

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторних робіт
з дисципліни**

***«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО
ПРИВОДА»***

Харків – 2014

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку
на засіданні кафедри автоматизованих систем електричного

транспорту 4 лютого 2013 р., протокол № 7.

Рекомендується для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 6.05070203 «Електричний транспорт» та 6.05070202 «Електричні системи та комплекси транспортних засобів».

Укладачі:

доц. С.Г. Буряковський,
старш. викл. М.М. Одегов,
асист. А.С. Маслій

Рецензент

проф. А.П. Фалендиш

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт

з дисципліни

*«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО
ПРИВОДУ»*

Відповідальний за випуск Одегов М.М.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 14.05.13 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,75. Тираж 50. Замовлення №

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

Зміст

Вступ.....	4
Лабораторна робота 1. Математичне моделювання моментів опору.....	6
Лабораторна робота 2. Математичне моделювання двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПСНЗ).....	28
Лабораторна робота 3. Математичне моделювання двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПСПЗ).....	33
Лабораторна робота 4. Математичне моделювання двомасової системи.....	37
Лабораторна робота 5. Математичне моделювання асинхронного двигуна.....	44
Лабораторна робота 6. Математичне моделювання руху електрорухомого складу.....	50
Список літератури.....	59
Додаток А.....	60
Додаток Б.....	61

Вступ

Метою лабораторних робіт з дисципліни «Теорія автоматизованого електропривода» є опанування навичок дослідження статичних і динамічних характеристик електричних двигунів, що застосовуються на електричному транспорті, поглиблення теоретичних і практичних знань з дисципліни, а також визначення меж безпечної експлуатації електричного привода рухомого складу з застосуванням математичного моделювання, визначення допустимих параметрів існуючих систем електричного привода електрорухомого складу (ЕРС) у рядовій експлуатації. Електричний привод рухомого складу є важливою складовою ЕРС, тому його досконалість повинна відповідати вибагливішим вимогам, які визначаються експлуатацією. Саме питання аналізу динамічних характеристик є найбільш актуальним. Моделювання та аналіз отриманих результатів дозволить студентові наочно визначити особливості приводів з різними тяговими електродвигунами (ТЕД). У методичних вказівках лабораторних робіт викладено матеріали останніх досягнень галузі, методики аналізу та розрахунку електроприводів.

Приведення в рух виконавчих механізмів і управління їх рухом для виконання технологічних операцій є основним завданням автоматизованого електропривода. Тому фахівець з автоматизованого електропривода повинен знати загальні особливості електромеханічних систем, найважливіші їх елементи, зв'язки і параметри, а також математичні методи їх опису і аналізу; повинен уміти на основі відомої кінематичної схеми механізму, його технічних даних і відомостей про технологічний процес складати розрахункові схеми і розраховувати параметри механічної частини електропривода, описувати рух електропривода диференціальними рівняннями, розраховувати частотні характеристики і механічні перехідні процеси. Повинен за відомим характером зміни електромагнітного моменту двигуна оцінювати характер руху електропривода.

Загальні вказівки до виконання робіт

Відповідно до навчального плану з дисципліни «Теорія автоматизованого електричного привода» студент виконує самостійну роботу з розроблення структурних схем диференціальних рівнянь і згідно з порядком виконання робіт отримує результати моделювання, наводить висновки щодо отриманих статичних і динамічних характеристик. Отриманий результат потрібно унаочнити кресленнями (ескізами, схемами). Креслення необхідно виконувати з дотриманням вимог ДСТУ, розрахунки супроводжувати відповідними формулами, указуючи значення, а також розмірність отримуваних даних. Не допускається вклеювання схем і креслень, скопійованих з книг, інструкцій і альбомів.

У звітах лабораторних робіт бажано навести особисті дослідження і досвід роботи у сфері експлуатації електропривода; вказати недоліки, а також внести свої міркування і пропозиції щодо усунення недоліків.

Текст лабораторних робіт виконується на одній стороні аркушів паперу формату А4. Він має бути виконаний за допомогою ЕОМ чи написаний чітко чорнилом або пастою чорного кольору й особисто самим студентом.

Лабораторна робота 1

Математичне моделювання моментів опору

Тема: дослідження впливу моменту опору механізму під час руху.

Мета: навчитись складати математичну модель моментів опору; на отриманій моделі відтворити поведінку моменту опору від зміни динамічного моменту.

Порядок виконання роботи:

1 Відповідно до завдання на лабораторну роботу заповнити таблицю 1.1.

2 Зробити розрахунки потрібних величин і заповнити таблиці 1.1-1.2.

3 Скласти структурну модель моменту опору відповідно до системи рівнянь (1.1).

4 Побудувати характеристики $M_c=f(\omega)$, $M_c=f(t)$, $\omega=f(t)$ при зміні динамічного моменту.

5 Зробити висновки з виконаної роботи.

Теоретичні відомості

Рівняння руху електропривода

Механічна енергія на валу двигуна $W_{\text{дв}}$ витрачається:

- на здійснення корисної роботи і подолання опору руху робочого органу $W_{\text{оп}}$;

- на створення запасу кінетичної енергії в механічній частині електропривода $W_{\text{кін}}$

$$W_{\text{дв}} = W_{\text{оп}} + W_{\text{кін}} \quad (1.1)$$

Потужність двигуна дорівнює похідній енергії за часом

$$D_{\text{дв}} = \frac{dW_{\text{дв}}}{dt} = \frac{dW_{\text{оп}}}{dt} + \frac{dW_{\text{кін}}}{dt} = D_{\text{оп}} + D_{\text{кін}} = \dot{W}_{\text{оп}} + \dot{W}_{\text{кін}} \quad (1.2)$$

Тоді момент двигуна

$$\dot{L} = \dot{L}\ddot{\omega} + \dot{L}\dot{\omega} \quad (1.3)$$

Визначимо динамічний момент, продиференціювавши за часом вираз кінетичної енергії:

$$\frac{dW_{kin}}{dt} = \frac{d\left(\frac{J \cdot \omega^2}{2}\right)}{dt} = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} + J\omega \frac{d\omega}{dt} = \dot{L}\dot{\omega} = \dot{L}\ddot{\omega} \quad (1.4)$$

З формули (1.4) випливає, що динамічний момент

$$\dot{L}\ddot{\omega} = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.5)$$

Момент M , що розвивається двигуном, врівноважується моментом опору руху M_{op} і динамічним моментом $M_{дин}$:

$$M = M\ddot{\omega} + \dot{L}\ddot{\omega} = M\ddot{\omega} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

Вираз називають повним рівнянням руху.

Для більшості механізмів момент інерції $J = const$. Тоді отримуємо основне рівняння руху електропривода:

$$M - M\ddot{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.7)$$

В основне рівняння руху входять:

- M - електромагнітний момент двигуна;

- M_{op} - момент опору руху;

- $M_{дин}$ - динамічний момент, що діє тільки в динаміці.

Основне рівняння руху дозволяє оцінити стан, у якому знаходиться електропривод:

- при $M > M_{op} \rightarrow J \frac{d\omega}{dt} > 0 \rightarrow J = const \rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0 \rightarrow \omega \uparrow$ електропривод розгоняється ;

- при $M < M_{op} \rightarrow J \frac{d\omega}{dt} < 0 \rightarrow J = const \rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0 \rightarrow \omega \downarrow$ електропривод гальмується;

- при $M = Mon \rightarrow J \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow J = const \rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow \omega = const$ швидкість електропривода постійна, сталий режим роботи електропривода;

- при $M = 0 \rightarrow M_{дин} = -Mon \rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0 \rightarrow \omega \downarrow$ електропривод гальмується під дією статичного моменту при відключеному двигуні (гальмування при вибіганні).

Знаки моментів:

- момент двигуна позитивний - $M (+)$, якщо напрям дії моменту двигуна збігається з напрямом обертання двигуна;

- статичний момент позитивний - $Mon (+)$, якщо статичний момент направлений назустріч швидкості обертання двигуна.

Основне рівняння поступальної ходи виводиться аналогічно і має вигляд

$$F\ddot{a}\hat{a} - F\ddot{i}\hat{i} = m \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (1.8)$$

де $F\ddot{d}\hat{v}$ - сила двигуна (лінійного);

Fon - сила опору руху;

m - маса, що пересувається;

v - лінійна швидкість пересування.

Механічна частина електропривода

Розглянемо розрахункову схему електропривода з нескінченною жорсткістю механічних зв'язків між елементами. Розрахункова схема електропривода представляється елементом, що обертається, з моментом інерції, приведеним до вала двигуна, $J = \delta \cdot J_{\delta v} + J_{po} / inep$, приведеним до вала двигуна моментом Mon і моментом двигуна M .

Основне рівняння руху при лінійному ($J = const$) кінематичному ланцюзі

$$M - Mon = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.9)$$

запишемо в операторній формі:

$$M(p) - M\ddot{i}\hat{i}(p) = J\omega(p) \cdot p. \quad (1.10)$$

Передавальну функцію механічної частини електропривода, на виході якої розглядаємо $\omega(p)$, на вході - динамічний момент,

$$M(p) - M_{оп}(p) = M_{дин}(p) \quad (1.11)$$

отримуємо у вигляді

$$W(p) = \frac{x_{a\ddot{\omega}}}{\delta_{a\ddot{\omega}}} = \frac{\omega(\delta)}{\dot{I}(\delta) - \dot{I}\ddot{n}(\delta)} = \frac{1/J}{p}. \quad (1.12)$$

Приведена ланка може бути відображена так, як на рисунку 1.1.

Структурна схема (особлива форма запису рівнянь) механічної частини електропривода, логарифмічна амплітудна (ЛАХ) і перехідні характеристики зображені на рисунку 1.1.

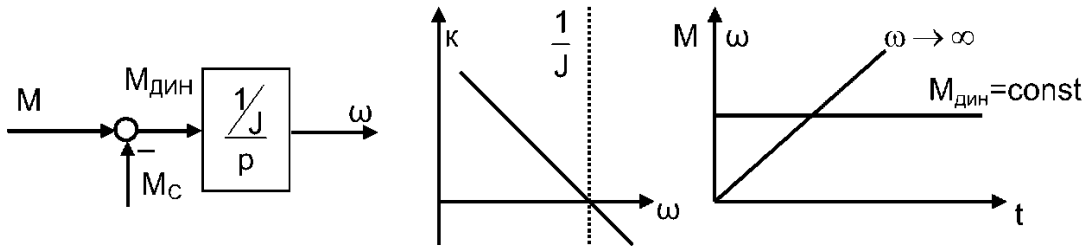


Рисунок 1.1 – Структурна схема, ЛАХ та перехідна характеристика механічної частини електропривода

При зміні на вході $M_{дин}(p) = M(p) - M_{оп}(p) = const$ і $J = const$ вихідна величина $\omega(t)$ наростатиме за лінійним ($d\omega/dt = \varepsilon = const$) законом у функції часу від $\omega = 0$ до $\omega = \infty$.

Перейдемо в наступному рівнянні до відносних одиниць (в.о.). Приймаємо за базові величини:

$M_B = M_N$ - номінальний електромагнітний момент двигуна;

$\omega_B = \omega_{0H}$ - швидкість ідеального холостого ходу при номінальній напрузі на якорі і номінальному струмі збудження.

Основне рівняння руху у відносних одиницях записуємо як

$$\bar{M} - \bar{M}\ddot{i} = \delta \ddot{\bar{\omega}}, \quad (1.13)$$

де $T_d = \frac{J \cdot \omega_{OH}}{M_H}$ - механічна постійна часу електропривода, що враховує і приведений момент інерції робочого органу.

Наявність у рівнянні T_d свідчить про запис рівняння у відносних одиницях.

Фізичним сенсом механічної постійної часу електропривода T_d є час, протягом якого двигун моментом інерції J розженеться без навантаження з нерухомого стану до швидкості ідеального холостого ходу під дією моменту, що дорівнює номінальному.

Кінематичні схеми конкретних електроприводів нескінченні, проте мають загальні особливості, які можна встановити, розглянувши ряд конкретних прикладів.

Наприклад, кінематична схема електропривода відцентрового вентилятора зображена на рисунку 1.2. Ротор двигуна Д через сполучну муфту СМ обертає вал робочого колеса вентилятора В. Всі елементи кінематичної схеми рухаються з однією і тією самою швидкістю.

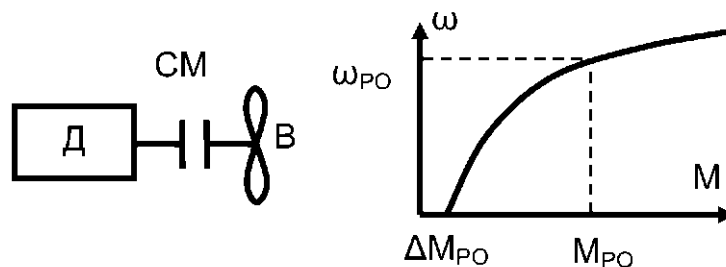


Рисунок 1.2 – Кінематична схема і механічна характеристика вентилятора

Момент опору руху робочого органу M_{PO} залежить від швидкості робочого органу ω_{PO} , створюється на робочому колесі вентилятора:

$$M_{PO} = \Delta M_{PO} + k_{ai} \cdot \left(\frac{\omega_{\partial i}}{\omega_{\dot{a}i}} \right)^n, \quad (1.14)$$

де ΔM_{PO} - момент механічних втрат на тертя в підшипниках робочого колеса вентилятора;

ω_{OH} - номінальна швидкість вентилятора;

M_{OH} - номінальний момент вентилятора при його номінальній швидкості;

n - коефіцієнт, залежний від магістралі, на яку працює вентилятор ($n = 2$ - магістраль без протитиску).

Механічна характеристика вентилятора є квадратичною залежністю моменту від швидкості (рисунок 1.2). Таким чином, електропривод вентилятора є безредукторним, нереверсивним, з нелінійною залежністю швидкості від моменту.

У більшості практичних випадків з різних міркувань доцільна номінальна швидкість двигуна не збігається з номінальною швидкістю робочого органу. При цьому виникає необхідність узгодження швидкостей шляхом введення в кінематичний ланцюг різних передач: зубчатих, фрикційних, ланцюгових, клиноременних і тому подібне. Для механічного ступінчастого регулювання швидкості використовують коробки передач, для плавного регулювання - фрикційні варіатори.

У кінематичну схему привода токарного верстата (рисунок 1.3) введена клиноременна передача КРП і коробка передач КП для ступінчастого регулювання швидкості. Вихідний вал коробки передач пов'язаний зі шпинделем III верстата. У результаті взаємодії деталі, що обертається, з нерухомим різцем Р виникають зусилля різання і момент різання

$$M_z = F_z \cdot r_z, \quad (1.15)$$

де M_z - момент різання;
 F_z - зусилля різання;
 r_z - радіус .

