

КОЛЯДА О.Ф., ШЕВЧЕНКО В.Г.

APPLIED  
MECHANICS  
ПРИКЛАДНА  
МЕХАНІКА

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів  
(лист № 14/18.2-2041 від 14.09.2004)

2004

**ББК 30.12**  
**А66**  
**УДК 621.01:531.8 (075.8)**

**Коляда О.Ф., Шевченко В.Г.**

Applied mechanics. Прикладна механіка: Навчальний посібник. -  
Запоріжжя: ЗНТУ, 2004. -182 с.  
**ISBN 966-7809-40-4**

Книга Прикладна механіка є навчальним посібником із прикладної механіки для студентів спеціальності технічний переклад. Текст, поданий англійською та українською мовами на суміжних сторінках. Обсяг матеріалу обумовлений програмою з прикладної механіки для технічних вищих навчальних закладів. В кінці книги додається англо-російсько-український словник технічних термінів із теорії механізмів і машин, опору матеріалів і деталей машин. У словнику також наводяться деякі терміни із суміжних дисциплін – теоретичної механіки, інженерної графіки, конструкційних матеріалів.

*Автори:*

**Коляда Олександр Федотович**, кандидат технічних наук, доцент;

**Шевченко Володимир Григорович**, кандидат технічних наук, доцент.

*Рецензенти:*

**Ройтман Анатолій Беніамінович**, доктор технічних наук, професор,  
Федеральний університет Марангао, відділ фізики, Бразилія;

**Соболь Юлія Олександрівна**, кандидат філологічних наук, доцент,  
завідувач кафедри іноземних мов Запорізького національного  
технічного університету.

# ДИНАМІКА МЕХАНІЗМІВ

СТРУКТУРА МЕХАНІЗМІВ

КІНЕМАТИКА МЕХАНІЗМІВ

РЕЖИМИ РУХУ

ДИНАМІКА МЕХАНІЗМІВ

# КОНСТРУКЦІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МІЦНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ

ОПІР МАТЕРІАЛІВ

З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

СИЛОВІ ПЕРЕДАЧІ

МУФТИ

ПІДШИПНИКИ

ВАЛИ ТА ОСІ

## ВСТУП

Книга розроблена як навчальний посібник із прикладної механіки для студентів спеціальності технічний переклад. Текст, поданий англійською та українською мовами на суміжних сторінках. Посібник складається з таких розділів: динаміка, конструкція, матеріали та міцність механізмів.

У першому розділі розглядається структурний аналіз, кінематика, режими руху механізмів і динаміка механізмів із жорсткими та пружними ланками.

У структурному аналізі подані основні частини, визначається ступінь рухомості механізму, надані механізми з пасивними в'язями та зайвими рухомостями. Показана будова важільних механізмів за допомогою груп Ассура.

В підрозділі кінематика механізмів надане визначення передаточного відношення рядових та сателітних зубчастих механізмів.

При розгляданні режимів руху механізмів наведено рівняння енергетичного балансу та механічний коефіцієнт корисної дії.

В підрозділі динаміки розглянуто методи вирішення задач руху механізмів із жорсткими ланками заміною реального механізму умовним. Для механізмів із пружними ланками надано визначення частот вільних коливань.

У другому розділі розглядається міцність, конструкція, матеріали механізмів та розрахунки деталей машин: з'єднань, силових передач, муфт, підшипників, валів.

При розгляданні міцності матеріалів надані основні визначення: видів навантаження, геометричних характеристик перерізу, напружень, деформацій. Наведені формули для розрахунків напружень та деформацій при розтяганні, крутінні й вигині, а також коефіцієнта запасу при циклічному навантаженні. Приведені основні механічні характеристики конструкційних матеріалів.

Деталі машин (з'єднання, силові передачі, муфти, підшипники, вали) розглядаються з точки зору класифікації, конструкцій, матеріалів та розрахунків міцності й довговічності.

Контрольні питання та список використаної літератури наведено за розділами книги. У кінці книги надано англійсько-російсько-український словник використаних технічних термінів.

Навчальний посібник ґрунтується на матеріалах лекцій і практичних занять, що застосовуються при викладанні прикладної механіки в Запорізькому національному технічному університеті.

## ВІД АВТОРІВ

При вивченні технічних дисциплін і пакетів комп'ютерних програм, що забезпечують технічні розрахунки, виникає необхідність строгої відповідності позначень і визначень використовуваних параметрів.

