

## СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

**Мета роботи:** навчитися складати розрахункові схеми механічної частини електропривода (ЕП) і визначати зведений момент інерції системи електродвигун-робоча машина.

### Програма роботи

- 1.1 Скласти вихідну розрахункову схему механічної частини електропривода вентилятора.
- 1.2 Вибрати елементи кінематичної схеми: передачу, діаметри тягових і ведених шківів передачі.
- 1.3 Визначити моменти інерції елементів схеми.
- 1.4 Скласти зведену схему механічної частини електропривода.
- 1.5 Визначити загальний зведений момент інерції системи. Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

### Загальні відомості і рекомендації

Механічна частина системи електропривод-робоча машина складається з ротора (якоря) електродвигуна, механічного передавального пристрою (системи передач) і виконавчого органу робочої машини, зв'язаних між собою кінематично.

Залежно від режиму роботи електродвигуна його ротор (якір) може бути джерелом або споживачем механічної енергії.

Механічний передавальний пристрій передає механічну енергію від електродвигуна до виконавчого органу робочої машини і навпаки. Крім того, за допомогою механічного передавального пристрою відбувається перетворення механічної енергії: обертальний рух перетворюється в поступальний або зворотно-поступальний, збільшується або зменшується швидкість руху і т. д. Механічними передавальними пристроями є ланцюгові, пасові, зубчасто-рейкові та інші передачі, редуктори, муфти, шатунно-кривошипні механізми та ін. Виконавчий орган робочої машини реалізує підведену до нього механічну енергію в корисну роботу, являючись таким чином споживачем механічної енергії. Іноді він може бути і джерелом механічної енергії, віддаючи, наприклад, на вал електродвигуна енергію, запасену обертовими частинами, піднятим вгору вантажем тощо.

Робота, яку виконує електродвигун або виконавчий орган робочої машини, визначається з рівняння:

при обертальному русі

$$W_{\omega} = \int_0^t M \cdot \omega \cdot dt ; \quad (1)$$

при поступальному русі

$$W_v = \int_0^t F \cdot v \cdot dt , \quad (2)$$

де  $M$  – обертовий момент, Н·м;  
 $\omega$  – кутова швидкість, рад/с;  
 $F$  – сила, Н;  
 $v$  – лінійна швидкість, м/с;  
 $t$  – час, с.

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом і при обертальному русі становить

$$P = \frac{dW_{\omega}}{dt} = M \cdot \omega ; \quad (3)$$

при поступальному русі

$$P = \frac{dW_v}{dt} = F \cdot v . \quad (4)$$

Сили і моменти, що розвиваються двигунним пристроєм (обертовим або лінійним електродвигуном), можуть бути рушійними або гальмівними. Рушійними вони бувають в двигунному режимі роботи, коли двигун приводить у рух виконавчий орган робочої машини, а гальмівними – у гальмівних режимах, коли виконавчий орган робочої машини є джерелом механічної енергії.

Сили і моменти статичних опорів, створювані виконавчими органами робочої машини, поділяються на реактивні і активні.

*Реактивними* називають сили і моменти статичних опорів, які виникають внаслідок руху як протидія механічної ланки на рух. До них належать сили і моменти, зумовлені тертям, опором матеріалу при обробці різанням, опором потоку повітря у вентиляторах або рідини у насосах і т. п. Реактивні сили і моменти завжди спрямовані проти руху і при зміні напрямку руху змінюють свій знак. Елементи механічної системи, які створюють реактивні сили і моменти, можуть бути тільки споживачами енергії.

*Активні* сили і моменти статичних опорів створюються сторонніми джерелами механічної енергії і виникають в механічній системі незалежно від її руху. До них належать сили і моменти, зумовлені тяжінням, стисканням, розтягуванням і скручуванням пружних тіл, силою вітру чи потоку падаючої води. Напрямок дії активних сил і моментів не залежить від напрямку руху і при зміні останнього вони зберігають свій знак. Джерело активної сили або моменту може споживати або віддавати механічну енергію. Так, вантаж, переміщуваний підйомником, при підніманні споживає механічну енергію від електродвигуна, а при опусканні віддає її електродвигуну, внаслідок чого останній працює в гальмівному режимі.