За вимогами технології обробка деталей ведеться в режимі потужності

$$P_z = \dot{V}_z \cdot \omega_{di} = \dot{n} \text{const}, \quad (1.16)$$

тому момент різання буде оберненопропорційний швидкості ω_{po} при її зміні, а механічна характеристика набирає вигляду гіперболи (див. рисунок 1.3). Окрім корисного моменту $M_{po} = M_z$, у всіх елементах кінематичного ланцюга діють сили тертя в підшипниках, у зубчатих зачепленнях і клиноременній передачі.

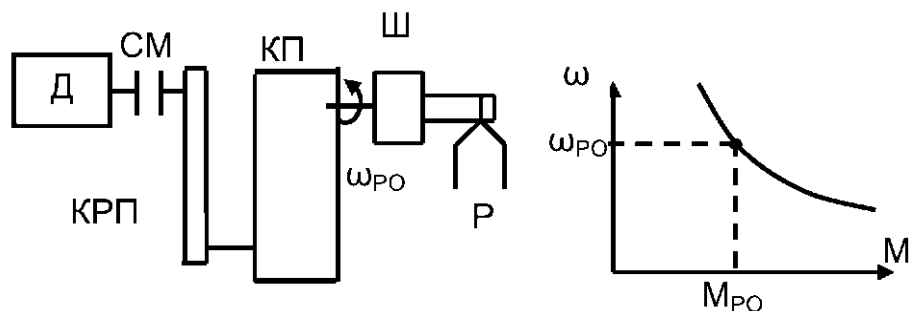


Рисунок 1.3 – Кінематична схема і механічна характеристика токарного верстата

Таким чином, електропривод токарного станка є нереверсивним, з нелінійною залежністю швидкості від моменту, для узгодження швидкостей двигуна і робочого органу застосовані редуктор КП і клиноременна передача КРП.

У механізмі пересування візка мостового крана (рисунок 1.4) момент на валу двигуна долає сили тертя. Двигун Д через редуктор Р обертає рушійну пару коліс візка, долаючи силу опору руху візка

$$F_{po} = \frac{k\zeta \cdot m \cdot g \cdot (f + \mu \cdot r_o)}{Rk}, \quad (1.17)$$

обумовлену тертям ковзання в підшипниках і тертям кочення коліс по рейках. Тут k_3 - коефіцієнт запасу; m - маса візка з вантажем; g - прискорення вільного падіння; $f = \frac{M_{trk}}{N}$ - коефіцієнт тертя кочення; $\mu = \frac{F_{trc}}{N}$ - коефіцієнт тертя ковзання; M_{trk} - момент тертя кочення; F_{trc} - сила тертя ковзання; Rk - радіуси колеса і шийки осі колеса.

Сила тертя F_{po} завжди направлена назустріч руху візка. Під реактивними силами розумітимемо такі сили, які при зміні напрямку руху робочого органу свій знак. Отже, F_{po} – реактивна сила з формули (1.17), і тоді впливає, що модуль сили тертя не залежить від швидкості обертання робочого органу

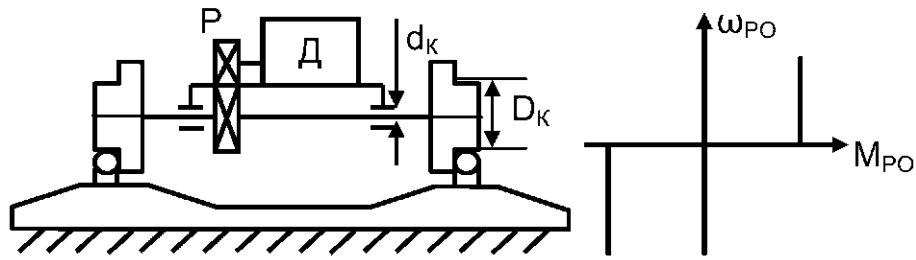


Рисунок 1.4 – Кінематична схема і механічна характеристика механізму пересування візка

Таким чином, електропривод візка є реверсивним, з постійним, незалежним від швидкості, моментом, знак якого змінюється при зміні напрямку руху, тобто носить реактивний характер. На відміну від механізму пересування, момент опору руху механізму піднімання створюється силою тяжіння підвішеного вантажу, причому її напрям не залежить від напрямку руху вантажу. Під активними силами розумітимемо такі сили, які при зміні напрямку руху робочого органу не змінюють свій знак. Отже, сила тяжіння - активна сила:

$$F_{po} = m \cdot g . \quad (1.18)$$

Кінематична схема механізму піднімання наведена на рисунку 1.5. Двигун Д через редуктор Р обертає барабан Б, на якому намотаний трос з вантажем. На вантаж діє сила тяжіння, не залежна від швидкості.

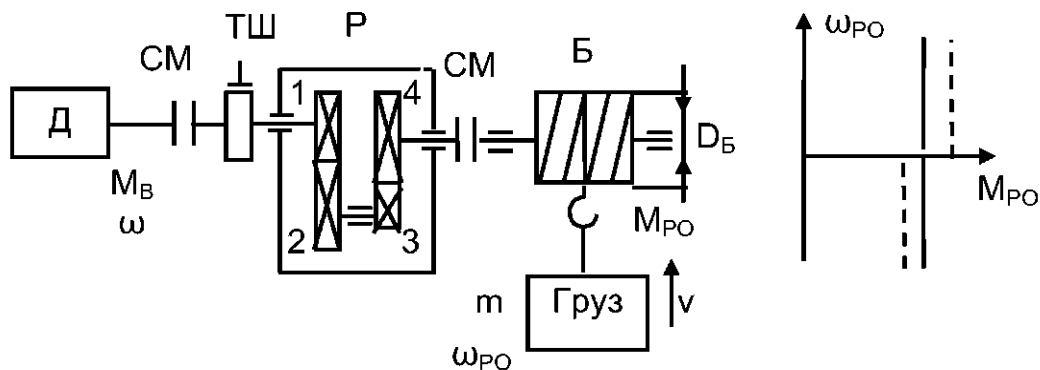


Рисунок 1.5 – Кінематична схема і механічна характеристика механізму піднімання (з активним характером навантаження)

Окрім сили тяжіння двигун долає сили тертя в підшипниках і зубчатих зачепленнях редуктора (пунктирні лінії на рисунку 1.5 – з урахуванням F_{po}).

Таким чином, електропривод механізму піднімання в цілому є реверсивним, з постійним, незалежним від швидкості, моментом, знак якого не змінюється при зміні напрямку руху, тобто носить активний характер.

Момент робочого органу носить активний характер, електропривод ліфта – реверсивний.

Таким чином, при різноманітні кінематичних схем робочого органу відносно електропривода вони мають такі особливості:

- реверсивні або нереверсивні електроприводи;
- електроприводи редукторний або безредукторний;
- в електроприводі діють рушійні моменти і сили, моменти і сили опору руху робочого органу, а також моменти і сили тертя;
- моменти опору можуть бути постійними або можуть залежати від швидкості, кута повороту, часу;
- моменти опору можуть мати характер активний (енергія поступає від іншого джерела або є запас потенційної енергії) або реактивний (обумовлений силами тертя);
- при зміні напрямку руху реактивні моменти опору руху миттєво змінюють знак, а активні моменти знак не змінюють.

Приведення моментів опору руху до вала двигуна

Критерієм приведення моментів опору руху до вала двигуна є енергетичний баланс реальної і розрахункової схем, що полягає в рівності енергій, витрачених на виконання певної роботи в реальній і розрахунковій схемах.

В ідеальному випадку за відсутності втрат потужності в передачі потужності робочого органу P_{po} дорівнює потужності на валу двигуна P_v :

$$D\dot{\omega} = D\dot{\alpha}. \quad (1.19)$$

Розглянемо для прикладу механізм піднімання (див. рисунок 1.5). Для обертального руху барабана:

- потужність на валу робочого органу

$$D\dot{\delta i} = \dot{I}\delta i \cdot \omega_{\delta i} ; \quad (1.20)$$

- потужність на валу двигуна

$$D\dot{a} = \dot{I}a \cdot \omega . \quad (1.21)$$

Підставивши рівняння, отримаємо момент опору руху, приведений до вала двигуна:

$$\dot{I}a = \frac{\dot{I}\delta i \cdot \omega_{\delta i}}{\omega} = \frac{\dot{I}\delta i}{i\delta} , \quad (1.22)$$

де $i\delta = \frac{\omega}{\omega_{\delta i}}$ - передавальне число редуктора.

Для поступальної ходи потужність на валу робочого органу

$$D\dot{\delta i} = \dot{I}\delta i \cdot \omega_{\delta i} = m \cdot g \cdot v = G \cdot v , \quad (1.23)$$

тоді момент опору руху, приведений до вала двигуна,

$$M\dot{a} = G \cdot \frac{v}{\omega} = \frac{G}{\rho} , \quad (1.24)$$

де ρ - радіус приведення, м.

Приведення моментів інерції до вала двигуна

Критерієм приведення є рівність запасу кінетичної енергії реальної і розрахункової схем електропривода. Кінетична енергія реальної схеми дорівнює сумі кінетичних енергій кожного елемента руху.

Для схеми механізму піднімання (див. рисунок 1.5) вираз кінетичної енергії $W_{кін}$ для розрахункової і реальної схем можна записати у вигляді

$$W_{\dot{\omega}} = J \frac{\omega^2}{2} = J_{\dot{\omega}} \frac{\omega^2}{2} + J_{\dot{\omega}} \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega^2}{2} + J_2 \frac{\omega^2}{2} + J_3 \frac{\omega^2}{2} + J_4 \frac{\omega_{\dot{\omega}}^2}{2} + J_A \frac{\omega_{\dot{\omega}}^2}{2} + m \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1.25)$$

де J - момент інерції розрахункової схеми, приведений до вала двигуна;

$J_{\dot{\omega}}$, $J_{\dot{\omega}}$, J_2 , J_3 , J_4 , J_B - моменти інерції відповідно двигуна, гальмівного шків, шестерень редуктора, барабана;

m - маса вантажу;

ω_1 - швидкість проміжного вала редуктора.

Поділивши праву і ліву частини рівняння на кутову частоту обертання, набудемо значення моменту інерції J розрахункової схеми, приведеного до вала двигуна:

$$J = J_{\dot{\omega}} + J_{\dot{\omega}} + J_1 + J_2 \frac{1}{i_1^2} + J_3 \frac{1}{i_2^2} + J_4 \frac{1}{i_p^2} + J_A \frac{1}{i_p^2} + m \cdot \rho^2, \quad (1.26)$$

де i_1 - передавальне число до проміжного вала редуктора;

i_2 - передавальне число редуктора;

$\rho = \frac{v}{\omega}$ - радіус приведення від лінійної швидкості вантажу до

вала двигуна.

У зв'язку зі складністю визначення моментів інерції елементів передачі розрахунок моменту інерції, приведеного до вала двигуна, виконують за формулою

$$J = \delta \cdot J_{\dot{\omega}} + J_{\dot{\omega}} \delta, \quad \delta = \frac{J_{\dot{\omega}} + J_{\dot{\omega}}}{J_{\dot{\omega}}} = 1, 1 \dots 1, 3, \quad (1.27)$$

де $J_{\text{пер}} = J_{\dot{\omega}} + J_1 + \frac{J_2}{i_1 \cdot 2} + \frac{J_3}{i_1 \cdot 2}$ - приведений момент інерції передачі;

$J_{\text{прр}} = \frac{J_B}{i_p^2} + m \cdot \rho^2$ - приведений момент інерції елемента

(барабана), що обертає, і поступально рухомого елемента (маси вантажу) робочого органу.

Радіус приведення ρ і приведений момент інерції $J_{\text{пр}}$ можуть бути змінними величинами.

Механічна частина електропривода з пружним зв'язком

Досі розглядалися механічні системи з ідеально жорсткими зв'язками. Практично жорсткості валів, сполучних муфт, передач (канати, ремені, вали в передачах і тому подібне) мають кінцеві значення, механічна система отримує декілька ступенів свободи, і в загальному випадку містить тіла, що піддаються крученню, вигину, розтягуванню і стискуванню.

Жорсткістю називатимемо коефіцієнт зв'язку C_k (C_l) між кутовою деформацією вала $\Delta\varphi$ (або лінійною деформацією ΔL) і пружним моментом M_y , що виникає в пружному елементі (або пружною силою F_y). Розглядатимемо лінійний закон деформації (закон Гука). У цьому випадку додавання пружного моменту не призводить до залишкових деформацій, а при знятті моменту на вході система повертається в початкове положення.

$$M_y = C_k \cdot \Delta\varphi, \quad (1.29)$$

$$F_y = C_{\check{e}} \cdot \Delta L. \quad (1.30)$$

Коефіцієнти жорсткості C_k і C_l визначаються геометричними розміром пружного елемента і залежать від матеріалу, з якого він виготовлений. Для вала радіусом R при його крученні коефіцієнт жорсткості, $\left[\frac{M}{\delta\alpha} \right]$,

$$C_k = J_s \cdot \frac{G}{L}, \quad (1.31)$$

де $J_s = \frac{\pi \cdot R^4}{2}$ – момент інерції поперечного перетину вала;

G - модуль пружності ;

L - довжина вала.

Для пружного вала при його розтягуванні або стискуванні коефіцієнт жорсткості, $\left[\frac{M}{i} \right]$,

$$C_{\check{e}} = \frac{G_s \cdot E}{L}, \quad (1.32)$$

де L - довжина ;

G_s - площа поперечного перетину;

E - модуль пружності.

Величину $1/C$, зворотну жорсткості, називають податливістю. Фізично податливість визначає деформацію елемента під впливом пружного моменту, а коефіцієнт жорсткості - величину пружного моменту при певній деформації.

Таким чином, чим більше коефіцієнт жорсткості пружного елемента, тим менша деформація в ньому виникає.

Приведення пружності до вала двигуна

При складанні розрахункових схем механічної частини здійснюється приведення до вала двигуна коефіцієнта жорсткості пружного елемента. Критерієм приведення є рівність запасу потенційної енергії в реальній і розрахунковій схемах.

Для обертального руху потенційна енергія для приведеної і реальної ланки визначається за формулою

$$W_i = \tilde{N}_{i\delta} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i\delta}^2}{2} = \tilde{N}_k \cdot \frac{\Delta\varphi_s^2}{2}, \quad (1.33)$$

тоді приведена жорсткість

$$\tilde{N}_{i\delta} = \tilde{N}_k \cdot \left(\frac{\Delta\varphi_s^2}{\Delta\varphi_{i\delta}^2} \right) = \tilde{N}_k \cdot \frac{1}{s^2}. \quad (1.34)$$

Для поступальної ходи потенційна енергія для приведеної і реальної ланки

$$W_i = \tilde{N}_{i\delta} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i\delta}^2}{2} = \tilde{N}_k \cdot \frac{\Delta L_s^2}{2}. \quad (1.35)$$

Приведення багатомасової пружної системи до двомасової

Розглянемо пружну систему з одним пружним елементом - схему електропривода вентилятора (рисунок 1.6).