У механіці більшість позначень запозичена з англійської мови. Технічні словники мають обмежену варіацію перекладу, що допускає неоднозначність тлумачення термінів. Це утрудняє як розуміння технічних дисциплін, так і створює складності при використанні розрахункових пакетів програм.

Це одна і, мабуть, головна причина, що спонукала побудувати підручник із “синхронним” перекладом тексту на англійській і українській мовах.

Другою особливістю книги є англо-російсько-український словник по прикладній механіці, що дозволяє уточнювати тлумачення різних технічних термінів.

Підручник має кілька рівнів подання прикладної механіки – від чисто описового до строгого викладу теорії динаміки, міцності й ін.. Це дозволяє формувати різний рівень навчання, а сам підручник може бути використаний не тільки для спеціальності технічний переклад, але і для інших спеціальностей з поглибленим вивченням прикладної механіки.

При створенні книги брали участь велика кількість фахівців. Усім їм щира вдячність. Автори вдячні Соболю Ю.О. і Сокіл Т.О. за спільне обговорення питань побудови книги, мовне й термінологічне її редагування, що дозволили зробити викладений матеріал більш прозорим і посильним для розуміння.

## ЗМІСТ

<b>1 ДИНАМІКА МЕХАНІЗМІВ</b>	
1.1 Структура механізмів .....	11
1.1.1 Основні елементи механізмів .....	11
1.1.2 Структурний аналіз механізму .....	13
1.1.3 Надлишкові в'язі та зайві рухомості в механізмі .....	15
1.1.4 Групи Ассура .....	17
1.2 Кінематика механізму .....	19
1.2.1 Передаточне відношення зубчатого механізму .....	19
1.2.2 Передаточне відношення рядової зубчатої передачі .....	21
1.2.3 Передаточне відношення сателітного механізму .....	23
1.3 Режим руху механізму .....	27
1.3.1 Режим руху. Рівняння енергетичного балансу машини .....	27
1.3.2 Механічний коефіцієнт корисної дії .....	29
1.3.3 Визначення механічного к.к.д. стандартних механізмів .....	33
1.4 Динаміка механізму з жорсткими ланками .....	39
1.4.1 Зведені момент інерції та момент сили .....	39
1.4.2 Рівняння руху механізму .....	41
1.4.3 Визначення швидкості вхідного вала редуктора .....	43
1.5 Нерівномірність руху механізму .....	45
1.5.1 Визначення нерівномірності руху .....	45
1.5.2 Діаграма "енергія-маса" .....	45
1.5.3 Визначення моменту інерції маховика за допомогою діаграми "енергія-маса" .....	49
1.5.4 Приклад. Визначення моменту інерції маховика .....	51
1.6 Динаміка механізму з пружними ланками .....	55
1.6.1 Жорсткість елементів механізму .....	55
1.6.2 Визначення частот вільних коливань механізму .....	57
Питання .....	61
Література .....	61
<b>2. КОНСТРУКЦІЯ, МАТЕРІАЛИ Й МІЦНІСТЬ МЕХАНІЗМУ</b>	
2.1 Міцність матеріалів .....	63
2.1.1 Реальний об'єкт та розрахункова схема .....	63
2.1.2 Зовнішні й внутрішні сили .....	65
2.1.3 Напруження .....	67
2.1.4 Деформації .....	69
2.1.5 Розтягання та стискання .....	69
2.1.6 Кручення стержня з круглим перерізом .....	73
2.1.7 Згинання .....	79
2.1.8 Міцність при циклічних напруженнях .....	81
2.1.9 Основні механічні характеристики матеріалів .....	93
2.1.10 Визначення допустимих напружень .....	95
2.2 З'єднання елементів машин .....	97

2.2.1 Типи з'єднань .....	97
2.2.2 Заклепкові з'єднання .....	97
2.2.3 Зварні з'єднання .....	99
2.2.4 Різьбові з'єднання .....	101
2.2.5 Шпонкові з'єднання .....	105
2.2.6 Шліцеві з'єднання .....	109
2.3 Силові передачі .....	111
2.3.1 Зубчаті передачі .....	111
2.3.2 Пасові передачі .....	119
2.3.3 Ланцюгові передачі .....	123
2.4 Некеровані і керовані муфти .....	127
2.4.1 Некеровані муфти .....	127
2.4.2 Керовані муфти .....	133
2.4.3 Самокеровані муфти .....	135
2.5 Підшипники .....	137
2.5.1 Підшипники ковзання .....	139
2.5.2 Підшипники кочення .....	141
2.6 Вали та осі .....	145
2.6.1 Конструкції валів та осей .....	145
2.6.2 Розрахунок міцності .....	147
2.6.3 Критична швидкість вала .....	151
Питання .....	153
Література .....	155
 АНГЛО-РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКИЙ СЛОВНИК .....	 156

