

Міністерство освіти і науки України
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка
Навчально-науковий інститут інформаційних
технологій і механотроніки
Навчально-науковий інститут нафти і газу

С.В. Попов, М.Я. Бучинський,
С.М. Гнітько, А.М. Чернявський

ТЕОРІЯ МЕХАНІЗМІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

Підручник для студентів механічних
спеціальностей закладів вищої освіти

Київ
Видавництво Ліра-К
2020

УДК 621.01
Т 33

*Рекомендовано до друку Науково-методичною радою
Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка
(протокол №4 від 28.03.2019 р.)*

Рецензенти:

Л.Г. Козлов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету;

Є.А. Фролов, доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування Навчально-наукового інституту інформаційних технологій та механотроніки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Попов С.В.

Теорія механізмів технологічних машин : підручник / С.В. Попов, М.Я. Бучинський, С.М. Гнітько, А.М. Чернявський. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020 268 с.

ISBN 978-617-7910-90-8

Основу цього підручника становлять загальні методи аналізу та синтезу механізмів, за яким студенти мають вивчити раціональну побудову структури сучасної технологічної машини під час її проектування.

Для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти та фахівців механічного профілю експлуатації та конструювання технологічних машин для підвищення кваліфікації.

УДК 621.01

ISBN 978-617-7910-90-8

© Попов С.В., Бучинський М.Я.,
Гнітько С.М., Чернявський А.М., 2020
© Видавництво Ліра-К, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ.....	9
1.1 Основа та ланки	10
1.2 Передача руху	13
1.3 Механізм.....	19
1.4 Кінематична схема	22
1.5 Функціональна здатність механізму.....	24
1.6 Передавальна функція.....	28
1.7 Утворення механізмів	30
1.8 Циклограми механізмів.....	35
1.9 Створення нових машин	37
1.10 Цільова функція.....	40
Питання для самоконтролю.....	41
2 СТРУКТУРА ТА КІНЕМАТИКА МЕХАНІЗМІВ.....	42
2.1 Структура механізмів.....	42
2.1.1 Важільні механізми	42
2.1.1.1 Кривошипно-повзунний механізм	42
2.1.1.2 Кривошипно-коромисловий механізм	44
2.1.1.3 Кривошипно-кулісний механізм	46
2.1.1.4 Деякі особливості важільних механізмів.....	47
2.1.1.5 Механізми періодичного повороту	49
2.1.1.6 Класифікація важільних механізмів.....	52
2.1.2 Кулачкові механізми	53
2.1.2.1 Кулачковий механізм із осьовим розташуванням роликового штовхача.....	54
2.1.2.2 Кулачковий механізм із ексцентричним розташуванням роликового штовхача.....	56
2.1.2.3 Кулачковий механізм із роликівим важелем, що гойдається	56
2.1.3 Фрикційні механізми.....	59
2.1.3.1 Фрикційна передача	60
2.1.3.2 Фрикційні варіатори	61
2.1.4 Зубчасті механізми	66
2.1.4.1 Види зубчастих зачеплень.....	71
2.1.4.2 Передавальна функція зубчастих передач.....	79
2.1.4.3 Основи теорії евольвентного зубчастого зачеплення	80
2.1.4.4 Виготовлення зубчастих коліс.....	84
2.1.4.5 Коефіцієнт форми зуба	88
2.1.4.6 Коефіцієнт контактних напружень	89
2.1.4.7 Основні показники зубчастого зачеплення.....	91

2.1.4.8	Опис деяких зубчастих механізмів	94
2.1.5	Гвинтові механізми	98
2.1.5.1	Теорія гвинтової пари	98
2.1.5.2	Опис деяких гвинтових механізмів	100
2.1.6	Гнучкі механізми: теорія пасової передачі	103
2.1.7	Комбіновані механізми	108
2.2	Метричний синтез	121
2.3	Кінематичний аналіз	123
2.3.1	Кінематичне дослідження важільних механізмів	124
2.3.2	Кінематика кулачкових механізмів	129
2.3.3	Кінематика зубчастих механізмів	136
	Питання для самоконтролю	142
3	ДИНАМІКА МЕХАНІЗМІВ	143
3.1	Силове дослідження	143
3.1.1	Класифікація сил, що діють	144
3.1.2	Реакції зв'язків	146
3.1.3	Приведена сила та приведений момент	147
3.1.4	Визначення реакцій зв'язку в кінематичних парах механізмів	148
3.2	Тертя	157
3.2.1	Внутрішнє в'язке тертя	158
3.2.2	Зовнішнє в'язке тертя	159
3.2.3	Зовнішнє тертя	161
3.2.3.1	Тертя ковзання	162
3.2.3.2	Тертя ковзання у кінематичних парах	166
3.2.3.3	Тертя кочення	170
3.2.3.4	Тертя ковзання змащених тіл	173
3.2.3.5	Використання процесу кочення	174
3.3	Рух механізмів під дією прикладених сил	179
3.3.1	Початкові міркування	179
3.3.2	Приведення мас та моментів інерції до вхідної ланки	179
3.3.3	Приведена сила та приведений момент	181
3.3.4	Рівняння руху механізму	183
3.3.5	Визначення закону руху механізму	188
3.3.5.1	Визначення закону руху механізму при $I_{np} = const$ та $M_{np} = M_{np}(\omega)$	189
3.3.5.2	Визначення закону руху механізму при $I_{np} = I_{np}(\varphi)$ та $M_{np} = M_{np}(\varphi)$	190
3.3.5.3	Визначення закону руху механізму при $I_{np} = I_{np}(\varphi)$ та $M_{np} = M_{np.pc}(\omega) - M_{np.co}(\varphi)$	191
3.3.6	Режими руху механізмів	193
3.3.7	Особливості періодичного усталеного руху	197
3.4	Регулювання руху механізмів	200

