

Кушніров П. В., Євтухов А. В., Дегтярьов І. М.

**СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ**

Навчальний посібник

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Кушніров П. В., Євтухов А. В., Дегтярьов І. М.

СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету

Суми
Сумський державний університет
2023

УДК 621.9:519.876.5(075.8)(0.034)
К 96

Рецензенти:

В. Б. Тарельник – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету;
І. В. Павленко – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
як навчальний посібник
(протокол № 2 від 8 вересня 2022 року)*

Кушніров П. В.

К 96 Системно-структурне моделювання технологічних процесів і систем : навчальний посібник / П. В. Кушніров, А. В. Євтухов, І. М. Дегтярьов. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 134 с.

Навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» та вивчають дисципліну «Системно-структурне моделювання технологічних процесів і систем». Він також буде корисним для здобувачів освіти інших програм спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 132 «Матеріалознавство» та 133 «Галузеве машинобудування».

Навчальне видання містить сім теоретичних тем, що охоплюють питання термінології, класифікації, формалізації технологічних процесів і систем машинобудівних виробництв, методів оцінювання їх ефективності й структурно-параметричної оптимізації.

УДК 621.9:519.876.5(075.8)(0.034)

© Кушніров П. В., Євтухов А. В., Дегтярьов І. М.,
2023

© Сумський державний університет, 2023

Зміст

	С.
Тема 1 Вступ	5
1.1 Мета й завдання курсу	5
1.2 Основні поняття систем. Системний об'єкт і системний процес	6
1.3 Структура технологічного процесу та механоскладального виробництва	13
1.4 Структурні методи досліджень у науці	17
<i>Запитання для самоперевірки</i>	22
Тема 2 Класифікація, опис та ієрархія систем	24
2.1 Загальна класифікація систем	24
2.2 Класифікація технічних систем	26
<i>Запитання для самоперевірки</i>	33
Тема 3 Опис взаємодії складових частин складних об'єктів і систем	34
3.1 Кількісне оцінювання елементів систем	34
3.2 Зв'язки системних об'єктів та процесів із навколишнім середовищем	41
<i>Запитання для самоперевірки</i>	43
Тема 4 Проектування технічних систем	44
4.1 Етапи створення нової технічної системи	44
4.2 Комплекс основних ознак якості продукції технічних систем	50
4.3 Кількісне оцінювання якості виробів	54
<i>Запитання для самоперевірки</i>	56
Тема 5 Теоретико-множинні принципи класифікації елементів технологічних процесів і систем	57
5.1 Формалізація об'єктів за допомогою символів ..	57
5.2 Символічні визначення верстатів, інструментів та пристроїв як множин, що співвідносяться між собою	58
5.3 Загальні принципи систематики елементів технологічної системи за ознаками механізації	60
5.4 Класифікація верстатів	65

5.5	Класифікація металообробних та слюсарно-складальних інструментів	66
5.6	Класифікація встановлювальних і слюсарно-складальних пристроїв	73
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	75
Тема 6	Дослідження технологічних процесів механо-складального виробництва на рівні середніх та елементарних структурних утворень	76
6.1	Класифікація елементів технологічної системи та їх оцінювання за стадіями розвитку.	76
6.2	Стохастична природа технологічної операції й технологічного процесу	84
6.3	Узагальнена структурна модель технологічної операції	88
6.4	Структурні моделі та приклади безелементних, одно-, дво- й триелементних операцій	91
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	95
Тема 7	Особливості багаторівневого проектування технологічних процесів і систем	96
7.1	Нерівномірність розвитку й старіння елементів технологічної системи	96
7.2	Неузгодженість технологічної системи в разі ізольованого удосконалення її елементів	100
7.3	Функціональна, часова та просторова структури технологічного процесу	105
7.4	Теоретичні закономірності побудови принципової схеми технологічного процесу	110
7.5	Параметрична оптимізація операції й технологічного процесу	124
7.6	Структурний синтез під час проектування технологічних процесів	126
7.7	Методи проектування технологічних процесів	128
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	130
	Список літератури	131



Тема 1 Вступ

1.1 Мета й завдання курсу

Лекції є складовою частиною курсу «Системно-структурне моделювання технологічних процесів і систем» (ССМТПіС).

Мета дисципліни – на основі базових знань із технології машинобудування розвинути в студентів системне мислення в галузі оптимального технологічного проектування на основі побудови ефективних моделей складних об'єктів. Це також спонукає до застосування й подальшого розвитку методології системно-структурного моделювання випускником ЗВО на виробництві як науково обґрунтованого методу вдосконалення технологічних процесів.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен знати структурні методи побудови й удосконалення технологічних процесів, теоретико-множинні принципи класифікації елементів технологічної системи, технологічні закономірності синтезу маршруту механічної обробки деталей. Також студент повинен уміти графічно інтерпретувати взаємозв'язок системних об'єктів і відношень множин; робити структурно-класифікаційний аналіз та систематику елементів технологічної системи (верстатів, пристроїв, інструментів) за різними ознаками; визначати періоди оптимального функціонування й межі технічної новизни технологічних систем; розробляти функціонально-структурні моделі технологічних процесів; раціонально розподіляти функції між технологом та ЕОМ під час побудови маршруту оброблення; оцінювати рівень прогресивності технології.

Необхідними базовими навчальними дисциплінами для вивчення системно-структурного моделювання технологічних процесів є вища математика, інженерна й комп'ютерна графіка, інформатика, основи систем автоматизованого проектування, технологічні основи машинобудування, теоретичні основи технології виробництва деталей і складання машин, технологія обробки типових деталей та складання машин.

1.2 Основні поняття систем. Системний об'єкт і системний процес

У сучасному світі фахівці в різних галузях знань постійно стикаються з необхідністю вирішувати складні проблеми, спричинені складністю самого навколишнього світу, як природного (природи), так і штучного (техносфери).

Для того, щоб успішно впоратися з цим завданням, недостатньо розгляду окремих елементів або питань. Необхідно розглядати їх у *системі*, з урахуванням численних взаємозв'язків та специфічних властивостей.

Для виконання подібних завдань (наприклад, у технічній галузі – проєктування технічних пристроїв) було створено безліч підходів, методів, прийомів, що в процесі свого розвитку й узагальнення почали становити цілі наукові напрямки (системний аналіз, системотехніка, теорія структур та ін.). Також розглядалися питання про системність мислення й системність навколишнього світу. До останнього часу це робили винятково філософи: матеріалісти та ідеалісти, метафізики й прихильники діалектики, агностики та ті, які були переконаними в пізнаваності світу. Усі вони мали різні думки щодо них.

Наприклад, англійський філософ, історик, політичний діяч та засновник емпіризму метафізик Ф. Бекон (1561–1626) доводив, що розумові побудови повністю довільні й не відповідають нічому в природі. Він писав: «Людський розум в силу своєї схильності легко передбачає в речах більше порядку і одноманітності, ніж їх знаходить. І в той же час, як багато в природі є одиничним і зовсім не має собі подоби, він придумує паралелі, відповідності та відносини, яких немає».

Голландський філософ-матеріаліст XVII ст. Б. Спіноза (1632–1677) висловлювався в абсолютно протилежному дусі: «Порядок та зв'язок ідей є тими ж самими, що і порядок та зв'язок речей», оскільки «субстанція мисляча і субстанція протяжна складають одну і ту ж субстанцію».

Німецький філософ засновник німецької класичної філософії І. Кант (1724–1804) вважав, що ми повинні «припускати систематичну єдність природи неодмінно як об'єктивно значиме і

необхідне», а системність розуму покликана шукати в природі цю речовину. Ним були написані фундаментальні філософські праці, що забезпечили йому репутацію одного з видатних мислителів XVIII століття та зробили величезний вплив на подальший розвиток світової філософської думки.

Вважають, що слово «система» з'явилося в Стародавній Греції (2500–2000 р. до н.е.) та означало «поєднання», «організм», «організація», «союз», а також «щось, поставлене разом, наведене в порядок». А першу природничу (механічну) картину світу людство має завдяки ідеям Г. Галілея (1564–1642) та І. Ньютона (1642–1727). Ними була вироблена певна концепція системи з такими категоріями, як річ і властивості, ціле й частина. Далі в німецькій класичній філософії глибоко та ґрунтовно розробили ідею системної організації наукового знання. Структура наукового знання стала предметом спеціального філософського аналізу. Теоретичне природознавство XIX–XX ст. надало розрізнення *об'єкта й предмета* пізнання, підвищення ролі *моделей* у пізнанні, дослідження системоутворювальних принципів (породження властивостей цілого з властивостей елементів і властивостей елементів із властивостей цілого).

У 1834 році французький фізик, математик і натураліст А.-М. Ампер опублікував книгу, що містить класифікації всіляких наук зокрема, тоді невідомих. Серед них Ампер виділив спеціальну науку про управління державою й назвав її *кібернетикою* що спочатку означало управління кораблем, а потім одержало більш широке значення мистецтва управління взагалі.

Російський соціал-демократ, філософ, економіст О. О. Богданов (Малиновський) у тритомній праці «Тектологія» (виданій у двадцятих роках минулого століття) пояснює процеси розвитку природи та суспільства на основі принципу рівноваги, запозиченого з природознавства. Усі країни, що розвиваються, усі об'єкти природи й суспільства є, за О. О. Богдановим, цілісними утвореннями або системами, що складаються з багатьох елементів. Рівноважний стан системи автор розглядає не як раз і назавжди заданий, а як «динамічну» або «рухливу» рівновагу. Усі об'єкти й процеси мають певний ступінь, рівень

організованості. Усі явища, на його думку, – безперервні процеси організації та дезорганізації. Рівень організації тим вищий, чим сильніше властивості цілого відрізняються від простої суми властивостей його частин. Характерною рисою теорії рівноваги О. О. Богданова є твердження, що протилежності повинні збалансувати, урівноважити одна одну і лише таким шляхом досягається стійкий стан системи. У системах, що розвиваються, одночасно діють дві протилежні тенденції: підвищення стійкості в результаті інтеграційних процесів, прагнення до рівноваги й зниження стійкості, спричинене появою «системних протиріч». Протиріччя ці, на відомому рівні їх розвитку, здатні призводити до криз. Рано чи пізно системні суперечності посилюються до того, що переважають організаційний зв'язок системи; тоді повинна настати криза, що призводить або до її перетворення, або до розпаду, краху.

У 1948 році американський вчений, видатний математик і філософ, основоположник кібернетики та теорії штучного інтелекту Н. Вінер опублікував книгу під назвою «Кібернетика». Спочатку він визначив кібернетику як «науку про управління та зв'язки у тварин і машинах», потім розширив її на суспільство. Його наукові праці стали віхою в розвитку понять системності та управління. З'явилися інші визначення. Наприклад: «кібернетика – це наука про оптимальне управління складними динамічними системами» (А. І. Берг); «кібернетика – це наука про системи, що сприймають, зберігають, переробляють і використовують інформацію» (А. М. Колмогоров). У 1950 р. була оприлюднена загальна теорія систем австрійського біолога Л. Берталанфі, – паралельний, незалежний щодо кібернетики, підхід до науки про системи. Учений намагався відшукувати структурну подібність законів, установлених у різних дисциплінах, і, узагальнюючи їх, виводити загальносистемні закономірності. Він є засновником узагальненої системної концепції під назвою «Загальна теорія систем», постановником системних завдань у сфері розроблення математичного апарату опису типологічно неподібних систем. У його працях розглянуто обмін системи речовиною, енергією та інформацією (негативною ентропією) з навколишнім середовищем, за якого у відкритій системі встановлюється динамічна рівновага, що може бути спрямованою на ускладнення організації.

Бельгійсько-американський фізик і хімік І. Пригожин працював у галузі *синергетики* (це міждисциплінарна наука, що займається вивченням процесів самоорганізації й виникнення, підтримки стійкості та розпаду структур і систем різної природи на основі методів математичної фізики). Він досліджував термодинаміку нерівноважних фізичних систем (Нобелівська премія з хімії 1977 р.) і встановив, що виявлені ним закономірності є справедливими для систем будь-якої природи. Учений ніби заново відкрив відомі властивості систем, але крім цього запропонував нову теорію динаміки систем. Згідно з його дослідженнями, матерія не є пасивною субстанцією; їй властива спонтанна активність, викликана нестійкістю нерівноважних станів, у які приходять система в результаті взаємодії з навколишнім середовищем. Так реалізується механізм самоорганізації систем, водночас в особливі «переломні» моменти (точки біфуркації) принципово неможливо передбачити, стане система менш або більш організованою.

