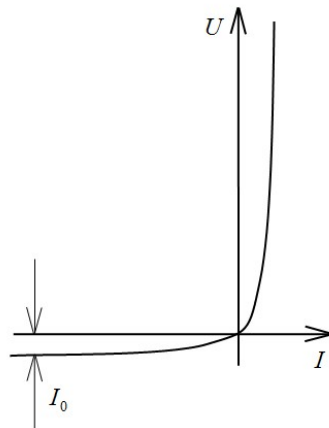


Рисунок 6.1 – Вольт-амперна характеристика діода

Математично вольт-амперна характеристика діода визначається формулою Еберса-Мола

$$i_B = I_0 \left(e^{\frac{U_B}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (6.1)$$

де $I_0=10^{-5}$ А – струм витоку;
 $\varphi_T=0,025$ В – тепловий потенціал.

6.2 Мета роботи

Засвоїти навички моделювання нелінійних діаграм системи.

6.3 Попереднє розрахункове завдання

Скласти топологічні і компонентні рівняння до схеми (рисунок 6.2) та скласти сигнальний граф для системи рівнянь.

Привести диференціальні рівняння до стандартної форми (у формі задачі Коші) та скласти відповідний сигнальний граф.

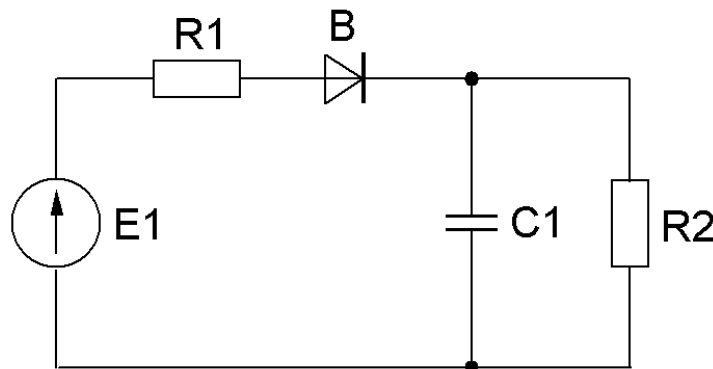


Рисунок 6.2 – Електрична система випрямляча з фільтром

6.4 Методика виконання розрахункового завдання

Дивись методичні вказівки до лабораторної роботи 4. Елемент діод слід розглядати як опір, що періодично приймає два значення: значення, що прагне до безкінечності і до нуля.

6.5 Робоче завдання

Розробити модель для сигнального графа, складеного за системою диференціальних рівнянь, що приведені до стандартної форми, і дослідити часові діаграми змінних стану схеми на ній.

Розробити модель для сигнального графа, складеного за системою компонентних і топологічних рівнянь, і дослідити часові діаграми змінних стану схеми на ній.

Дослідити на моделі вплив зміни значення ємності конденсатора на вихідний струм випрямляча.

6.6 Методика виконання робочого завдання

При моделюванні блока діода рекомендується змоделювати формулу Еберса-Мола, використовуючи блоки суматори Sum, множники Product, константи Const, для моделювання експоненти необхідно застосувати блок Math Functions із розділу Math Operations. Усі блоки, що моделюють формулу Еберса-Мола, необхідно об'єднати в окрему підсистему, для цього їх необхідно виділити, натиснути праву кнопку миші та виконати команду Create Subsystem.

6.7 Зміст звіту

Електрична схема та дані до неї відповідно до варіанта.

Дерево випрямляча, матриця "контур-вітка", сигнальні графи.

Візуальна модель випрямляча на основі сигнального графа електричної системи.

Результати моделювання – осцилограми вхідних і вихідних величин, пояснення та висновки до них.

6.8 Контрольні питання

Що являють собою нелінійні системи?

Які елементи можуть включати нелінійні системи?

Якою формулою описується вольт-амперна характеристика діода?

Який пріоритет включення ребер, відповідних діоду, до дерева?

Яку форму мають струми та напруги на виході випрямляча?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

Дослідження динамічної системи із взаємними зв'язками

7.1 Загальні відомості

Магнітно зв'язані елементи присутні в більшості електроустаткування. До таких елементів можна віднести трансформатори і автоколивальники, різного роду дроселі, трансформатори, що обертаються (зміщують фази напруги), двигуни і електромашинні генератори (у них між статором і ротором існує електромагнітний зв'язок), датчики, лічильники тощо.

На рисунку 7.1 зображено взаємозв'язані котушки індуктивності.