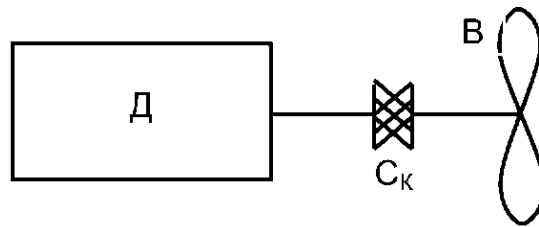


Рисунок 1.6 – Кінематична схема вентилятора

За наявності пружних елементів не завжди вдається отримати одномасову розрахункову схему, і залежно від кількості пружних елементів виходять багатомасові механічні системи - двомасова, тримасова і так далі.

У кінематичній схемі вентилятора можна розглянути чотири маси з моментами інерції: ротора двигуна $\delta J_{дв}$, напівмуфт J_1 і J_2 , робочого колеса $J_{пр}$, сполучені трьома пружними елементами: валом двигуна до напівмуфти жорсткістю C_1 , пружною муфтою - C_2 , валом вентилятора до робочого колеса - C_3 . Отримали чотиримасову систему (рисунок 1.7), у якій маси, що обертаються, сполучені відрізками, пропорційними податливостям валів.

Зазвичай багатомасову систему приводять до найбільш податливої ланки (у нашому випадку - C_2), маси, що при цьому обертаються, з малими моментами інерції приєднують до головних мас з набагато більшими моментами інерції. У схемі вентилятора віднесемо J_1 до $\delta J_{дв}$, J_2 - до $J_{пр}$ і отримаємо двомасову пружну систему (рисунок 1.8). У розрахунковій схемі розглядаємо головні маси $\delta J_{дв}$ і $J_{пр}$. Еквівалентну жорсткість C_{12} двомасової пружної системи визначають через суму податливостей пружних елементів реальної схеми:

$$\frac{1}{C_{\text{екв}}} = \frac{1}{\tilde{N}_1} + \frac{1}{\tilde{N}_2} + \frac{1}{\tilde{N}_3}. \quad (1.36)$$

Головна маса $\delta J_{дв}$ обертається зі швидкістю ω_1 , до неї прикладений момент двигуна M і момент статичний ΔM_c . Головна маса $J_{пр}$ обертається зі швидкістю ω_2 , до неї прикладений момент M_c . Розрізатимемо систему по пружному елементу, у місці розрізу прикладемо пару моментів M_{12} .

Моментом M_{12} є момент пружної взаємодії між головними масами $\delta J_{\delta v}$ і $J_{\text{ПР}}$.

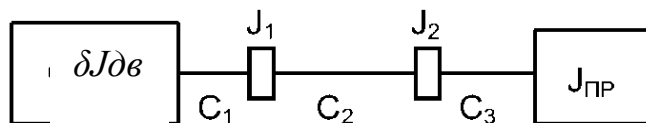


Рисунок 1.7 – Чотиримасова пружна система

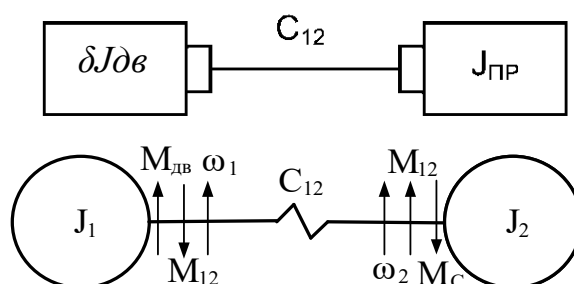


Рисунок 1.8 – Розрахункова схема двомасової пружної системи

Рівняння руху і структурна схема двомасової пружної системи

Рух двомасової пружної системи (ДПС) описується системою диференціальних рівнянь (рисунок 1.8)

$$\begin{aligned}
 M &= \Delta M \ddot{u} + \delta \cdot J \ddot{a} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} + M_{12}, \\
 M_{12} &= M \ddot{u} + J \ddot{\delta} \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \\
 M_{12} &= \tilde{N}_{12} \cdot \Delta \varphi_{12} = \tilde{N}_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = \tilde{N}_{12} \cdot \left(\int \omega_1 dt - \int \omega_2 dt \right).
 \end{aligned}
 \tag{1.37}$$

Перепишемо систему рівнянь в операторній формі:

$$\begin{aligned}
 M &= \Delta M \ddot{u} + \delta \cdot J \ddot{a} \cdot \omega_1 \cdot p + M_{12}, \\
 M_{12} &= M \ddot{u} + J \ddot{\delta} \cdot \omega_2 \cdot p, \\
 M_{12} &= \tilde{N}_{12} \frac{\omega_1 - \omega_2}{p}.
 \end{aligned}
 \tag{1.38}$$

За системою рівнянь будується структурна схема ДПС (рисунок 1.9). Відмінність структурної схеми ДПС від схеми системи з ідеально жорсткими зв'язками полягає в тому, що головні маси розділені, між ними - інтегруюча ланка C_{12}/p , що представляє жорсткість.

Отримаємо передавальну функцію ДПС, для чого перетворимо структурну схему рисунку 1.9. На рисунку 1.10 наведена перетворена структурна схема, у якій зворотні зв'язки перенесені на вихід системи.

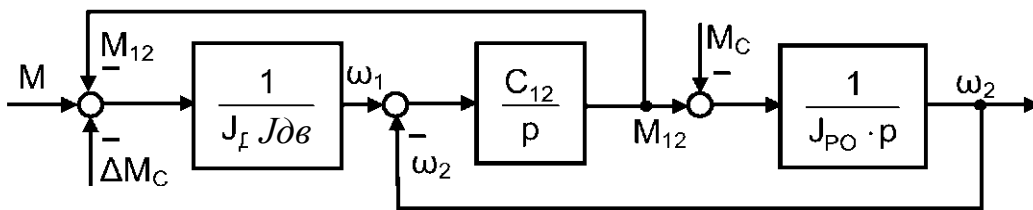


Рисунок 1.9 – Структурна схема ДПС

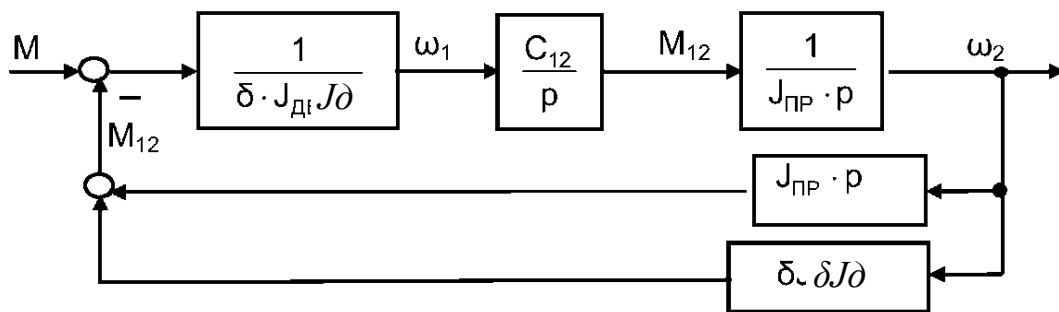


Рисунок 1.10 – Перетворена структурна схема при $\Delta M_{on}=0$, $M_{on}=0$ (за рекомендацією викладача)

Передавальна функція цієї схеми має вигляд

$$\begin{aligned}
 W(p) &= \frac{\Delta \omega_2(p)}{\Delta M(p)} = \frac{\frac{C_{12}}{p^2 \cdot \delta \cdot J \ddot{a} \dot{a} \cdot J i \delta}}{1 + \frac{C_{12}}{p^2 \cdot \delta \cdot J \ddot{a} \dot{a} \cdot J i \delta} \cdot (J i \delta + \delta \cdot J \ddot{a} \dot{a}) \cdot \delta} = \\
 &= \frac{1}{(J i \delta + \delta \cdot J \ddot{a} \dot{a}) \cdot \delta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\delta \cdot J \ddot{a} \dot{a} \cdot J i \delta}{(J i \delta + \delta \cdot J \ddot{a} \dot{a}) \cdot \tilde{N}_{12}} \cdot \delta^2}.
 \end{aligned} \tag{1.39}$$

Як видно з рівняння, передавальна функція містить дві ланки:

- інтегруюча ланка з коефіцієнтом посилення $\frac{1}{J} = \frac{1}{(Jnp + \delta \cdot J\delta\epsilon)}$ - ця ланка являє собою ідеально жорстку систему;
- консервативна ланка (коливальна ланка без демпфування коливань) з постійною часу T_k і частотою зрізу $\Omega_k = \Omega_{12}$:

$$T_k = \sqrt{\frac{Ji\delta \cdot \delta \cdot J\ddot{a}\hat{a}}{(Ji\delta + \delta \cdot J\ddot{a}\hat{a}) \cdot \tilde{N}_{12}}}; \quad \Omega_k = \sqrt{\frac{(Ji\delta + \delta \cdot J\ddot{a}\hat{a}) \cdot \tilde{N}_{12}}{Ji\delta \cdot \delta \cdot J\ddot{a}\hat{a}}}. \quad (1.40)$$

Передавальна функція консервативної ланки записується у вигляді

$$W(p) = \frac{1}{(T_k^2 \cdot p^2 + 1)}. \quad (1.41)$$

При $C_{12} = \infty$ постійна часу $T_k = 0$, частота зрізу $\Omega_{12} = \infty$, передавальна функція пружної системи перетворюється на передавальну функцію ланки з ідеально жорсткими зв'язками.

При $p = j\Omega$ отримаємо амплітуду консервативної ланки, яка дає модуль цього комплексного числа

$$A = \left| \frac{1}{(T_k^2 \cdot (j \cdot \Omega)^2 + 1)} \right| = \frac{1}{1 - T_k^2 \cdot \Omega^2}. \quad (1.42)$$

Неважно перекопатися, що амплітуда консервативної ланки дорівнюватиме нескінченності $A = \infty$ при $\Omega = 1/T_k$.

Таким чином, при частоті зрізу консервативної ланки Ω_{12} настає явище резонансу (цю частоту $\Omega_{12} = \Omega_{PEZ}$ називають резонансною), ЛАЧХ цієї ланки зазнає розриву. ЛАЧХ пружної системи наведена на рисунку 1.11. Якщо збудження проходять з частотою Ω_{12} , у пружній системі виникають резонансні коливання пружного моменту з амплітудою $A = \infty$.

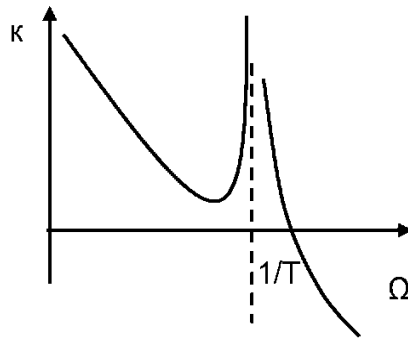


Рисунок 1.11 – Частотна характеристика ДПС

При дії пружних коливань в елементі, що деформується, відбувається поглинання енергії коливань, оскільки при зміні швидкості змінюється і знак моменту, потужність втрат в елементі залишається позитивною.

Для обліку моменту в'язкого тертя до розрахункової і структурної схем ДПС вносять β_{12} (рисунок 1.12).

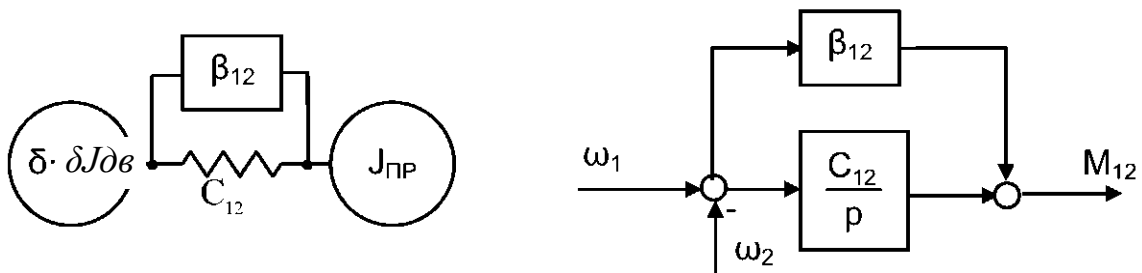


Рисунок 1.12 – ДПС з елемента в'язкого тертя

У внутрішнє в'язке тертя дозволяє при найбільших β_{12} понизити максимум динамічного навантаження за рахунок природного приблизно на 15 %, що сумірно з точністю визначення параметрів системи. Тому при аналізі максимальних динамічних навантажень у перехідних процесах пуску і гальмування електропривода природним демпфуванням можна нехтувати.

Перехідні процеси у двомасовій пружній системі з зазором

У механічному устаткуванні, що діє, разом з пружністю досить часто зустрічаються зазори в механічних передачах і зчленуваннях. У розрахунковій схемі (рисунок 1.13) зазор розриває механічний ланцюг. Залежність $M12 = f(\omega1 - \omega2)$ стає нелінійною. Коли в процесі дії пружного моменту деформація елемента $\Delta\varphi$ стає менше зазора $\Delta\varphi_3$ в механічній передачі, пружний момент $M12$ стає рівним нулю, кінематичний ланцюг розривається. Система продовжує рух, наростає різниця швидкостей і після проходження зазора механічний ланцюг замикається. Наростаючий пружний момент створює удар у механічному ланцюзі.

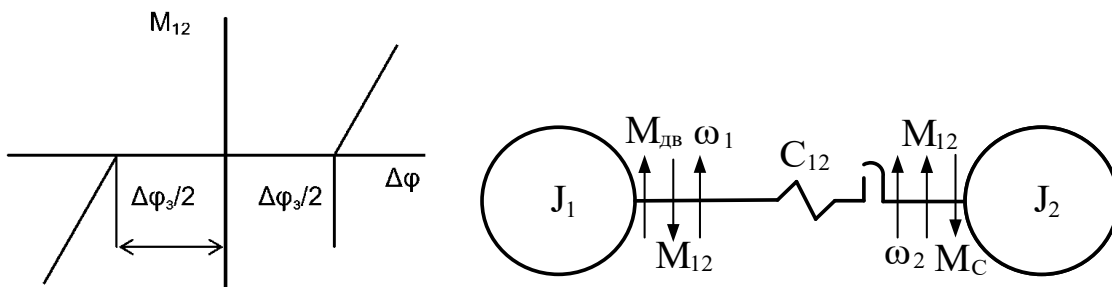


Рисунок 1.13 – Розрахункова схема ДПС із зазором і залежність $M12=f(\Delta\varphi)$

Структурна схема ДПС із зазором і перехідний процес застосу моменту M двигуна стрибком наведені на рисунках 1.14, 1.15. Пропонується самостійно проаналізувати тимчасові діаграми координат пружної системи з зазором.

