

**Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет**

**Д.Г. Алексієвський**

**АНАЛІЗ І ПРОЕКТУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

**Методичні вказівки до проведення практичних занять**

для спец. 171 "Електроніка"

Запоріжжя  
2024

**Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет**

# **АНАЛІЗ І ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

**Методичні вказівки до проведення практичних занять**

*Схвалено на засіданні  
кафедри ЕІСПЗ  
" 26" 08 2024 р.  
протокол № 1*

Запоріжжя  
2024

Укладач: *Д.Г. Алексієвський, д.т.н., доцент*

Відповідальний за випуск *зав. кафедрою ЕІСПЗ*  
*д.т.н., проф Т.В. Критської*

## **ЗМІСТ**

<b>1. Теми практичних занять</b>	<b>5</b>
<b>2. Короткі теоретичні відомості</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Побудова моделі простої електромеханічної системи</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Побудова моделі імпульсного перетворювача постійної напруги</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Побудова моделі електроприводу постійного струму</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Методика розрахунку електромеханічної системи</b>	<b>24</b>
<b>3. Завдання на практичні заняття</b>	<b>39</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	<b>43</b>

## 1. Темі практичних занять

№	Назва теми
1	Головне рівняння руху електромеханічної системи
2	Застосування методу блок-схем
3	Застосування візуально-блочного моделювання
4	Комп'ютерного моделювання у середовищі MathLab
5	Моделювання електромеханічного перетворення енергії
6	Моделювання системи керування електромеханічною системою
7	Моделювання електромеханічної системи робота-маніпулятора
8	Моделювання електромеханічної системи прокатного стану
9	Моделювання електромеханічної системи вітроенергетичної установки
10	Моделювання електромеханічної системи наземного безпілотного апарату
11	Моделювання електромеханічної системи морського безпілотного апарату
12	Моделювання електромеханічної системи літального безпілотного апарату

## 2. Короткі теоретичні відомості

### 2.1. Побудова моделі простої електромеханічної системи

Розглянемо електромеханічну систему на прикладі вентилятору з електроприводом постійної напруги. Схема наведена на рис. 1.

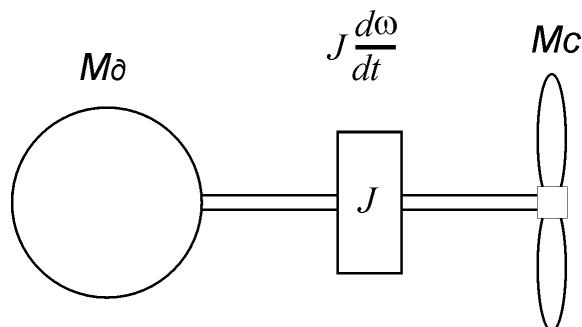


Рисунок 20

Вона складається з двигуна, вентилятору, еквівалентного маховика (маси, що обертається) та валу, що механічно з'єднує всі елементи системи. Двигун, вал та вентилятор не мають маси, та відповідно і момент інерції. Вона зосереджена у еквівалентному маховику.

У системі діють три моменти:

$M_{\partial}$  - момент двигуна (електричної машини постійного струму);

$M_c$  - момент вентилятору;

$J \frac{d\omega}{dt}$  - динамічний момент, що створює еквівалентний маховик.

Система заняття описується рівнянням балансу моментів :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial} - M_c \quad (1)$$

З рівняння видно, що динамічний момент виникає у випадку нерівності моменту джерела механічної енергії (в нашому випадку - це двигун) та споживача механічної енергії (в нашому випадку - це вентилятор):  $M_{\partial} \neq M_c$ .

Причому, якщо значення динамічного моменту є позитивним (тобто  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ),

то механічна система заняття прискорюється, а якщо його значення негативне

(тобто  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ), то система заняття, відповідно, гальмується.

Більш наочно поведінку електромеханічної системи можна проілюструвати у системі координат механічної характеристики двигуна та вентилятора (рис. 2).

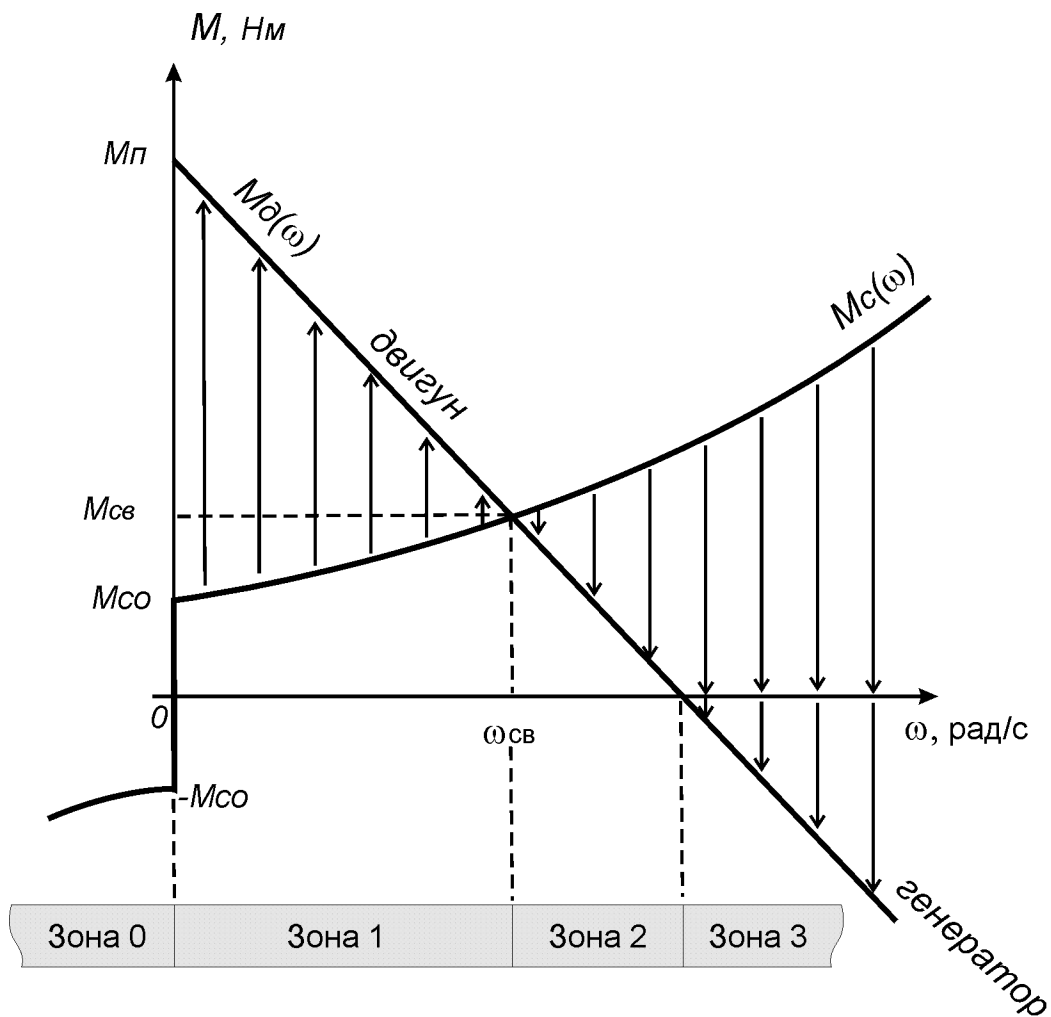


Рисунок 2

На рисунку показано варіант спрощеної механічної характеристики двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням. Його механічна характеристика має характерні точки:

- точка пускового моменту -  $M_{п}$ ;
- точка холостого ходу -  $\omega_{хх}$ .

Розглянемо режими роботи електромеханічної системи у різних зонах, відповідно до кутовій швидкості обертання -  $\omega$  (дивись рис.21).

У зоні 1 момент двигуна -  $M_{д}$  перевищує момент навантаження -  $M_{с}$ . Відповідно, динамічний момент має позитивне значення і система заняття прискорюється.

Динамічний момент зображається на рисунку у вигляді вертикальної стрілки, що починається на механічній характеристиці споживача механічної енергії та закінчується на характеристиці джерела механічної енергії і відповідає певній

швидкості обертання. Напрямок - угору відповідає режиму прискорення, а напрям - донизу відповідає гальмуванню електромеханічної системи.

У зоні 2 видно, що система заняття гальмується. На кордоні зон 1 та 2 знаходиться точка рівноваги механічних моментів, точка перетину механічних характеристик двигуна та вентилятора  $M_d = M_c$ .

Наявність напрямів прискорення та гальмування, що направлені на точку рівноваги, вказує на те, що ця точка є точкою стійкої рівноваги (дивись рис. 3).