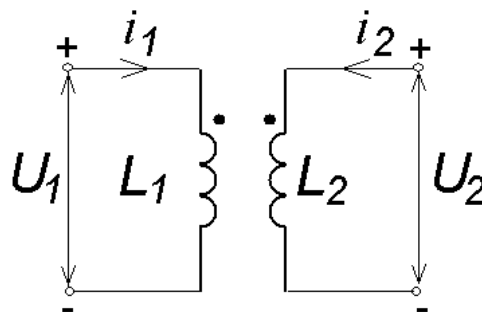


Рисунок 7.1

Для двох взаємозв'язаних котушок індуктивності вводиться інтегральний показник – *коефіцієнт зв'язку*. За наявності повного зв'язку коефіцієнт зв'язку дорівнює 1. Практично це ніколи не досягається за наявності розсіювання магнітного потоку. Характер магнітного зв'язку визначається знаком коефіцієнта зв'язку (при зв'язку, що співпадає, «+», при протидії «-»). У загальному плані будь-які два провідники в просторі є магнітно зв'язаними, однак на практиці часто цим нехтують, оскільки він дуже слабкий. Магнітний зв'язок підсилюється, якщо провідники укладені в котушці індуктивності. За наявності магнітних сердечників, загальних для двох котушок, магнітний потік підсилюється, коефіцієнт зв'язку значно підвищується, а якщо сердечник замкнений, коефіцієнт зв'язку прагне до одиниці.

Взаємна індуктивність M

$$\begin{aligned} M &= k\sqrt{L_1L_2}; \\ -1 < k < 1. \end{aligned} \quad (7.1)$$

Для опису поведінки магнітного зв'язку M можна скористуватися рівняннями в диференціальній формі

$$\begin{aligned} U_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ U_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Таким чином, наявність магнітного зв'язку проявляється в математичному виразі в тому, що доданки, зумовлені впливом струму від магнітного зв'язку елементів, що створюють додаткові напруги, пропорційні M . Запишемо рівняння в операторній формі:

$$\begin{aligned} U_1(p) &= pL_1i_1(p) - L_1i_1(0) + pMi_2(p) - Mi_2(p); \\ U_2(p) &= pL_2i_2(p) - L_2i_2(0) + pMi_1(p) - Mi_1(p). \end{aligned} \quad (7.3)$$

Для приведених рівнянь можна побудувати такий сигнальний граф, як на рисунку 7.2.

У наведеному графі враховується електромагнітний вплив як власного струму та його початкових значень, так і струмів від магнітного зв'язку інших котушок. Для практичного використання доцільно одержати рівняння, у яких виражаються струми котушок через їхні напруги. З цією метою записавши вище систему двох рівнянь в операторній формі, слід розв'язати їх відносно $i_1(p)$, $i_2(p)$.

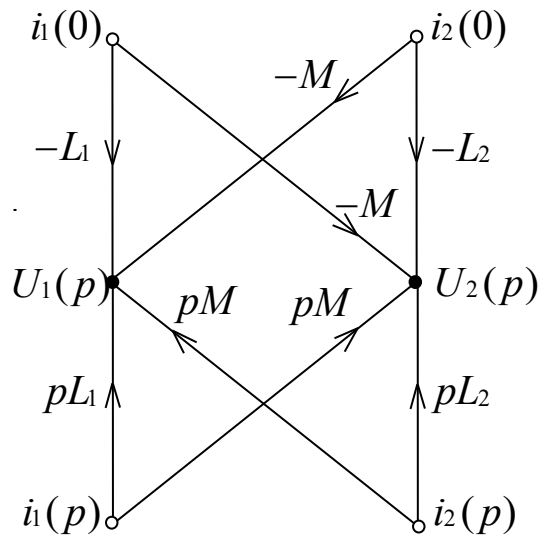


Рисунок 7.2

Та сама мета може бути досягнута, якщо, використавши формулу Мейсона, піддати інверсії $i_2(p) \rightarrow U_2(p)$; $i_1(p) \rightarrow U_1(p)$. Тоді одержимо сигнальний граф в такому вигляді, як на рисунку 7.3.