Отже, можна зробити загальний висновок, що сучасна наука бачить світ як нескінченну ієрархію систем, яка безперервно розвивається. А системність нашого мислення впливає із системності світу.

Після Другої світової війни виник один із нових напрямків у галузі теорії систем – *системотехніка*. Це науково-технічна дисципліна, що охоплює питання проектування, створення, випробування та експлуатації складних систем. Під час розроблення таких систем виникають проблеми, що стосуються не лише властивостей їх складових частин (елементів, підсистем), а й цілого (загальносистемні проблеми). Для вирішення проблем системотехніки здебільшого застосовують методи дослідження складних систем із залученням математичної логіки та статистики, теорії алгоритмів, комбінаторики, теорії множин, теорії графів, теорії ігор, теорії ситуацій, теорії масового обслуговування, теорії інформації та ін.

Системний підхід, застосований для вивчення складних процесів, має свій понятійний і методологічний апарати. Розглянемо певні поняття цього підходу.

Під *системним об'єктом* або *процесом* зазвичай розуміють об'єкти або процеси будь-якої природи, які можна

умовно або фізично розчленувати на сукупність більш простих взаємозалежних між собою частин, що є єдиним цілим. Відношення характеризують зв'язок між частинами та їхніми властивостями, за допомогою яких частини й елементи поєднуються в систему. Крім того, кожна частина може бути розглянута як складний об'єкт, що складається з простіших елементів. Зважаючи на це, до категорії системних належать не всі об'єкти й процеси, а тільки ті, що складаються з окремих частин та елементів і мають цілісний характер функціонування.

Кожен системний об'єкт або процес має визначену *структуру*, під якою розуміють сукупність стійких відношень між частинами цілісного об'єкта або процесу.

Властивості та функції системних об'єктів не зводяться безпосередньо до суми властивостей і функцій їх складових елементів. Вони мають нові функції та властивості, яких може не бути в окремих елементах. Наприклад, зібраний з окремих деталей вузол є складною системою (системним об'єктом). Він характеризується новими властивостями й функціями, яких немає в окремих деталях. *Емерджентність* (від англ. emerge – виникати, з'являтися) – це те, що не зводить властивості системи та системних об'єктів до суми властивостей елементів, із яких вони складаються.

Дамо визначення основних понять теорії систем, використовуваних під час аналізу системних об'єктів і процесів, зокрема технологічних процесів та технологічних систем.

Об'єктом пізнання є частина реального світу, що виділяється і сприймається як єдине ціле протягом тривалого часу. Об'єкт може бути матеріальним та абстрактним, природним і штучним. Реально об'єкт має нескінченний набір властивостей різної природи. Тому систему як образ об'єкта задають на кінцевій множині відібраних для спостереження властивостей.

Елементом системи називають деякий об'єкт (матеріальний, енергетичний, інформаційний), що має ряд певних властивостей. Є багато визначень і самого поняття «система».

Система є комплексом елементів, що взаємодіють.

Система – це множина об'єктів разом із відношеннями цих об'єктів.

Система – це множина елементів, які перебувають у відношеннях або зв'язках один з одним, що утворює цілісність або органічну єдність

Терміни «відношення» і «взаємодія» використовують у найширшому сенсі, охоплюючи весь набір родинних понять, таких, як обмеження, структура, організаційний зв'язок, з'єднання, залежність та ін.

Отже, система S являє собою впорядковану пару

$$S = (A, R),$$

де A – множина елементів;

R – множина відношень між A .

Система – це повний, цілісний набір взаємозв'язаних елементів (компонентів), що взаємодіють між собою так, щоб могла реалізуватися функція системи. *Проста система* – це система, що не має розгалужених структур і складається з невеликої кількості взаємозв'язків та елементів. *Складна система* – це система, що складається з елементів різних типів і має різноманітні зв'язки між ними.

Поняття «система» виникає там та тоді, де й коли ми матеріально або умовляно проводимо замкнуту межу між необмеженим або деякою обмеженою множиною елементів.

Ті елементи з їх відповідною взаємною обумовленістю, що потрапляють всередину, утворюють систему, а ті, які залишилися за межами кордону, – множину, що називають «системним оточенням» (просто «оточенням») або «зовнішнім середовищем».

Будь-яку систему можна розглядати, з одного боку, як *підсистему* системи вищого порядку (надсистеми), а з іншого – як *надсистему* системи нижчого порядку (підсистеми). Наприклад, система «виробничий цех» входить як підсистема в систему більш високого порядку – надсистему «підприємство», а система «підприємство» може бути підсистемою «корпорації».

Зазвичай як підсистеми фігурують порівняно самостійні частини систем, виділені за певними ознаками, що мають певний ступінь свободи.

Зв'язки – це елементи, що здійснюють безпосередню взаємодію між елементами (або підсистемами) системи, а також з елементами й підсистемами оточення.

Прямі зв'язки призначені для заданого функціонального передавання речовини, енергії, інформації або їх комбінацій від одного елемента до іншого в напрямку основного процесу.

Зворотні зв'язки, здебільшого, виконують інформаційні функції, відображаючи зміну стану системи в результаті керувального впливу на неї. Відкриття принципу зворотного зв'язку стало визначною подією в розвитку техніки й мало винятково важливі наслідки. Процеси управління, адаптації, саморегулювання, самоорганізації, розвитку неможливі без використання зворотних зв'язків (рис. 1.1).

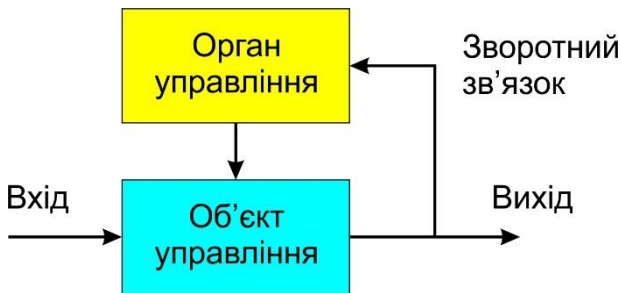


Рисунок 1.1 – Приклад зворотного зв'язку в системі

Функціонування системи полягає в переробці вхідних (відомих) параметрів і відомих параметрів впливу навколишнього середовища в значення вихідних (невдомих) параметрів з урахуванням факторів зворотного зв'язку.

Дамо також короткі визначення певних важливих термінів. *Вхід* – це все те, що змінюється під час протікання процесу (функціонування) системи. *Вихід* – це результат кінцевого стану процесу. *Процесор* – це переведення входу у вихід. *Ефективність системи* – співвідношення між заданим (цільовим) показником результату функціонування системи й фактично реалізованим.

1.3 Структура технологічного процесу та механоскладального виробництва

На сучасному етапі розвитку технологія машинобудування є наукою про закономірності перебігу робочих процесів, вибір оптимальних параметрів їх ведення й раціональні способи керування ними. Ця наука все істотніше перетворюється на безпосередню продуктивну силу, а процеси виробництва все більше розвиваються під її прямим впливом, стають її технологічним застосуванням. Практичною метою технології є забезпечення найекономічнішого виготовлення якісної продукції з високою продуктивністю.

Наукові основи сучасної технології машинобудування й близьких до неї дисциплін закладені працями багатьох видатних вітчизняних учених-машинобудівників – Б. С. Балакшина, М. Є. Єгорова, О. І. Каширіна, В. М. Кована, В. С. Корсакова, А. О. Маталіна, С. П. Митрофанова та ін.

Технологія, як і кожна наукова дисципліна, розвивається нерівномірно, проривами окремих її напрямків. Зокрема, одержала значний розвиток теорія точності обробки деталей і складання машин, відстали у своєму розвитку проблеми економічного обґрунтування вибору оптимальних варіантів технологічних процесів, але значно менше вивчені питання раціоналізації структури технологічних процесів (засновниками цього напрямку досліджень є Д. В. Чарнко, В. Д. Цветков, В. Т. Полуянов).

З курсу технології машинобудування відомі поняття структури технологічних процесів і структури операцій (див. рис. 1.1). Водночас кожен складову частину більш високого порядку можна структурно поділяти на низку складових елементів нижчого порядку (наприклад, технологічний процес – на частини, операцію – на установи і т.д.).

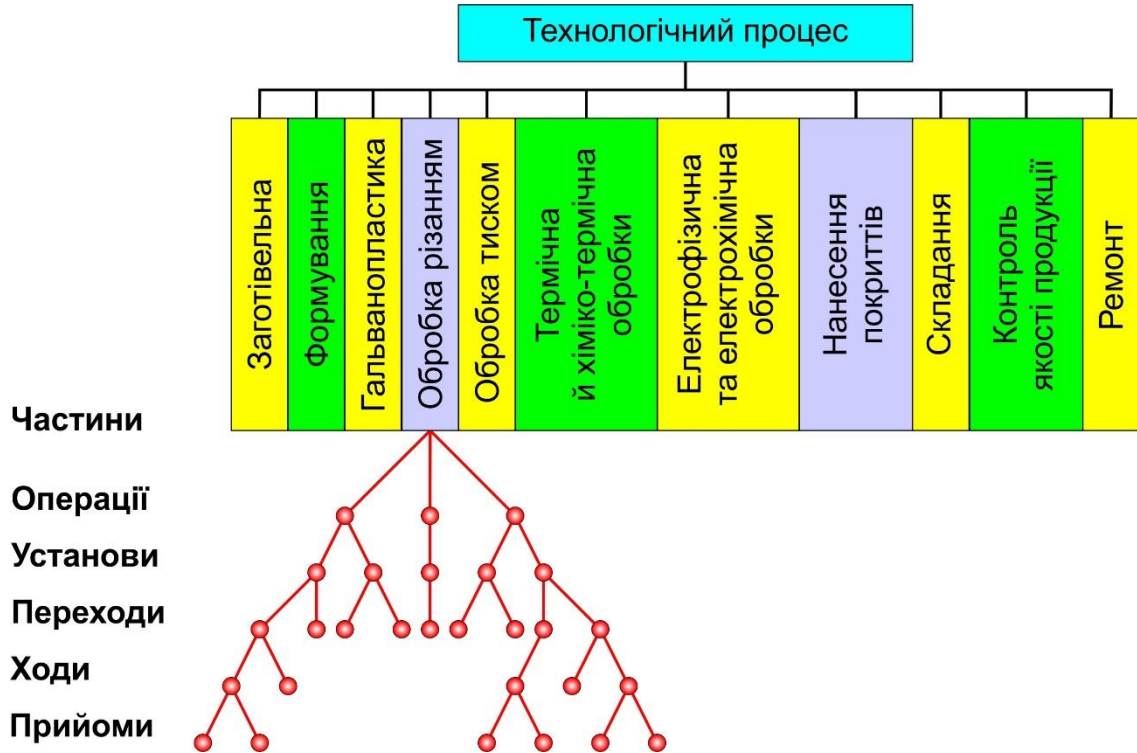


Рисунок 1.2 – Структура технологічного процесу

Структура операції механоскладального виробництва залежить від:

- необхідної кількості установів, переходів, ходів, прийомів;
- кількості одночасно встановлюваних або оброблюваних заготовок (одномісна обробка або багатомісна);
- кількості використаних на операції інструментів (одноінструментна або багатоінструментна обробка);
- кількості задіяних на операції шпинделів або супортів, а також позицій обробки (однопозиційна або багатопозиційна обробка).

Практика показує, що вирішення проблеми оптимальних структурних будов технологічних процесів емпіричними засобами заходить у глухий кут. Виникає нагальна потреба наукового дослідження цього кола питань.

Технологія, як і будь-яка інша галузь матеріального світу, існує у вигляді визначеної структурної організації. Загальний характер структурних зв'язків у технології механоскладального виробництва зображений на рисунку 1.2.

Структурні утворення розподіляються за декількома зонами, розміщеними в ієрархічному (супідрядному) порядку та об'єднаними стійким законом зв'язку.

Зовнішні зв'язки виявляються насамперед між технологічними процесами виготовлення різних виробів (D_1, D_2, \dots, D_i), тобто чітко позначають першу зону – зону великих структурних підрозділів. Вони охоплюють зв'язки за спеціалізацією й кооперуванням, а також групуванням як самих процесів, так і технологічно однорідних операцій. Проблему зовнішніх зв'язків докладно досліджено, тому в її додатковому розгляді немає необхідності.