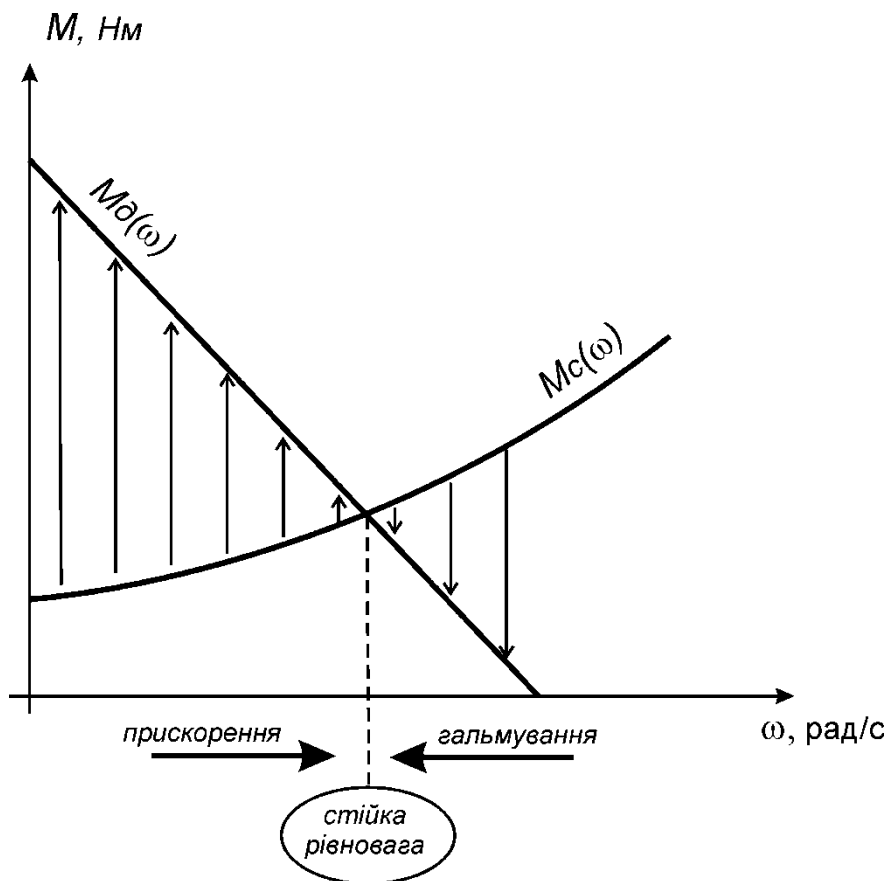


Рисунок 3

Якщо ж напрямки прискорення та гальмування направлені від точки рівноваги, та ця точка є точкою нестійкої рівноваги (дивись рис. 4).



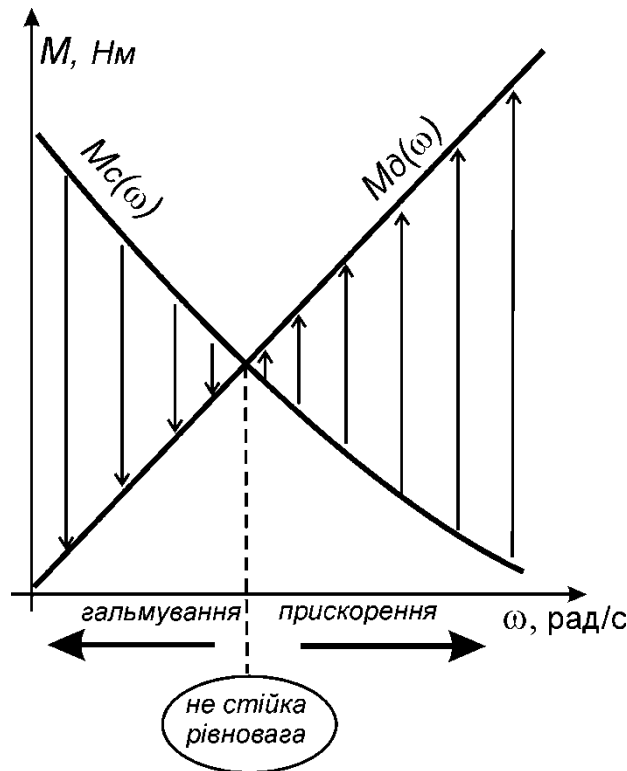


Рисунок 4

У зоні 3 електрична машина перестає бути двигуном і стає генератором, тобто він з джерела механічної енергії перетворюється на споживача механічної енергії. Відповідно у зоні 3 існують два споживача механічної енергії. Єдиним джерелом енергії є у цей момент маховик. Він витрачає кінетичну енергію, що була накопичена у масі, що обертається.

Розібравшись з фізичною стороною поведінки електромеханічної системи повернемось до побудови її математичної моделі. Проінтегруємо рівняння (1):

$$J \cdot d\omega = (M_d - M_c) \cdot dt,$$

$$\int J \cdot d\omega = \int (M_d - M_c) \cdot dt,$$

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_d - M_c) \cdot dt + \omega(0). \quad (2)$$

Отриманому рівнянню відповідає наступна блок-схема маТема заняттяичної моделі (Рис. 5).

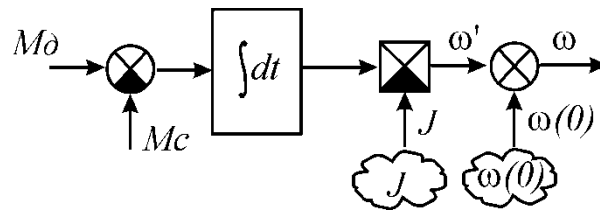


Рисунок 5

Слід звернути увагу на появу константи інтегрування  $\omega(0)$ , що відображає початкове значення кутовий швидкості обертання на початку моделювання.

Вхідними змінними моделі рис. 5 є момент двигуна -  $M_d$  та момент навантаження -  $M_c$ , а вихідною є кутова швидкість обертання.

Момент навантаження, у даному прикладі, має вентиляторну характеристику  $M_c = M_c(\omega)$ , яка описується наступним загальним рівнянням:

$$M_c(\omega) = K_{вен} \cdot \omega^2 + M_{c0} \quad (3)$$

де:  $K_{вен}$  - коефіцієнт пропорційності, що характеризує вентилятор;

$M_{c0}$  - момент тертя спокою.

Залежність (3) відповідає наступному ескізу (рис. 6).

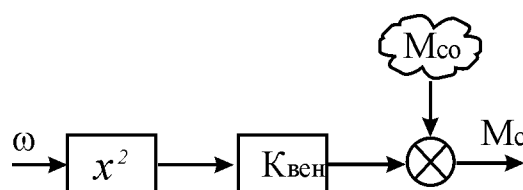


Рисунок 6

Слід відзначити особливу групу точок, що відповідають  $\omega = 0$  на характеристиці навантаження (дивись рис. 21). Використання блок-схеми, що зображена на рисунку 25 можливо тільки в режимах де  $\omega \neq 0$ . При  $\omega = 0$  ця схема буде не адекватною, момент тертя спокою перетвориться у момент прискорення для протилежного напрямку обертання. Тому, якщо моделювання вентиляторної характеристики потрібно проводити у діапазоні  $-\infty < \omega < +\infty$  можна застосувати блок-схему, що зображена на рисунку 7.

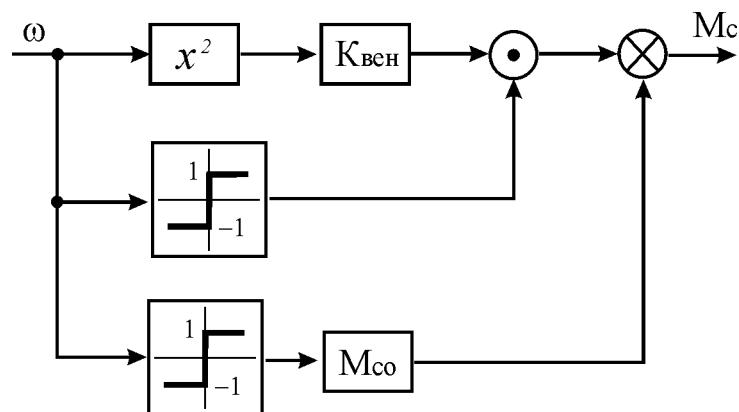


Рисунок 7

Ця блок-схема моделює характеристику вентилятору, що відображена на рисунку 7.

Застосування помножувача та релейного елемента дозволяє враховувати напрям обертання.

Блок схема, що показана на рисунку 7 дозволяє моделювати симетричну вентиляторну характеристику. Якщо вентилятор не є симетричним (з певних аеродинамічних властивостей), то можна запропонувати модель, зображену на рисунку 8.

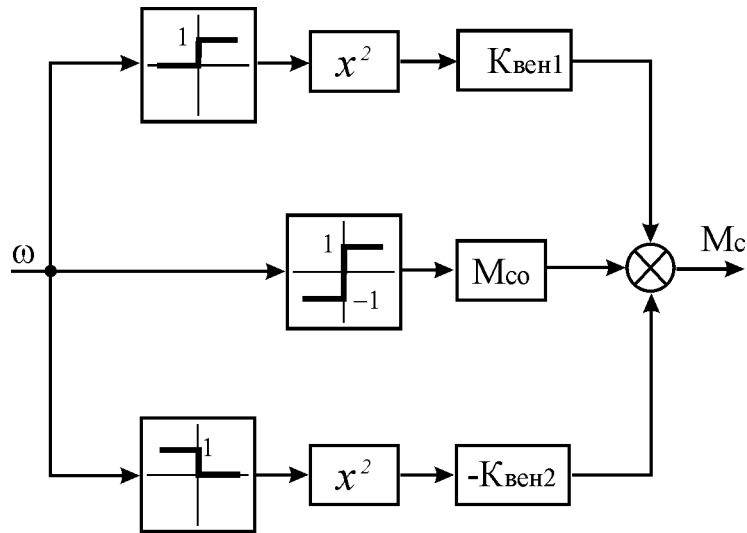


Рисунок 8

Слід звернути увагу, що коефіцієнти вентилятору для різних напрямів обертання можуть бути різними:

$$K_{вен1} \neq K_{вен2},$$

що узгоджується з реальним фізичним уявленням про аеродинаміку вентилятору.

Модернізуючи блок-схему аеромеханічної системи отримуємо наступну блок-схему (дивись рис. 9).

Електрична машина (двигун) є перетворювачем електричної енергії у механічну. При умовах підтримки постійного магнітного потоку його можна у моделі описати за допомогою рівнянь:

$$E_{Я} = K_E \cdot \omega, \quad (4)$$

$$M_{\partial} = K_M \cdot I_{Я}, \quad (5)$$

де:  $E_{Я}$  - електрорушійна сила (ЕРС) якоря,

$K_E, K_M$  - конструктивні коефіцієнти,

$I_{Я}$  - струм якоря.