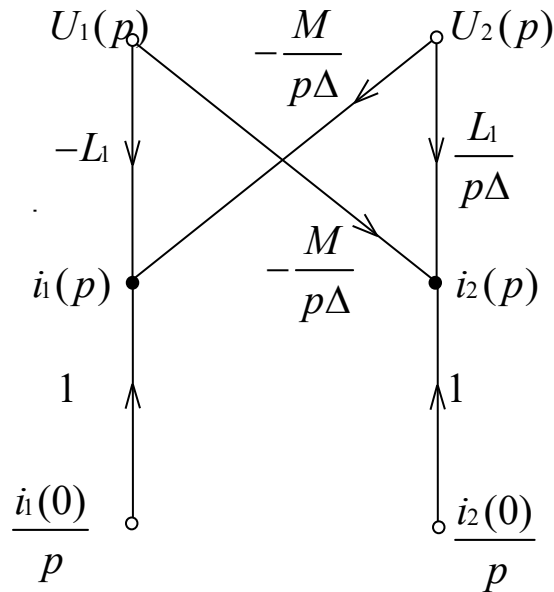


Рисунок 7.3

Для одержання дискретного графа слід помножити джерела, що відображають ненульові початкові умови, на p і вважати ці значення на k -му кроці, операторні зображення вважати значенням на $(k+1)$ -му кроці; замінити p на величину, зворотну часовій виборці.

7.2 Мета роботи

Засвоїти навички роботи з матрицями та її елементами в середовищі Mathcad.

7.3 Попереднє розрахункове завдання

Скласти сигнальний граф трансформатора.

7.4 Робоче завдання

Зібрати візуальну модель трансформатора на основі сигнального графа електричної системи.

Дослідити динамічні процеси на моделі трансформатора.

Дослідити на моделі вплив на роботу трансформатора зміни значення коефіцієнта зв'язку.

7.5 Методика виконання робочого завдання

Рекомендується записати значення параметрів трансформатора в окремий M файл, який можна створити, виконавши команду File–New–M-File. У блоки слід вводити ім'я параметрів, яким присвоюються значення у m-файлі. Після запуску m-файла значення змінних будуть передані в робочий простір Matlab і таким чином будуть передані до блоків моделі.

7.6 Зміст звіту

Електрична схема трансформатора.

Дерево трансформатора, матриця "контур-вітка", система рівнянь.

Сигнальний граф, складений за системою рівнянь.

Візуальна модель трансформатора на основі сигнального графа електричної системи.

Результати моделювання – осцилограми вхідних і вихідних величин, пояснення та висновки до них.

7.7 Контрольні питання

У чому полягає основний принцип роботи магнітно-зв'язаних елементів?

Якими рівняннями можна описати поведінку магнітного зв'язку?

Як можна використовувати m-файли?

Як впливає зміна значення коефіцієнта зв'язку на вихідні напругу і струм трансформатора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

Дослідження процесів у двигунах постійного струму

8.1 Загальні відомості

Двигуни постійного струму знайшли широке використання на електричному рухомому складі і застосовуються у якості тягових двигунів. Їх принцип дії полягає у використанні явища електромагнітної індукції. Конструктивно двигун являє собою послідовно зв'язані між собою провідники, розташовані на якорі. Обертання якоря здійснюється завдяки протіканню струму у провідниках, розташованих у магнітному полі, створеному обмоткою збудження. Взаємодія струму із магнітним полем полюсів створює сили на провідники зі струмом, напрямком яких визначається за правилом лівої руки. У результаті сумісної дії сил створюється момент обертання M , що приводить якір із провідниками в обертання.

Відомо, що при обертанні провідників якоря в магнітному полі в кожному провіднику індукується е.р.с. e , напрямком якої визначається за правилом правої руки. У двигунах постійного струму е.р.с. має напрямок, протилежний напрямку струму і перешкоджає його протіканню. Тому е.р.с., що індукується в обмотках якоря двигуна, називають проти-е.р.с.

Залежно від способу включення обмотки збудження двигуни постійного струму поділяють на такі типи:

а) двигуни з незалежною обмоткою збудження;

б) двигуни послідовного збудження (серієсні), у яких обмотка збудження включена послідовно з обмоткою якоря;

в) двигуни з паралельним збудженням (шунтові), у яких обмотка збудження включена паралельно з обмоткою якоря;

г) двигуни зі змішаним збудженням (компаундні), що мають дві обмотки збудження, одна з яких включається паралельно, а друга послідовно із якорем.

Важливими величинами, що характеризують двигуни постійного струму, є момент інерції M , струм якоря i_a та частота обертів якоря ω .

Експлуатаційні властивості двигуна характеризуються залежностями між змінами окремих його величин, які, як правило, даються у вигляді кривих, що називаються характеристиками двигунів. Найбільш поширеними є електромеханічні характеристики – залежність швидкості обертання та обертального моменту від струму навантаження, і механічні – залежність швидкості обертання від обертального моменту.