Механічна частина значної кількості систем електродвигун-робоча машина має складну кінематичну схему з багатьма ланками, які рухаються з різними швидкостями. Рух окремих ланок може бути обертовим, поступальним або складним. Кожний елемент кінематичної схеми має певну пружність, а в з'єднаннях елементів наявні зазори. При теоретичному аналізі такої системи потрібно скласти рівняння руху кожного елемента з

урахуванням впливу одного елемента на інший, а потім розв'язати ці рівняння разом. Розрахунок систем таким методом досить складний і проводиться в тих випадках, коли потрібна дуже висока точність (слідкуючі системи металообробних верстатів, радіотелескопів, механізми із гнучкими в'язами, довгими валами тощо).

У більшості випадків розрахунки ведуть із допущеннями, що механічна система складається з абсолютно жорстких елементів, які не деформуються і між якими немає зазорів. При такому допущенні за рухом одного елемента можна одержати інформацію про рух решти елементів системи. Найчастіше таким елементом вважають вал електродвигуна. При цьому реальну багатомасову систему замінюють найпростішою одномасовою без зазорів системою з обертальним рухом, еквівалентною в енергетичному відношенні реальній. Розрахункова схема системи зводиться до узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції  $J$ , на яку діє електромагнітний момент двигуна  $M_{\text{дв}}$  і сумарний, зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів  $M_{\text{с}}$ , до якого входять всі механічні втрати в системі.

В основу принципу зведення моментів статичних опорів до вала електродвигуна покладена рівність потужності системи до і після зведення.

При зведенні систем з обертовим електродвигуном до найпростішого виду можливі наступні випадки:

- зведення обертового руху до обертового;
- зведення поступального руху до обертового.

Для системи, що складається з електродвигуна  $M$  (рисунок 1), одноступінчастої передачі та одного виконавчого механізму  $BM$  рівняння балансу потужності дорівнює

$$P_2 \cdot \eta = P_M \quad (5)$$

де  $P_2$  – потужність на валу електродвигуна, Вт;

$P_M$  – потужність, що передається на вал виконавчого механізму, Вт;

$\eta$  – КПД передачі.

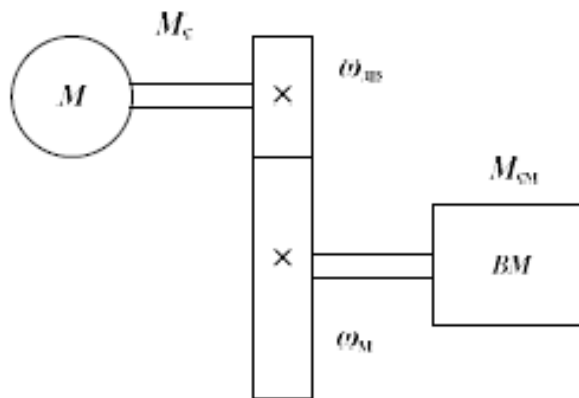


Рисунок 1 – Кінематична схема з обертовим виконавчим механізмом

Підставивши значення потужностей з виразу (3), одержимо

$$M_c \cdot \omega_{дв} \cdot \eta = M_{см} \cdot \omega_M \quad (6)$$

Звідки зведений до вала двигуна момент статичних опорів дорівнює

$$M_c = M_{см} \cdot \frac{\omega_M}{\omega_{дв} \cdot \eta} \quad (7)$$

або

$$M_c = \frac{M_{см}}{i \cdot \eta}, \quad (8)$$

де  $i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_M}$  – передаточне відношення передачі.