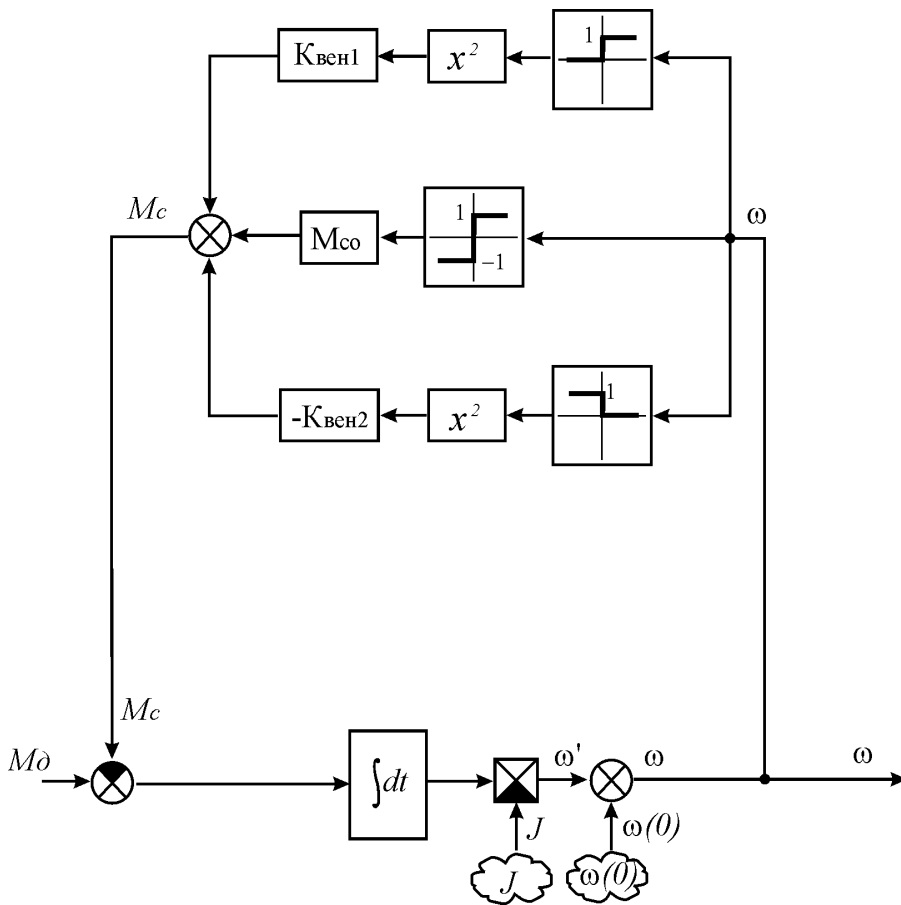


Рисунок 9

Відповідно до (4) та (5) ідеальний електромеханічний перетворювач (електричну машину) можна зобразити у вигляді ескізу, що показаний на рисунку 10.

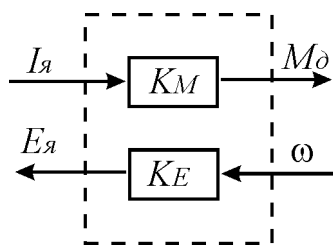


Рисунок 10

Далі розглянемо схему заміщення кола якоря (дивись рис. 11).

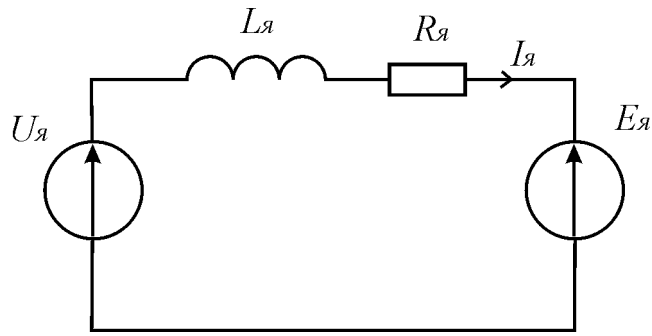


Рисунок 11

На схемі (рис.30) позначено:

$U_я$  - напруга, що підводиться до затисків якоря,

$L_я$  - індуктивність якірного кола (до неї може входити не тільки індуктивність самого якоря, а й індуктивність фільтру джерела живлення),

$R_я$  - активний опір якірного кола (до нього може входити, крім активного опору обмоток якоря та струмозбірних щіток, ще й внутрішній опір джерела живлення).

Рівняння балансу напруги, відповідно до другого закону Кірхгофа, для цієї схеми має наступний вигляд:

$$L_я \frac{di_я}{dt} = U_я - E_я - i_я R_я \quad (6)$$

Проінтегруємо вираз (7):

$$\begin{aligned} L_я \cdot di_я &= (U_я - E_я - i_я \cdot R_я) \cdot dt, \\ \int L_я \cdot di_я &= \int (U_я - E_я - i_я \cdot R_я) \cdot dt, \\ i_я &= \frac{1}{L_я} \int (U_я - E_я - i_я \cdot R_я) \cdot dt + i_я(0). \end{aligned} \quad (7)$$

Йому буде відповідати наступний ескіз (дивись рис. 12).

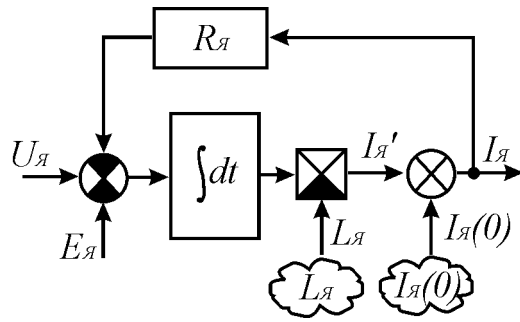


Рисунок 12

Отримавши ескізи окремих компонентів можна побудувати загальну блок-схему електромеханічної системи (дивись рис. 13)

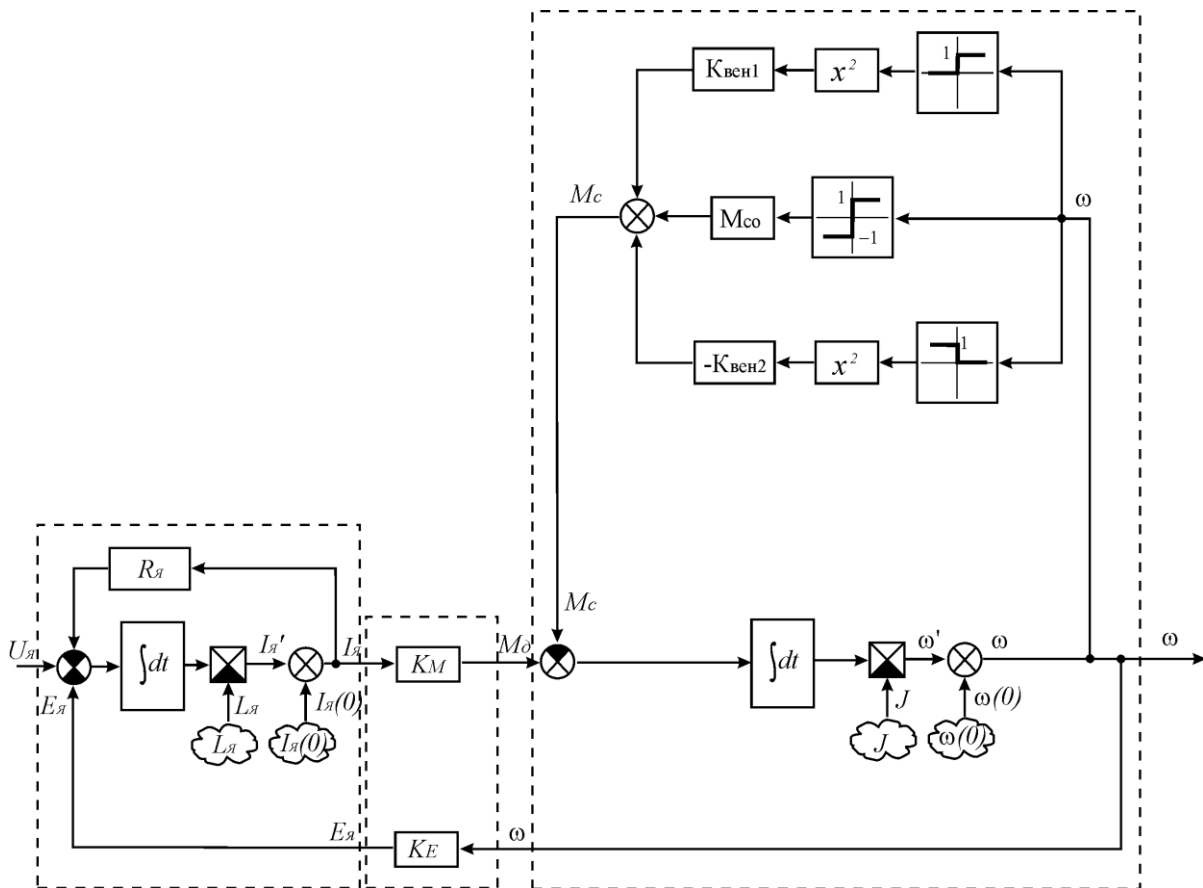


Рисунок 13

## 2.2. Побудова моделі імпульсного перетворювача постійної напруги

Структурна схема ІППН зображена на рисунку 14.