У наступних групах структурних утворень простежуються внутрішні відношення між складовими частинами технологічних процесів – операціями та їх елементами, що проявляються на рівні середніх (друга зона) та елементарних (третья зона) зв'язків. У зазначених зонах – серцевина всіх структурних співвідношень. Деяку частину їх вивчено, зокрема виявлено закономірності взаємозв'язку основних частин технологічних процесів: заготівельної, обробної та складальної.

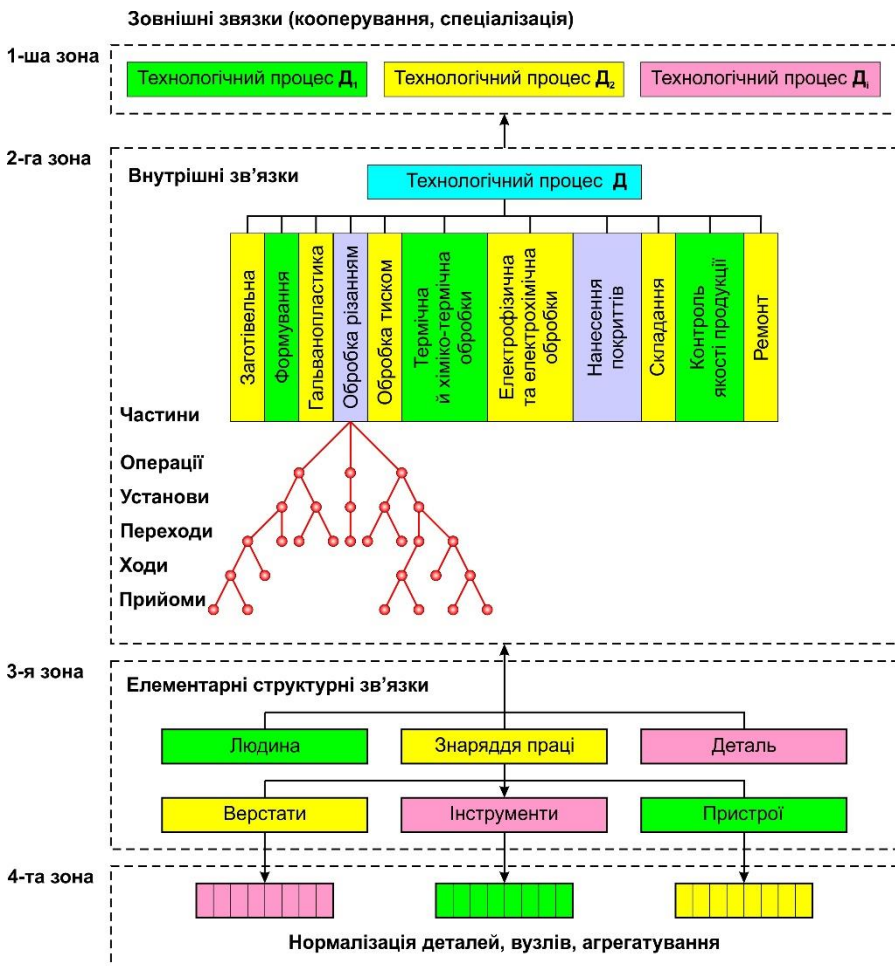


Рисунок 1.3 – Структурні зв'язки в технології механоскладального виробництва

Характерно, що сучасні умови дали змогу одночасного виконання перших двох стадій, а за особливо точних методів виготовлення заготовок став можливим прямий перехід від першої стадії до складання, минаючи механічну обробку.

Інтенсивно досліджують специфічні структурні форми технологічних процесів механізованого й автоматизованого виробництва. Також знайдено структурні плани чергування та зміни баз. Загалом досліджено первинний осередок кожного виробничого й технологічного процесу – операцію. Виявлено структурний поділ операції на установ, позицію, перехід, хід і прийом. Усе це – дослідження на рівні середніх структурних утворень. Проте ще мало уваги приділено вивченню будови та природи елементарних складових цих утворень, тобто дослідженню наступної, третьої зони структурних відношень.

Структурні відношення на рівні елементарних зв'язків прямо визначають виробничі можливості як окремих операцій, так і технологічних процесів загалом. Недооцінювання значення й природи початкових, елементарних компонентів технології значно зменшує її ефективність.

Відзначимо, що й елементарні складові технології, наприклад знаряддя праці, являють собою складні системи, розкладені на свої конструктивні частини; їм відповідає четверта зона – зона субелементних зв'язків. Цей важливий тип структурних відношень вже досить широко досліджено, водночас створені теоретичні основи ефективного конструювання знарядь праці: верстатів, інструментів і пристроїв із нормалізованих деталей, вузлів або агрегатів.

Отже, розгляд стану всієї проблеми показує, що в загальній схемі структурних зв'язків у технології машинобудування досить глибоко вивчені відношення на рівні великих і субелементних підрозділів. Менше досліджені центральні за значенням зв'язки на рівні елементарних та частково середніх структурних утворень.

1.4 Структурні методи досліджень у науці

Розглянемо поняття структури в більш широкому змісті, а саме в контексті таких понять, як структурні аналіз і синтез. Як відомо, *синтез* (від грецького *synthesis* – з'єднання, сполучення, складання, узагальнення) – це метод наукового дослідження

будь-якого предмета, явища, що полягає в пізнанні його як єдиного цілого, у єдності та взаємному зв'язку всіх його частин. *Аналіз* (від грецького *analysis* – розкладання, розчленовування) є методом наукового дослідження, що полягає в уявному або фактичному розкладанні цілого на складові частини.

Застосування цих методів під час вивчення структури технологічних процесів або окремих об'єктів дає змогу вдосконалити технологію виробництва: структурний аналіз допомагає виявляти внутрішні резерви технології на кожному робочому місці, а структурний синтез – створювати оптимальні й найбільш продуктивні технологічні процеси. Водночас на основі взаємодії обох методів дослідження можна моделювати структуру механозбиральних процесів і давати порівняльну оцінку ступеня їх технічної досконалості. Крім того, розглянуті основи теорії комплексного (системного) використання предмета обробки й знарядь праці як структурних складових частин технології, а також удосконалення технологічних процесів, їх механізація та автоматизація засобами структурних перетворень.

Ідеї структурного аналізу й синтезу усе глибше проникають у теоретичні основи різних наукових дисциплін і галузей техніки, навіть розроблено цілу науку – теорію структур.

Загалом структура являє собою будову, форму організації будь-якого явища, вираження способу зв'язку елементів цілого між собою та з усім цілим.

Однією з труднощів дослідження структури є те, що вона динамічна: упродовж внутрішнього закономірного розвитку змісту ця структура перетворюється з форми розвитку на рамки, що стримують її подальше зростання.

Початковим принципом будь-яких структурних досліджень є положення, що кожен об'єкт, якою б не була його природа, безпосередньо відтворюється з первинних елементів. Ще в середні віки П'єр Гассенді переконливо довів, що з порівняно невеликого набору атомів – не більше ніж 120 – можливе одержання декількох мільйонів різних хімічних сполук. Подібних прикладів побудови складних процесів із початкових, простих можна навести нескінченно багато.

Велике пізнавальне значення має розгляд сфери застосування структурних досліджень у наші дні. Найбільш

яскраво виявляються їх досягнення в галузі хімії та ядерної фізики.

Такі життєво важливі наукові дисципліни, як біологія, генетика й біохімія, досліджують речовину на різних рівнях її структурних проявів. Молекулу білка також записують у вигляді трьох різних структур: первинної (послідовність чергування різних амінокислотних ланок у поліпептидному ланцюгу), вторинної (просторова спіральна конфігурація, що набуває поліпептидний ланцюг), третинної (розміщення в просторі закрученої спіралі).

Розвиток теоретичної основи всіх наук – математики – також рухається в напрямку широкого застосування структурних методів. За словами відомого американського вченого Г. Біркгофа, «Теорія структур має зіграти – а у дійсності вона вже неявно грає і тепер – фундаментальну роль у математиці».

Структурні методи досліджень знаходять усе більше визнання також у прикладних технічних дисциплінах.

Структурні методи – основа і такої науки, як кристалографія, висновки якої частого використовують у металознавстві, кристалооптиці, напівпровідниковій техніці, для одержання синтетичних п'єзоелектриків, чистих кристалічних реактивів та ін.

Металографія – це наука про будову (структуру) металів і сплавів, досягнення якої яскраво проявилися в створенні жаростійких матеріалів, зокрема для авіаційної, космічної та ядерної галузей.

Технічна механіка спирається на дослідження П. Л. Чебишева, що в 1869 році запропонував структурну формулу для кінематичних ланцюгів.

Академік І. І. Артоболовський провів важливі дослідження структури просторових механізмів і створив їх єдину класифікацію.

У теорії різання металів академіком Г. І. Грановським доведено, що все різноманіття принципово можливих схем різання може бути отримане способом різного структурного сполучення усього лише двох видів елементарно простих технологічних рухів – прямолінійного та обертового.

Наука про металорізальні верстати також охоплює структурні методи, зокрема вони необхідні для розроблення кінематичної структури верстатів.

Отже, структурні методи для багатьох сучасних природно-наукових і технічних дисциплін є досить ефективним інструментом досліджень.

Структурні вдосконалення технології високоефективні й містять у собі величезні внутрішні можливості. Так, наприклад, чотирма англійськими дослідницькими фірмами: «Associated Industrial Consultants», «Personnel Administration», «Production Engineering» і «Warwick Orr and Partners» покращено структуру технології на 300 машинобудівних підприємствах, у результаті чого була підвищена продуктивність праці від 40 % до 75 %.

Актуальність структурних перетворень технології підтверджує зазначена далі важлива обставина. Об'єктами технологічних удосконалень можуть бути як суть процесів – *метод*, так і форми його розвитку – *структура*. Водночас можуть змінюватися як методи обробки або складання, так і структура процесу, зокрема структурні будови в межах того самого методу.

Аналіз показує, що метод обробки або складання у своїх основних рисах є найбільш стійким, консервативним, діє протягом тривалого часу. За всю історію розвитку технології машинобудування кількість оригінальних методів обробки не перевищила декількох десятків. Тим часом виконання кожного з них можливе безліччю структурних побудов.

Структура на противагу методу більш гнучка, мінлива, здатна до багаторазових перетворень. Впливаючи на метод своїми новими проявами, вона розширює його можливості й підвищує загальну ефективність технології. Оскільки винайдення нових методів обробки або складання – рідке явище, технологічні вдосконалення переважно спрямовані на пошуки способів зміни структури процесів.

Склалося парадоксальне положення, за якого структурні перетворення, що є найпоширенішим видом технологічних удосконалень виробництва, найменш вивчені. Зважаючи на це, на цьому етапі розвитку технологічної науки дослідження закономірностей саме структурних перетворень технології має особливе значення.

Отже, вирішення проблеми оптимальних побудов (структур) технологічних процесів є актуальним завданням.

Необхідно зазначити, що розвиток робіт з автоматизації проектування технологічних процесів обробки складних деталей

наштовхується на серйозні труднощі, пов'язані з недостатнім розробленням теорії проєктування технологічних процесів, придатної для математичного моделювання та алгоритмізації процесів проєктування. Ще не розроблені досить вдалі, адекватні аналітичні та логічні залежності, що пов'язують параметри оброблюваної деталі зі структурою й характеристиками технологічного процесу та оснащення для її виготовлення.

У технології машинобудування основну увагу приділяють завданням аналізу технологічних процесів для виявлення впливу різних факторів на точність, продуктивність та економічну ефективність обробки. Водночас методи синтезу технологічних процесів на основі характеристик оброблюваної деталі й виробничої системи підприємства, в умовах якої необхідно реалізувати проєктований технологічний процес, ще недостатньо досліджені. Створення теорії проєктування припускає перехід від традиційних завдань аналізу та емпіричних класифікацій до проблематики завдань синтезу технологічних процесів.

Труднощі виконання цих завдань у рамках традиційних підходів полягають у великій складності й багатогранності проблеми проєктування, а також неможливості її зведення до сукупності окремих, хоча і важливих розрахункових та аналітичних завдань. У такому разі проєктування є комплексною проблемою, у якій у складному взаємозв'язку переплітаються завдання аналізу, оцінювання, оптимізації, добору варіантів, моделювання й синтезу.