Схема двигуна постійного струму з незалежною обмоткою збудження наведена на рисунку 8.1:

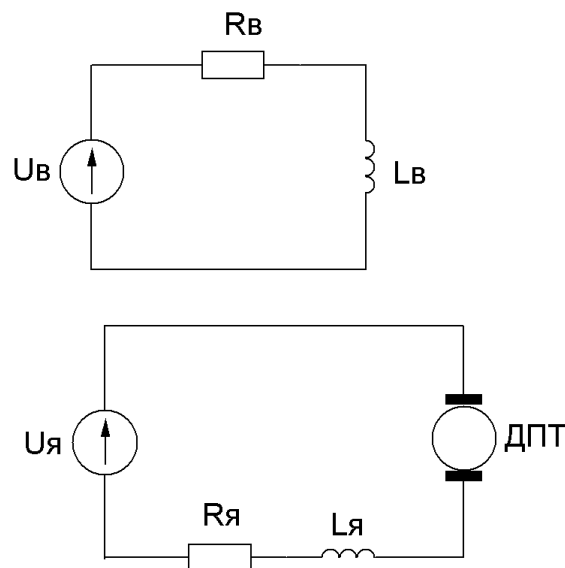


Рисунок 8.1– Електрична схема ДПС з незалежним збудженням

Математична модель двигуна постійного струму являє собою систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\epsilon}}{dt} &= \frac{1}{L_{\epsilon}} (U_{\epsilon} - R_{\epsilon} i_{\epsilon}); \\ \frac{di_{\text{я}}}{dt} &= \frac{1}{L_{\text{я}}} (U_{\text{я}} - R_{\text{я}} i_{\text{я}} - c_{\text{о}} \omega); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (G i_{\epsilon} i_{\text{я}} - M_{\text{с}}). \end{aligned} \quad (8.1)$$

де $U_{\epsilon}, i_{\epsilon}, R_{\epsilon}$ – відповідно напруга, струм та опір в обмотці збудження;

$U_{\text{я}}, i_{\text{я}}, R_{\text{я}}, L_{\text{я}}$ – відповідно напруга, струм, опір та індуктивність у якорі;

ω – частота обертів якоря;

J – момент інерції;

G – спеціальний коефіцієнт, за яким розраховується момент інерції якоря M за формулою

$$M = G i_{\epsilon} i_{\text{я}}; \quad (8.2)$$

$M_{\text{с}}$ – момент зовнішнього опору;

$c_{\text{о}}$ – коефіцієнт проти-е.р.с.

Схема двигуна постійного струму з паралельною обмоткою збудження наведена на рисунку 8.2.

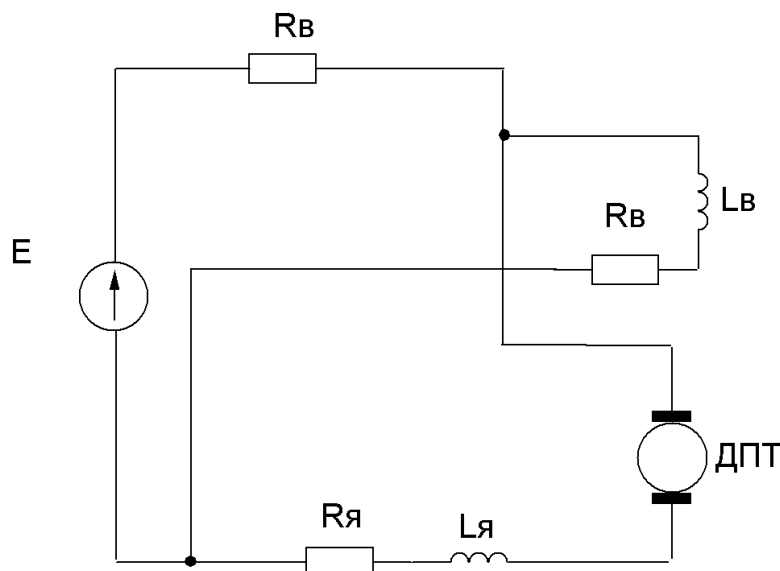


Рисунок 8.2 – Електрична схема ДПС з паралельним збудженням

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} [E - \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} [E - \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [Gi_a - \end{cases} \quad (8.3)$$

На рисунку 8.3 наведена схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Особливістю цього двигуна є залежність його магнітного потоку від навантаження, оскільки обмоткою збудження протікає струм якоря, і струм збудження в даному двигуні дорівнює струму якоря.