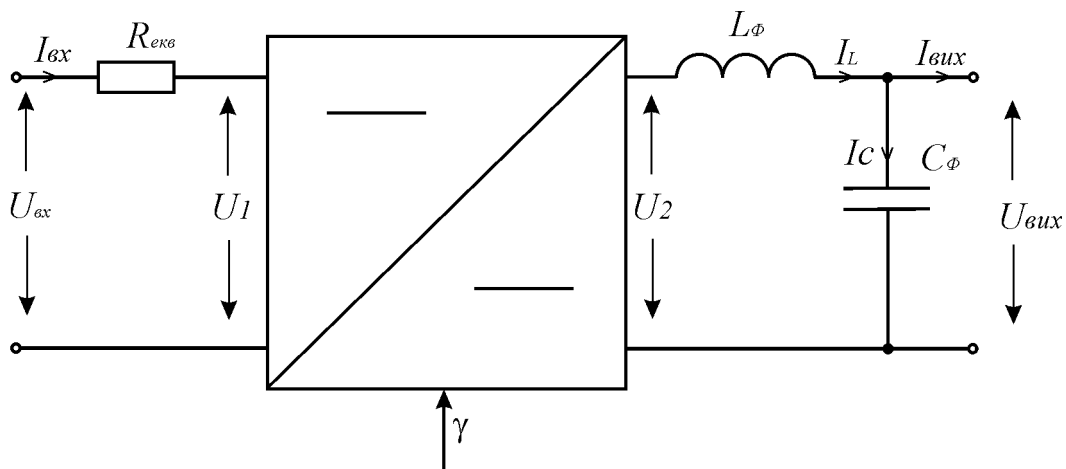


Рисунок 14

Схема складається з ідеального перетворювача постійної напруги, еквівалентного активного опору -  $R_{екв}$  та RC- фільтру. Еквівалентний активний опір враховує сумарні втрати потужності в ІППН.

Напруга на виході пристрою дорівнює напрузі на ємності фільтру. Тобто:

$$u_{вих} = \frac{1}{C_{\phi}} \cdot \int i_c(t) \cdot dt + u_c(0), \quad (8)$$

де  $-u_c(0)$  початкова напруга на фільтруючій ємності.

Виразу (8) відповідає ескіз (дивись рис. 15).

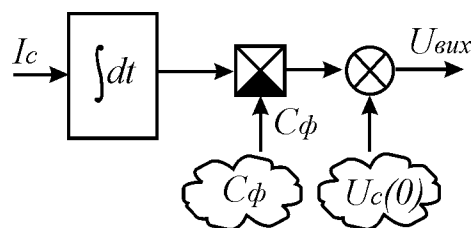


Рисунок 15

Відповідно до першого закону Кірхгофа:



$$i_c = i_L - i_{вих} \quad (9)$$

Виразу (9) відповідає ескіз (дивись рис. 16).

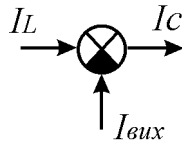


Рисунок 16

Миттєве значення струму крізь індуктивність описується виразом:

$$i_L = \frac{1}{L_\phi} \cdot \int U_L(t) \cdot dt + i_L(0). \quad (10)$$

Йому відповідає ескіз (дивись рис. 17).

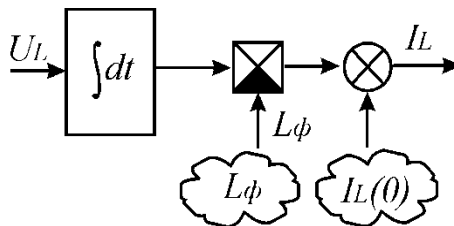


Рисунок 17

Відповідно до другого закону Кірхгофа:

$$U_L = U_2 - U_{вих} \quad (11)$$

Виразу (11) відповідає ескіз (дивись рис. 18).

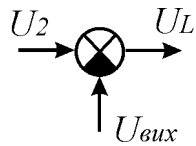


Рисунок 18

Якщо вважати ІППН ідеальним перетворювачем постійної напруги, то напруга на його виході визначається за формулою:

$$U_2 = \gamma \cdot U_1, \quad (12)$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт заповнення ІППН.

Виразу (12) відповідає ескіз (дивись рис. 19).

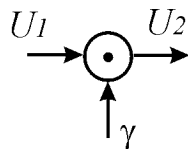


Рисунок 19

Напруга на вході ідеального ІППН визначається як різниця між вхідною напругою та падінням напруги на еквівалентному резисторі:

$$U_1 = U_{вх} - I_{вх} \cdot R_{екв}. \quad (13)$$

Виразу (13) відповідає ескіз (дивись рис. 20).

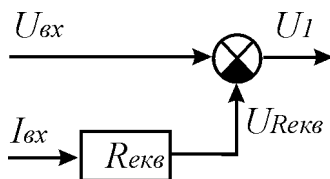


Рисунок 20

Струм на вході ІППН визначається струмом на його виході відповідно до коефіцієнта заповнення ІППН:

$$I_{ex} = \gamma \cdot I_L. \quad (14)$$

Виразу (14) відповідає ескіз (дивись рис. 21).

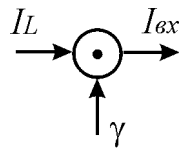


Рисунок 21

Вихідний струм пристрою визначається навантаженням  $R_H$ :

$$I_{вих} = \frac{U_{вих}}{R_H} \quad (15)$$

Виразу (15) відповідає ескіз (дивись рис. 22).

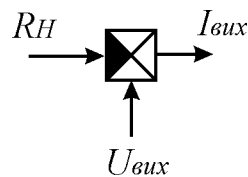


Рисунок 22

Після стикування ескізів, що зображені на рисунках 15-22 отримуємо модель ІППН (дивись рис. 23).



Інформацію про стан об'єкта регулювання блок управління (БУ) отримує з двох датчиків: датчика струму (ДС) та датчика швидкості (ДШ).

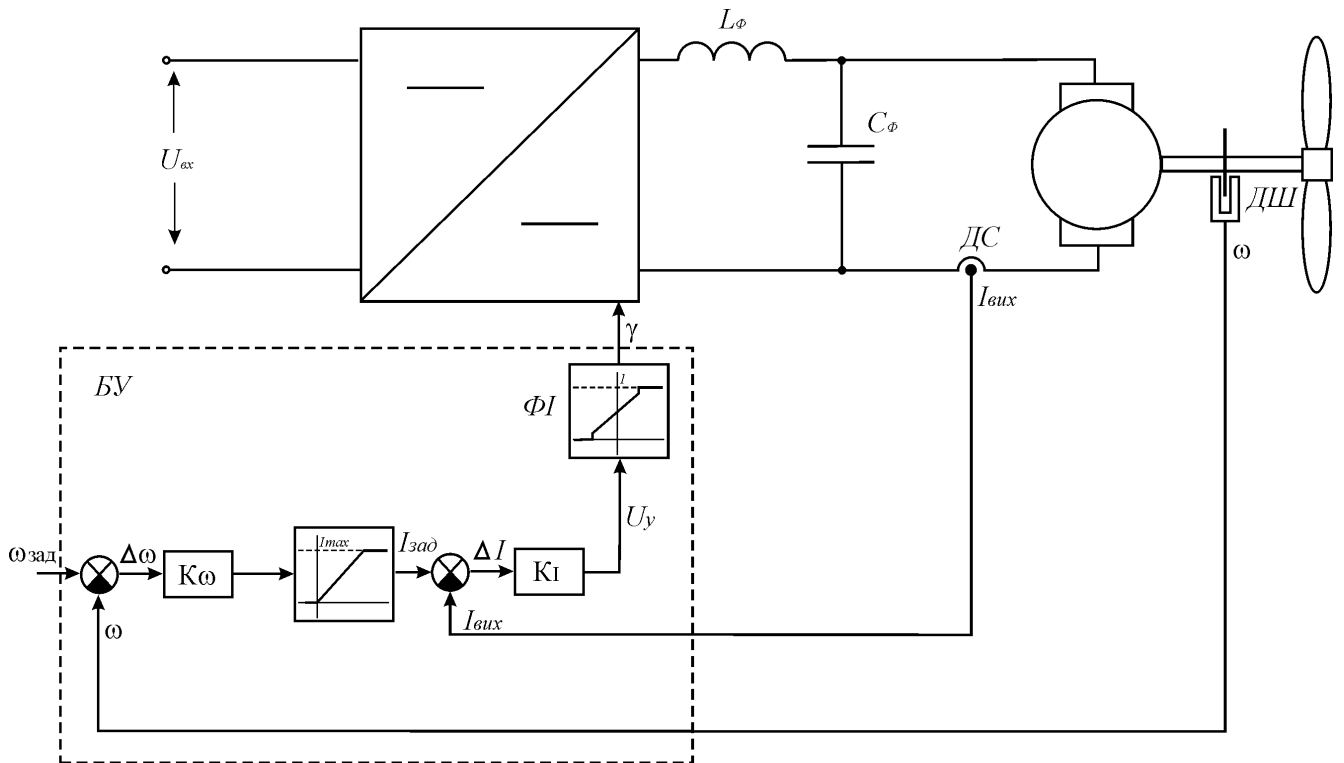


Рисунок 24

Задане значення струму  $I_{зад}$  є виходом нелінійного блоку, що обмежує струм на рівні  $I_{max}$  згори та на рівні нуля знизу.

Величина  $\gamma$  є виходом формувача імпульсів -  $\Phi I$ , що реалізує задану функцію від сигналу управління -  $U_y$ :

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < U_y < -0.45 \\ U_y + 0.5 & \text{при } -0.45 \leq U_y \leq 0.45 \\ 1 & \text{при } 0.45 < U_y < +\infty \end{cases} \quad (20)$$

Схема моделі наведена на рисунку 25.