Розширення вихідної бази завдяки введенню таких понять, як структура, функція, стан, організація, зв'язок, відношення, керування, елемент та ін., забезпечує деякі переваги так званому системному підходу перед традиційними методами дослідження й дає змогу створювати більш адекватні дійсності моделі складних об'єктів, технологічних процесів і процесів проєктування.

На сьогодні в системних дослідженнях можна виділити три основні *напрямки*: структурно-функціональний аналіз, структуралізм і безпосередньо системний підхід. Вони відрізняються тим, що розглядають різні сторони об'єкта як системи.

Структурно-функціональний аналіз вивчає складно організовані об'єкти з погляду виконуваних ними *функцій*

стосовно більш складної системи, до якої вони входять. У такому разі властивості об'єкта синтезуються в цілісну картину за допомогою сукупності функцій. Основне навантаження несе поняття функції, а структура об'єктів і процесів неначе постулюється.

За допомогою *структурних досліджень (структуралізму)* вивчають проблематику цілісності, розширюють поняття про зв'язки та їх типологію. Поняття структури як характеристики складного об'єкта висувають на перший план; відбувається усвідомлення ієрархічності будови складних об'єктів і процесів. Водночас виконується завдання виявлення й класифікації типів зв'язків, але функціональну сутність частин структури детально не вивчають і беруть як одну з передумов.

У *системному підході* поняття системи є більш широким, воно містить у собі як складові частини всі зазначені вище поняття (структура, функція, зв'язок та ін.). Це метод *комплексного* вивчення складних об'єктів, тому його вважають найбільш вдалим для системних досліджень.

У системних дослідженнях також важлива *кібернетика* – наука про керування. Але вона розглядає лише одну, хоча й дуже важливу сторону функціонування систем – регулятивну, у той час як для системного підходу характерне комплексне вивчення об'єкта, що охоплює різні сторони його будови та функціонування.

Отже, поява поняття «системний підхід» пов'язана з розвитком двох ліній в історії науки: аналізу й синтезу. В останні десятиліття роль синтезу побудов особливо зросла. Потрібно не просто вивчати явище, факт, а й установлювати його зв'язок з іншими фактами. Системний підхід можна розглядати як початкову фазу системного аналізу, етап первинного, якісного аналізу проблеми та постановки завдань.



Запитання для самоперевірки

- 1 Хто з видатних учених зробив вагомий внесок у дослідження поняття «система»?
- 2 Наведіть визначення поняття «система».

- 3 Що вивчає системотехніка?
- 4 Що таке «емерджентність»?
- 5 Що таке «зовнішнє середовище» системи?
- 6 Наведіть приклад зворотного зв'язку в системі.
- 7 Що таке «структура технологічного процесу» та «структура операції»?
- 8 Які структурні зв'язки виділяють у технології механоскладального виробництва?
- 9 Хто з видатних учених застосовував структурні методи у своїх дослідженнях?
- 10 Які структурні методи досліджень у науці вам відомі?



Тема 2 Класифікація, опис та ієрархія систем

2.1 Загальна класифікація систем

Класифікацією називається поділ на класи за найбільш істотними ознаками. У такому разі під *класом* розуміють сукупність об'єктів, що мають деякі ознаки спільності. *Ознака* (або *сукупність ознак*) є підставою (критерієм) класифікації.

Згідно із загальною класифікацією систем їх поділяють на *реальні* й *абстрактні*. Реальні системи – це матеріальні, об'єктивно існуючі. Абстрактні системи (концептуальні, ідеальні) – ті, що є продуктом мислення людини.

Реальні системи поділяють на *природні* та *штучні*. *Природні* системи – природничого походження. Наприклад, фізичні й хімічні (системи неживої природи) або біологічні (системи живої природи). *Штучні* системи антропогенні. Вони створюються людством для своїх потреб та утворюються в результаті цілеспрямованих зусиль. Їх поділяють на *технічні* (техніко-економічні), *соціальні* (громадські), *організаційно-технічні* (керовані людиною).

Абстрактні системи є результатом відображення дійсності (реальних систем) у мозку людини. Ці системи поділяють на системи *безпосереднього відображення* (математичні, логіко-евристичні моделі) та *генералізуючі* (концептуальні моделі, мови).

Розглянемо ще певні принципи класифікації систем (див. табл. 2.1).

Відкритою називається система, що взаємодіє з навколишнім середовищем. Виділення зовнішніх зв'язків та опис механізмів взаємодії «система–середовище» є центральним завданням теорії відкритих систем. Розгляд відкритих систем дає змогу розширити поняття структури системи. Для відкритих систем воно охоплює не лише внутрішні зв'язки між елементами, а й зовнішні зв'язки із середовищем. Для опису структури зовнішні комунікаційні канали поділяють на вхідні (за якими середовище впливає на систему) і вихідні (навпаки). Сукупність елементів каналів, що належать власній системі, називаються вхідними й вихідними полюсами системи.

Таблиця 2.1 – Класифікація систем за різними критеріями

<i>Підстава (критерій) класифікації</i>	<i>Класи систем</i>
За взаємодією із зовнішнім середовищем	1) відкриті; 2) закриті; 3) комбіновані.
За структурою	1) прості; 2) складні; 3) великі
За характером функцій	1) спеціалізовані; 2) багатфункціональні (універсальні)
За характером розвитку	1) стабільні; 2) ті, що розвиваються
За ступенем організованості	1) добре організовані; 2) погано організовані (дифузні)
За складністю поведінки	1) автоматичні; 2) вирішальні; 3) ті, що самоорганізуються; 4) ті, що прогнозують
За характером зв'язків між елементами	1) детерміновані; 2) стохастичні
За характером структури управління	1) централізовані; 2) децентралізовані
За призначенням	1) виробничі; 2) керувальні; 3) обслуговувальні

2.2 Класифікація технічних систем

Технічні системи спроектовані й виготовлені людиною в певних цілях.

Під *технічними системами* розуміють єдину конструктивну сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих об'єктів, призначену для цілеспрямованих дій із метою досягнення в процесі функціонування заданого результату. Відмінними ознаками технічних систем порівняно з довільною сукупністю об'єктів або окремими елементами є *конструктивність* (практична здійснюваність відношень між елементами), орієнтованість та взаємопов'язаність складових елементів і цілеспрямованість.

Організаційна система, для ефективного функціонування якої істотним фактором є спосіб організації взаємодії людей із технічної підсистемою, називається *людино-машинною системою*. Приклади людино-машинних систем:

- «автомобіль – водій»;
- «літак – льотчик»;
- «ЕОМ – користувач» та ін.

За призначенням технічні системи поділяють на:

- виробничі;
- керувальні;
- обслуговувальні.

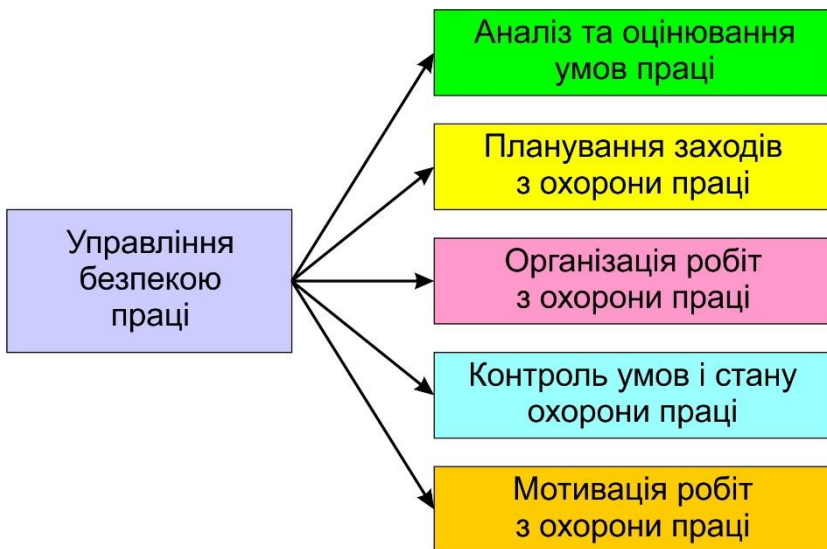
У виробничих системах реалізуються процеси отримання деяких продуктів або послуг. Призначення керувальних систем – організація й управління матеріально-енергетичними та інформаційними процесами. Обслуговувальні системи підтримують задані межі функціональної здатності керувальних і виробничих систем.

Технічні системи класифікують за їх структурою: матеріальна або речова (див. рис. 2.1 а) та функціональна (рис. 2.1 б). Виділяють також алгоритмічні технічні системи (алгоритми програм, інструкції).

Структура технічної системи може бути охарактеризована за наявними в ній (або переважними) типами зв'язків (див. рис. 2.2).



а)

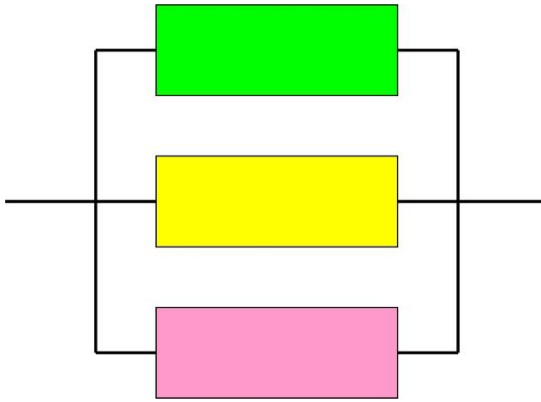


б)

Рисунок 2.1 – Класифікація технічних систем за їх структурою:
а) матеріальна (речова); б) функціональна



а)



б)

Рисунок 2.2 – Типи зв'язків у структурі технічної системи:
а) послідовне з'єднання елементів; б) паралельне з'єднання елементів

Класифікацію критеріїв розвитку технічних систем наведено на рисунку 2.3.

Завдання проєктування технічної системи зводиться до проєктування:

- основних об'єктів, частин;
- функціональних систем;
- груп агрегатів;
- механізмів;
- окремих деталей.



Рисунок 2.3 – Класифікація критеріїв розвитку технічних систем

Розглянемо *ієрархію* технічних систем. Ієрархія – це структура з наявністю підпорядкованості, тобто нерівноправних зв'язків між елементами. В ієрархії частини або елементи цілого розміщують у порядку від найвищого до нижнього. Ієрархічна структура – це множина, частково впорядкована так, що є лише один елемент, який не має попереднього, а всі інші елементи мають тільки один попередній. Наявною є багаторівнева форма організації з чіткою належністю об'єктів нижнього рівня певному об'єкту верхнього. Найчастіше її графічно репрезентують у вигляді дерева.

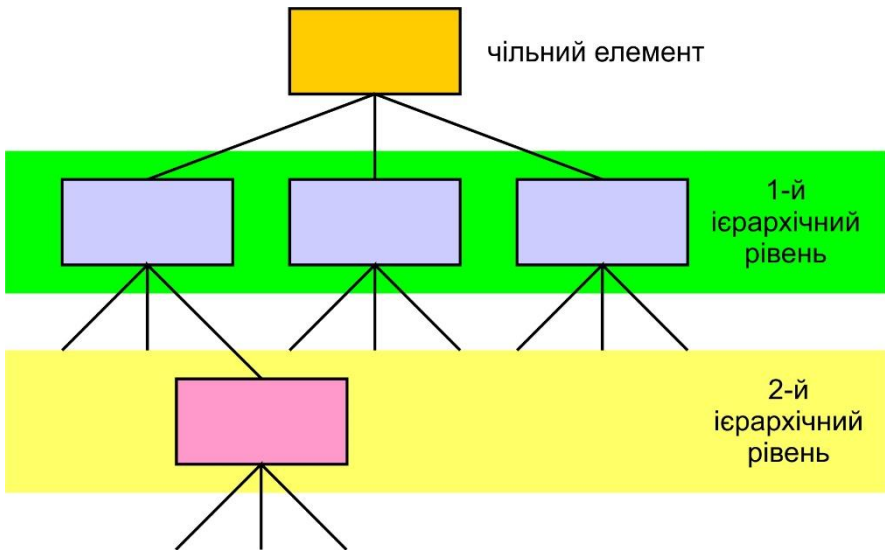


Рисунок 2.4 – Деревоподібна ієрархічна структура

Зустрічаються інші види ієрархій, наприклад кільцева, ромбоподібна (див. рисунок 2.5).