3.4.1	Загальні відомості.....	200
3.4.2	Визначення моменту інерції махових мас	202
3.4.3	Розрахунок маховика технологічної машини із електричним приводом.....	205
3.4.4	Визначення місця встановлення та розмірів маховика.....	210
3.4.5	Регулювання неперіодичних коливань швидкості машини	212
3.5	Зрівноваження механізмів	214
3.5.1	Сили, що діють.....	214
3.5.2	Умови зрівноваження.....	219
3.5.3	Методи зрівноваження	221
3.5.4	Зрівноваження мас, що обертаються	222
3.5.5	Міра незрівноваження.....	224
3.5.6	Зрівноваження мас, що рухаються поступально	226
3.6	Механічні критерії оцінювання	229
3.6.1	Коефіцієнт корисної дії.....	232
3.6.2	Коефіцієнт втрат механічної енергії.....	235
3.6.3	Втрати у кінематичних парах	236
3.6.3.1	Поступальна пара ковзання.....	236
3.6.3.2	Обертова пара ковзання.....	238
3.6.3.3	Вища кінематична пара	240
3.6.4	Коефіцієнт корисної дії шарнірно-важільного механізму.....	242
	Питання для самоконтролю.....	244
	АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	245
	ЛІТЕРАТУРА.....	248
	ДОДАТОК А. ЕЛЕМЕНТИ КІНЕМАТИКИ	250
	ДОДАТОК Б. АЛФАВІТИ І ЦИФРИ	264
	ДОДАТОК В. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ СІ.....	265

ВСТУП

Теорія механізмів є базовою основоположною дисципліною інженерної освіти для студентів механічних спеціальностей. Адже конструювання та експлуатація технологічних машин потребує великого обсягу знань. І саме теорія механізмів дає базові знання для застосування загальних прийомів аналізу і синтезу механізмів, дає можливість зрозуміти основні методи технічної побудови механізмів і їх теоретичного дослідження.

Вона дає можливість на основі нових технічних ідей ефективно, без помилок створювати нові технологічні машини; технічно грамотно експлуатувати сучасну техніку. Адже в теорії механізмів технологічних машин закладена фізична сутність явищ, що відбуваються під час руху механізмів.

Тому сподіваємось, що запропонований підручник зацікавить не тільки здобувачів вищої технічної освіти, а також зможе стати в нагоді конструкторам й інженерам, які займаються проектуванням, виробництвом та експлуатацією технологічних машин різного призначення.

Проектування технологічних механізмів розпочинають після детального вивчення й аналізу технологічного процесу. Технологічний процес – це сукупність різних примусових впливів при певних режимах на оброблювані матеріали, сировину, заготовки, в результаті яких змінюються геометричні параметри та (або) фізичні властивості початкових напівфабрикатів.

Існують безперервні та дискретні технологічні процеси. У цій роботі подано для розгляду теорію механізмів, які призначені для дискретних технологічних процесів. Такі процеси вимагають, щоб наприкінці певного проміжку часу – циклу механізми технологічної машини повторювали положення швидкості та прискорення складових ланок у певній послідовності, приводячи їх у початковий стан. Так забезпечується циклічність роботи технологічної машини.

Технологічний дискретний процес розбивають на окремі операції, що характеризуються певними та узгодженими переміщеннями за встановленою траєкторією робочого органу, тобто інструмента та оброблюваної заготовки. Будують циклограму роботи майбутньої машини, тобто схему узгодженості переміщень виконавчої ланки в часі.

Потім із числа відомих чи нових технічних рішень складають у декількох варіантах структурну схему машини. Умовою є отримання найбільшої технологічної продуктивності. Це можливо, передусім, при мінімальній кількості холостих ходів механізмів, що розглядаються. Складена структурна схема машини піддається кінематичному та силовому аналізу запропонованих варіантів з метою перевірки працездатності та визначення оптимального технічного рішення.