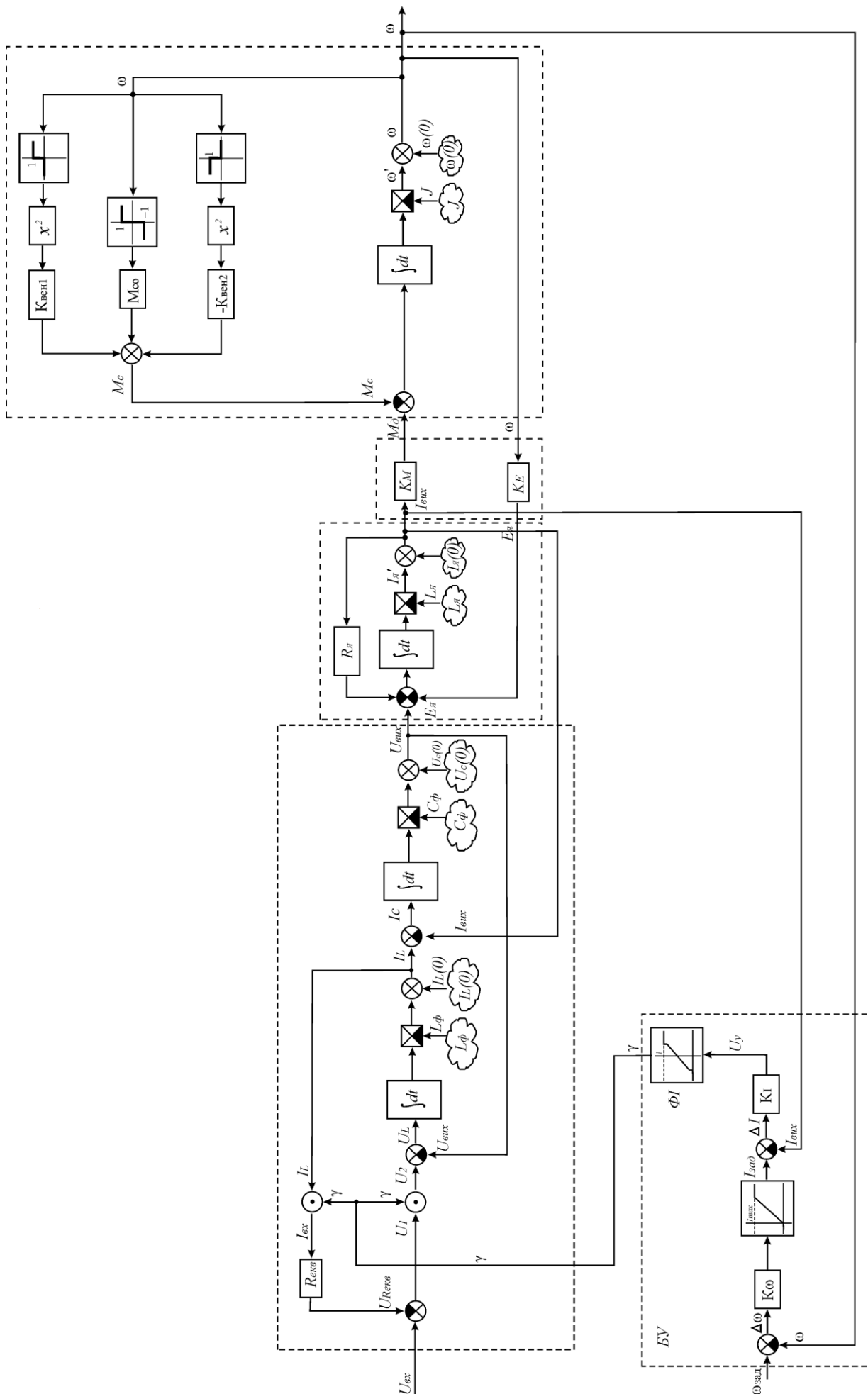


Рисунок 25

При стикуванні окремих елементів слід звернути увагу на зміну найменувань змінних. Так  $U_{вих} = U_{я}$  та  $I_{вих} = I_{я}$ , тому, що ІППН навантажений на машину постійного струму. При цьому навантаженням ІППН тепер є не постійний опір а проти-ЕРС електричної машини -  $E_{я}$  з внутрішнім опором -  $R_{я}$ .

В результаті стикування отримано нелінійне диференційне рівняння четвертого порядку (на це вказує кількість інтеграторів) у структурній формі. Фізично це є ознакою того, що у системі є чотири накопичувача енергії:

- індуктивність фільтру;
- індуктивність якірного кола;
- фільтрова ємність;
- маси, що обертаються.

## 2.4. Методика розрахунку електромеханічної системи

### Приведення моментів опору, інерційних мас і моментів інерції

Звичай двигун приводить в обертання (рух) робочу машину через систему передач. Реальна механічна система заняття має пружні елементи і зазори між елементами. Розв'язання рівнянь руху з урахуванням цих чинників є достатньо скрутним. Для багатьох інженерних розрахунків цими чинниками можна нехтувати.

В цьому випадку рух одного елемента дає інформацію про рух всіх інших. Тому рух всієї системи можна звести до руху одного елемента. Зручно за цей елемент брати вал двигуна.

Таким чином, розрахункову кінематичну схему електроприводу можна привести до однієї еквівалентної ланки, що має еквівалентний момент інерції  $J$ , на який впливає електромагнітний момент двигуна  $M$  і сумарний приведений до валу двигуна момент опору робочого механізму (включаючи всі механічні втрати)  $M'_c$ . Приведення моментів опору проводиться на підставі рівності потужностей:

$$M_c \cdot \omega_M \cdot \frac{1}{\eta_{II}} = M'_c \cdot \omega_d,$$

де:  $M_c$  - момент опору механізму,

$M'_c$  - приведений момент опору механізму,

$\eta_{II}$  - ККД механічної передачі,

$\omega_M$  - кутова швидкість механізму,

$\omega_d$  - кутова швидкість двигуна.

Формула приведення моменту механізму для обертального руху:

$$M_c' = M_c \cdot \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n},$$



де:  $\eta_j$  - ККД  $j$ -ої механічної передачі,

$i_j$  - передавальне число  $j$ -ої механічної передачі.

Передавальне число визначається як відношення швидкості обертання на вході  $\omega_j$  і на виході передачі  $\omega_{j+1}$ :

$$i = \frac{\omega_j}{\omega_{j+1}}.$$

Приведення моментів інерції частин, що обертаються, до валу двигуна проводиться за формулою:

$$J = J_1 + J_2 \cdot \frac{1}{i_1^2} + J_3 \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + J_n \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \dots \cdot i_{n-1}^2},$$

де  $J_1 \dots J_n$  - моменти інерції частин, що обертаються.

### Механічні характеристики виробничих механізмів

Існує величезна кількість видів і типів механічних характеристик механізмів. Проте, можна ввести наближену класифікацію за допомогою емпіричної формули [1]:

$$M_c(\omega_m) = M_o + (M_{с.ном} - M_o) \cdot \left( \frac{\omega_m}{\omega_{м.ном}} \right)^x,$$

де:  $M_o$  - момент тертя робочого механізму,

$M_{с.ном}$  - номінальний момент робочого механізму,

$\omega_{м.ном}$  - номінальна швидкість робочого механізму,

$x$  - емпіричний коефіцієнт форми механічної характеристики робочого механізму.

Відповідно до цієї формули можуть бути виділені наступні типи механічних характеристик.

1) ( $x=0$ ) - механічні характеристики з постійним моментом (підйомні

крани, лебідки, ліфти, поршневі насоси при постійній висоті подачі, конвеєри з постійною масою матеріалу, що пересувається, всі механізми в яких головним моментом є момент тертя).

2) ( $x=1$ ) - лінійно-зростаючі механічні характеристики (привід генератора постійного струму при електричному навантаженні у вигляді постійного резистора).

3) ( $x=2$ ) - нелінійно-зростаючі механічні характеристики (вентилятори, гребні гвинти).

4) ( $x=-1$ ) - лінійно-спадаючі механічні характеристики (деякі типи токарних, фрезерних та токарно-розточувальних верстатів, моталки).

### **Механічна характеристика двигуна постійного струму з незалежним збудженням**

У сталому режимі в ланцюзі якоря діє рівновага напруги:

$$U = I_{я} \cdot R + E, \quad (1.1)$$

$U$  - напруга, що підводиться до якоря двигуна,

$I_{я}$  - струм якоря,

$R$  - сумарний опір якірного ланцюга,

$E$  - проти-ЕРС якоря двигуна.

Проти-ЕРС якоря визначається за формулою:

$$E = C_{ном} \cdot \omega_{\partial}, \quad (1.2)$$

де  $C_{ном}$  - конструктивний коефіцієнт двигуна при номінальному магнітному потоці,

$\omega_{\partial}$  - кутова швидкість ротора двигуна.

Таким чином, з (1.1) і (1.2) кутова швидкість може бути виражена:

$$\omega_{\partial} = \frac{(U - I_{я} \cdot R)}{C_{ном}} . \quad (1.3)$$

В свою чергу, момент двигуна визначається з виразу:

$$M = C_{ном} \cdot I_{я} . \quad (1.4)$$

Якщо підставити (1.4) у (1.3) одержимо вираз для розрахунку механічної характеристики ДПС з незалежним збудженням:

$$\omega_{\partial} = \frac{U}{C_{ном}} - M \cdot \frac{R}{(C_{ном})^2} .$$

### **Зміст розрахункового завдання**

Для заданої електромеханічної системи з відомими параметрами кінематичної схеми, параметрами електродвигуна та параметрами механічної характеристики робочого механізму (згідно варіанту завдання):

- 1) накреслити кінематичну схему, використовуючи умовні графічні позначення,
- 2) привести задану кінематичну схему до узагальненої еквівалентної ланки,
- 3) записати рівняння динаміки електроприводу,
- 4) побудувати природну механічну характеристику двигуна,
- 5) побудувати механічну характеристику робочого механізму,
- 6) визначити кутову швидкість обертання електромеханічної системи та момент на валу двигуна в сталому режимі для природної характеристики двигуна,
- 7) визначити значення опорів ступенів пускового реостата.