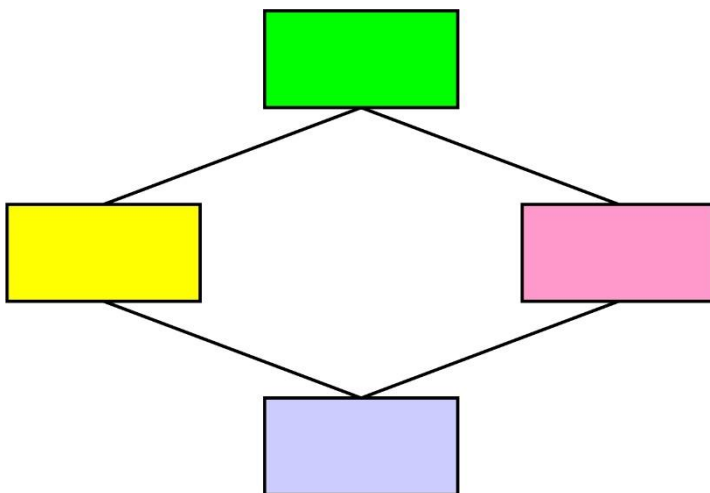


Рисунок 2.5 – Ромбоподібна ієрархічна структура

Деревоподібна структура є найбільш простою для аналізу й реалізації, тому вона набула найбільш поширення в технічних системах – для опису конструкції складних технічних виробів і комплексів, структури класифікаторів, виробничих та організаційних структур підприємств тощо.

Наприклад, класифікація технічної системи за ієрархічними рівнями складності повинна бути такою:

машина – група – підгрупа – елемент.

На рисунку 2.6 наведено ієрархію технічних систем на прикладі металообробних верстатів.

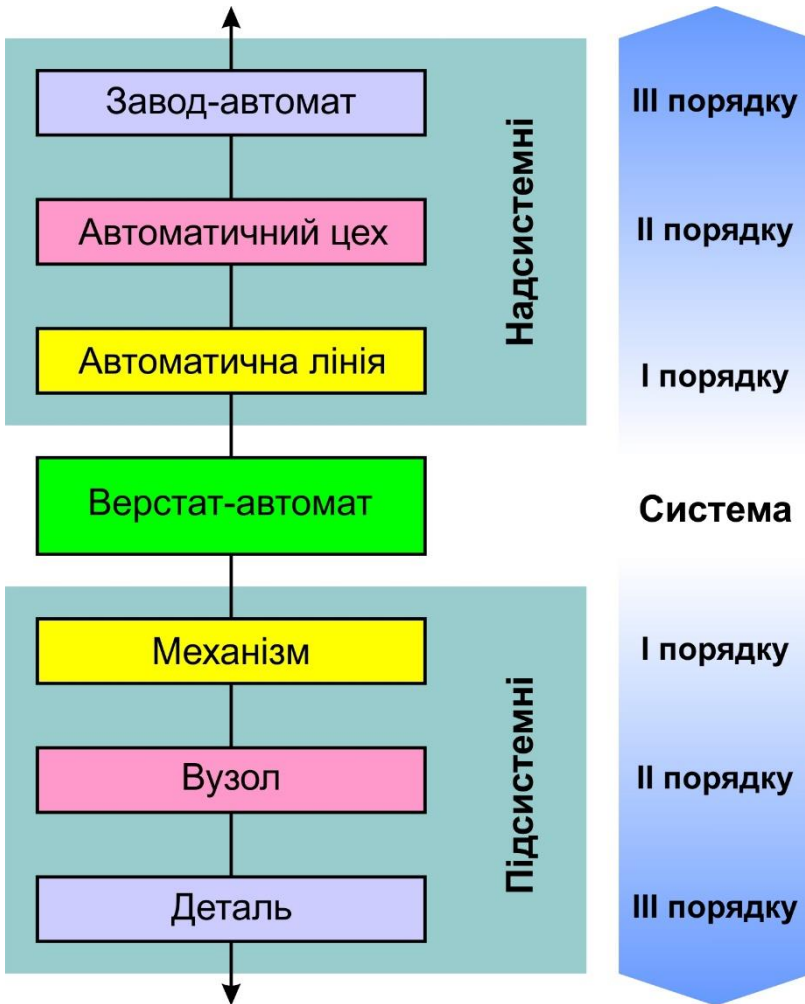


Рисунок 2.6 – Ієрархія технічних систем на прикладі металообробних верстатів



Запитання для самоперевірки

- 1 Як класифікують системи за різними критеріями?
- 2 Чим реальні системи відрізняються від абстрактних?
- 3 Що таке «технічна система»?
- 4 Що таке «людино-машинна система»?
- 5 Як класифікують технічні системи за їх структурою?
- 6 Які типи зв'язків у структурі технічної системи ви знаєте?
- 7 Як класифікують критерії розвитку технічних систем?
- 8 Що таке «ієрархія технічних систем»?
- 9 Наведіть деревоподібну ієрархічну структуру.
- 10 Наведіть ромбоподібну ієрархічну структуру.
- 11 Наведіть надсистеми системи «верстат-автомат».
- 12 Наведіть підсистеми системи «верстат-автомат».



Тема 3 Опис взаємодії складових частин складних об'єктів і систем

3.1 Кількісне оцінювання елементів систем

Технологічні процеси, технологічні системи (Т-системи) та їх компоненти належать до складних об'єктів. Вони характеризуються великою кількістю елементів, складними функціональними, часовими та просторовими зв'язками, залежністю загальних властивостей об'єкта не лише від властивостей складових його елементів, а і від характеру зв'язків між ними.

Більш складними є процеси та системи автоматизації технологічного проектування (САПР-ТП), які складаються з великої кількості взаємозалежних проектних операцій, що здійснюють пошук, аналіз, синтез, оцінювання, оптимізацію й вибір технологічних рішень на різних стадіях проектування.

Для аналізу структури системних об'єктів часто використовують елементи теорії множин і теорії графів, за допомогою яких можна здійснити геометричну або аналітичну інтерпретацію взаємодії складових частин систем.

Елементи систем можуть мати кількісну оцінку, описану математичними законами операцій із множинами. Математичне поняття *множини* характеризує об'єднання окремих об'єктів (предметів, понять, чисел, символів та ін.) у єдине ціле. *Множина* утворюється з елементів, що мають деякі властивості та перебувають у деяких відношеннях між собою або з елементами інших множин.

Твердження, що множина A складається з різноманітних елементів a_1, a_2, \dots, a_n (і лише з цих елементів), умовно записують як $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$... Належність елемента до множини (відношення *належності*) позначають символом \in (наприклад, $a_1 \in A$ або $a_1, a_2, \dots, a_n \in A$). Якщо b не є елементом A , то пишуть $b \notin A$.

Дві множини A і B *однакові (тотожні)*, тобто $A = B$, тоді й лише тоді, коли кожен елемент A є елементом B і навпаки. Це означає, що множина однозначно обумовлена своїми елементами.

Множина може містити будь-яку кількість елементів (*скінченна* або *нескінченна*), зокрема один елемент (*одиначна*, *одноелементна* множина) або жодного (*порожня* множина, що позначають символом \emptyset).

Множину A , усі елементи якої належать і множині B , називають *підмножиною* (*частиною*) множини B . Це відношення між множинами є *включенням*, його позначають: $A \subset B$ (A включене в B). Відношення $A \subset B$ припускає і тотожність $A = B$, тобто будь-яку множину можна розглядати як підмножину самої себе ($A \subset A$). Вважають також, що підмножиною будь-якої множини є порожня множина, тобто $\emptyset \subset A$. Одночасне виконання співвідношення $A \subset B$ та $B \subset A$ можливе лише за $A = B$ і навпаки.

Будь-яка не порожня множина A має, щонайменше, дві різні підмножини: A і порожню множину \emptyset . Ці підмножини називають *невласними*, а всі інші підмножини A – *власними*.

Відношення включення має властивість *транзитивності*: якщо $A \subset B$ і $B \subset C$, то $A \subset C$. Відношення належності до цієї властивості не має. Наприклад, $A = \{1, \{2, 3\}, 4\}$; $2, 3 \in \{2, 3\}$ і $\{2, 3\} \in A$, але $2, 3 \notin A$.

Множину можна задати простим переліком її елементів. Наприклад, специфікація має множину деталей виробу, каталог – множину книг у бібліотеці. Інший спосіб задання множини складається з опису елементів визначальною властивістю $P(x)$ (формою від x), загальною для всіх елементів: $X = \{x \mid P(x)\}$, або $X = \{x : P(x)\}$. Наприклад, $\{x \mid x^2 = 2\}$ – множина чисел, квадрат яких дорівнює двом, $\{x : x - \text{є інструмент для свердлення отворів}\}$ – множина свердел. Використовують запис і в іншому вигляді, наприклад, $\{x^2 \mid x - \text{просте число}\}$, що означає множину квадратів простих чисел.

Зазвичай уже в самому визначенні конкретної множини явно або неявно обмежено сукупність припустимих об'єктів. Зокрема, множину свердел варто шукати серед різальних інструментів, а не серед верстатів і тим паче не серед книг. Зручно таку *сукупність припустимих об'єктів* зафіксувати явно й вважати, що розглянуті множини є підмножинами цієї сукупності. Її називають *основною множиною* (*універсумом*) і позначають через U . Універсум арифметики – це числа, зоології

– тварини. Графічно U позначають як множину точок прямокутника.

Множини можна визначити також за допомогою операцій над деякими іншими множинами. Нехай є дві множини A і B .

Об'єднання (сума) $A \cup B$ є множиною всіх елементів, що належать A або B . Наприклад,

$$\{1, 2, 3\} \cup \{2, 3, 4\} = \{1, 2, 3, 4\}.$$

Переріз (добуток) $A \cap B$ є множина всіх елементів, що належать одночасно як до A , так і до B . Наприклад,

$$\{1, 2, 3\} \cap \{2, 3, 4\} = \{2, 3\}.$$

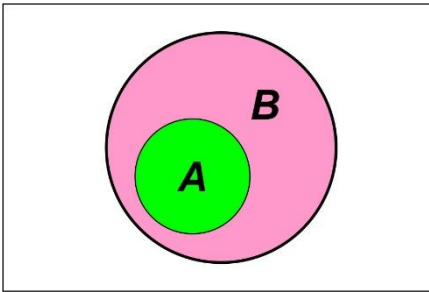
Множини, які не мають спільних елементів ($A \cap B = \emptyset$), називають такими, що *не перерізаються (розчленованими)*.

Для наочного зображення відношень між множинами використовують кола Ейлера (рис. 3.1), на яких заштрихованими місцями позначені множини, одержані в результаті операцій над множинами A , B і C .

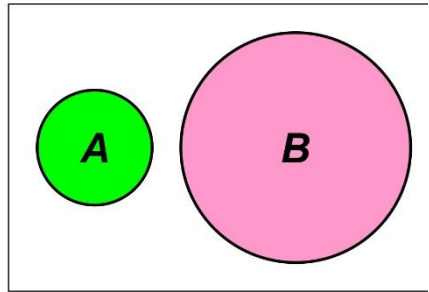
Оскільки елементи складних систем перебувають у взаємозв'язку один з одним та із зовнішнім середовищем, то такі зв'язки аналізують роблять також за допомогою графів. Під час цього аналізовані об'єкти зображують точками, що мають назву *вершин*, а зв'язки між ними – лініями довільної конфігурації, які називають *ребрами*. Множина вершин V , зв'язки між якими визначені множиною ребер E , – це *граф*, його позначають $G = (V, E)$. Якщо $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ і $E = \{e_1, e_2, \dots, e_q\}$, тобто граф містить p вершин та q ребер, то такий граф є (p, q) -графом.

Для зазначення напрямку зв'язку між вершинами графа відповідне ребро позначається стрілкою. Орієнтоване так ребро називають *дугою*, а граф з орієнтованими ребрами – *орієнтованим графом (орграфом)*.