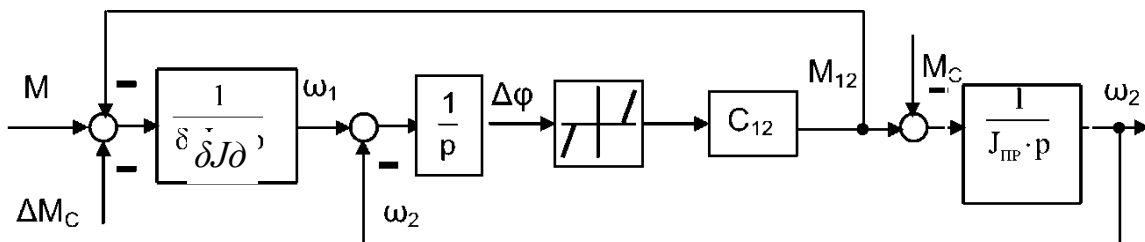


Рисунок 1.14 – Структурна схема ДПС із зазором

Динамічні коливальні процеси в середньому не впливають на тривалість перехідних процесів, але негативно позначаються на умові виконання технологічних операцій, зокрема в точності роботи установки.

Практично завжди виникнення пружних коливань збільшує динамічні навантаження механічної і її знос.

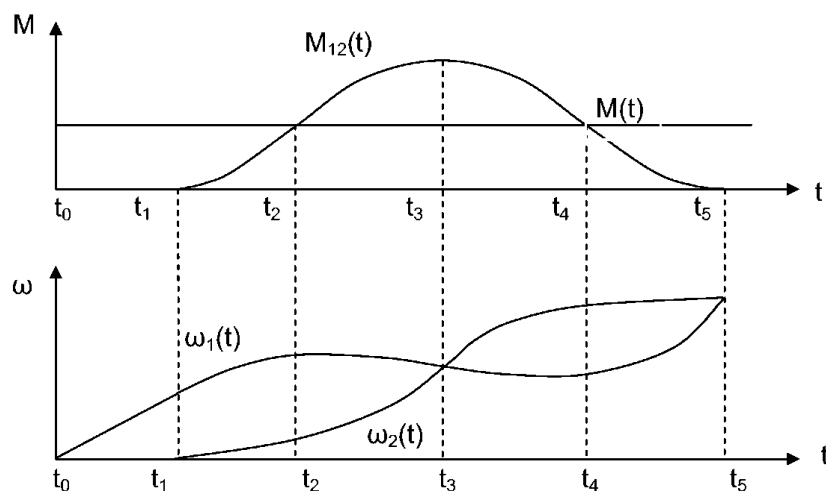


Рисунок 1.15 – Тимчасова діаграма моменту M_{12} , швидкостей ω_1 і ω_2 для ДПС із зазором

Потрібно так проектувати електропривод, щоб знижувати викиди пружних моментів (зменшувати динамічний коефіцієнт), потрібно певним чином вибирати структуру електропривода, його параметри (обмежувати прискорення, застосовувати систему вибірки зазорів і тому подібне).

Узагальнена структурна схема механічної частини електропривода

У цілому механічна частина електропривода - складний об'єкт управління (рисунок 1.16) з істотними нелінійностями (зазор $\Delta\varphi_3$, сухе Мст та в'язке тертя Мвт). Завдання для виконання лабораторної роботи отримуємо згідно з таблицею 1.1.

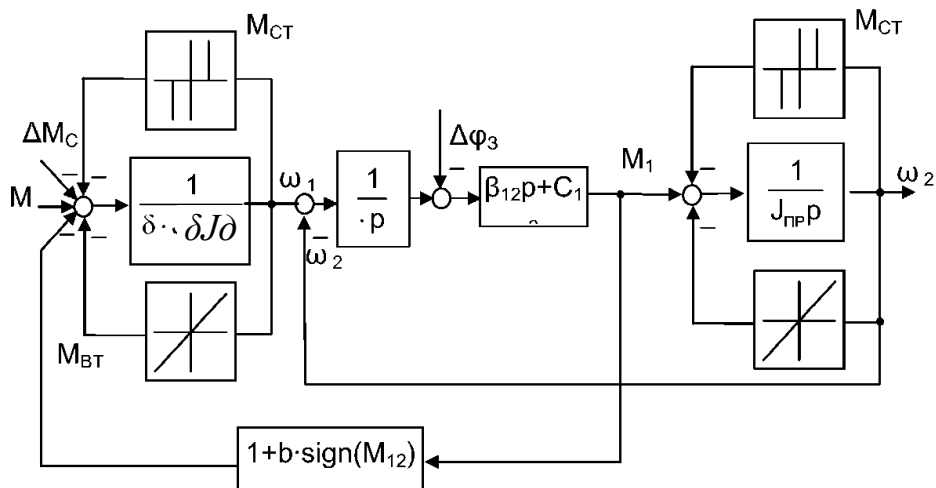


Рисунок 1.16 – Узагальнена структурна схема механічної частини електропривода

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до лабораторної роботи

Номінальний момент	
Вид навантаження (активний, реактивний)	
Кількість мас	
Момент інерції J_1	
Момент інерції J_2	
Момент інерції J_3	
Момент інерції J_4	
Наявність зазора	
Величина зазора, мм	
Жорсткість зв'язку C_1	
Жорсткість зв'язку C_2	
Жорсткість зв'язку C_3	

Відповідно до отриманих даних побудувати структурну схему та налагодити її роботу. Будуємо динамічні характеристики $M_c=f(t)$, $M_c=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M_c=f(n)$, $M_c=f(t)$.

Контрольні запитання

- 1 Охарактеризувати моменти опору.
- 2 Пояснити вплив кожної складової опору від швидкості.
- 3 Додатково навести приклади присутніх видів моменту опору та надати аналітичні або графічні залежності.
- 4 Кількісно оцінити вплив складових моментів опору від швидкості руху.

Лабораторна робота 2

Математичне моделювання двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПСНЗ)

Тема: дослідження статичних і динамічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження.

Мета: навчитись складати математичну модель двигуна постійного струму незалежного збудження; на отриманій моделі дослідити поведінку даного типу двигуна в динамічних режимах з прямою подачею напруги.

Порядок виконання роботи:

- 1 За заданою викладачем маркою двигуна всі необхідні параметри занести в таблицю 2.1.
- 2 Зробити розрахунки потрібних величин і заповнити таблиці 2.1-2.2.
- 3 Побудувати криву намагнічування.
- 4 Скласти структурну модель ДПСНЗ відповідно до системи рівнянь (2.1).
- 5 Побудувати характеристики $M=f(t)$, $\omega=f(t)$, $I_a=f(t)$ при прямому пуску.
- 6 Зробити висновки з виконаної роботи.

Теоретичні відомості і розрахунок

Двигун постійного струму – це електромеханічний перетворювач енергії, за допомогою якого електрична енергія

переходить в енергію механічну. Якірна обмотка та обмотка збудження ДПСНЗ живляться від окремих джерел.

Електрична схема двигуна постійного струму незалежного збудження подана на рисунку 2.1.

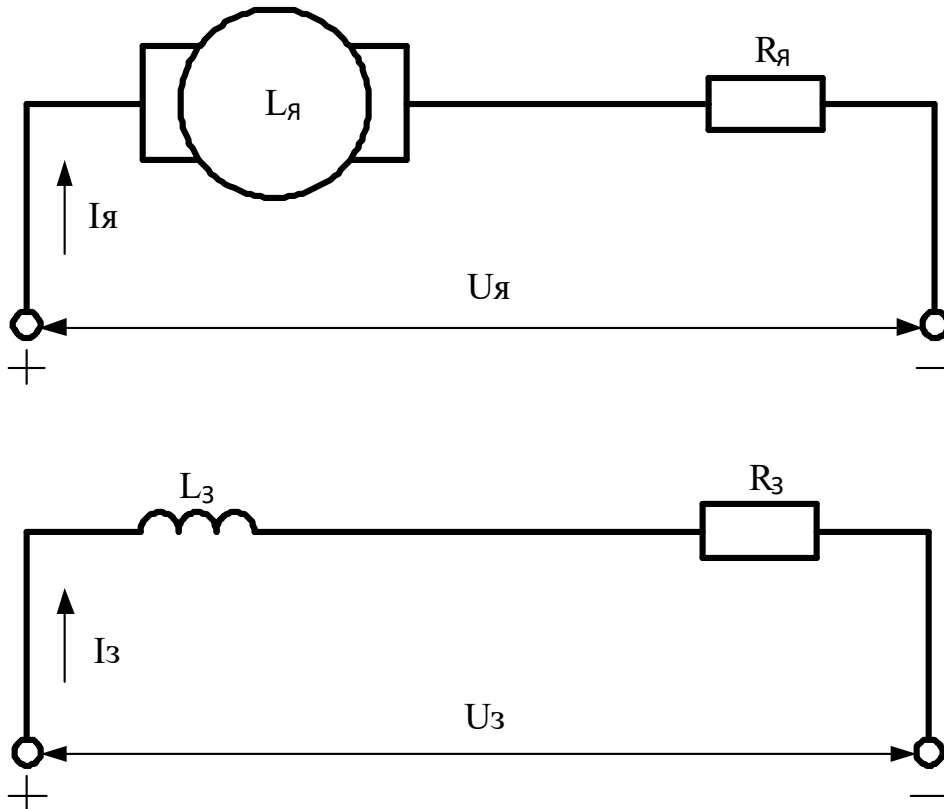


Рисунок 2.1 – Спрощена електрична схема двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Для побудови структурної схеми ДПСНЗ використовуємо систему рівнянь, яка описує його,

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\dot{y}} = L_{\beta} \frac{dI_{\dot{y}}}{dt} + r_{\beta} \cdot I_{\dot{y}} + E, \\ U_{\dot{\zeta}} = L_{\zeta} \frac{dI_{\dot{\zeta}}}{dt} + r_{\zeta} \cdot I_{\dot{\zeta}}, \\ \dot{I}_{aa} - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \\ E = k\dot{O}\omega, \\ \dot{I}_{aa} = k\dot{O}^2_{\beta}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де $U_{\dot{y}}, U_{\dot{\zeta}}$ – напруга живлення якірної обмотки та обмотки збудження;

$I_{\dot{y}}, I_{\dot{\zeta}}$ – струм якірної обмотки та обмотки збудження;

$r_{я}, r_{з}$ – активний опір якірної обмотки та обмотки збудження;

ω – кутова частота обертання якоря двигуна;

$M_{\text{дв}}$ – електромагнітний момент двигуна;

Φ – магнітний потік двигуна;

k – конструкційна стала двигуна;

E – електрорушійна сила;

$L_{я}, L_{з}$ – індуктивність якірної обмотки та обмотки збудження.

На основі системи (2.1) складаємо структурну схему у вигляді блоків (рисунок 2.2),

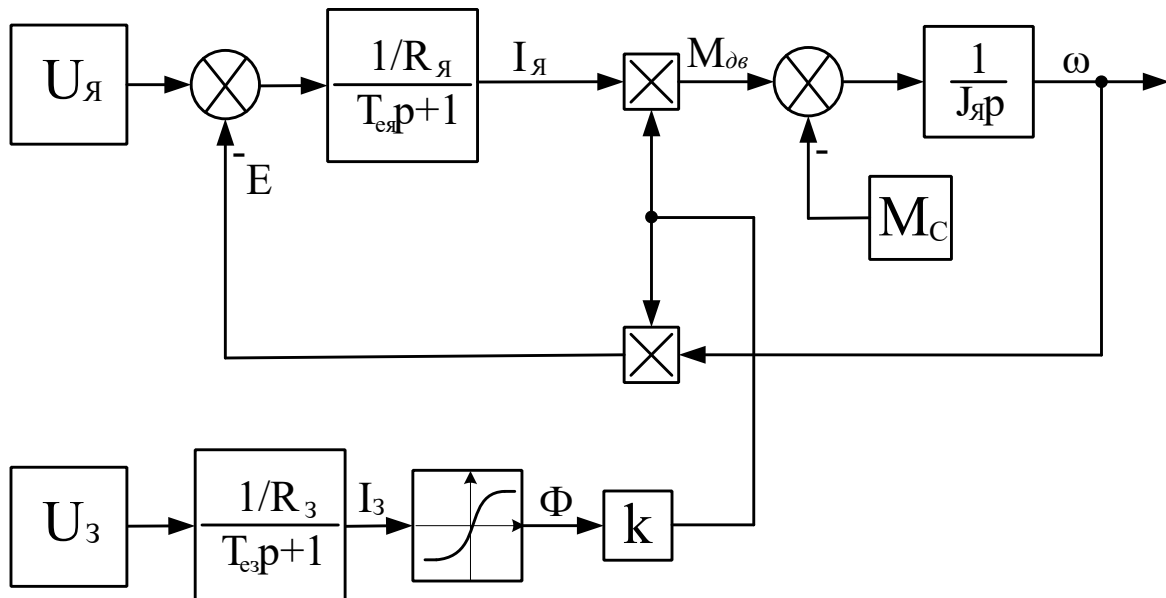


Рисунок 2.2 – Структурна схема ДПСНЗ

Таблиця 2.1 - Параметри ДПСНЗ

Вихідні дані	
Марка двигуна	
Опір якірної обмотки $R_{я}, Ом$	
Опір обмотки збудження $R_{з}, Ом$	
Номінальний струм якоря $I_{я}, А$	

Номинальна напруга якоря $U_{я}, B$	
Номинальний струм обмотки збудження $I_{з}, A$	
Номинальна напруга обмотки збудження $U_{з}, B$	
Кількість активних провідників N	
Кількість пар полюсів p	
Кількість паралельних гілок a	
Кількість витків обмотки збудження W	
Номинальний електромагнітний момент $M, Нм$	
Номинальна частота обертання якоря $n, об / хв$	
Маса якоря $m, кг$	
Радіус якоря $r, м$	
Розрахункові дані	
Індуктивність якірної ланки $L_{\dot{y}} = \frac{0,25U_{\dot{y}} \cdot 60}{2pnI_{\dot{y}}\pi}$, Гн	
Електромеханічна стала двигуна $k = \frac{pN}{2\pi a}$	
Магнітний потік двигуна $\Phi_i = \frac{M}{k \cdot I_{\zeta}}$, Вб	
Кутова швидкість двигуна $\omega = \frac{2\pi \cdot 60}{60}$ рад/с	
Індуктивність обмотки збудження $L_{\zeta} = \frac{\Psi}{I_{\zeta}}$ Гн	
Потокозчеплення обмотки збудження $\Psi = W\Phi_H \sigma$ ($\sigma = 1.2$), Вб	

Продовження таблиці 2.1

Електромагнітна стала часу якірної обмотки $T_{\dot{a}\dot{y}} = \frac{L_{\dot{y}}}{R_{\dot{y}}}$, с	
Електромагнітна стала часу обмотки збудження $T_{\dot{a}\zeta} = \frac{L_{\zeta}}{R_{\zeta}}$, с	
Момент інерції якоря $J = \frac{\rho r^2}{2}$, кгм ²	

Таблиця 2.2 – Крива намагнічування у відносних одиницях (при заповненні таблиці необхідно помножити на величини номінального струму та потоку відповідно)

$\frac{I_{я}}{I_H}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
$\frac{\Phi}{\Phi_H}$	0,502	0,759	0,9	1,0	1,059	1,112
$I_{я}, A$						
Φ, B б						

Контрольні запитання

- 1 Закон електромагнітної сили; 1-й, 2-й закони Кірхгофа; 1-й, 2-й закони комутації.
- 2 Пояснити принцип роботи ДПСНЗ.
- 3 Механічна характеристика двигуна ДПСНЗ.
- 4 Жорсткість характеристики.
- 5 Фізичний сенс електромагнітної сталої часу.