# 1 ДИНАМІКА МЕХАНІЗМІВ

## 1.1 Структура механізмів

### 1.1.1 Основні елементи механізмів

Розглянемо механізм привода. Механічний привод застосовується для передачі руху від двигуна до робочої машини. На рисунку 1.1 показано привод прокатного стану.

Рух передається від двигуна змінного струму (1) вальцям (8) прокатного стану, що обробляють гарячі вилівки (10). Двигун постійного струму (6) живиться від генератора (5). Редуктор (7) зменшує швидкість обертання. Маховик (4) вирівнює навантаження на двигун (1) і робить рівномірним рух привода. Привод забезпечує необхідні швидкість, обертовий момент і нерівномірність руху вальців (8).

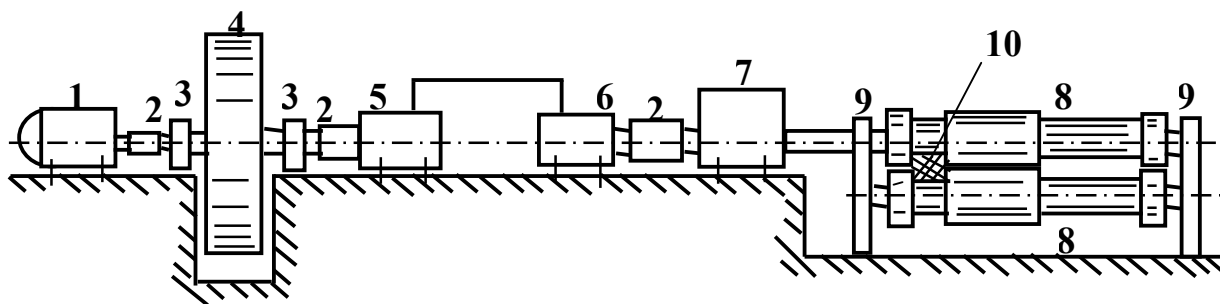


Рис. 1.1 – Привод прокатного стану

1-електричний двигун змінного струму; 2-муфти; 3-опори маховика;  
4-маховик; 5-генератор постійного струму; 6-двигун постійного струму;  
7-редуктор; 8-вальці прокатного стану; 9-опори вальців; 10-гаряча заготовка

Розрахунок привода передбачає розв'язання таких задач.

Привод повинен забезпечити необхідну швидкість кінцевої ланки. Звичайний привод має асинхронний двигун із частотою обертання 750, 1500, 3000  $xv^{-1}$ . Вихідний вал робочої машини має частоту обертання від 20 до 150  $xv^{-1}$ . Таким чином, зниження швидкості є однією з головних задач привода.

Досконалість конструкції характеризується мінімумом витрат енергії та максимумом механічного коефіцієнта корисної дії. Його розрахунок є однією із задач динаміки привода.

Сили на двигуні та робочій машині змінюються, тому привод рухається нерівномірно. Нормальна робота машини можлива при невеликій, допустимій нерівномірності руху. Звичайно, нерівномірність руху зменшують установленням додаткових мас у привод.

Таким чином, розрахунок мас і сил у приводі є однією з головних задач проектування привода. Використовують два методи розрахунку. Перший метод



визначає динаміку механізму з жорсткими та пружними ланками. Другий метод передбачає розрахунок резонансу у приводі та його запобігання.

Проектування приводу вимагає виконання структурного аналізу: визначення ланок, кінематичних пар і ступені його рухомості.

### 1.1.2 Структурний аналіз механізму

Механізм – це сукупність тіл, що призначена для перетворення руху. Механізм складається з ланок та кінематичних пар.

Ланка – це тверде тіло або сукупність нерухомо з'єднаних твердих тіл. Механізм має рухомі та нерухомі ланки. Нерухоми ланку називають стійкою. Ланку називають ведучою, якщо вона з'єднана з двигуном.