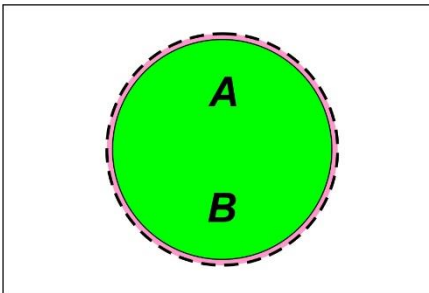
Якщо пара вершин з'єднана двома або більшою кількістю дуг, то такі дуги називають *паралельними*. Граф, що містить і ребра, і дуги, є *змішаним*.



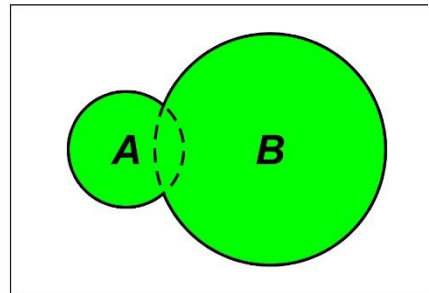
Включення, $A \subset B$



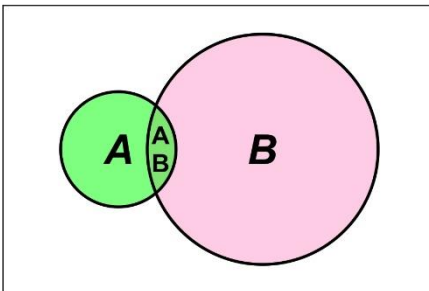
Непереріз, $A \cap B = \emptyset$



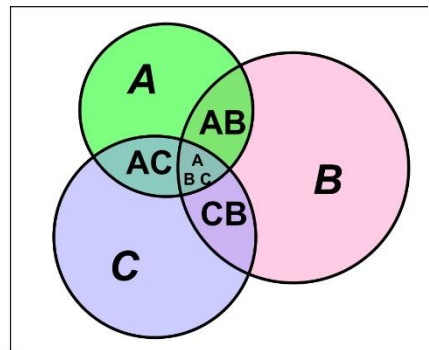
Тотожність, $A = B$



Об'єднання, $A \cup B$



Переріз, $A \cap B = AB$



Переріз, $A \cap (B \cap C) = ABC$

Рисунок 3.1 – Геометрична інтерпретація відношень множин за Л. Ейлером

Кожне ребро $e_k \in E$ з'єднує пару вершин $v_i, v_j \in V$, що є його кінцями (*граничними вершинами*). Для орієнтованого ребра (дуги) розрізняють *початкову вершину*, із якої воно виходить, і *кінцеву вершину*, у яку воно заходить. Ребро, граничними вершинами якого є та сама вершина, називають *петлею*. Загалом граф може містити й *ізолювані вершини*, що не є кінцями ребер, і не пов'язані ні між собою, ні з іншими вершинами.

Редра з однаковими граничними вершинами є паралельними й мають назву *кратних*. Граф без петель і кратних ребер є *простим* або *звичайним*, а граф без петель, але з кратними ребрами – *мультиграфом*. Найбільш загальний приклад графа, у якому можуть бути і петлі, і кратні ребра, називають *псевдографом* (рис. 3.2). Якщо граф не має ребер ($E = \emptyset$), то всі його вершини ізолювані ($V \neq \emptyset$), і він є *порожнім*, або *нуль-графом*.

Дві вершини $v_i, v_j \in V$ графа $G = (V, E)$ називають *суміжними*, якщо вони є граничними вершинами ребра $e_k \in E$ (відношення *суміжності* між *однорідними* об'єктами – вершинами).

Якщо вершини v_i є кінцями ребра e_k , то говорять, що вони *інцидентні*: вершина v_i інцидентна ребру e_k (і навпаки). Інцидентність – це відношення між *різнорідними* об'єктами (вершинами й ребрами).

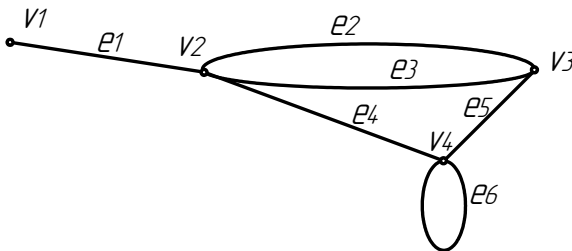


Рисунок 3.2 – Псевдограф

Як приклад (рис. 3.3) розглянемо зв'язок деталі вилки перемикачання з іншими деталями вузла механізму перемикачання. Можна аналітично описати взаємодію зазначеної деталі з деталями вузла. Взаємодія деталі D_1 із деталями D_2, D_3, D_4, D_5 буде здійснюватися за допомогою комплексу поверхонь

$$H = \{(P_{11}, P_{21}), (P_{12}, P_{31}), (P_{13}, P_{22}), (P_{14}, P_{51})\},$$

що визначають вид з'єднань, взаємне положення й ступені свободи як аналізованої деталі, так і інших деталей, приєднаних до неї. У цьому разі моделлю конструктивних і розмірних зв'язків деталей буде граф $H(P, R)$, у якому його вершинами $P = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{ij}\}$ (i – номер деталі; j – номер поверхні деталі) є *поверхні сполучень (поверхні з'єднань)* деталей, що взаємодіють, а ребрами R – вид сполучення та його розміри.

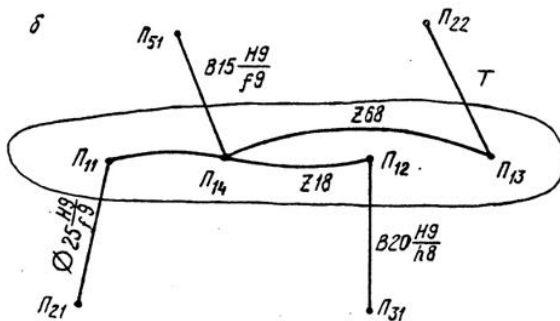
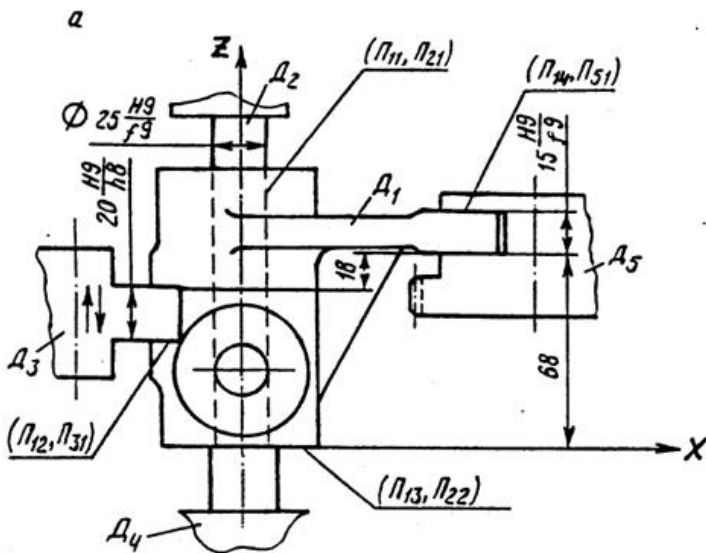


Рисунок 3.3 – Модель зв'язків деталі D_1 з іншими деталями вузла: а – схема механізму перемикачання; б – граф зв'язків деталі D_1 з іншими деталями: $\Pi_{11} - \Pi_{14}$ – поверхні з'єднань деталі D_1 ; $\Pi_{21}, \Pi_{31}, \Pi_{51}$ – поверхні з'єднань інших деталей (D_2, D_3, D_5)

3.2 Зв'язки системних об'єктів та процесів із навколишнім середовищем

Якщо розглянути технологічну систему з точки зору системного підходу, то її можна визначити п'ятіркою таких характеристик:

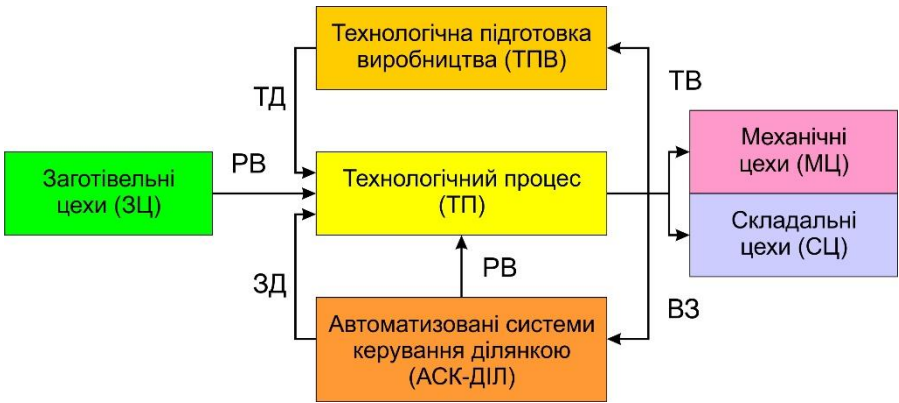
$$TC = \langle H, F, S, Z, U \rangle,$$

де H – зв'язки системи з навколишнім середовищем; F – набір функцій, виконуваних системою; S – структура системи; Z – сукупність функціональних та структурних властивостей системи; U – історія функціонування й розвитку системи.

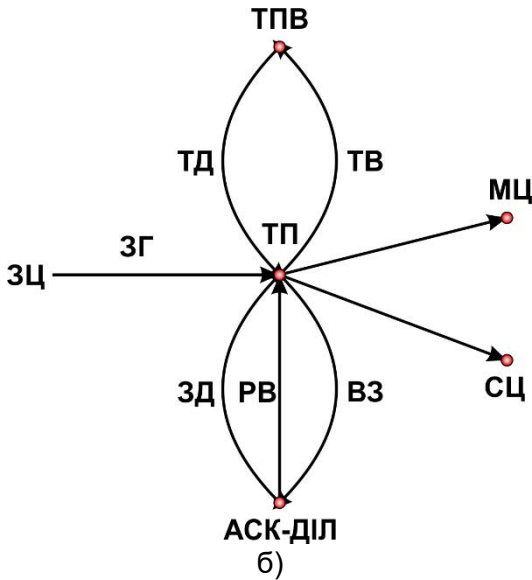
Наведені характеристики належать до системних і визначають найбільш істотні риси будови та функціонування складних об'єктів і процесів. Для того щоб технологічні процеси, оброблювані деталі й процеси проектування було можна класифікувати до категорії системних, необхідно показати, що вони мають зазначені вище системні характеристики.

Функціональна цілісність і відносна відособленість технологічних систем передбачають наявність зв'язків між системою та навколишнім середовищем. До останнього належить сукупність об'єктів і систем, що впливають на розглянуту систему або залежать від характеру її функціонування. Технологічні системи пов'язані з кожною із систем навколишнього середовища, здебільшого не одним, а декількома видами зв'язків і відношень. Так, для технологічного процесу характерні матеріальні, енергетичні й інформаційні зв'язки із системами навколишнього середовища.

Вузол або складальна одиниця машини пов'язані з іншими вузлами, що утворюють навколишнє середовище, конструктивними, кінематичними та розмірними зв'язками. Тому для правильного розуміння взаємодії системних об'єктів і процесів із навколишнім середовищем необхідний облік впливу різних видів зв'язків. У кібернетичному плані технологічний процес виготовлення деталей у системі оперативного керування виробничою ділянкою є об'єктом керування (рис. 3.3).



а)



б)

Рисунок 3.3 – Зв'язки технологічного процесу з навколишнім середовищем:

а) схема зв'язків; б) граф зв'язків:

ЗГ – заготовка; ТД, ТВ – технологічна документація й відхилення; ЗД, ВЗ – відповідно завдання та відхилення від його виконання; ПВ – регулювальний вплив

На його входи надходять заготовки та керувальна інформація. Одна частина цієї інформації охоплює завдання, що визначають календарні терміни запуску й випуску деталей, а друга – технологічну документацію, яка містить алгоритм і програми керування процесом виготовлення деталей на різних операціях.

До виходів системи належать готові деталі та інформація про фактичний час їх виготовлення й технологічні відхилення. Ця інформація надходить у систему оперативного керування виробництвом і служби технологічної підготовки виробництва. Отже, *навколишнім середовищем* для технологічних процесів виготовлення деталей будуть *заготівельні та складальні цехи, служби технологічної підготовки й оперативного керування виробництвом*.

Математичною моделлю, що відображає множинний характер зв'язків технологічної системи з кожною із систем навколишнього середовища, є мультиграф $H(Q, U)$, який показує зв'язок технологічного процесу з різними службами та підрозділами підприємства.