### Початкові дані для розрахунку

Електромеханічна система заняття, яка підлягає розрахунку зображена на рис.3.1. Тип двигуна - ДПС.

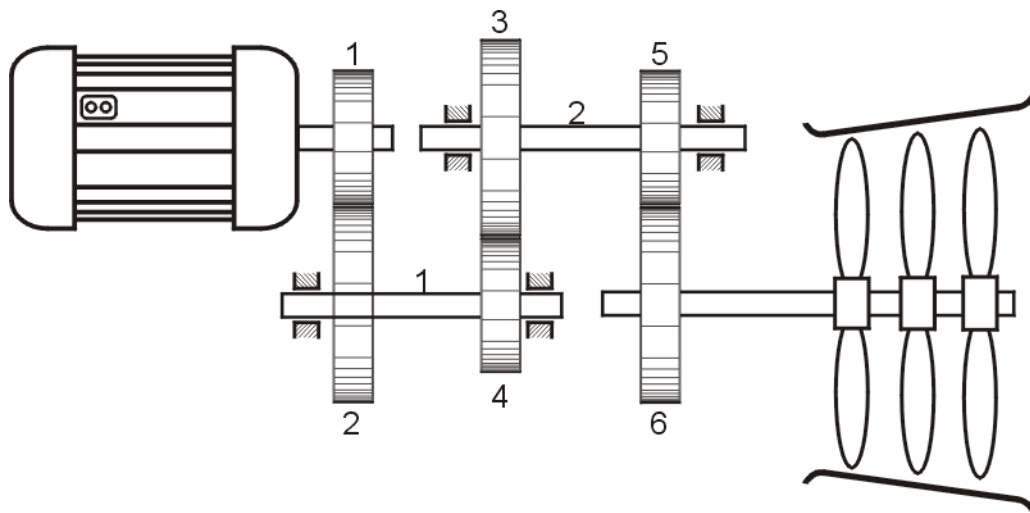


Рис.3.1

Механічна характеристика робочого механізму описується емпіричним виразом [1]:

$$M_c(\omega_4) = M_o + (M_{с.ном} - M_o) \cdot \left( \frac{\omega_4}{\omega_{м.ном}} \right)^x$$

де:

$M_o$  - момент тертя робочого механізму,

$M_{с.ном}$  - номінальний момент робочого механізму,

$\omega_{м.ном}$  - номінальна швидкість робочого механізму,

$x$  - емпіричний коефіцієнт форми механічної характеристики робочого механізму.

Початкові дані для виконання практичної роботи вказані в таблиці 1 згідно номеру варіанту. Варіант завдання визначається з номеру студента по журналу академічної групи.

Таблиця 1

Позначення параметру	Номер варіанту											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$J_1, \text{ кг}\cdot\text{м}$	42	32	32	35	34	36	32	32	40	30	35	30
$J_2, \text{ кг}\cdot\text{м}$	4	5	4	5	4	5	4	5	5	5	4	10
$J_3, \text{ кг}\cdot\text{м}$	14	15	14	15	12	20	15	14	14	22	12	5
$J_4, \text{ кг}\cdot\text{м}$	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
$J_5, \text{ кг}\cdot\text{м}$	4	5	4	4	5	4	5	4	5	7	4	5
$J_6, \text{ кг}\cdot\text{м}$	15	12	20	15	14	14	14	15	12	20	15	10
$J_7, \text{ кг}\cdot\text{м}$	2	1	2	3	2	4	1	2	3	1	2	1
$J_8, \text{ кг}\cdot\text{м}$	6	5	4	5	6	5	4	5	6	4	5	5
$J_9, \text{ кг}\cdot\text{м}$	15	12	20	15	15	12	20	15	12	15	12	10
$J_{10}, \text{ кг}\cdot\text{м}$	120	125	123	124	123	122	124	111	123	121	152	100
$i_1$	2	3	4	4	3	2	2	3	4	4	3	2
$i_1$	4	4	3	2	2	3	4	4	3	2	2	3
$i_1$	3	2	2	3	4	4	3	2	2	3	4	4
$\eta_1$	0.95	0.85	0.9	0.95	0.95	0.9	0.85	0.85	0.9	0.95	0.95	0.9
$\eta_2$	0.9	0.95	0.85	0.85	0.9	0.95	0.9	0.95	0.85	0.85	0.9	0.95
$\eta_3$	0.85	0.9	0.9	0.9	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.9	0.85	0.85
$M_0, \text{ нм}$	25	30	24	22	10	12	51	22	25	21	10	50
$M_{\text{М.НОМ}}, \text{ нм}$	420	525	700	530	560	490	420	630	650	730	770	350
$\omega_{\text{М.НОМ}}, \text{ рад/с}$	8.3	8.4	8.3	8.2	8.3	8.4	8.3	8.2	8.3	8.4	8.3	8.4
$x$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\omega_{\text{НОМ}}, \text{ рад/с}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$C_{\text{НОМ}}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$I_{\text{НОМ}}, \text{ А}$	12	15	20	15	16	14	12	18	19	21	22	10
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	311	311	311	311	311	311	311	311	311	311	311	311
$K_{\text{М}}$	2.3	2.5	2.3	2.5	2.3	2.2	2.5	2.2	2.5	2.2	2.5	2.5
$\eta_{\text{НОМ}}$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

### Приклад розрахунку електромеханічної системи

Згідно варіанту завдання №12 маємо наступні параметри електромеханічної системи:

момент інерції ротора двигуна -  $J_1 = 30 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,

момент інерції шестерні № 1 -  $J_2 = 10 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,

момент інерції шестерні № 2-  $J_3 = 5 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,

момент інерції вила № 1 -  $J_4 = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,

момент інерції шестерні № 3-  $J_5 = 5 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 момент інерції шестерні № 4-  $J_6 = 10 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 момент інерції вила № 2 -  $J_7 = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 момент інерції шестерні № 5 -  $J_8 = 5 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 момент інерції шестерні № 6 -  $J_9 = 10 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 момент інерції робочого механізму -  $J_{10} = 100 \text{ кг}\cdot\text{м}$ ,  
 передавальне число першої передачі -  $i_1 = 2$ ,  
 передавальне число другої передачі -  $i_2 = 3$ ,  
 передавальне число третьої передачі -  $i_3 = 4$ ,  
 номінальна кутова швидкість двигуна -  $\omega_{ном} = 200 \text{ рад/с}$ ,  
 номінальний струм якоря  $I_{ном} = 10 \text{ А}$ ,  
 номінальний ККД двигуна -  $\eta_{ном} = 0.9$ ,  
 конструктивний коефіцієнт двигуна -  $C_{ном} = 2$ ,  
 номінальна напруга на якорі двигуна -  $U_{ном} = 311 \text{ В}$ ,  
 коефіцієнт перевантаження по моменту двигуна  $K_M = 2.5$   
 момент тертя робочого механізму -  $M_o = 50 \text{ нм}$ ,  
 номінальний момент робочого механізму -  $M_{с.ном} = 350 \text{ нм}$ ,  
 номінальна швидкість робочого механізму -  $\omega_{м.ном} = 8.4 \text{ рад/с}$ ,  
 емпіричний коефіцієнт форми механічної характеристики робочого механізму  $x = 2$ .

### Рішення задачі

1) Зобразимо кінематичну схему електромеханічної системи за допомогою умовних позначень (рис.4.1):

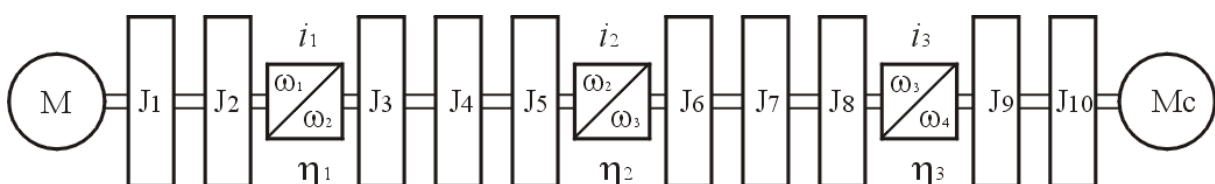


Рис.4.1

2) Спростимо схему шляхом складання моментів інерції мас, що обертаються з однією кутовою швидкістю :

$$J_1' = J_1 + J_2 = 30 + 5 = 35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_2' = J_3 + J_4 + J_5 = 10 + 1 + 5 = 16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_3' = J_6 + J_8 + J_7 = 10 + 1 + 5 = 16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_4' = J_9 + J_{10} = 10 + 100 = 110 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

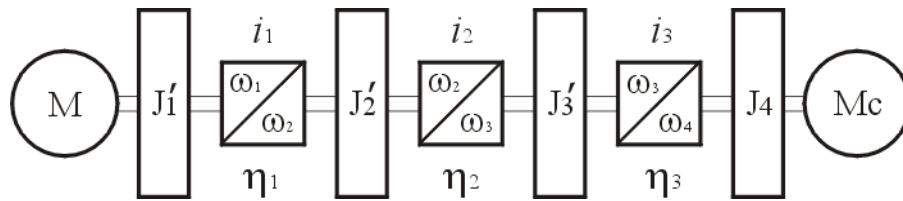


Рис. 4.2

Момент опору еквівалентної ланки визначається за формулою:

$$\begin{aligned}
 Mc' &= Mc \cdot \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} = \\
 &= Mc \cdot \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} \cdot \frac{1}{0.9 \cdot 0.95 \cdot 0.85} = 0.057 \cdot Mc \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Момент інерції еквівалентної ланки визначається за формулою:

$$J = J_1 + J_2 \cdot \frac{1}{i_1^2} + J_3 \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + J_4 \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} =$$

$$= 35 + 16 \cdot \frac{1}{2^2} + 16 \cdot \frac{1}{2^2 \cdot 3^2} + 110 \cdot \frac{1}{2^2 \cdot 3^2 \cdot 4^2} = 39.63 \text{ кг} \cdot \text{м}$$

Кутова швидкість робочого механізму приводиться до валу двигуна за допомогою формули:

$$\omega_1 = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot \omega_4 = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \omega_4 = 24 \cdot \omega_4 . \quad (4.2)$$

Кінематична схема еквівалентної ланки зображена на рис. 4.3.