Кінематична пара – це рухоме з'єднання двох ланок. Кінематичні пари поділяють на класи. Клас визначається числом в'язів у парі (рис. 1.2). Ланки та кінематичні пари утворюють кінематичний ланцюг.

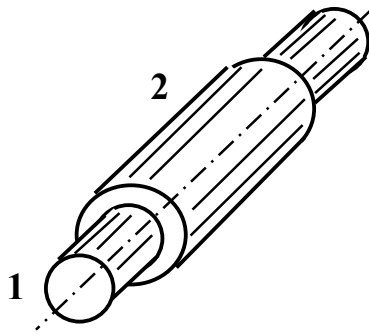


Рис. 1.2 – Кінематична пара четвертого класу

Ступінь рухомості механізму визначається кількістю ведучих ланок. Ступінь рухомості плоского механізму визначається за формулою (1.1)

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1.1)$$

де  $n$  – кількість рухомих ланок;  $p_5$  – кількість кінематичних пар 5-го класу;  $p_4$  – кількість кінематичних пар 4-го класу.

Механізм (рис. 1.3) має  $n = 3$  (ланки 1,2,3),  $p_5 = 4$  (пари А,В,С,Д),  $p_4 = 0$ . Для такого механізму маємо

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1,$$

Таким чином, ступінь рухомості дорівнює 1 і кількість рушійних ланок у механізмі також дорівнює одиниці. В механізмі може бути декілька рушійних ланок. Такий механізм називається диференціальним, так як він складає надані рушійними ланками рухи.

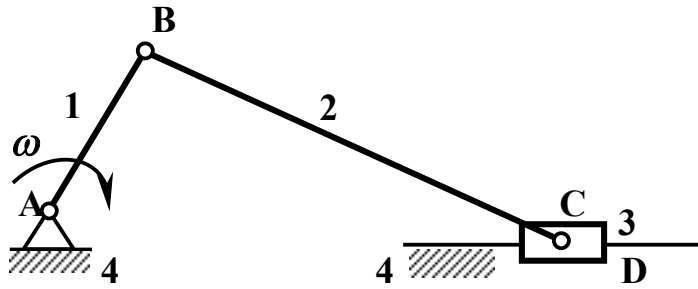


Рис. 1.3 – Кривошипно-повзунний механізм

Ступінь рухомості просторового механізму дорівнює

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (1.2)$$

де  $n$  – кількість рухомих ланок;  $p_1, p_2, \dots, p_5$  – кількість кінематичних пар відповідних класів.

Формули (1.1), (1.2) справедливі якщо кінематичні пари мають незалежні в'язі. Механізм може мати надлишкові в'язі та зайві рухомості.

### 1.1.3 Надлишкові в'язі та зайві рухомості в механізмі

В'язі та рухомості, які не впливають на рух механізму, називають надлишковими в'язями і зайвими рухомостями відповідно. Розглянемо плоский і просторовий чотирьох ланковий механізм (рис. 1.4). Ступінь рухомості плоского чотирьох ланкового механізму (рис. 1.4a) дорівнює

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad \text{де } n=3, p_5=4, p_4=0.$$

В цьому випадку ступінь рухомості дорівнює  $W=1$ .

Ступінь рухомості просторового чотирьох ланкового механізму (рис. 1.4a) дорівнює

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad \text{де } n=3, p_5=4, p_4=p_3=p_2=p_1=0.$$

Ступінь рухомості його буде  $W=-2$  і тут маємо три надлишкові в'язі. Усунемо надлишкові в'язі зниженням класу кінематичних пар (рис. 1.4b). Тоді механізм має  $n=3, p_5=2, p_4=1, p_3=1, p_2=p_1=0$  і його ступінь рухомості  $W=1$ . Надалі ми можемо знизити клас кінематичної пари  $B(4)$  до третього. В цьому випадку механізм (рис. 1.4c) матиме дві ступені рухомості – рух першої ланки та локальний рух другої ланки.

Механізми з надлишковими в'язями використовують для передачі великих навантажень (преси, двигуни внутрішнього згорання, молоти, тощо). Необхідний клас кінематичних пар у машині формується в процесі обкатки. Механізми із зайвими рухомостями використовують для передачі точного руху (керуючі механізми) або для компенсації похибок при виготовленні механізмів.