Множині його вершин відповідають розглянута система Q_p і системи навколишнього середовища Q_i , що взаємодіють із нею, а множині ребер U – зв'язки й відношення між Q_p та Q_i . У мультиграфі $H(Q, U)$ кожну пару вершин Q_p і Q_{ik} зв'язує не одне, а кілька ребер відповідно до кількості зв'язків між ними.



Запитання для самоперевірки

- 1 Математичне поняття множини та відношень множин.
- 2 Графічна інтерпретація відношень множин за допомогою кіл Л. Ейлера.
- 3 Поняття графа та його складових.
- 4 Як можна описати взаємодію однієї деталі у вузлі з іншими деталями?
- 5 Як виділяють зв'язки системних об'єктів і процесів із навколишнім середовищем?
- 6 Що розуміють під навколишнім середовищем для технологічних процесів виготовлення деталей?



Тема 4 Проєктування технічних систем

4.1 Етапи створення нової технічної системи

З розвитком техніки принципи та методологія створення технічних систем безперервно змінюються й удосконалюються в результаті впровадження нових технологій виготовлення машин та ускладнення їх конструкцій.

У процесі створення технічної системи виконують такі роботи:

- обґрунтування необхідності створення нової технічної системи;
- науково-технічні дослідження;
- розроблення конструкторського проєкту;
- виготовлення, випробування й доведення дослідних зразків.

Процес створення нової технічної системи або її окремого функціонального вузла охоплює чотири етапи:

- науковий (інженерне прогнозування);
- конструкторський (проєктування);
- технологічний (підготовку виробництва);
- організаційний (опанування виробництва).

Науковий етап пов'язаний з інженерним прогнозуванням, що аргументує необхідність створення нової технічної системи. Прогнозування – це не передбачення, а наукове теоретичне обґрунтування того, що повинно здійснитися. Під час інженерного прогнозування використовують теоретичні й експериментальні засоби аналізу та синтезу.

У питаннях прогнозування і створення нових технічних систем, яких ще не було у світовій практиці, доцільно застосовувати так званий фрейм-підхід. Слово *фрейм* (англ. frame – кадр, рамка) в найзагальнішому трактуванні означає структуру, що містить деяку інформацію. У системному аналізі, штучному інтелекті, інженерії знань цей термін позначає структуру, що охоплює опис об'єкта у вигляді атрибутів та їх значень. Відповідно до цього підходу ланцюжок пошуку потрібно

розглядати як розгалужене на декількох рівнях дерево альтернатив (див. рис. 4.1).

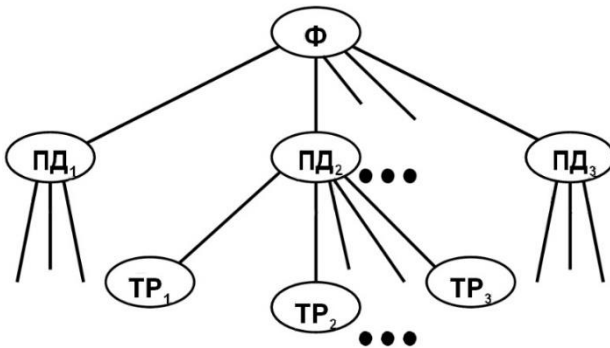


Рисунок 4.1 – Фрейм-модель прогнозування та створення нової технічної системи

На наведеній фрейм-моделі прогнозування та створення нової технічної системи зображено:

- функціональну модель об'єкта (функція Φ);
- альтернативні варіанти моделей принципів дій (ПД_i) (наприклад, фізичних Φ -ПД або технологічних ТП-ПД, що реалізують цю функцію);
- альтернативні варіанти моделей технічних рішень (ТР_i), що реалізують розглянуті принципи дій.

Необхідність створення техніки за короткий термін на рівні кращих світових зразків висуває особливі вимоги до другого (конструкторського) етапу, який поділяють на *творчий* і *технічний підетапи*.

Творчий підетап процесу проектування технічної системи має багатоваріантний характер, є складним послідовним рішенням багаторівневих, багатоциклічних, багатокритеріальних і багатоекстремальних завдань синтезу, аналізу й вимірювання, починаючи з вибору технічних ідей (технологічного принципу, способу формування, принципу закріплення тощо) і закінчуючи створенням конструкції з оптимальними параметрами.

Технічний підетап проєктування технічної системи – це процес створення необхідної для виготовлення й експлуатації системи технічної документації (наочного відображення конструкції машини загалом та її деталей, ескізів, моделей, макетів, креслень із зазначенням потрібних розмірів, посадок, ступенів точності та інших технічних вимог; інструкцій для випробувань і доведення машини; технічних паспортів виробів, що містять основні відомості про техніко-економічні показники й рекомендації з експлуатації).

Рівень конструкторської діяльності можна оцінити за *ступенем новизни розробки*. Найвищим – I рівнем – є творче (оригінальне) конструювання, за якого розробляють конструкції на підставі нових принципів роботи машин. Наступним – II рівнем – є конструктивне вдосконалення, тобто створення машин, принцип роботи яких відомий, але яким конструктор надає нових якісних характеристик. До III рівня належить розроблення відомих за принципом роботи машин, пристосованих до певних умов експлуатації, а IV рівень передбачає створення низки (гами) машин певного призначення, що відрізняються лише деякими параметрами. Найменше творчий внесок необхідний на V рівні конструювання деталей або складальних одиниць, його роблять для узгодження їх з умовами конкретного виробництва та діючими стандартами. Починаючи свою роботу з останнього – V – рівня конструкторської діяльності, набуваючи досвіду й навичок, можна досягти значного успіху, – творчого виконання серйозних конструкторських завдань, тобто навчитися бути конструктором.

Державний стандарт передбачає п'ять стадій розроблення конструкторської документації на виробі всіх галузей промисловості. Ця документація така:

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проєкт;
- технічний проєкт;
- розроблення робочої документації, або робочий проєкт.

Технологічна підготовка виробництва на підставі конструкторської документації повинна забезпечити комплексне

розроблення технології основних і допоміжних процесів виготовлення нових конструкцій машин на всіх стадіях виробництва. Головною й найбільш відповідальною частиною технологічної підготовки виробництва є проектування технологічних процесів і конструювання технологічної оснастки.

На організаційному етапі проектування технічних систем відбувається остаточне опанування виробництва всіма учасниками процесу створення системи.

Процес проектування технічних систем можна розглядати як сукупність процедур переробки інформації, у результаті якої виникає кінцевий продукт цього процесу – проект. Значна частина таких процедур є типовою, тобто вони призначені для багаторазового застосування під час проектування багатьох типів технічних систем. Розрізняють проектні процедури аналізу й синтезу. Синтез передбачає створення опису технічної системи. Аналіз технічної системи – це проектна процедура, що полягає у визначенні властивостей проекрованої системи та дослідженні її функціональної здатності за її описом. Аналіз передбачає виконання завдань функціонального проектування за допомогою математичних моделей технічної системи на мікро-, макро- й метарівнях.

Модель – це опис системи, що відображає певну групу її властивостей. Математична модель технічної системи дає змогу проаналізувати та передбачити її поведінку в певному діапазоні умов, а також виконувати завдання не лише аналізу, а й синтезу. Залежно від цілей і завдань моделювання його можуть проводити на різних рівнях абстракції.

Систему можна описувати з функціональної точки зору. Функціональний опис необхідний, щоб усвідомити важливість системи, визначити її місце, оцінити відносини з іншими системами. Функціональний опис може бути виконано:

- алгоритмічно;
- аналітично;
- графічно;
- таблично;
- за допомогою тимчасових діаграм функціонування;
- вербально (словесно).

Під час описування системи її розглядають як структуру, у яку в певні моменти часу щось (речовина, енергія, інформація) вводиться, і з якої в певні моменти часу щось виводиться.

Узагальнено функціональний опис системи зображують сімкою:

$$S_f = \{T, x, C, O, y, \varphi, \eta\},$$

де T – множина моментів часу;
 x – множина миттєвих значень вхідних впливів;
 $C = \{c: T \rightarrow x\}$ – множина допустимих вхідних впливів;
 O – множина станів;
 Y – множина значень вихідних величин;
 $Y = \{u: T \rightarrow y\}$ – множина вихідних величин;
 $\varphi: T \times c \rightarrow Q$ – перехідна функція стану;
 $\eta: T \times O \rightarrow y$ – вихідне відображення;
 c – відрізок вхідного впливу;
 u – відрізок вихідної величини.

Проте функціональний опис недостатньо відображає важливі характеристики технічних систем – її структуру та ієрархію. Тому систему доречно також описувати з морфологічної точки зору. *Морфологічний аналіз* – це інструмент системного підходу у винахідництві й в наукових дослідженнях. Метод розроблений відомим американським астрономом швейцарського походження Фріцем Цвіккі.

На теоретико-множинній мові морфологічний опис є четвіркою:

$$S_M = \{S, E, d, K\},$$

де $S = \{S_i\}$ – множина елементів і їх властивостей (під елементом у цьому разі розуміють підсистему, усередину якої не проникає морфологічний опис);
 $E = \{E_j\}$ – множина зв'язків;
 d – структура;
 K – композиція.

Усі множини вважають кінцевими.

Часто виникає необхідність розкласти ціле на складові (*декомпонувати*) або об'єднати складові в ціле (*агрегувати*). Основною операцією аналізу є *декомпонування* за якого

завдання поділяють на підзавдання, систему – на підсистеми, мету – на підцілі. За необхідності цей процес повторюють, що приводить до побудови ієрархічних деревоподібних структур – дерев декомпозиції. На етапі декомпонування, що забезпечує загальне уявлення системи, здійснюють:

- визначення та декомпонування загальної мети дослідження та основної функції системи як обмеження траєкторії в просторі станів системи або області допустимих ситуацій. Найбільш часто декомпонують способами побудови дерева цілей і дерева функцій;

- виділення системи із середовища (поділ на систему / «несистему») за критерієм участі кожного елемента, який розглядають у процесі, що приводить до результату на основі розгляду системи як складової частини надсистеми;

- опис факторів, що впливають;

- опис тенденцій розвитку, різних невизначеностей;

- опис системи як «чорного ящика»;

- функціональне (за функцією), компонентне (за видом елементів) і структурне (за видом відношень між елементами) декомпонування системи.

Розроблення оптимальної конструкції потребує розгляду певної кількості варіантів. Такий спосіб проєктування може привести до багатоваріантних завдань, що виконують за допомогою сучасних математичних методів, а розрахунки роблять за допомогою ЕОМ. На сьогодні значно збільшуються обсяги проєктних робіт. Тому істотне підвищення продуктивності праці інженерно-технічних працівників, зайнятих проєктуванням, може бути забезпечено впровадженням і розробленням систем автоматизованого проєктування (САПР). Їх будують з урахуванням єдиної системи конструкторської документації, єдиної системи технологічної підготовки виробництва, а також автоматизованої системи управління виробництвом. В разі використання для виготовлення машин верстатів із ЧПК і верстатних комплексів завдяки однозначній дискретній системі перетворення інформації доцільно об'єднувати процеси автоматизованого проєктування, автоматизованого програмування й автоматизованого виробництва, що значно скорочує терміни від ідеї до готової продукції.

4.2 Комплекс основних ознак якості продукції технічних систем

Одним із найважливіших напрямків розвитку системних досліджень є вивчення організаційних структур систем, насамперед систем, що мають ієрархічну організацію, особливо технічних. Другий напрямок пов'язаний із розробленням принципів побудови й використання моделей (моделювання), що імітують протікання реальних процесів (наприклад, технологічних), способів об'єднання таких моделей у системи та уявлення системи моделей в ЕОМ.

Не менш важливим є вивчення технологічних систем і технологічних процесів як представників технічних систем із точки зору забезпечення якості їх розроблення й функціонування. Відомо, що зміст і структура технологічних процесів істотно залежать від споживчих властивостей виробів та вимог до рівня їх якості. Зважаючи на це важливо розглянути такі аспекти проблеми якості: загальне поняття якості промислових виробів; аналіз її сутності і структури; способи кількісного оцінювання якості промислової продукції; основні технічні й організаційні способи забезпечення високого рівня якості продукції.