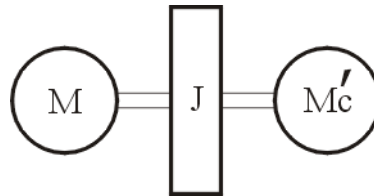


Рис.4.3

3) Рівняння динаміки електроприводу:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - Mc'$$

після підстановки набутих значень має вигляд:

$$39.63 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - 0.057 \cdot Mc'$$

4) Номінальний момент двигуна визначається з номінального струму якоря двигуна:



$$M_{НОМ} = C_{НОМ} \cdot I_{НОМ} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ Нм}$$

Опір якоря двигуна визначається з виразу:

$$R_{я} \approx \frac{0.5 \cdot (1 - \eta_{НОМ}) \cdot U_{НОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{0.5 \cdot (1 - 0.9) \cdot 311}{10} = 1.55 \text{ Ом}$$

Кутова швидкість холостого ходу двигуна визначається за допомогою виразу:

$$\omega_o = \frac{U_{НОМ} \cdot \omega_o}{U_{НОМ} - I_{НОМ} \cdot R_{я}} = \frac{311 \cdot 200}{311 - 10 \cdot 1.55} = 210 \text{ рад/с}$$

Характеристика ДПТ з незалежним збудженням являє собою пряму лінію, що проходить через точку з координатами номінального моменту і номінальної швидкості, та через точку холостого ходу двигуна (Рис.4.4).

5) Механічна характеристика робочого механізму розраховується за емпіричною формулою:

$$M_c(\omega_4) = M_o + (M_{с.НОМ} - M_o) \cdot \left( \frac{\omega_4}{\omega_{м.НОМ}} \right)^x$$

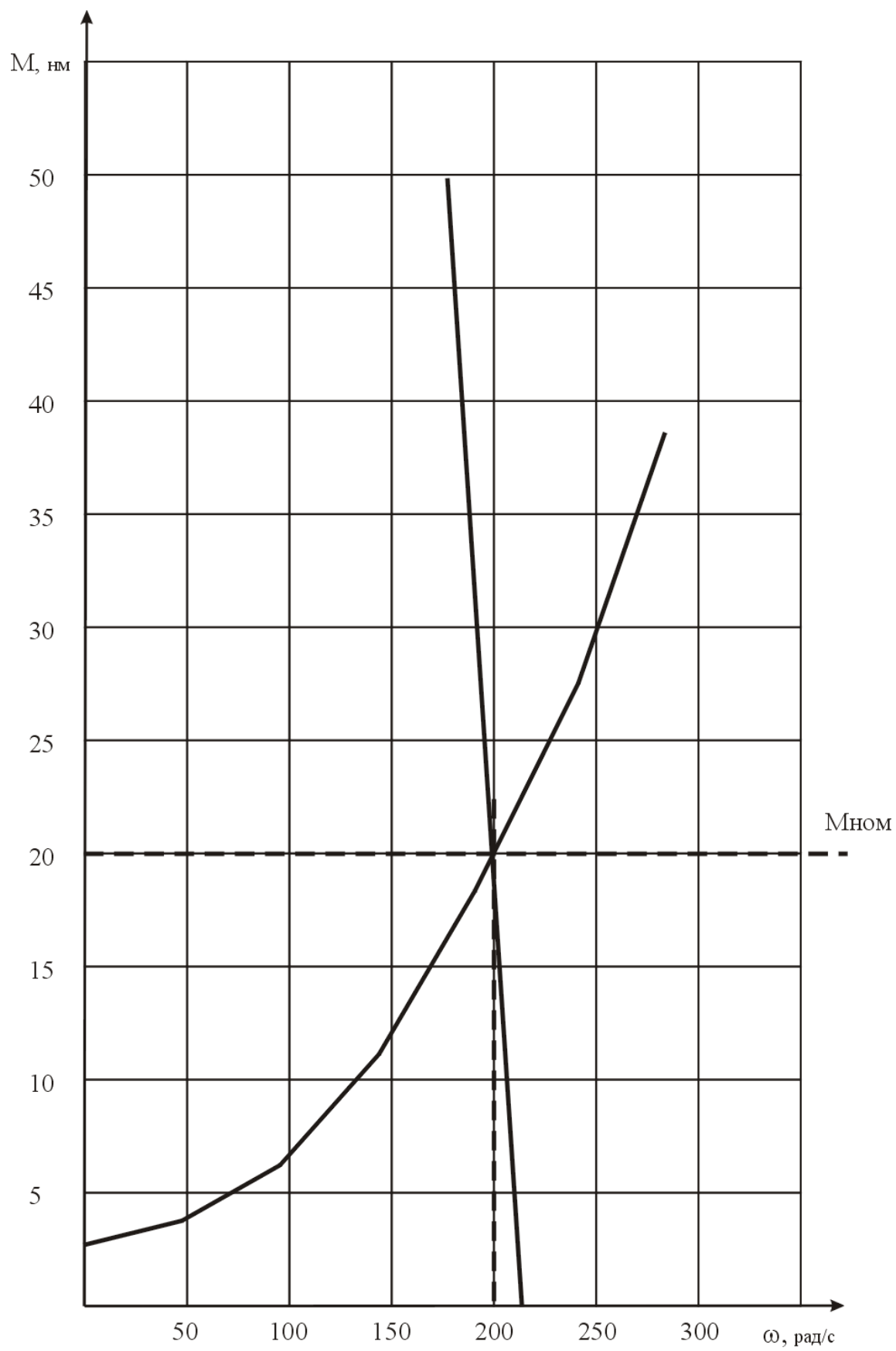


Рис. 4.4

Підставимо в формулу початкові дані:

$$M_c(\omega_4) = 50 + (350 - 50) \cdot \left( \frac{\omega_4}{8.4} \right)^2,$$

$$M_c(\omega_4) = 50 + 4.25 \cdot \omega_4^2.$$

Розрахункові значення для побудови характеристики наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

$\omega_4, \text{ рад/с}$	0	2	4	6	8	10	12
$M_c, \text{ нм}$	50	67	118	203	322	475	662

Приведемо одержану механічну характеристику робочого механізму до валу двигуна за допомогою (4.1) і (4.2). Результати розрахунку наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

$\omega_1, \text{ рад/с}$	0	48	96	144	192	240	288
$M_c', \text{ нм}$	3	4	7	12	18	27	38

Приведена до валу двигуна механічна характеристика робочого механізму показана на рис. 4.4.

б) Оскільки в сталому режимі динамічний момент має нульове значення, то момент двигуна та приведений момент робочого механізму є рівними між собою. Таким чином, сталому режиму електромеханічної системи відповідатиме точка перетину графіків механічної характеристики двигуна та приведеної характеристики робочого механізму. Ця точка має координати:

$$\omega = 200 \text{ рад/с},$$

$$M = 20 \text{ нм}.$$

7) Визначимо значення пускового моменту за допомогою коефіцієнта перевантаження по моменту:

$$M_n = K_m \cdot M_{ном} = 2.5 \cdot 20 = 50 \text{ нм}$$

Побудуємо горизонтальну лінію, що відповідає пусковому моменту в системі координат механічної характеристики двигуна (рис. 4.5).

Виконаємо побудови у послідовності, яка вказана на графіку рис.4.5. (Номери побудов графічних об'єктів вказані в "крапельках". При оформленні студентом контрольної роботи номери побудов вказувати не обов'язково).

Крапки №3, №8, №12 відповідають кутовим швидкостям реостатних характеристик при номінальному моменті двигуна:

$$\omega_1' = 125 \text{ рад/с},$$

$$\omega_1'' = 175 \text{ рад/с},$$

$$\omega_1''' = 195 \text{ рад/с}.$$

Всі реостатні характеристики проходять через точку холостого ходу. Таким чином, по одержаних трьох координатах кутової швидкості можуть бути визначені значення опору пускового реостата для трьох реостатних характеристик:

$$R_p' = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1'}{\omega_o}\right) - R_y = \frac{311}{10} \cdot \left(1 - \frac{125}{210}\right) - 1.55 = 11.04 \text{ Ом},$$

$$R_p'' = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1''}{\omega_o}\right) - R_y = \frac{311}{10} \cdot \left(1 - \frac{175}{210}\right) - 1.55 = 3.63 \text{ Ом},$$

$$R_p''' = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1'''}{\omega_o}\right) - R_y = \frac{311}{10} \cdot \left(1 - \frac{195}{210}\right) - 1.55 = 0.67 \text{ Ом}.$$