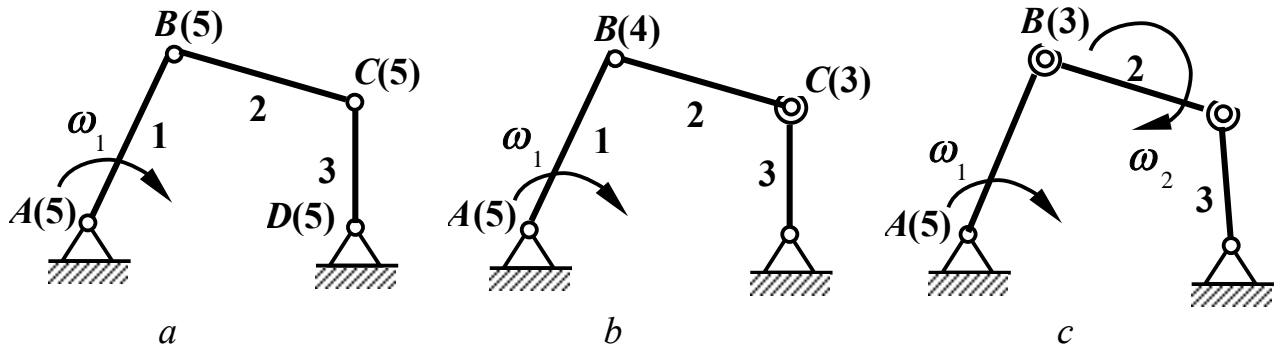


Рис. 1.4 – Просторовий чотирьох ланковий механізм  
*a* – із надлишковими в'язями, *b* – без надлишкових в'язів,  
*c* – із локальною рухомістю другої ланки

### 1.1.4 Групи Ассура

Відповідно до класифікації І.Артоболовського [1], що ґрунтується на ідеях Л.Ассура, можна побудувати механізм послідовним сполученням початкової вхідної ланки та груп Ассура.

Група Ассура – це кінематичний ланцюг, ступінь рухомості якого дорівнює нулю при приєднанні вільних кінематичних пар до стояка. Групи Ассура мають тільки кінематичні пари 5-го класу. В цьому разі ступінь рухомості групи Ассура плоского механізму дорівнює

$$W = 3n - 2p_5 = 0.$$

Група Ассура складається з парної кількості ланок і кратної три кількості кінематичних пар. Наприклад, механізм преса (рис. 1.5) має вхідну ланку (1) та групу Ассура другого (ланки 2,3) класу.

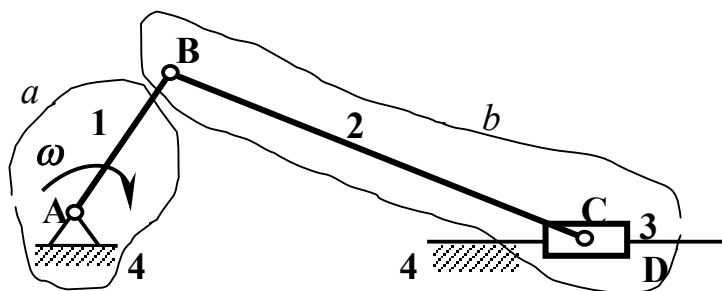


Рис. 1.5 – Механізм преса  
*a* – вхідна ланка; *b* – група Ассура другого класу

## 1. 2 Кінематика механізму

В кінематиці вивчають методи визначення руху механізму. Два метода найчастіше використовують у практиці: аналітичний і графічний. У розділі розглянуто методи аналізу рядових і сателітних зубчастих механізмів.

### 1. 2.1 Передаточне відношення зубчастого механізму

Простий зубчастий механізм має дві рухомі ланки, дві нижчі і одну вищу кінематичну пари. Складний механізм складається з декількох простих зубчастих механізмів. Зубчастий механізм може бути з циліндричними (осі коліс паралельні), конічними (осі коліс перетинаються) і гіперболічними (осі коліс схрещуються) колесами (рис. 1.6).