Якщо в системі є наявні елементи з поступальним рухом, наприклад, у підйомних механізмах вантаж масою  $m$  піднімається зі швидкістю  $v$  (рисунок 2), то з урахуванням (4) рівняння балансу потужностей становить

$$M_c \cdot \omega_{дв} \cdot \eta = F \cdot v, \quad (9)$$

де  $F$  – сила тяжіння вантажу, Н·м;  
 $v$  – швидкість руху вантажу, м/с.

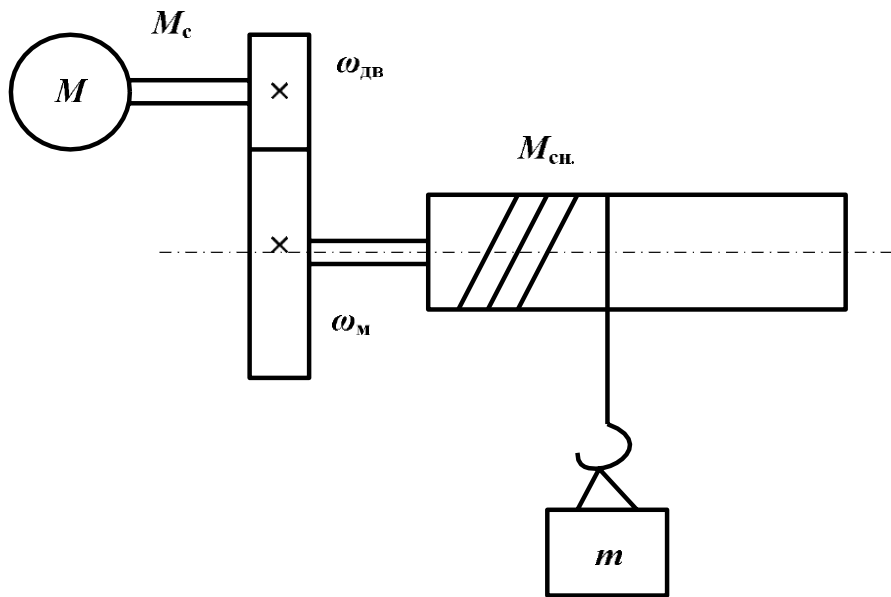


Рисунок 2 – Кінематична схема з ланкою, що рухається поступально

Але

$$F = m \cdot g, \quad (10)$$

де  $m$  – маса вантажу, кг;  
 $g$  – прискорення земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

Зведений до вала двигуна момент статичних опорів знаходимо за виразом

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega_{дв} \cdot \eta}. \quad (11)$$

При опусканні вантажу зі швидкістю  $v$  двигун працює в гальмівному режимі, момент від сил тертя в механізмах теж має гальмівний характер, тому вираз зведеного моменту має вигляд

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot v \cdot \eta}{\omega_{дв}}. \quad (12)$$

Рівняння балансу потужностей складних систем, які мають обертові виконавчі органи та елементи, що рухаються поступально (рисунок 3), записується

$$P_{дв} = P_{с1} + P_{с2} + \dots + P_{сn} + P_{пост}, \quad (13)$$

де  $P_{дв}$  – потужність на валу двигуна, Вт;

$P_{c1}, P_{c2}, P_{cn}$  – потужність, що витрачається на обертання  $i$ -го механізму, Вт;

$P_{пос}$  – потужність, що витрачається на привод механізму, що рухається поступально, Вт.