Механізм – це сукупність окремих складових частин-ланок, що несуть певне функціональне навантаження. Шляхом кінематичних пар утворюють кінематичний ланцюг, встановлений на основі. Він здатний перетворювати певні рухи (зазвичай обертові чи поступальні) вхідної ланки у необхідні рухи вихідної ланки.

Машина – це сукупність механізмів функціонально пов’язаних між собою. Оснащується приводом і системою керування, поєднаних єдиною метою в механічний пристрій, який здійснює задану програму. Машина самостійно чи за допомогою людини здійснює певний технологічний процес для перетворення енергії, матеріалів чи інформації.

Залежно від виконуваних функцій розрізняють такі машини: енергетичні, робочі, інформаційні.

Енергетичні машини призначені для перетворення енергії. До них належать генератори, що перетворюють механічну роботу в інший вид енергії, та двигуни. Останні перетворюють різні види енергії в механічну роботу.

Робочі машини здійснюють зміну форми, властивостей, стану та положення предметів праці. Це технологічні, транспортні та транспортуючі машини.

Інформаційні машини призначені для збирання, переробки, зберігання та використання наукової, технічної, виробничої, економічної та інших видів інформації.

У ХХ ст. з’явилися і у наш час набули широкого поширення машини нового покоління – *маніпулятори* із програмним керуванням, тобто *промислові роботи*.

У цьому підручнику подано матеріал про механізми одноопераційних технологічних машин, а саме: металорізальні верстати, ковальсько-пресове обладнання, машини для видобутку нафти, переробки сільськогосподарської сировини, розливання металу, виконання будівельних робіт, буріння свердловин тощо.

Машинобудівна промисловість виробляє велику кількість різноманітних механізмів. Створення нових технологічних машин потребує класифікації механізмів.

Методи розрахунку дозволяють виділити три групи механізмів:

- 1-а група – механізми із твердими та гнучкими нерозтяжними складовими частинами-ланками. Їх рух досліджують, використовуючи закони теоретичної механіки;

- 2-а група – механізми із твердими та пружними складовими частинами-ланками. Їх рух вивчається за допомогою методів теорії пружності для врахування деформації ланок, яка впливає на кінематику та динаміку технічної системи;

- 3-а група – гідравлічні та пневматичні механізми. Вивчаючи їх рух використовують закони гідро- та аеродинаміки.

У курсі теорії механізмів технологічних машин вміщено матеріал про першу групу механізмів, яку, відповідно до класифікації І.І. Артоболевського, можна розділити на сім підгруп: важільні, кулачкові, фрикційні, зубчасті, гвинтові, гнучкі, комбіновані.

Механізми, побудовані на основі зачеплення (зубчасті, черв’ячні) і тертя (фрикційні), називають **механічними передачами**. Вони слугують для передачі обертового або поступального рухів із перетворенням швидкості та

відповідною зміною обертового моменту. За допомогою механічних передач розв'язують такі питання:

- зниження (рідше підвищення) швидкості;
- ступінчасте або безступінчасте регулювання швидкості у широкому діапазоні при постійній потужності;
- зміна напрямку руху;
- приведення до руху одним двигуном декількох механізмів;
- приведення до руху декількома двигунами одного механізму.

Основними характеристиками механічних передач є:

- обертовий момент, що передається;
- частота обертання вхідного валу;
- передавальне відношення;
- коефіцієнт корисної дії.

Механічні передачі набули широкого поширення у приводах технологічних машин із постійним передавальним відношенням, а також у приводах малої та середньої потужності зі змінюваним передавальним відношенням.

За функціональним призначенням механізми поділяють на два класи: передавальні та виконавчі.

Передавальні механізми приводяться від джерел механічного руху. Зазвичай трансформують та передають обертовий рух від вхідного валу до вихідного при постійній потужності.

Виконавчі механізми отримують рух, зазвичай обертовий від передавального механізму або безпосередньо від двигуна, трансформують його, якщо потрібно змінюють характер руху і передають виконавчій ланці, що несе робочий орган. Останній виконує необхідні рухи для здійснення заданого технологічного процесу.

Так як у переважній більшості вихідні ланки – вали двигунів, що здійснюють обертовий рух, то передавальні механізми будують на основі механічних передач у вигляді редукторів, мультиплікаторів, варіаторів, коробок швидкостей, коробок передач, розподілювачів потужності і т.д. Для побудови виконавчих механізмів використовують механізми різного конструктивного виконання залежно від вимог технологічної операції, що виконується.

1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Технологічна машина – це сукупність функціонально зв'язаних механізмів, оснащених приводом та системою керування. Вони введені в механічний пристрій, що реалізує певну програму, з метою змінити форми, властивості, стану і положення предметів праці відповідно до заданого технологічного процесу.