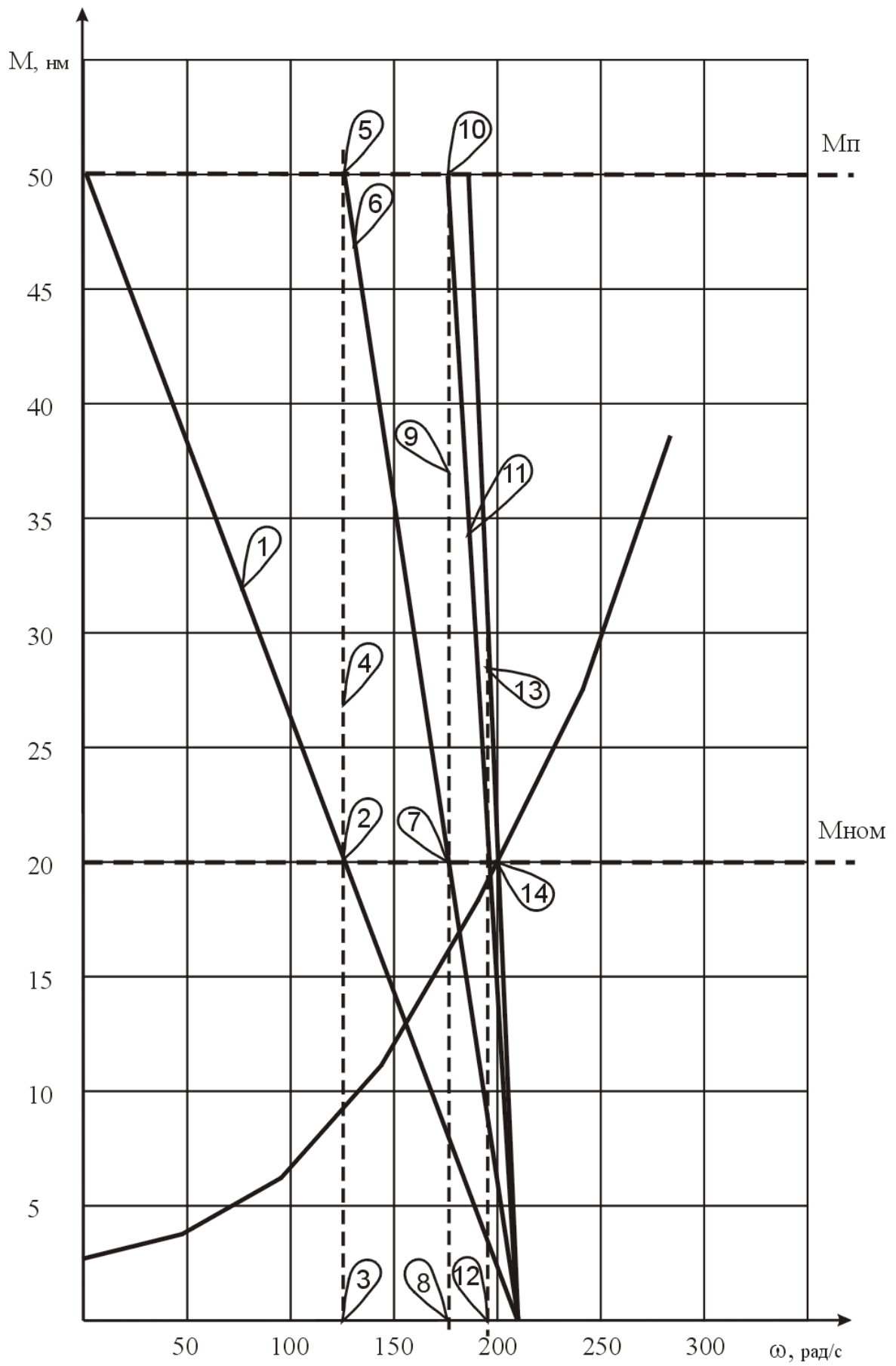


Рис.4.5

Відповідно ступені реостата визначаються як різниці сумарних опорів:

$$R_1 = R'_p - R''_p = 11.04 - 3.63 = 7.41 \text{ Ом},$$

$$R_2 = R''_p - R'''_p = 3.63 - 0.67 = 2.96 \text{ Ом},$$

$$R_3 = R'''_p = 0.67 \text{ Ом}$$

### **3. Завдання на практичні заняття з теоретичного матеріалу**

**Тема заняття 1:** " Головне рівняння руху електромеханічної системи"

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Що є головним рівнянням руху електромеханічної системи?

Які основні складові рівняння руху?

Як враховуються інерційні сили у рівнянні руху?

У чому полягає роль електромагнітних сил у рівнянні?

Як пов'язані динамічні властивості системи та її рівняння руху?

**Тема заняття 2.** Застосування методу блок-схем

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Що таке блок-схема та яка її роль у моделюванні систем?

Якими є основні правила побудови блок-схем для електромеханічних систем?

Які типи блоків зазвичай використовуються для моделювання руху та управління?

У чому перевага використання блок-схем для аналізу складних систем?

Як за допомогою блок-схем можна розділити механічну та електричну частини системи?

**Тема заняття 3.** Застосування візуально-блокового моделювання

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

У чому різниця між візуально-блоковим моделюванням та традиційними методами?

Які переваги надає візуально-блокове моделювання для аналізу складних систем?

Який програмний інструмент найчастіше використовується для візуально-блокового моделювання?

Як візуально-блокове моделювання дозволяє покращити точність електромеханічних моделей?

Які типи з'єднань блоків використовуються для моделювання інформаційного та енергетичного обміну?

**Тема заняття 4.** Комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Якими є основні функції MATLAB для моделювання електромеханічних систем?

Чим відрізняється моделювання електромеханічних процесів у Simulink від суто програмного підходу?

Які вбудовані бібліотеки MATLAB корисні для моделювання електромеханіки?

Як у MATLAB задаються параметри системи для моделювання руху?

Які основні етапи моделювання системи серед MATLAB?

**Тема заняття 5.** Моделювання електромеханічного перетворення енергії

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Що таке електромеханічне перетворення енергії та як воно моделюється?

Які рівняння описують процеси перетворення електричної енергії на механічну?

Яка роль законів збереження енергії у моделюванні перетворення?

Як враховуються втрати при електромеханічному перетворенні енергії?

Наведіть приклади систем, де перетворення енергії є основним процесом.

**Тема заняття 6.** Моделювання системи керування електромеханічною системою

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Яка структура типової системи керування електромеханічною системою?

Які методи управління найчастіше використовуються в електромеханічних системах?

Як моделюються зворотні зв'язки у системі управління?

У чому полягає роль регуляторів та як їх моделювати?

Як можна оцінити ефективність керування електромеханічною системою?



**Тема заняття 7.** Моделювання електромеханічної системи робота-маніпулятора

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які особливості має моделювання руху робота-маніпулятора?

Які рівняння описують роботу електромеханічних приводів у маніпуляторі?

Як враховувати динамічні навантаження на зчленування маніпулятора?

Які типи управління можуть використовуватись у роботах-маніпуляторах?

Які параметри впливають на точність маніпулятора?

**Тема заняття 8.** Моделювання електромеханічної системи прокатного стану

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які процеси притаманні електромеханічним систем прокатних станів?

Які основні засади моделювання приводу прокатного стану?

Як моделюється взаємодія приводу з металом у процесі прокатки?

Які параметри мають ключове значення у моделюванні прокатних станів?

Як можна оцінити ефективність електроприводу у прокатному стані?

**Тема заняття 9.** Моделювання електромеханічної системи вітроенергетичної установки

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які фактори враховуються під час моделювання вітроенергетичних установок?

Як моделюються навантаження, що діють на лопаті турбіни?

Які рівняння описують перетворення вітрової енергії на електричну?

Як вплив зовнішніх факторів (вітер, погодні умови) впливає на моделювання?

Як можна підвищити ефективність моделювання для вітроенергетичних систем?

**Тема заняття 10.** Моделювання електромеханічної системи наземного безпілотного апарату

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які параметри руху моделюються у сис  
Тема заняттях наземних  
безпілотників?

Як враховуються дорожні та кліматичні умови при моделюванні?

Які системи управління необхідні автономного руху наземного апарату?

У чому особливість моделювання енергоспоживання наземного  
безпілота?

Як моделюються сенсори та системи навігації у наземному безпілотнику?

**Тема заняття 11.** Моделювання електромеханічної системи морського  
безпілота апарату

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які параметри враховуються під час моделювання руху морських  
апаратів?

Як моделюється вплив водного середовища на електромеханічну  
систему?

Які навігаційні системи важливі для морських безпілотників?

Як моделювати стійкість та управління рухом морського апарату?

У чому особливості моделювання системи енергоспоживання для  
морських безпілотників?

**Тема заняття 12.** Моделювання електромеханічної системи літального  
безпілота апарату

**Мета заняття:** опрацювання теоретичного матеріалу лекційного курсу.

**Питання для обговорення на практичному занятті:**

Які основні етапи моделювання руху літального апарату?

Як моделюються аеродинамічні властивості безпілотників?

Які системи управління важливі для автономного польоту літального  
апарату?

Як моделюються динамічні дії на безпілотник у польоті?

Які чинники впливають на моделювання енергоспоживання літальних  
апаратів?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Елементи автоматизованого електропривода/ М.Г.Попович, В.А.Гаврилюк, О.В.Ковальчук, В.І.Теряєв. Навчальний посібник. – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.
2. Автоматизований електропривод ч. 2. Навчальний посібник /В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. –204 с.
3. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи: Навч. посібник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2003.
4. Автоматизований електропривод машин та установок: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавр за освітньою програмою Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» / О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак. Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. –Електронні текстові дані (1 файл: 24,3Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 61с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41535>.
5. Теорія електропривода: Підручник/ М.Г.Попович, М.Г.Борисюк, В.А.Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г.Поповича. –К.: Вища школа, 1993. –494с.
6. М.Г. Попович, В.В. Кострицький. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія та практика). Навчальний посібник. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.: - Бібліогр.: 402 с. Укр. мовою.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э.Кравчик, М.М.Шлаф, В.И.Афонин, Е.А.Соболенская. –М.: Энергоиздат, 1982. –504с.
8. Підйомні установки: Навчально-методичний посібник/ М.Г. Попович, Б.М. Мацко. – Київ, НТУУ «КПІ» - 2002. – 149 с.
9. Теорія електропривода / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г.Поповича. Підручник. - К.: Вища школа, 1993. -494с.
10. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. Навчальний посібник. - К.: Либідь, 2005. – 680 с.
11. Елементи автоматизованого електропривода/ М.Г.Попович, В.А.Гаврилюк, О.В.Ковальчук, В.І.Теряєв. Навчальний посібник. – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.