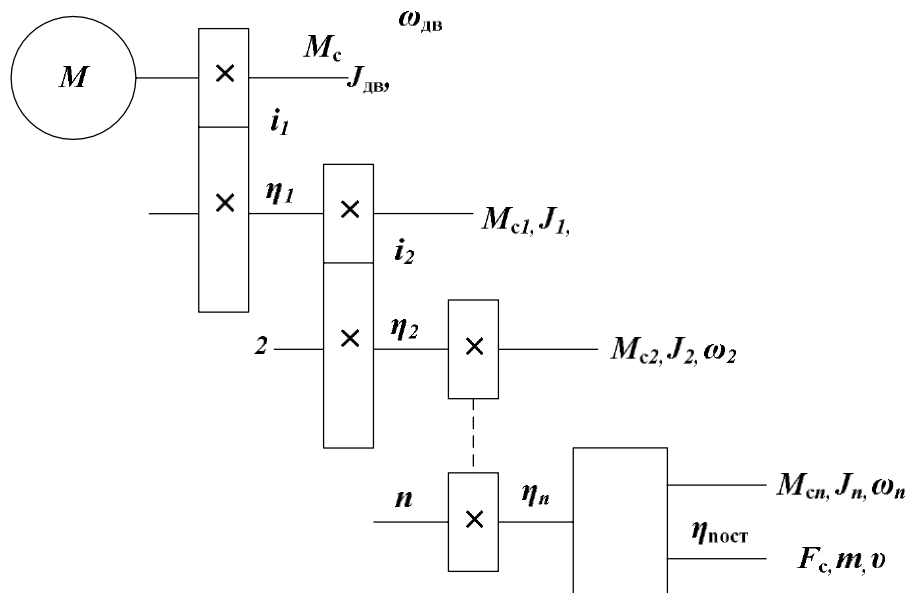


Рисунок 3 – Кінематична схема багатоланкової системи

Підставивши значення потужностей з виразів (3) і (4) і врахувавши втрати потужностей у передачах, рівняння (13) запишемо у вигляді

$$M_c \cdot \omega_{дв} = \frac{M_{c1} \cdot \omega_1}{\eta_1} + \frac{M_{c2} \cdot \omega_2}{\eta_1 \cdot \eta_2} + \dots + \frac{M_{cn} \cdot \omega_n}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{пост}}, \quad (14)$$

де  $M_c$  – зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів системи, Н·м;

$M_{c1}, M_{c2}, \dots, M_{cn}$  – момент статичних опорів окремих елементів системи, які рухаються обертально, Н·м;

$\omega_{дв}$  – кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  – кутові швидкості обертання окремих елементів системи, рад/с;

$F_c$  – статичне зусилля елемента, що рухається поступально, Н;

$v$  – лінійна швидкість елемента, що рухається поступально, м/с;

$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n, \eta_{пост}$  – відповідно коефіцієнти корисної дії передач між валами системи та передачі до елемента, що рухається поступально.

Розділивши рівняння (14) на  $\omega_{дв}$  одержимо

$$M_c = \frac{M_{c1}}{\eta_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{дв}} + \frac{M_{c2}}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_{дв}} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_{дв}} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{пост} \cdot \omega_{дв}}, \quad (15)$$

або

$$M_c = \frac{M_{c1}}{\eta_1 \cdot i_1} + \frac{M_{c2}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot i_1 \cdot i_2} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{пост} \cdot \omega_{дв}}, \quad (16)$$

де  $i_1, i_2, \dots, i_n$  – передаточні відношення передач між валами системи.

Зведення до вала електродвигуна моментів інерції системи і механічних її мас, які рухаються поступально, виконують на основі рівності запасів кінетичної енергії системи до і після зведення.

Для системи, зображеної на рисунку 3, рівняння балансу кінетичної енергії має вигляд

$$J \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} = J_{дв} \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (17)$$

де  $J$  – зведений до вала електродвигуна момент інерції системи, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{дв}$  – момент інерції ротора (якоря) електродвигуна і частин, які обертаються на його валу, кг·м<sup>2</sup>;

$J_1, J_2, \dots, J_n$  – моменти інерції елементів, які обертаються з валами 1, 2, ..., n, кг·м<sup>2</sup>;

$m$  – маса елементів, кг, які рухаються поступально зі швидкістю  $v$ , м/с.