Лабораторна робота 3

Математичне моделювання двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПСПЗ)

Тема: дослідження статичних і динамічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження.

Мета: навчитись складати математичну модель двигуна постійного струму послідовного збудження; на отриманій моделі дослідити поведінку даного типу двигуна в динамічних режимах з прямою подачею напруги та зі ступінчатим її підвищенням.

Порядок виконання роботи:

1 За заданою викладачем маркою двигуна (додаток А) у роботі [2] знайти всі необхідні параметри та занести їх у таблицю 3.1.

2 Зробити розрахунки потрібних величин і заповнити таблицю 3.1.

3 Скласти структурну модель ДПСПЗ відповідно до системи рівнянь (3.1).

4 Виконати розрахунок статичних характеристик ДПСПЗ.

5 Виконати розрахунок динамічних характеристик ДПСПЗ.

6 Побудувати характеристики $M=f(t)$, $\omega=f(t)$, $I_a=f(t)$.

7 Зробити висновки з виконаної роботи.

Теоретичні відомості і розрахунок

Двигун постійного струму послідовного збудження – це електродвигун, який живиться від постійної напруги, а якірна обмотка та обмотка збудження з'єднані послідовно. Принцип дії такого двигуна базується на законі *електромагнітної сили*.

Електрична схема двигуна постійного струму послідовного збудження наведена на рисунку 3.1.

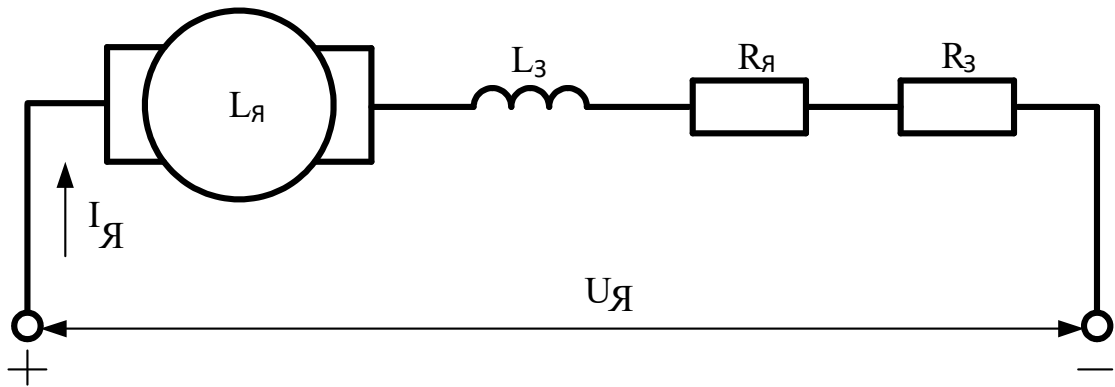


Рисунок 3.1 – Спрощена електрична схема ДПСЗ

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використовуємо систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = R_{\Sigma} I_{\text{я}} + L_{\Sigma} \dot{I}_{\text{я}} \\ M_{\text{дв}} = k \Phi I_{\text{я}} \\ J_{\text{я}} \dot{\omega} = M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} \end{cases} \quad (3.1)$$

- де $U_{\text{я}}$ – напруга живлення двигуна;
 $I_{\text{я}}$ – струм двигуна;
 R_{Σ} – загальний активний опір обмоток двигуна;
 ω – кутова частота обертання якоря двигуна;
 $M_{\text{дв}}$ – електромагнітний момент двигуна;
 Φ – магнітний потік двигуна;
 k – конструкційна стала двигуна;
 E – електрорушійна сила;
 L_{Σ} – загальна індуктивність всіх обмоток двигуна.

На основі цієї системи складаємо структурну схему у вигляді блоків (рисунок 3.2).

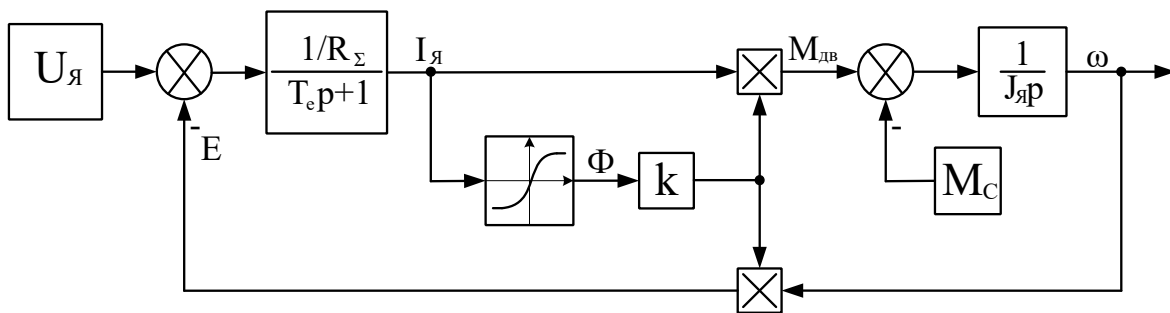


Рисунок 3.2 – Структурна схема ДПСЗ

Таблиця 3.1 - Параметри ДПСПЗ

Вихідні дані	
1	2
Марка двигуна	
Опір якірної обмотки $R_{я}, Ом$	
Опір обмотки збудження $R_з, Ом$	
Опір обмотки додаткових полюсів $R_{дп}, Ом$	
Номінальний струм якоря $I_H, А$	
Номінальна напруга якоря $U_H, В$	
Кількість активних провідників N	
Кількість пар полюсів p	
Кількість паралельних гілок a	
Кількість витків обмотки збудження W	
Номінальний електромагнітний момент $M, Нм$	
Номінальна частота обертання якоря $n, об / хв$	
Маса якоря $m, кг$	
Радіус якоря $r, м$	

Продовження таблиці 3.1

Розрахункові дані	
1	2
Сумарний опір обмоток двигуна $R_{\Sigma} = R_{\beta} + R_{\zeta} + R_{\text{я}} ,$	
Індуктивність якірної обмотки $L_{\text{я}} = \frac{0,25U_i \cdot 60}{2pnI_i \pi} ,$ Ом	Гн
Конструкційна стала двигуна $k = \frac{pN}{2\pi a}$	
Магнітний потік двигуна $\hat{O}_i = \frac{M}{k \cdot I_i} ,$	Вб
Кутова швидкість двигуна $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ рад/с	
Індуктивність обмотки збудження $L_{\zeta} = \frac{\Psi}{I_j}$ Гн	
Потокозчеплення обмотки збудження $\Psi = W\Phi_H \sigma$ ($\sigma = 1.2$), Гн	
Сумарна індуктивність обмоток двигуна $L_{\Sigma} = L_{\beta} + L_{\zeta} + L_{\text{я}} ,$ Гн (індуктивність обмотки додаткових полюсів (приймаємо 20 % індуктивності обмотки збудження))	
Електромагнітна стала часу $T_a = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} ,$ с	
Момент інерції якоря $J = \frac{\rho r^2}{2} ,$ кгм ²	

Таблиця 3.2 – Крива намагнічування у відносних одиницях (при побудові в моделі необхідно помножити на величини номінального струму та потоку відповідно)

$\frac{I_{\text{я}}}{I_H}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
$\frac{\Phi}{\Phi_H}$	0,502	0,759	0,9	1,0	1,059	1,112

Контрольні запитання

- 1 Пояснити принцип роботи ДПСФЗ.
- 2 Пояснити способи регулювання швидкості ДПСФЗ.
- 3 Штучні механічні характеристики ДПСФЗ.
- 4 Штучні електромеханічні характеристики ДПСФЗ.

Лабораторна робота 4

Математичне моделювання двомасової системи

Тема: дослідження динамічних характеристик двомасової системи електропривода.

Мета: навчитись складати математичну модель двомасової системи; на отриманій моделі дослідити поведінку кожної з мас електропривода.

Порядок виконання роботи:

1 Ознайомитися з теоретичним матеріалом, наведеним у методичці, і вибрати дані відповідно до свого варіанта.

2 Зробити розрахунки потрібних величин і заповнити таблицю 4.1.

3 Скласти структурну модель двомасової системи відповідно до системи рівнянь (4.1).

4 Побудувати осцилограми пружних моментів і сил, лінійних і кутових швидкостей мас.

5 Зробити висновки з виконаної роботи.

Теоретичні відомості і розрахунок

Приведення в рух виконуючого механізму та керування цим рухом для здійснення технологічних операцій є основною задачею автоматизованого електропривода. При цьому необхідно знати загальні особливості механічної частини електромеханічної системи, важливі її елементи, зв'язки та параметри. Тому на основі кінематики механізму складають розрахункову схему, що описує рух електропривода диференціальними рівняннями.

Перш ніж описати рух електропривода, необхідно скласти його структурну схему. При її складанні заданий механізм (таблиця 4.1) необхідно подати у вигляді двомасової системи (рисунок 4.1) (при описанні системи за допомогою рівнянь Лагранжа обов'язково повинен бути врахований пружний зв'язок).

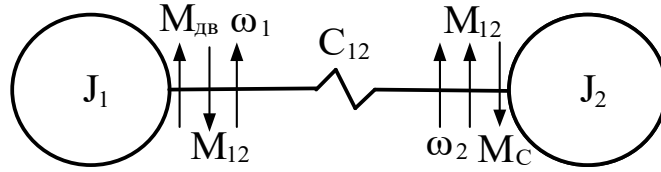


Рисунок 4.1 – Структура двомасової моделі механічної частини електромеханічної системи

При цьому перша маса J_1 – момент інерції двигуна разом з приведеним до нього моментом інерції редуктора, друга маса J_2 – приведений момент інерції робочого органу. Дану структуру можна описати системою диференціальних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{дв}} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{12} - M_{\text{н}} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1, \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2, \\ M_{12} = c_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де ω_1 – кутова швидкість першої маси;
 ω_2 – кутова швидкість другої маси;
 $M_{\text{дв}}$ – електромагнітний момент двигуна;
 M_{12} – пружний момент;
 φ_1 – кут повороту першої маси;
 φ_2 – кут повороту другої маси;
 c_{12} – коефіцієнт пружності.

Відповідно до схеми (таблиця 4.1) маса m_2 здійснює послідовний рух. Тому для переходу від кутової швидкості двигуна до лінійного руху маси m_2 , а також від моментів до сил використовуються формули

$$V = \rho_{1j} \cdot \omega, \quad (4.2)$$

$$M = \rho_{1j} \cdot F, \quad (4.3)$$

де ρ_{1j} – радіус приведення j -ї маси.

На основі отриманої системи рівнянь складається структурна схема (рисунок 4.2).

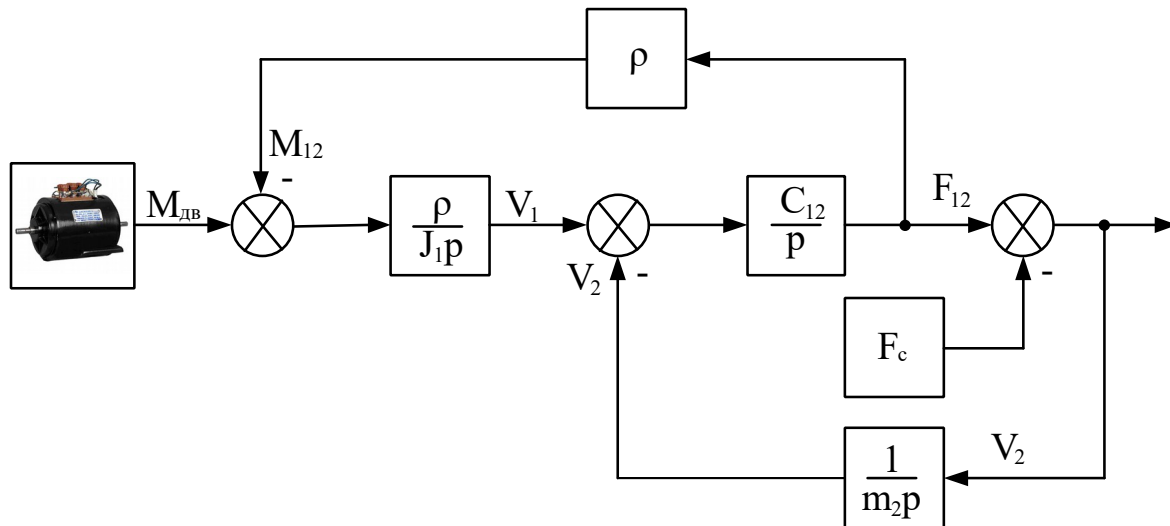


Рисунок 4.2 – Структурна схема двомасової системи електропривода

При приведенні до вала двигуна сумарний приведений момент інерції електропривода може бути виражений загальною формулою

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + \sum_{i=2}^{i=n} \frac{J_i}{i_i^2} + \sum_{j=1}^{j=k} m_j \rho_{1j}^2, \quad (4.4)$$

- де n – кількість мас, які здійснюють обертальний рух;
 k – кількість мас, які здійснюють послідовний рух;
 i_i – передаточне число від вала приведення до i -го вала;
 m_j – j -та маса;
 J_i – момент інерції i -го обертального елемента;
 $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна.