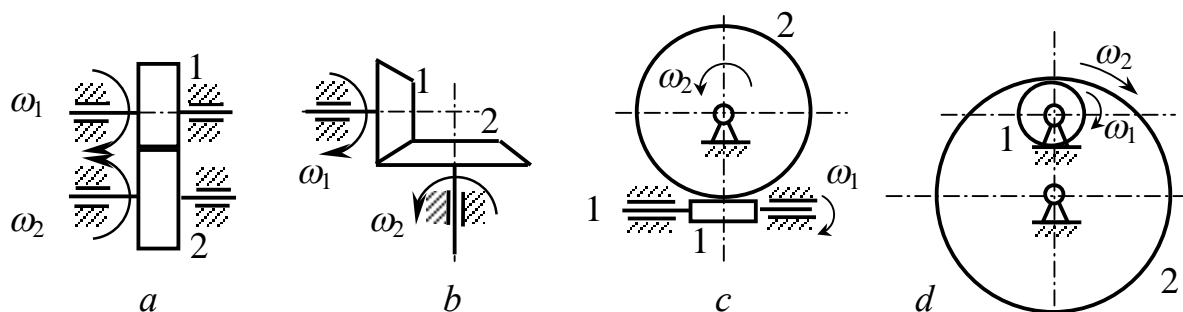


Рис. 1.6 – Циліндричні (a, d), конічні (b), і гіперболічні (c) зубчасті механізми

Зубчасті механізми можуть бути з зовнішнім і внутрішнім зачепленням. Колеса в механізмах із зовнішнім зачепленням обертаються в різні боки (рис. 1.6a), а в механізмах із внутрішнім зачепленням – в один бік (рис. 1.6d). Зубчастий механізм має ведуче (1) і ведене (2) колеса. Механізми можуть бути рядові і сателітні. Рядові механізми мають колеса з нерухомими осями, другі – мають рухомі осі.

Головною кінематичною характеристикою зубчатого механізму є передаточне відношення. Передаточне відношення позначається  $U$ . Передаточне відношення – це відношення кутової швидкості вхідного колеса до кутової швидкості вихідного колеса  $U_{12} = \omega_1 / \omega_2$  (рис. 1.6a). Якщо  $\omega = \pi \cdot n / 30$ , де  $n$  – частота обертання коліс в  $\text{хв}^{-1}$ , то передаточне відношення дорівнює

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm \frac{n_1}{n_2} . \quad (1.3)$$

У формулі (1.3) знак “плюс” вказує на обертання вхідного і вихідного коліс в один бік, а “мінус” – вказує на обертання цих коліс у різні боки.

В конічних колесах напрям обертання визначається за допомогою правила стрілок (рис. 1.6b).

Для циліндричних, конічних коліс швидкість в точці контакту (рис.1.6a, 1.6b) дорівнює

$$V_a = \omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2, \quad (1.4)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  - кутові швидкості коліс;  $r_1, r_2$  - радіуси коліс.

З рівнянь (1.3) та (1.4) одержуємо

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm \frac{n_1}{n_2} = \pm \frac{r_2}{r_1}.$$

Якщо кількість зубців коліс  $z_1, z_2$  а крок зубців  $p$ , то довжини кіл коліс дорівнюють

$$2\pi r_1 = pz_1, \quad 2\pi r_2 = pz_2$$

і передаточне відношення матиме вигляд

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm \frac{n_1}{n_2} = \pm \frac{r_2}{r_1} = \pm \frac{z_2}{z_1}. \quad (1.5)$$

У цій формулі знак “плюс” вказує на внутрішні зачеплення і знак “мінус” – на зовнішні зачеплення тому, що зовнішні зачеплення змінюють напрям обертання коліс.

### 1.2.2 Передаточне відношення рядової зубчатої передачі

Для отримання великого передаточного відношення використовують декілька простих зубчастих механізмів [1]. Таке з'єднання називають багатоступеневим. Зубчатий механізм з нерухомими осями коліс називають рядовим (рис. 1.7).

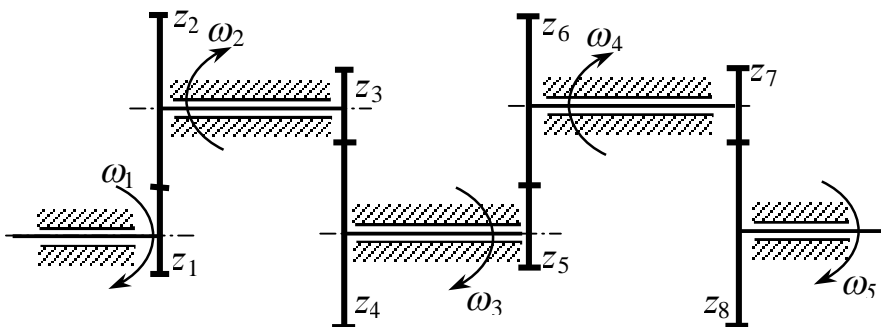


Рис. 1.7 – Багатоступеневий зубчатий механізм