Розділивши рівняння (17) на  $\frac{\omega_{дв}^2}{2}$  і замінивши відношення кутових швидкостей на відповідні передаточні числа, одержимо

$$J = J_{дв} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \dots \cdot i_n^2} + \frac{m \cdot v^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (18)$$

Для оцінки динамічних властивостей електропривода при перехідних процесах – пуску, гальмуванні, реверсуванні, переході від однієї швидкості до іншої тощо – користуються показником, який називають *коефіцієнтом інерції системи*  $FJ$ . Коефіцієнт інерції – це величина, яка показує, у скільки разів, зведений до вала електродвигуна момент інерції системи  $J_{дв}$ , більший за мо-

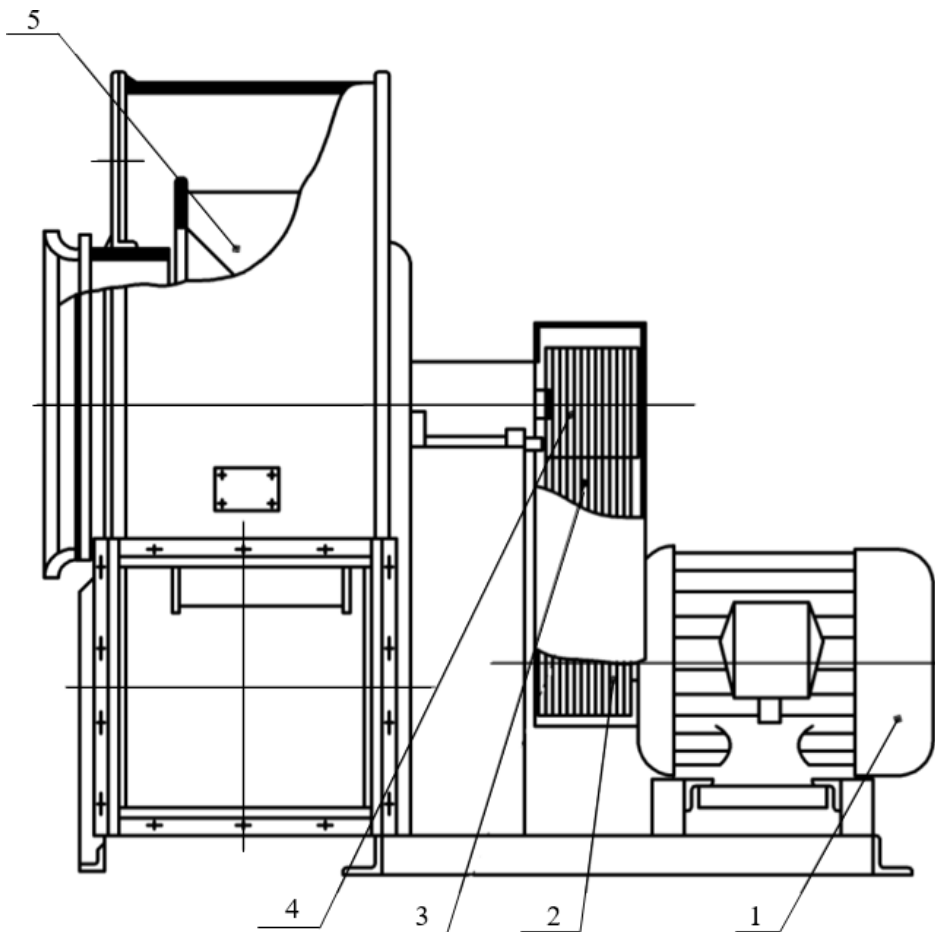
мент інерції ротора двигуна  $J_{дв}$ .

$$FJ = \frac{J}{J_{дв}}. \quad (19)$$

Відповідно до величини показника  $FJ$  всі види приводів поділяють на чотири категорії

$FJ$	Динамічні властивості приводу
$\leq 1,2$	Легкі
1,6; 2,0	Середні
2,5	Важкі
$\geq 4,0$	Дуже важкі

Наприклад, колесо відцентрового вентилятора насаджено на окремий вал, який зв'язаний з валом електродвигуна через пасову передачу (рисунок 4).