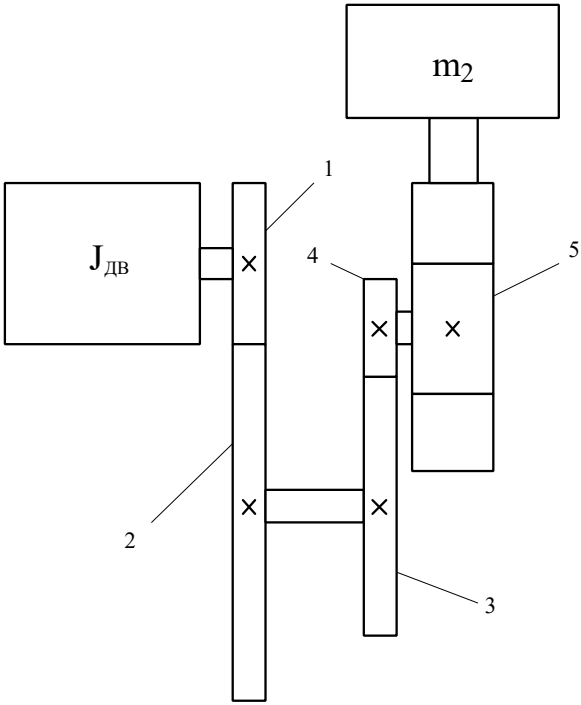
Таблиця 4.1 – Параметри редуктора

Ва-	Схема редуктора	Вихідні дані
-----	-----------------	--------------

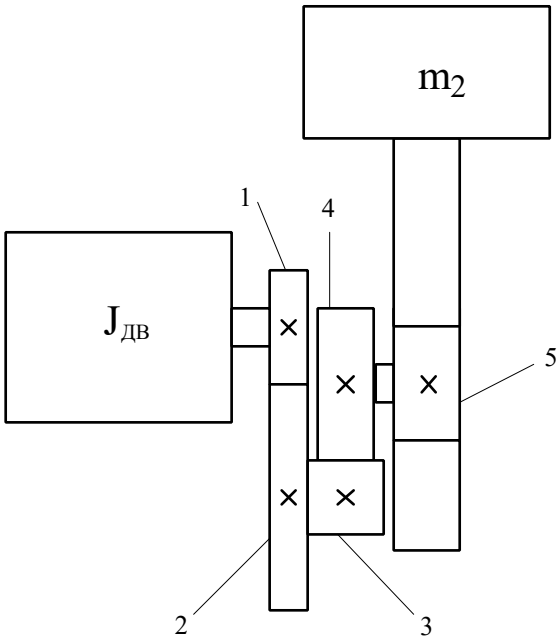
рі-ант		
1	2	3
1 2		$h_1 = h_2 = h_4 = h_6 = 0,015i ;$ $h_3 = 0,025i ; h_5 = 0,05i ;$ $R_1 = R_6 = 0,1; R_2 = 0,2; R_3 = 0,15;$ $R_4 = 0,25; R_5 = 0,05;$ $J_{AA} = 0,01; m_2 = 500\text{êã}$ $h_1 = h_2 = h_4 = h_6 = 0,01i ;$ $h_3 = 0,02i ; h_5 = 0,05i ;$ $R_1 = R_6 = 0,05; R_2 = 0,2; R_3 = 0,1;$ $R_4 = 0,2; R_5 = 0,05; R_8 = 0,08;$ $J_{AA} = 0,015; m_2 = 300\text{êã}$

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
3 4		$h_1 = h_2 = h_4 = 0,02i ;$ $h_3 = 0,03i ; h_5 = 0,025i ;$ $R_1 = 0,1; R_2 = 0,2; R_3 = 0,05;$ $R_4 = 0,06; R_5 = 0,05;$ $J_{AA} = 0,005; m_2 = 200\text{êã}$ $h_1 = h_2 = h_4 = 0,025i ;$ $h_3 = 0,035i ; h_5 = 0,03i ;$ $R_1 = 0,1; R_2 = 0,2; R_3 = 0,05;$ $R_4 = 0,06; R_5 = 0,05;$ $J_{AA} = 0,01; m_2 = 250\text{êã}$

5 6		$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 0,01i ;$ $h_5 = 0,03i ; R_1 = 0,1; R_2 = 0,25;$ $R_3 = 0,2; R_4 = 0,05; R_5 = 0,1;$ $J_{AA} = 0,01; m_2 = 100\epsilon\ddot{a}$ $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 0,01i ;$ $h_5 = 0,03i ; R_1 = 0,15; R_2 = 0,3;$ $R_3 = 0,25; R_4 = 0,01; R_5 = 0,15;$ $J_{AA} = 0,01; m_2 = 150\epsilon\ddot{a}$
--------	---	--

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
7 8		$h_1 = h_2 = 0,01m; h_4 = h_5 = 0,02m;$ $h_3 = 0,025m; R_1 = 0,08; R_2 = 0,15;$ $R_3 = 0,05; R_4 = 0,12; R_5 = 0,1;$ $J_{дв} = 0,015; m_2 = 500кг$ $h_1 = h_2 = 0,015m; h_4 = h_5 = 0,02m;$ $h_3 = 0,025m; R_1 = 0,1; R_2 = 0,2;$ $R_3 = 0,05; R_4 = 0,15; R_5 = 0,1;$ $J_{дв} = 0,01; m_2 = 400кг$

Таблиця 4.2 - Параметри двомасової системи

Вихідні дані			
Густина сталі $\rho_{ст}$, кг/м ³	8000		
Коефіцієнт тертя f	0,5	0,1	0,05
Коефіцієнт пружності C_{12}	10^5	10^6	10^7
Розрахункові дані			
Передаточне число двох шестерень $i_{ij} = \frac{R_j}{R_i}$ Загальне передаточне число $i_{1j} = i_{12} \cdot i_{34} \cdot \dots \cdot i_{ij}$			
Маса шестерень $m_i = \pi \cdot R_i^2 \cdot h_i \cdot \rho$, кг			

Продовження таблиці 4.2

1	2
Момент інерції шестерні $J_i = \frac{m_i R_i^2}{2}$, кгм ²	
Приведений момент інерції обертальних елементів $J_{прі} = \frac{J_i}{i_{li}^2}$, кгм ²	
Загальний приведений момент інерції $J_{\Sigma} = J_{ДВ} + \sum_{i=1}^n J_{прі}$, кгм ²	
Радіус приведення маси $m_2 \rho = \frac{R_j}{i_{1j}}$, м	
Сила опору $F_c = m_2 g f$, Н	

Контрольні запитання

- 1 Що таке пружний момент?
- 2 Що таке коефіцієнт пружності та коефіцієнт в'язкості?
- 3 У яких випадках коефіцієнтом пружності можна знехтувати?
- 4 Навести декілька прикладів одномасової, двомасової та тримасової систем.
- 5 Написати рівняння електромеханічної системи в узагальнюючих координатах.

Лабораторна робота 5

Математичне моделювання асинхронного двигуна

Тема: дослідження статичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна.

Мета: навчитись складати математичну модель асинхронного двигуна; на отриманій моделі дослідити поведінку даного типу двигуна в динамічних режимах з прямою подачею напруги.

Порядок виконання роботи:

1 За заданою викладачем маркою двигуна знайти всі необхідні параметри та занести їх у таблицю 5.1.

2 Зробити розрахунки потрібних величин і заповнити таблицю 5.1.

3 Змоделювати трифазну напругу.

4 Скласти структурну модель АД відповідно до систем рівнянь (5.1)-(5.3).

5 Побудувати характеристики $M=f(t)$, $\omega=f(t)$ при прямому пуску.

6 Зробити висновки з виконаної роботи.

Теоретичні відомості і розрахунок

Для спрощення математичного описання машин змінного струму дуже часто використовують еквівалентне перетворення координат, в основі якого лежить припущення про повну симетрію електричної машини, а також поняття узагальненого вектора. Введемо ортогональну систему координат статора α, β , одна вісь якого (наприклад, α) співпадає з віссю A для сигналів статора, а друга (β) є ортогональною до неї (повернутою на кут 90° проти годинникової стрілки).

При дослідженні динамічних режимів асинхронних двигунів використовують двофазні математичні моделі, які адекватно відображають процеси, що протікають у реальній машині. Найбільш загальною формою математичного описання двофазних моделей є система диференціальних та алгебраїчних рівнянь



де $\psi_{\alpha s}$ – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь α ;

$\psi_{\beta s}$ – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь β ;

$\psi_{\alpha r}$ – проекція вектора потокозчеплення ротора на вісь α ;

$\psi_{\beta r}$ – проекція вектора потокозчеплення ротора на вісь β ;

$i_{\alpha s}$ – проекція вектора струму статора на вісь α ;

$i_{\beta s}$ – проекція вектора струму статора на вісь β ;

$i_{\alpha r}$ – проекція вектора струму ротора на вісь α ;

$i_{\beta r}$ – проекція вектора струму ротора на вісь β ;

ω – кутова частота обертання якоря двигуна;

$M_{об}$ – електромагнітний момент двигуна;

J – момент інерції ротора;

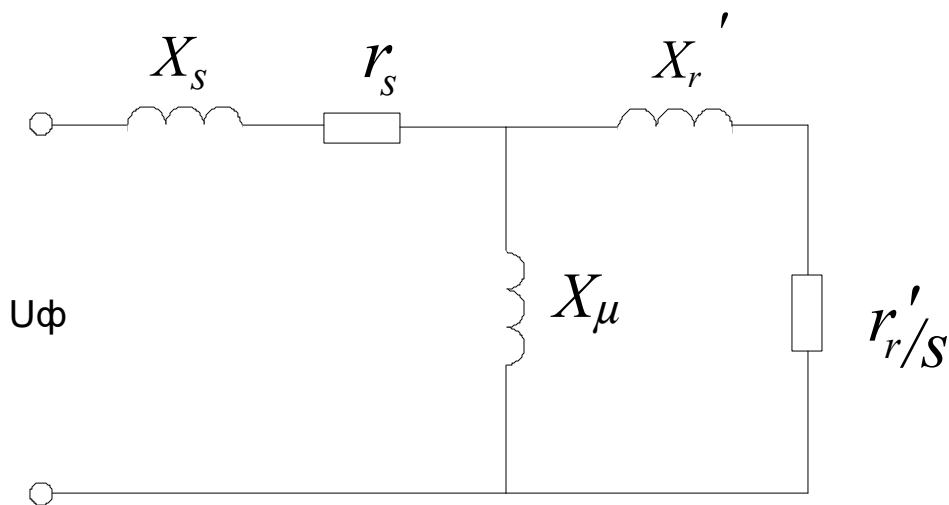
L_{μ} – взаємна індуктивність;

ω_k – швидкість обертання ортогональної системи координат, у якій знаходиться двофазна модель (при нерухомій системі координат $\omega_k = 0$);

A – коефіцієнт.

Для моделювання, а також визначення невідомих параметрів машини використовують Т – подібну схему заміщення фази двигуна (рисунок 5.1).

Структурна схема асинхронного двигуна подана на рисунку 5.2.



X_s – реактивний опір обмотки статора; X_r' – приведений реактивний опір обмотки ротора; X_μ – реактивний опір контуру, що намагнічує; r_s – активний опір статора; r_r'/S – приведений активний опір ротора

Рисунок 5.1 – Схема заміщення фази двигуна

Перехід від трифазної системи координат (АВС) у двофазну ($\alpha\beta$) виконується на основі системи рівнянь (5.2), а сама трифазна напруга описується системою (5.3). Структурна модель переходу у двофазну систему координат подана на рисунку 5.3, а трифазної напруги – на рисунку 5.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_\alpha = U_A, \\ U_\beta = \frac{U_B - U_C}{\sqrt{3}}. \end{array} \right. \quad (5.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = U_\phi \sqrt{3} \sin(\omega_s t), \\ U_B = U_\phi \sqrt{3} \sin(\omega_s t + 2\pi/3), \\ U_C = U_\phi \sqrt{3} \sin(\omega_s t - 2\pi/3). \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Таблиця 5.1 - Параметри АД

Вихідні дані	
Марка двигуна	
Опір обмотки статора $r_s, Ом$	
Опір обмотки ротора $r_r', Ом$	
Реактивний опір статора $X_s, Ом$	
Реактивний опір ротора $X_r', Ом$	
Реактивний опір контура намагнічування $X_\mu, Ом$	
Номінальна фазна напруга $U_\phi, В$	
Частота напруги живлення $f, Гц$	
Число пар полюсів, P	
Номінальний електромагнітний момент $M, Нм$	
Номінальна частота обертання якоря $n, об / хв$	
Маса якоря $m, кг$	
Радіус якоря $r, м$	
Розрахункові дані	

Кутова частота напруги живлення $\omega_s = 2\pi f, \text{ рад/с}$		
Продовження таблиці 5.1		
1	2	3
Індуктивність контуру, що намагнічує $L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega_s}, \text{ Гн}$		
Індуктивність статора $L_s = \frac{X_s}{\omega_s}, \text{ Гн}$		
Індуктивність ротора $L_r' = \frac{X_r'}{\omega_s}, \text{ Гн}$		
Коефіцієнт А $A = \frac{1}{(L_s \cdot L_r' - L_\mu^2)}$		
Момент інерції якоря $J = \frac{\partial r^2}{2}, \text{ кгм}^2$		
Момент опору $\dot{i}_{\bar{r}} = 0,5 \cdot \dot{i}_i, \text{ Нм}$		