За ступенем автоматизації технологічні машини поділяють на три класи: машини загального призначення, або універсальні; напівавтомати; автомати.

Універсальна машина – це механічний пристрій, в якому здійснюється часткова механізація ручної праці тієї частини технологічної операції, у якій відбувається безпосередня зміна стану, форми або якості заготовки, і зберігається участь людини в керування машиною.

Напівавтоматична машина самостійно здійснює один повний робочий цикл і вимагає зовнішнього втручання лише для повторення циклу. Наприклад, металорізальний, деревообробний та інші верстати. Така машина виконує увесь цикл обробки заготовки і повертає механізми верстата у початкове положення самостійно. Встановлення ж заготовки, пуск верстата та зняття обробленої деталі виконує оператор.

Автоматична технологічна машина – це механічний пристрій, що без участі людини виконує за заданою програмою усі операції в процесах отримання та перетворення матеріалів або заготовок.

Структура найпростішої технологічної машини представлена на рисунку 1.1. Машина складається із джерела механічного руху (двигуна) 1, передавального механізму 2, виконавчого механізму 3, системи керування 4.

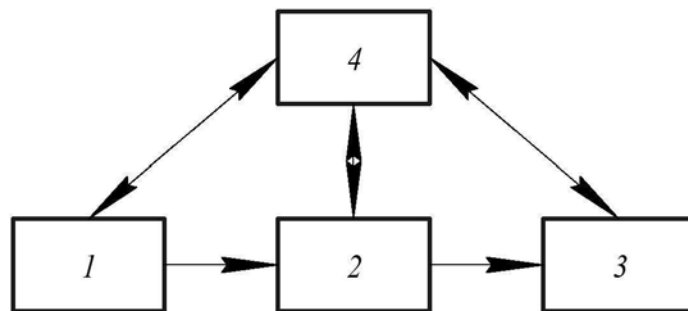


Рисунок 1.1 – Структура технологічної машини:
1 – джерело механічного руху (двигун); 2 – передавальний механізм;
3 – виконавчий механізм; 4 – система керування

У переважній більшості вихідні ланки двигунів є валами, що здійснюють обертовий рух. Далі будемо розглядати механізми, що одержують обертовий рух від джерела механічного руху.

Передавальні механізми призначені для зміни параметрів обертового руху (швидкості й моменту) вихідного валу джерела механічного руху до значень, що необхідні для вхідного валу виконавчого механізму.

Виконавчі механізми, переважно, отримують рух від передавальних механізмів. Рідше, безпосередньо від двигуна. Слугують для безпосереднього виконання певних операцій заданого технологічного процесу і трансформують не лише параметри обертового руху, а якщо потрібно, то і характер руху вхідного валу в задані рухи вихідної ланки за визначеною траєкторією. Вихідні ланки виконавчих механізмів оснащують робочими органами, тобто інструментом, що здійснює певні та узгоджені переміщення відносно заготовки, що обробляється, або матеріалу на відповідних технологічних режимах [1-11].

1.1 Основа та ланки

Як передавальні, так і виконавчі механізми складаються із окремих складових частин. Нерухому частину механізму (станину, корпус, раму, стійку, каркас тощо), на якій базуються рухомі частини, називають **основою**.

Рухомі частини механізму, що представляють собою монолітні деталі, або групу жорстко скріплених деталей, що не мають між собою відносного руху і несуть певне функціональне навантаження при роботі механізму, називають **ланками**. У теорії механізмів технологічних машин ланки розглядають як абсолютно тверді тіла. Залежно від конструктивного виконання, характеру руху відносно основи і функціонального призначення ланки називають так: кривошипом, коромислом, шатуном, повзуном, кулісою, кулачком, штовхачем, крейцкопфом, поршнем, циліндром, гвинтом, гайкою, зубчастим колесом, рейкою, черв'яком, черв'ячним колесом, шківом, зірочкою, штоком тощо. Ланки, що обертаються, монтують на валах або осях. На рисунку 1.2 представлено види ланок.



Рисунок 1.2 – Ланки механізмів, аркуш 1:
а – кривошип; б – коромисло; в – шатун; г – повзун; д – куліса; е – кулачок



Рисунок 1.2 – Ланки механізмів, аркуш 2:

ж – штовхач; з – крейцкопф; и – поршень; к – циліндр; л – гвинт і гайка; м – зубчасте колесо; н – рейка; п – черв'як; р – черв'ячне колесо; с – шків; т – зірочка; у – шток

Нижче наведено описи деяких ланок:

- **кривошип** – ланка важільного механізму, яка здійснює повний оберт навколо осі, що пов'язана з основою;

- **коромисло** – ланка важільного механізму, яка здійснює неповний оберт навколо осі, що пов'язана із основою;