1 – електродвигун; 2 – тяговий шків; 3 – пасова передача; 4 – ведений шків; 5 – колесо вентилятора

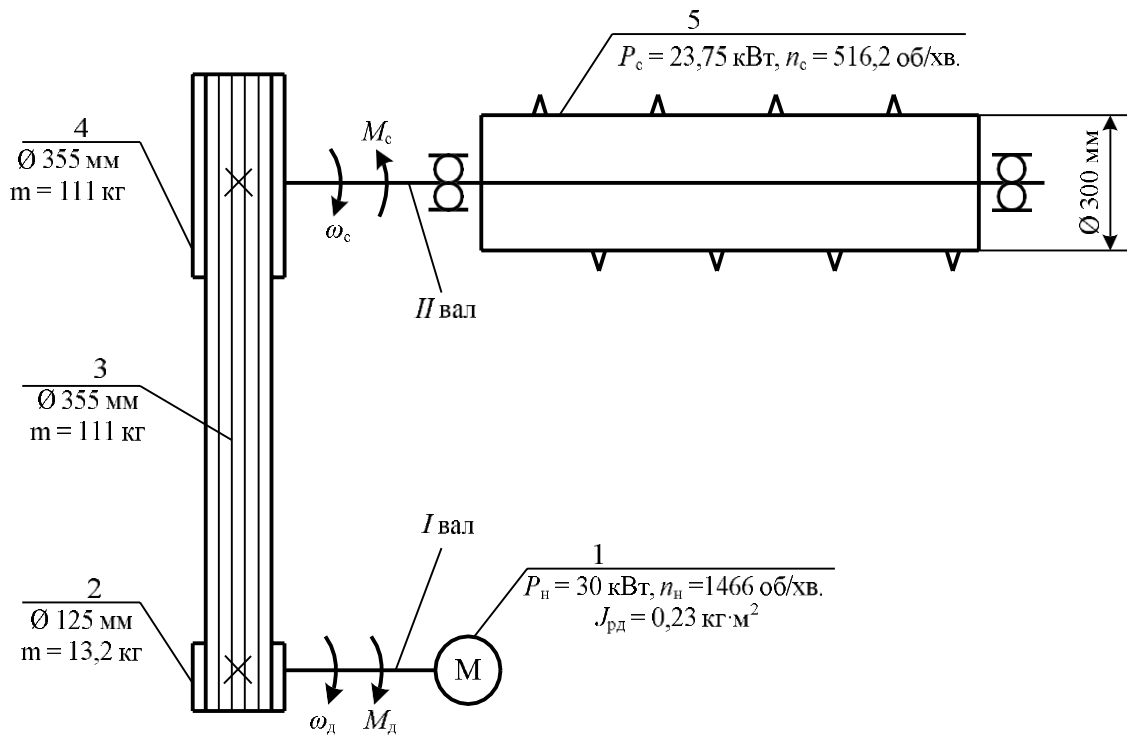
Рисунок 4 – Конструкція відцентрового вентилятора





На схемі (рисунок 5) зображені чотири елементи, які мають моменти інерції: електродвигун  $J_{дв}$ , тяговий шків  $J_2$ , ведений шків  $J_4$ , колесо вентилятора  $J_5$ .

Рисунок 5 – Зразок кінематичної схеми вентилятора



Вихідна розрахункова схема механічної частини електропривода вентилятора представлена на рисунку 6.