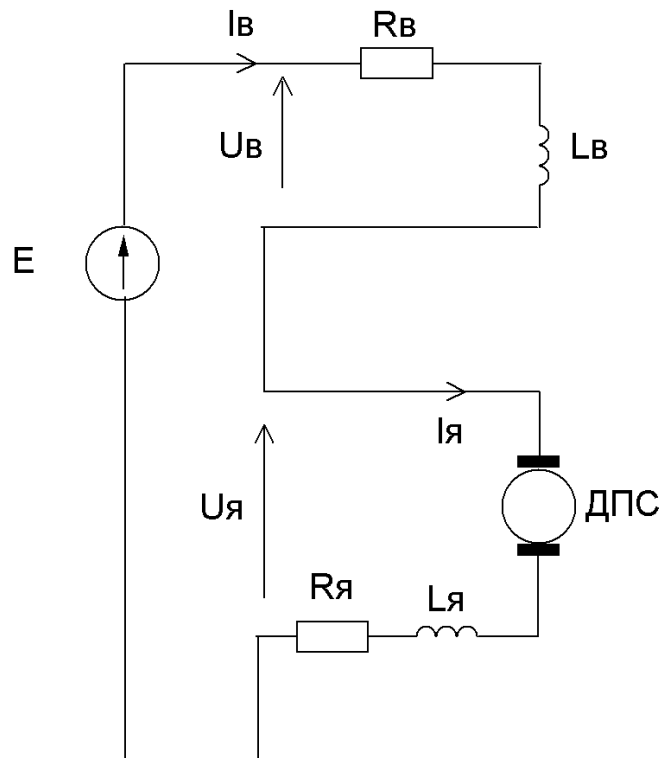


Рисунок 8.3 – Електрична схема ДПС з послідовним збудженням

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a + L_a} [E - (R_a + L_a)i_a - c_o\omega] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [Gi_a^2 - M_c] \end{cases} \quad (8.4)$$

Найбільш придатним для тяги на залізничному транспорті є двигуни з послідовним збудженням. Це можна пояснити такими причинами:

- 1 Зміна навантаження при русі потяга не викликає такої великої зміни потужності, як у двигунів паралельного збудження.
- 2 М'яка механічна характеристика двигунів із послідовним збудженням дозволяє краще використовувати силу інерції потяга.
- 3 Завдяки крутості механічної характеристики двигуна за послідовним збудженням зміна напруги живлячої мережі при

будь-якій кількості обертів не буде викликати різкої зміни струму, обертального моменту і тягового зусилля.

4 Завдяки тому, що магнітний потік у двигуні з послідовним збудженням створюється струмом навантаження, обертальний момент при однаковій величині струму буде більший, ніж у двигуні з паралельним збудженням.

8.2 Мета роботи

Засвоїти навички роботи моделювання двигунів постійного струму.

8.3 Попереднє розрахункове завдання

Скласти сигнальний граф двигуна постійного струму згідно з вашим варіантом.

8.4 Робоче завдання

Зібрати візуальну модель двигуна постійного струму на основі сигнального графа електричної системи.

Дослідити динамічні процеси на моделі двигуна постійного струму.

8.5 Зміст звіту

Електрична схема ДПС.

Дерево ДПС, матриця "контур-вітка", система рівнянь, що характеризує динамічні процеси, що протікають у ДПС.

Сигнальний граф, складений за системою рівнянь.

Візуальна модель ДПС на основі сигнального графа електричної системи.

Результати моделювання – осцилограми моменту інерції M , струм якоря i_a і частота обертів якоря ω .

Пояснення та висновки до результатів моделювання.

8.6 Контрольні питання

Який принцип покладено у роботу ДПС?

Які існують основні види ДПС?

Якими рівняннями описуються динамічні процеси ДПС з незалежною обмоткою збудження?

Якими рівняннями описуються динамічні процеси ДПС з паралельною обмоткою збудження?

Якими рівняннями описуються динамічні процеси ДПС з послідовною обмоткою збудження?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ильинский Н.Ф., Цаценкин В.К. Приложение теории графов к задачам электромеханики. – М.: "Энегрция", 1968. – 200 с.

2. Кенинг Г., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем / Пер. с англ., М.–Л.: Изд-во "Энергия", 1965. – 424 с.

3. Львович А.Ю. Электромеханические системы: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. – 296 с.

4. Робишо Л., Буавер М., Робер Ж. Направленные графы и их приложение к электрическим цепям и машинам / Пер. с франц. – М.–Л., Изд-во "Энергия", 1964. – 248 с.

5. Рябенський В. М., Драган С. В., Солобуто Л. В. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакета прикладних програм MATLAB/Simulink). – Львів: Новий Світ – 2000, 2008. – 385 с.

6. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин / Пер. с англ. – М.: "Энергия", 1967. – 224 с.

7. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику / Пер. с англ. – М.: "Энергия", 1969. – 336 с.