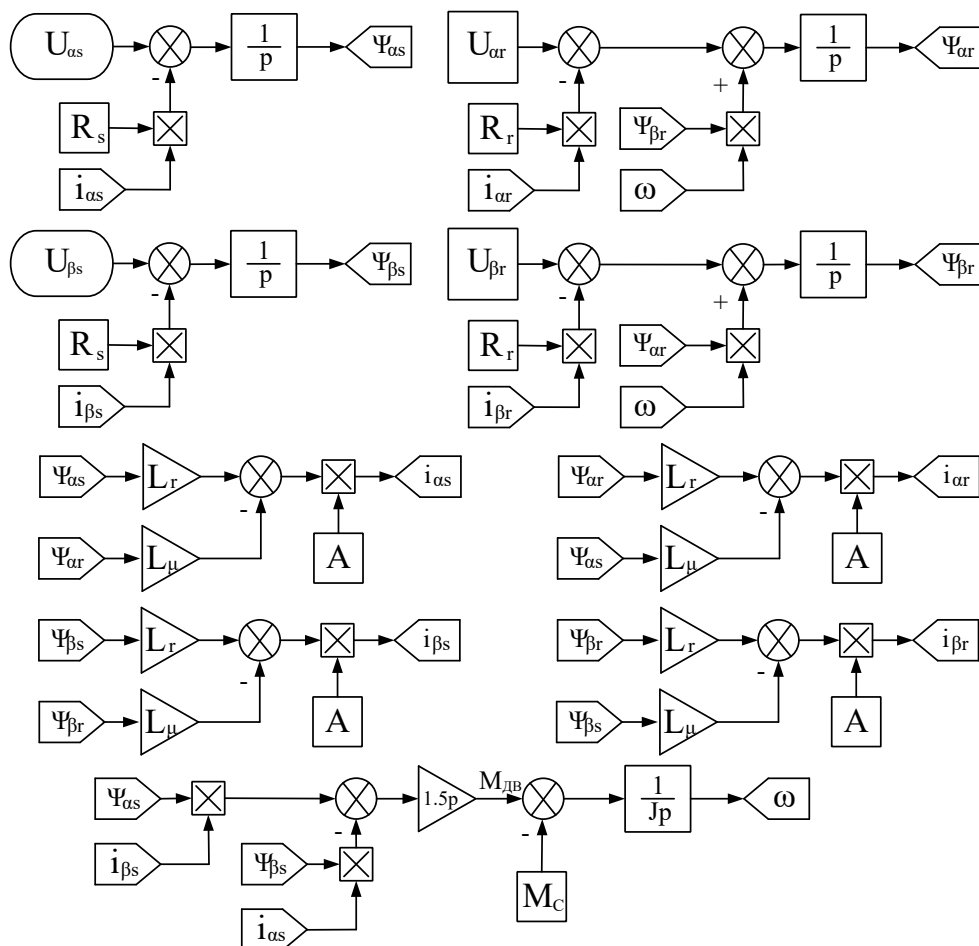


Рисунок 5.2 – Структурна модель асинхронного двигуна

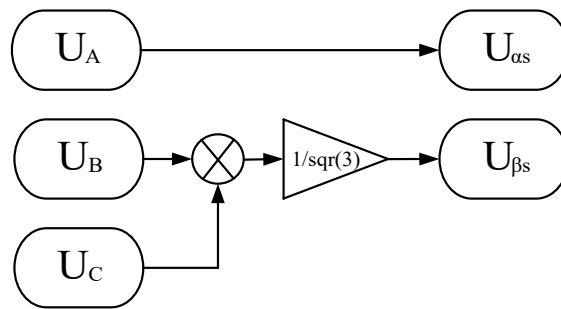


Рисунок 5.3 – Структурна модель перетворення координат

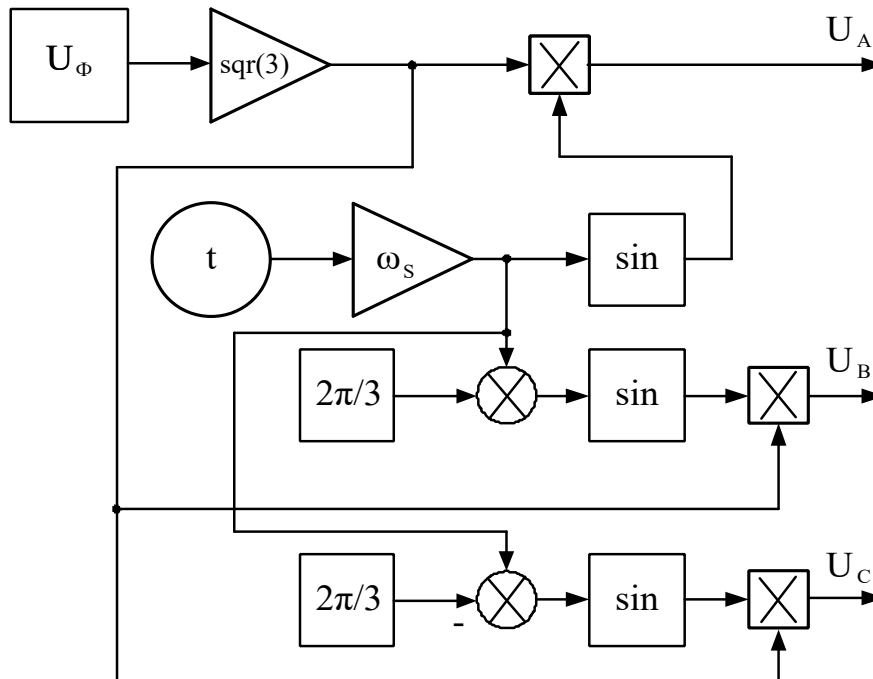


Рисунок 5.4 – Структурна модель трифазної напруги

Контрольні запитання

- 1 Пояснити принцип створення обертового магнітного поля та роботу АД.
- 2 Штучні механічні характеристики АД.
- 3 Пояснити способи регулювання швидкості АД.
- 4 Пояснити принцип роботи перетворювача частоти.
- 5 Скалярний і векторний закони керування.

Лабораторна робота 6

Математичне моделювання руху електрорухомого складу

Тема: дослідження руху електрорухомого складу.

Мета: навчитись складати математичну модель електрорухомого складу і досліджувати режими руху.

Теоретичний матеріал

Системи керування ТЕД на залізничному транспорті різні (рисунки 6.1-6.4).

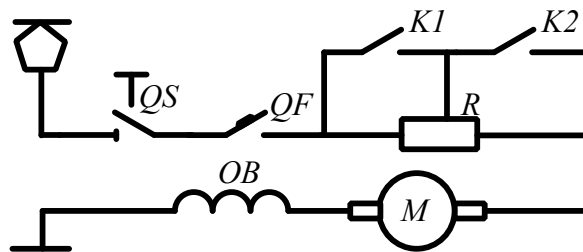


Рисунок 6.1 – Реостатно-контакторна система пуску ЕРС постійного струму

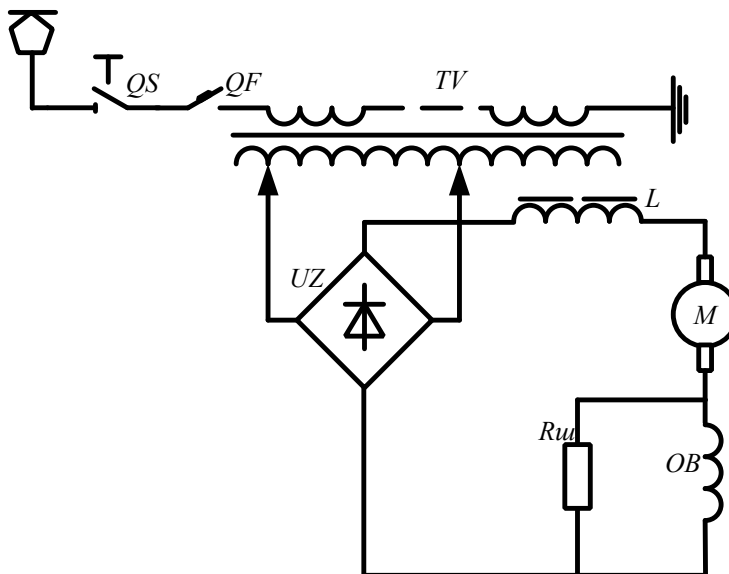


Рисунок 6.2 – Система пуску ЕРС змінного струму з системою регулювання напруги на нижній стороні тягового трансформатора

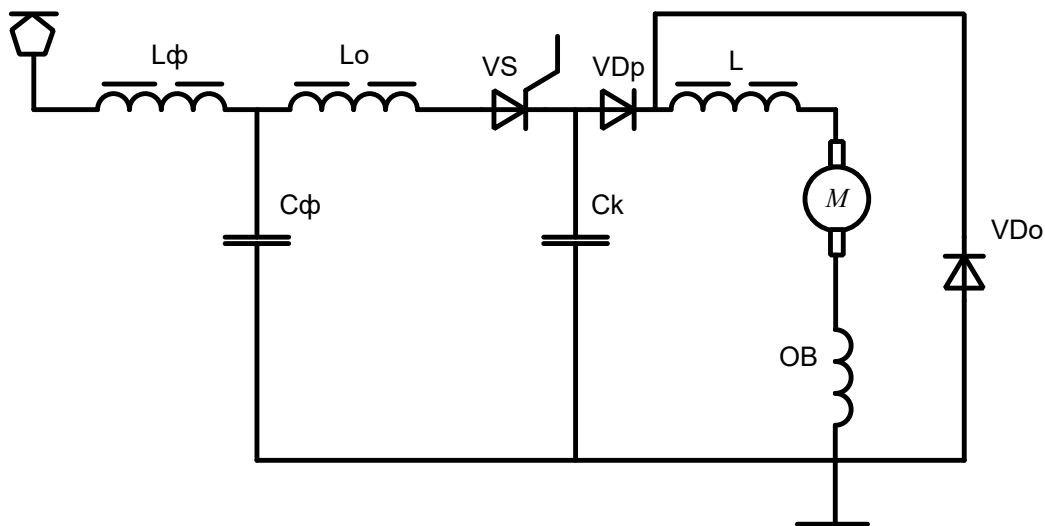


Рисунок 6.3 – Імпульсна система пуску ТЕД

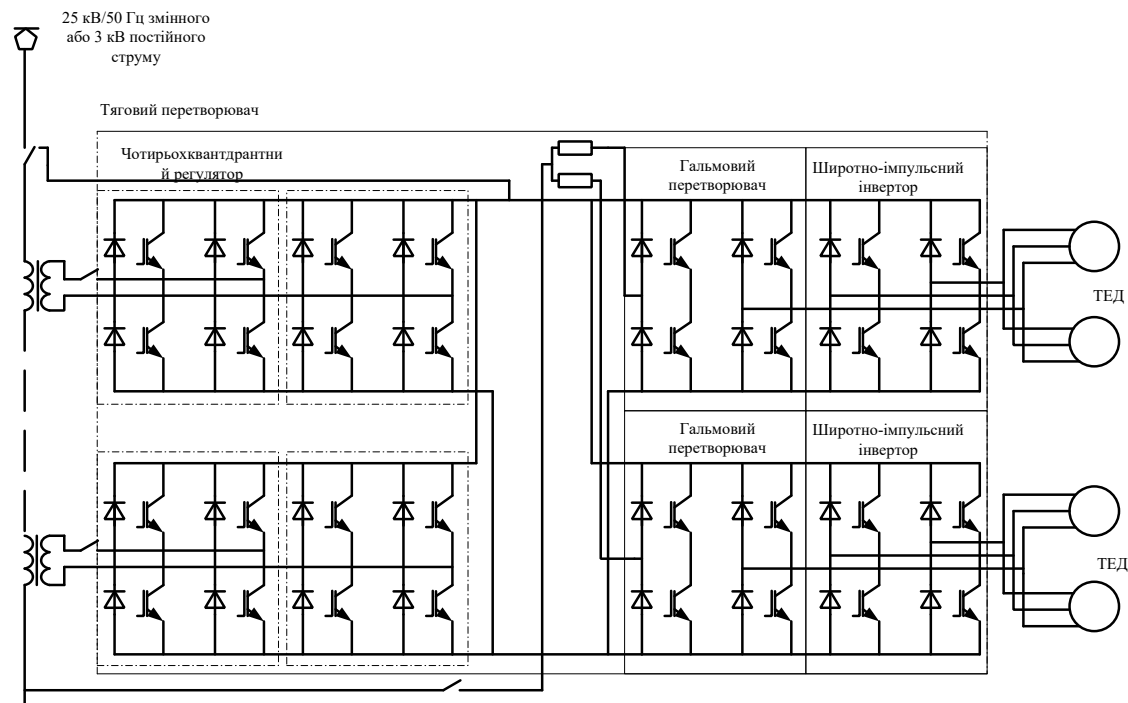


Рисунок 6.4 – Схема ЕРС з асинхронним електроприводом

Аналізуючи структурні схеми ЕРС рисунків 6.1 - 6.4 відповідно до обраного ТЕД, приймаємо потрібну систему керування (реостатну, імпульсну або з частотним керуванням), використовуючи раніш отримані математичні моделі і склавши їх до купи відповідно до рисунків 6.6, 6.7, отримуємо повну модель ЕРС.

Усі сили та моменти навантаження, що прикладені до механічної частини електропривода, поділяються на сили та моменти механічних витрат і сили та моменти корисного навантаження виконавчого органу. Для рухомого складу встановити теоретично значення основного опору руху складно, тому що воно залежить від багатьох факторів, які змінюються під час руху випадково. Щоб визначити основний опір рухові, розглянемо у вигляді складових: опір від тертя у підшипниках; опір від тертя кочення коліс по рейках; опір від тертя ковзання коліс по рейках; опір від деформації колії, ударів на стиках і нерівностях; опір від повітря; опір від ухилів і кривих ділянок колії. Таке поділення основного опору умовне, тому що в дійсності деякі складові залежать один від одного. Тому основний опір рухові визначається дослідним шляхом при випробуваннях рухомого складу на експериментальному колі, результати наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахункові залежності основного опору руху рухомого складу [5]

Тип рухомого складу і режим роботи	Основний питомий опір руху, Н/кН (при швидкості, км/год)
Електровози: а) на ланковому шляху: тяга та електричне гальмування вибіг і механічне гальмування	$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2$ $w'_0 = 2,4 + 0,011 \cdot v + 0,00035 \cdot v^2$
б) на безстиківому шляху: тяга та електричне гальмування вибіг і механічне гальмування	$w'_0 = 1,9 + 0,008 \cdot v + 0,00025 \cdot v^2$ $w'_0 = 2,4 + 0,009 \cdot v + 0,00035 \cdot v^2$
Електропоїзди: а) на ланковому шляху: тяга та електричне гальмування вибіг і механічне гальмування	$w'_0 = 0,6 + 0,03 \cdot v + 0,00008 \cdot v^2$ $w'_0 = 1,1 + 0,02 \cdot v + 0,00023 \cdot v^2$

Продовження таблиці 6.1

1	2
б) на безстиківому шляху: тяга та електричне гальмування вибіг і механічне гальмування	$w'_0 = 0,6 + 0,027 \cdot v + 0,00005 \cdot v^2$ $w'_0 = 1,1 + 0,017 \cdot v + 0,0002 \cdot v^2$
Чотиривісні завантажені вантажні вагони	$w''_0 = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot v + 0,0025 \cdot v^2}{m_{кп}}$
Цельнометалеві вагони	$w''_0 = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot v + 0,003 \cdot v^2}{m_{кп}}$
Примітка. $m_{кп}$ – вага, що припадає на одну колісну пару, кН; v – швидкість руху, км/год	

У таблиці 6.1 наведена величина питомої сили опору руху. Тому при використанні у розрахунках необхідно помножити на величину ваги, що приведена до тягового двигуна. Після цього приводимо величину сили опору до моменту опору за допомогою формул

$$W_0 = \frac{w'_0 \cdot m_e + w''_0 \cdot m_c}{N_{\dot{a}\dot{a}}}, \quad (6.1)$$

$$M_{\dot{r}} = \frac{W_0 \cdot D_e}{2 \cdot \mu \cdot \eta_{\dot{r}\dot{a}\dot{d}}}, \quad (6.2)$$

$$v = \frac{\omega \cdot D_e}{2 \cdot \mu}, \quad (6.3)$$

де w'_0 - питомий опір електрорухомого складу;
 m_e - вага електрорухомого складу, кН;
 w''_0 - питомий опір складу;
 $N_{\dot{a}\dot{a}}$ - кількість електричних двигунів;
 W_0 - сила опору, що припадає на один двигун електрорухомого складу, Н;
 M_{on} - момент опору, що припадає на один двигун;
 D_k - діаметр колеса, м;
 μ - співвідношення редуктора;
 η_{nep} - ККД редуктора;

ω - кутова швидкість двигуна;
 v - лінійна швидкість ЕРС.