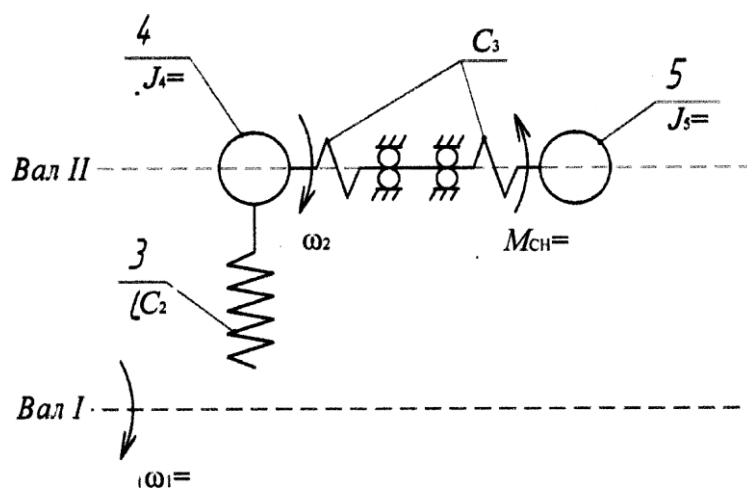


Рисунок 6 – Вихідна розрахункова схема механічної частини електропривода

Момент опору приводиться до вала електродвигуна за виразом

$$M'_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{сн}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}}, \quad (27)$$

де  $\eta_{\text{пер}}$  – ККД передачі, в.о.

#### 4 Приклад розрахунку

Звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів і моменти інерції відцентрового вентилятора (рисунок 5).

Вихідні дані для розрахунку вибрати з таблиці 1 згідно варіанта: тип електродвигуна АИР132S4, момент інерції ротора двигуна  $J_{\text{дв}} = 0,0280$  кг·м<sup>2</sup>; передаточне число  $i = 1,68$ ; діаметр колеса вентилятора  $D_5 = 0,8$  м; діаметр тягового шківa  $d_1 = 180$  мм; діаметр веденого шківa  $d_2 = 315$  мм; момент опору тягового шківa  $M_{\text{сн}} = 65$  Н·м; ширина шківa передачі  $B = 46,75$  мм.

Моменти інерції обертових частин визначаємо за виразом

$$J = \lambda \cdot m \cdot R^2,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт (для пасових шківів  $\lambda = 0,7$ ; для колеса вентилятора  $\lambda = 0,8$ );

$m$  – маса шківa (або колеса вентилятора), кг;

$R$  – зовнішній радіус шківa (або колеса вентилятора), м.

Масу шківa визначаємо за формулою

$$m = \rho \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot B \right),$$

де  $\rho$  – питома вага сталі,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – діаметр шківa, м;

$B$  – ширина шківa, м.

Визначаємо масу:

$$\text{– тягового шківa } m_2 = 7800 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,18^2}{4} \cdot 0,047 \right) = 9,32 \text{ кг};$$

$$\text{– веденого шківa } m_5 = 7800 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,315^2}{4} \cdot 0,047 \right) = 28,5 \text{ кг}.$$

Масу колеса вентилятора визначаємо за формулою

$$m = 22 \cdot D^2,$$

де  $D$  – діаметр колеса вентилятора, м.

$$m_5 = 22 \cdot 0,8^2 = 14,08 \text{ кг.}$$

Визначаємо моменти інерції обертових частин:

$$\text{– тягового шківa } J_2 = 0,7 \cdot 9,32 \cdot 0,09^2 = 0,053 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\text{– веденого шківa } J_4 = 0,7 \cdot 28,5 \cdot 0,152^2 = 0,461 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\text{– вентилятора } J_5 = 0,8 \cdot 17,6 \cdot 0,4^2 = 2,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу  $I$  за формулою

$$J_1 = J_{\text{ш}} + J_2,$$

де  $J_2$  – момент інерції тягового шківa,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$J_1 = 0,028 + 0,053 = 0,081 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу  $II$  за формулою

$$J_{4,5} = J_4 + J_5,$$

де  $J_4, J_5$  – відповідно моменти інерції веденого шківa і колеса вентилятора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$J_{4,5} = 0,461 + 2,25 = 2,711 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу  $III$ , зведений до першого вала за формулою

$$J'_{\text{ш2}} = \frac{J_{4,5}}{i^2},$$

де  $i$  – передаточне відношення пасової передачі, в.о.

$$J'_{\text{ш2}} = \frac{2,711}{1,68^2} = 0,961 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо загальний зведений момент інерції, який діє на валу  $I$

$$J_{\text{ш}} = J_1 + J'_{\text{ш2}};$$

$$J_{\text{пр}} = 0,081 + 0,961 = 1,042 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо момент опору, зведений до вала електродвигуна за виразом

$$M'_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{сн}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}},$$