Механічна частина електропоїзда типу ЕР2т з урахуванням зазора наведена на рисунку 6.5.

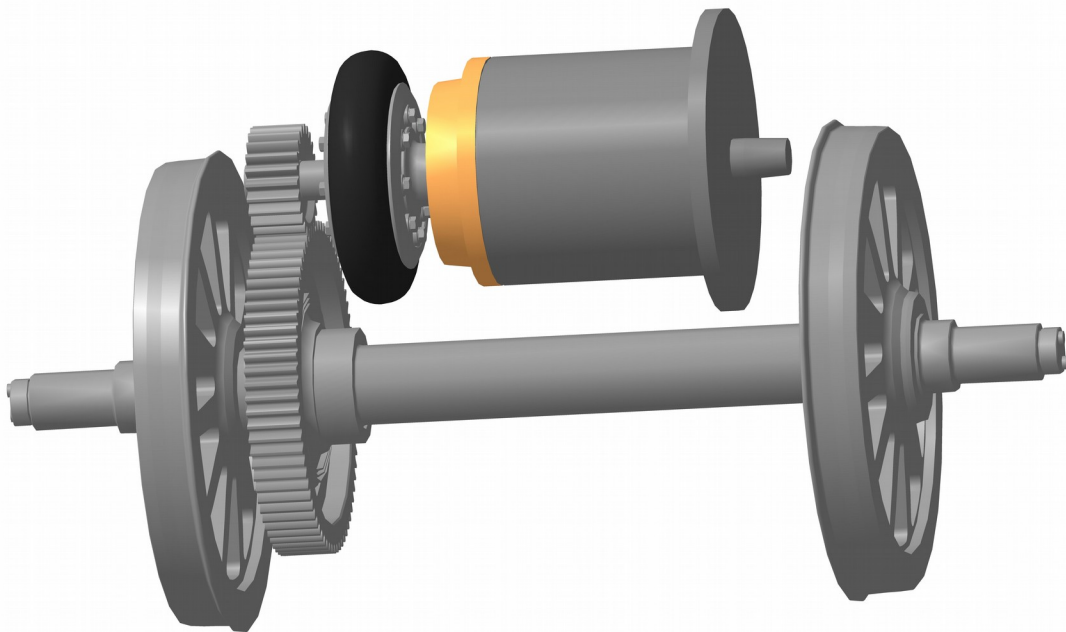
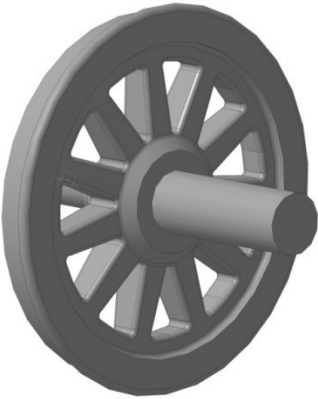
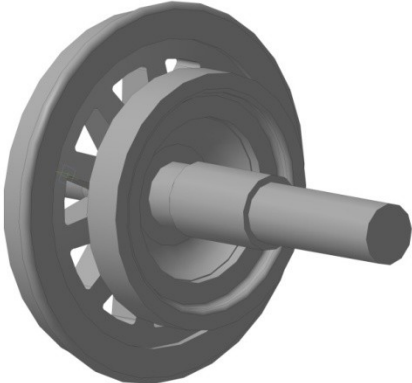
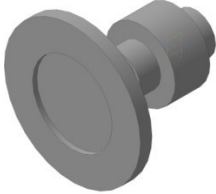
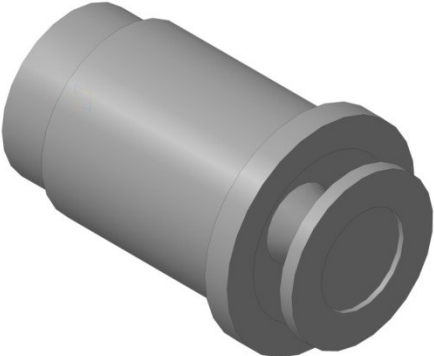


Рисунок 6.5 – Кінематична модель привода електропоїзда типу ЕР2т

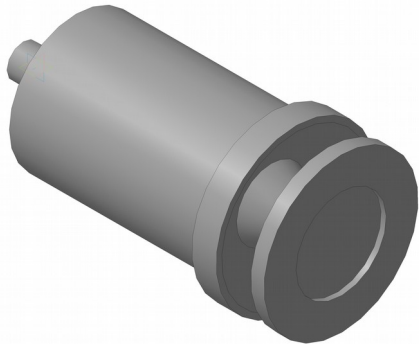

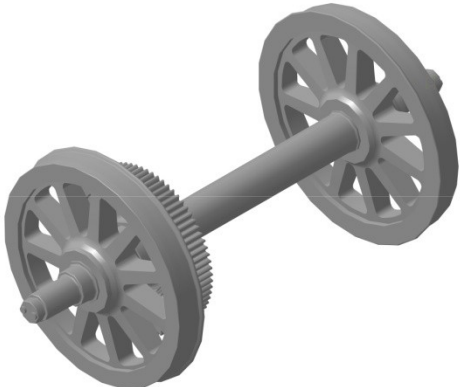
Механічна частина електропоїзда (таблиця 6.2) складається з колісної пари з зубчастим колесом, шестерні з напівфлянцем гумовокордної муфти і якір двигуна з напівфлянцем гумовокордної муфти.

Таблиця 6.2 – Розрахункові дані моментів інерції механічних частин електропоїзда ЕР2т

№ п/п	Рисунок механічної частини для розрахунку моменту інерції	Розрахункові дані
1	2	3

		<p>Маса $M = 820.710942$ кг Площа $S = 3.022068$ м² Об'єм $V = 0.104950$ м³ Момент інерції $J_x = 99.930495$ кг*м²</p>
		<p>Маса $M = 1205.824409$ кг Площа $S = 4.592074$ м² Об'єм $V = 0.154197$ м³ Момент інерції $J_x = 125.521343$ кг*м²</p>
		<p>Маса $M = 120.383580$ кг Площа $S = 0.700825$ м² Об'єм $V = 0.015394$ м³ Момент інерції $J_x = 1.800781$ кг*м²</p>
		<p>Маса $M = 1324.383914$ кг Площа $S = 2.590461$ м² Об'єм $V = 0.169359$ м³ Момент інерції $J_x = 46.895080$ кг*м²</p>

Продовження таблиці 6.2

1	2	3
		<p>Маса $M = 744.208200$ кг Площа $S = 1.790658$ м² Об'єм $V = 0.095167$ м³ Момент інерції $J_x = 16.315572$ кг*м²</p>
		<p>Маса $M = 7.932171$ кг Площа $S = 0.546131$ м² Об'єм $V = 0.006197$ м³ Момент інерції $J_x = 0.318034$ кг*м²</p>
		<p>Маса $M = 1760889.636198$ кг Площа $S = 7818883.037194$ мм² Об'єм $V = 225177702.838592$ мм³ Момент інерції $J_x = 99,93+125,52$ кг*м²</p>

Порядок виконання роботи:

1 Отримати завдання від керівника лабораторних робіт (таблиця 6.3).

Таблиця 6.3 - Параметри розрахунку кривих руху ЕРС

Вихідні дані	
Тип рухомого складу (електровоз або електропоїзд)	
Прискорення, м/с ²	
Швидкість конструкційна, км/год	

2 Скласти структурну модель (рисунок 6.6) опору руху при різних ухилах.

3 Скласти структурну схему дослідження ЕРС відповідно до рисунка 6.7.

4 Провести моделювання руху ЕРС до конструкційної швидкості.

5 Провести аналіз отриманих результатів (визначити час розгону, час сповільнення, шлях, що проходить рухомий склад).

6 Побудувати осцилограми напруги і струму, швидкості, шляху, що пройшов потяг.

7 Зробити висновки до виконаної роботи.

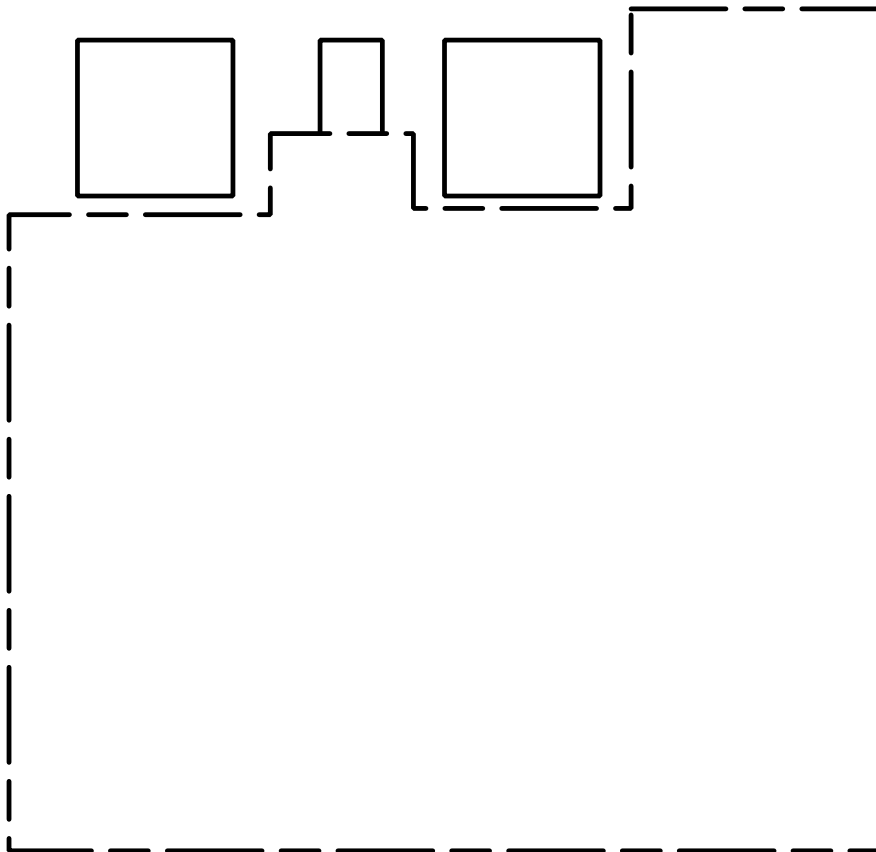


Рисунок 6.6 – Структурна модель моменту опору рухомого складу (визначена частина моделі використовується як навантаження для наступних робіт з урахуванням приведення до одного двигуна)

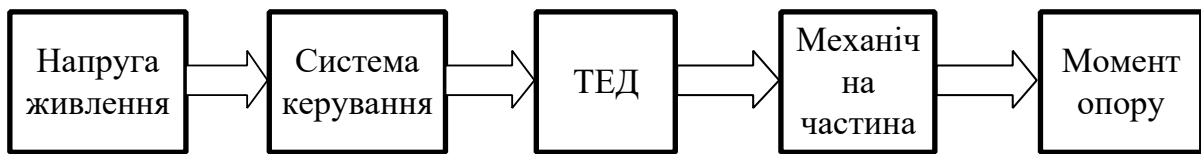


Рисунок 6.7 – Структурна схема тягового привода ЕРС

Контрольні запитання

- 1 Пояснити принцип роботи системи керування для вашого варіанта ЕРС.
- 2 Пояснити способи регулювання швидкості ТЕД.
- 3 Як визначається витрачена енергія для розгону потяга?
- 4 Як визначається енергія, що потрібна для гальмування ЕРС?

Список літератури

1 Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода [Текст] / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Издательство «Энергия», 1976. – 616 с.

2 Ковчин, С.А. Основы электропривода [Текст] / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – Л.: Издательство «Энергоатомиздат», 1974. – 567 с.

3 Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии [Текст] / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Издательство «Энергия», 1964. – 528 с.

4 Ткачук, В.І. Електромеханотроніка [Текст]: підручник / В.І. Ткачук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.

5 Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – С - Пб: Издательство «КОРОНА-век», 2008. – 368 с.

6 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров; под ред. И.П. Исаева.-М.: Транспорт, 1995.-294 с.

7 Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи [Текст]: навч. посібник / О.Г. Плахтина, С.С. Мазепа, А.С. Куцик.- Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2002.-228 с.

Додаток А
(довідковий)
Вихідні дані до лабораторних робіт 2,3

Варіант	1	2	3	4	5
Марка двигуна	НБ-418К6	УРТ – 110 Б	AL4442nP	НБ-514	НБ-406
Опір якірної обмотки $R_{я}, Ом$	0,01628	0,1	0,0068	0.0092	0,0473
Опір обмотки збудження $R_{оз}, Ом$	0,01071	0,123	0,0053	0.0071	0,0442
Опір обмотки додаткових полюсів $R_{дп}, Ом$	0,0174	0,095	0,004	0.0054	0,0237
Номинальний струм якоря $I_H, А$	820	146	1100	1140	340
Номинальна напруга якоря $U_H, В$	1250	1500	1040	800	1500
Кількість активних провідників N	348	653	1050	580	584
Кількість пар полюсів p	2	4	3	3	2
Кількість паралельних гілок a	2	2	3	3	2
Кількість витків обмотки збудження W	66	78	10	19	52
Номинальний електромагнітний момент $M, Нм$	7730	1670	8044	6800	7120
Номинальна частота обертання якоря $n, об / хв$	915	1145	1210	1015	765
Маса якоря $m, кг$	1344	580	1490	1150	1380
Радіус якоря $r, м$	0,41	0,28	0,37	0,29	0,42

Додаток Б
(довідковий)
Вихідні дані до лабораторної роботи 5

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип АТД	НТА-1200	НБ-607	АД-914	ЕД-900	АД-906А	АД-906
$U\phi$, В	3000	1500	3000	1500	1250	1500
r_s , Ом	0,0298	0,016	0,0338	0,0317	0,29	0,083
r'_r , Ом	0,0255	0,016	0,0221	0,0304	0,22	0,0676
X_s , Ом	0,5536	0,11	0,2276	0,114	1,09	0,343
X'_r , Ом	0,44	0,188	0,2138	0,119	0,71	0,298
X_μ , Ом	0,465	0,131	0,2018	0,1015	0,864	0,305
f , Гц	65	50	56	66	50	50
P	3	3	3	3	3	3
M , Нм	8010	2150	7800	9520	9200	8640
n , об/хв	1100	1250	1050	980	870	1020
r , м	0,37	0,25	0,35	0,41	0,4	0,38
m , кг	980	370	830	1020	995	950