де  $\eta_{\text{пер}}$  – ККД передачі, в.о.

$$M'_{\text{сн}} = \frac{65}{1,68 \cdot 0,95} = 40,73 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

### Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Рисунки конструкції відцентрового вентилятора, кінематичну схему вентилятора, розрахункову схему механічної частини електропривода.
- 4 Аналіз отриманих результатів.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Типорозмір електродвигуна	Момент інерції ротора ЕД, $J_{\text{дв}}$ , кг·м <sup>2</sup>	Передаточне число, $i$ , в.о.	Діаметр			Момент опору, $M_{\text{с.н}}$ , Н·м	Ширина шківів передачі, $B$ , мм
				коліса вентилятора, $D_5$ , м	тягового шківів, $d_1$ , мм	веденого шківів, $d_2$ , мм		
1	АИР71В4	0,0014	0,71	0,3	100	71	2,8	15
2	АИР71В4	0,0014	0,64	0,3	100	71	3,1	15
3	АИР71В4	0,0014	0,59	0,3	100	71	3,0	15
4	АИР80А4	0,0032	0,56	0,3	112	71	3,2	19,5
5	АИР80В4	0,0033	0,51	0,3	125	71	4,2	19,5
6	АИР71А4	0,0013	1,19	0,4	80	100	3,5	15
7	АИР71В4	0,0014	1,09	0,4	100	112	5,0	15
8	АИР80А4	0,0032	0,92	0,4	112	112	6,2	19,5
9	АИР80В4	0,0033	0,81	0,4	125	100	7,8	19,5

10	АИР90L4	0,0056	0,73	0,4	160	125	9,8	19,5
11	АИР100S4	0,0087	0,93	0,5	160	160	15,0	25,5
12	АИР90L4	0,0056	1,05	0,5	160	180	13,2	19,5
13	АИР80B4	0,0033	1,22	0,5	125	160	10,3	19,5
14	АИР80A4	0,0032	1,33	0,5	112	160	9,1	19,5
15	АИР71B4	0,0014	1,42	0,6	100	140	7,0	15
16	АИР80A4	0,0032	1,83	0,6	112	224	12,4	19,5
17	АИР80B4	0,0033	1,63	0,6	125	200	13,6	19,5
18	АИР100S4	0,0087	1,35	0,6	160	224	20,7	25,5
19	АИР100S4	0,0087	1,23	0,6	160	200	23,5	25,5
20	АИР100L4	0,0110	1,14	0,8	200	224	25,6	25,5
21	АИР100S4	0,0087	1,65	0,8	160	315	26,8	25,5
22	АИР100L4	0,0110	1,48	0,8	200	315	31,9	25,5
23	АИР112M4	0,0170	1,37	0,8	160	224	42,0	46,75
24	АИР112M4	0,0170	1,25	0,8	160	224	43,9	46,75
25	АИР132S4	0,0280	1,51	0,8	180	315	62,7	46,75

### Контрольні питання

- 1 Чим зумовлюються в механічних системах активні сили і моменти, реактивні сили і моменти?
- 2 Які сили і моменти в механічних системах можуть споживати або віддавати енергію, тільки споживати механічну енергію?
- 3 Як звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів механічної системи, що рухається поступально, що обертається?
- 4 Як звести до вала електродвигуна моменти інерції механічної системи, що рухається поступально, що обертається?
- 5 Що таке коефіцієнт інерції механічної системи?
- 6 Якими рівняннями описуються процеси нерівномірного поступального та обертового руху механічної системи з постійним моментом інерції?
- 7 Яким рівнянням описується процес нерівномірного поступального обертового руху механічної системи з моментом інерції, залежним від кута повороту механізму?
- 8 Що показує кінематична схема електропривода?
- 9 Що називається розрахунковою схемою механічної частини електропривода?
- 10 Які параметри вказуються на розрахунковій схемі механічної частини електропривода?