Сучасна наука багато зробила для розвитку окремих питань теорії якості. Ретельно досліджують такі найважливіші показники, як *надійність*, *довговічність*, *точність*. Знайдено перевірені на практиці математичні описи цих понять. Незважаючи на це, наука про якість ще далека від завершальної стадії свого розвитку.

Сучасне трактування поняття якості, що базується лише на зазначених поняттях, збіднює наші уявлення про нього, звужує арсенал наукових і технічних засобів, застосовуваних для його забезпечення. Виникає нагальна потреба переходу від емпіричного встановлення сутності якості промислової продукції до наукового. Тому поняття якості промислової продукції може бути охарактеризовано не розрізненими двома-трьома ознаками, а більш повним їх комплексом.

Загалом під *якістю* розуміють істотну визначеність предмета – те, через що він є цим предметом, а не іншим. Її

оцінюють за сукупністю властивостей, що визначають придатність предмета задовольняти ті або інші потреби користувачів. З нескінченно великої кількості ознак якості можна виділити принаймні 10 найбільш значущих.

Першою й найбільш наочною ознакою якості будь-якої машини та інших матеріальних об'єктів є їх *корисність*. Під корисністю зазвичай розуміють ту характеристику використання матеріального об'єкта, що людина прагне максимізувати, а здатність виробу мати постійну споживацьку вартість є мірою задоволення бажань замовника. Хоча немає способів точного вимірювання цього показника, можна робити висновок про корисність машини за її коефіцієнтом корисної дії, зручністю керування та обслуговування, ступенем відповідності заданим техніко-економічним показникам тощо. Чим вище їх числове значення, тим корисніша машина. Але корисний об'єкт гарний і якісний лише тоді, коли він надійний.

Надійність – це найважливіша характеристика якості, що являє собою властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або потрібного напруження.

Надійність виробу обумовлена його безвідмовністю, ремонтпридатністю, здатністю зберігатися, а також довговічністю. Кожне з цих понять має конкретне визначення в чинних стандартах.

Сучасна технологія машинобудування дає змогу виготовляти продукцію високої якості з усім спектром значень надійності – від наднадійної до економічно доцільної. Загалом надійність виробу визначають за формулою повної ймовірності. У разі безперервної зміни параметрів системи надійність можна охарактеризувати таким виразом:

$$H_{\rho}(t, E) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\alpha) \lambda(\alpha, t, E) d\alpha ,$$

де $P(\alpha)$ – імовірність усталеної роботи виробу за визначених значень параметра α ;

$\lambda(\alpha, t, E)$ – щільність імовірності параметра α в передбачуваних умовах експлуатації E ;

t – заданий період часу надійної роботи виробу.

Виявлення законів розподілу відмов під час експлуатації виробу дає змогу встановити розглянуту далі важливу складову його якості – *довговічність*. Під нею розуміють властивість виробу зберігати корисність і функціональну здатність до обумовленого граничного стану або руйнування з необхідними перервами для технічного обслуговування й ремонтів. Кількісно довговічність оцінюють за загальною тривалістю часу експлуатації (годин роботи), обсягом виконаної роботи (кілометрами пробігу та ін.) або продукції, виготовленої до руйнування виробу чи якого-небудь його граничного стану.

Показник технічного *морального стану* – одна з найважливіших структурних складових понять якості виробів. Причин морального старіння дві: або поява більш якісних аналогів, або виготовлення виробів економічнішими засобами. Момент виведення з експлуатації застарілої техніки визначають за *оптимальним терміном її служби*. У цьому понятті відображено своє вираження техніко-економічні межі тривалості використання продукції.

Оптимальний термін служби виробів – це економічно найбільш вигідний період експлуатації з обмеженим впливом морального й матеріального зношування, а також характером законів розподілу відмов під час експлуатації.

Точність як ступінь відповідності заданим параметрам (розмірам, структурі) – ще один і найважливіший показник якості. Проблема точності є однією з найбільш досліджених. За допомогою апарата сучасної математики (теорії ймовірності, математичної статистики та ін.) аналітично описані методи забезпечення різних точнісних характеристик виробів: розмірних, часових, структурних. Фундаментально досліджені технологічні основи забезпечення точності під час механічного оброблення й складання виробів машинобудування.

Центральною структурною складовою поняття якості є *економічна вигідність*. Економічну вигідність кращої якості оцінюють за системою різних показників, що являють собою два види ефективності: економії в підприємства-виробника та економії, що одержують споживачі, тобто

$$E = E_v + E_c.$$

Економічність значно залежить від технологічної придатності виробу до умов високопродуктивного механізованого або автоматизованого виробництва.

Конструкція виробу повинна забезпечувати зручність його використання й надавати йому привабливого вигляду. Цю ознаку якості оцінюють за критеріями *ергономічності*, *естетичної цінності* та *краси*. Загалом естетична цінність продукції машинобудування може бути визначена сукупністю таких груп показників:

- відповідністю виробу сучасним суспільним потребам;
- зручністю обслуговування, комфортабельністю, тобто ергономічними й психологічними факторами;
- досконалістю художньої композиції (архітектоніки);
- високим рівнем обробки та красою вигляду зовні.

Показник технічної естетичності Π_{TE} виробів може бути обчислений методом середнього оцінювання за бальною системою:

$$\Pi_{TE} = \frac{\sum B_i a_i}{\delta},$$

де B_i – оцінка в балах i -го показника технічної естетики;

a_i – коефіцієнт вагомості i -го показника;

δ – максимальна кількість балів.

Важливими ознаками якості промислової продукції, зокрема під час виходу на світовий ринок, є показники *патентної чистоти* й *відповідності кращим світовим зразкам*. У такому разі враховують наявність патентно-правового захисту конструкції виробу (показник Π_K), способу його роботи (показник Π_C) і товарного знака (показник Π_T). Водночас загальний показник патентної чистоти $\Pi_{н.ч}$ оцінюють способом підсумовування його складових

$$\Pi_{н.ч} = \Pi_K + \Pi_C + \Pi_T.$$

Особливе значення для підвищення якості виготовлення має також система технологічних та організаційних заходів, поєднаних загальним поняттям *культури виробництва*.

4.3 Кількісне оцінювання якості виробів

Крім суто описового оцінювання самого поняття якості, є різні показники й критерії, що дають змогу виразити його в числових, кількісних залежностях. Такі показники та критерії містять державні стандарти, еталони якості, нормалі, сортаменти на промислові вироби, технічні нормативи (завдання) з головних експлуатаційних характеристик, показників точності та інших ознак якості; показники порівняльної характеристики якості для однотипної продукції різного виробництва; методики оцінювання й розрахунки.

Кількісне оцінювання якості продукції може охоплювати такі основні етапи.

1 Аналітичне оцінювання кожної ознаки (окремо) залежно від своїх особливих параметрів:

$$H_d = \varphi(x_{nd}, y_{nd}, \dots), D_2 = \Phi(x_d, y_d, \dots), C_o = \phi(x_o, y_o, \dots), \\ E = F(x_e, y_e, \dots), T_p = f(x_m, y_m, \dots).$$

У цих виразах великими літерами позначені відповідно такі ознаки якості, як надійність, довговічність (обчислювана в натуральних одиницях: годинах, кілометрах пробігу та ін.), оптимальний термін служби, економічна ефективність, точність, а в дужках зазначені параметри, що обумовлюють їх значення.

2 Синтез частково узагальненої характеристики взаємозв'язку якості продукції K_y із показниками продуктивності та собівартості виготовлення.

3 Синтез цілком узагальненої залежності впливу основних ознак якості в єдиній характеристиці. Такий показник може бути обчислений за формулою

$$K_y = \sum_1^i A_i K_i = A_1 H_d + A_2 D_2 + A_3 E + \dots + A_{i-1} T_p + \dots,$$

де K_y – узагальнений показник якості промислового виробу;

K_i – його часткова (структурна) ознака;

i – загальна кількість оцінюваних компонентів якості;

A_1, A_2, \dots, A_i – коефіцієнти ваги кожної зі структурних складових якості.

Варто враховувати, що ті самі коефіцієнти ваги компонентів якості в різних виробів можуть істотно відрізнятися. Зокрема, якщо в пристроях атомної техніки, космічної апаратури та інших подібних до них об'єктах коефіцієнт ваги надійності буде переважати над коефіцієнтом ваги економічності, то у виробках масового споживання ці співвідношення можуть бути іншими.

Теорія й практика ще не прийшли до повної єдності думок щодо способів кількісного оцінювання якості промислової продукції. І на сьогодні продовжується активний процес нагромадження теоретичного та експериментального матеріалу.

Необхідно також звернути увагу на зв'язок якості з *культурою споживання*. Під час споживання виробів якість продукції повною мірою переходить із категорії «можливості» у категорію «дійсність». У такому разі насамперед виявляється властивість *корисності* продукції.

У процесі експлуатації повинні бути забезпечені такі найважливіші характеристики якості виробів, як їх готовність до виконання поставленого завдання, функціональна здатність, надійність. Їх досягають високим рівнем культури експлуатації, що передбачає раціональну систему норм споживання продукції й сировини заданої якості, правил технічного догляду та обслуговування, систему планово-попереджувальних ремонтів, а також відновлення й модернізацію устаткування.

У разі відсутності статичних і динамічних перевантажень, роботі поза зоною резонансу коливань, високої культури споживання продукція машинобудування може досягти проектних показників за оптимальною довговічністю та іншими характеристиками або навіть перевищити їх. Наприклад, фактичний час роботи дизельних двигунів типу «В2» може коливатися в досить широких межах. Унаслідок запуску «нахолодно» й роботи в зоні резонансу власних коливань виробу з коливаннями всієї установки були випадки аварійного виходу дизелів із ладу протягом перших годин роботи. Водночас у результаті його ретельного обслуговування та правильного догляду, а також використання спеціальних присадок до мастил деякі дизелі на нафтопромислах напрацьовували до

12 000 годин, що в кілька разів перевищувало їх проектну довговічність.

Досить важливим є також використання фактичних результатів експлуатації виробів – достовірне, повне й безперервне статистичне дослідження цих матеріалів і вибір на їх підставі заходів конструктивного і технологічного порядку для підвищення надійності, довговічності, економічності, покращання вигляду машин зовні й систематичного підвищення інших показників якості.



Запитання для самоперевірки

- 1 Охарактеризуйте етапи процесу створення нової технічної системи або її окремого функціонального вузла.
- 2 Що таке «фрейм-підхід»?
- 3 Охарактеризуйте фрейм-модель прогнозування та створення нової технічної системи.
- 4 Що відбувається на технічному підетапі процесу проєктування технічної системи?
- 5 Який рівень новизни конструкторської розробки є найвищим і чому?
- 6 Що передбачають проєктні процедури аналізу й синтезу технічних систем?
- 7 Як варто трактувати поняття математичної моделі технічної системи?
- 8 На чому базується функціональний опис технічної системи?
- 9 Що таке «морфологічний аналіз»?
- 10 Які операції здійснюють на етапі декомпозиції під час системного аналізу технічної системи?
- 11 Який комплекс основних ознак якості продукції та структура якості?
- 12 Як кількісно оцінюють якість виробів?
- 13 Що передбачає поняття культури виробництва і культури споживання?



Тема 5 Теоретико-множинні принципи класифікації елементів технологічних процесів і систем

5.1 Формалізація об'єктів за допомогою символів

Для формалізації, короткого й змістовного характеризування множин корисне застосування принципів *символічної логіки*, що досліджує *структурні моделі* різних систем. Це передбачає насамперед позначення об'єктів дослідження деякими *символами*. Загальний зміст використання символів полягає в тому, що вони, за виразом В. Лейбніца, коротко виражають найінтимнішу сутність речей і в цьому разі разюче скорочується робота думки. Важливим є положення, що відношення множин будь-яких об'єктів можуть бути замінені логічними відношеннями їх символічних позначень. Як довів Д. Буль, справедливість процесу аналізу не залежить від інтерпретації символів, що трапляються, а лише від законів їх сполучень. Нарешті, скорочені символічні позначення дають змогу більш ефективно використовувати ЕОМ для розпізнавання букв і цифр та ухвалення рішення за станом відображуваних множин.

Інтерпретацію множин за допомогою геометричних образів розробляли такі вчені, як Л. Ейлер, Д. Венн і П. С. Порецький. Розглянута нами інтерпретація відношень множин за допомогою кіл Л. Ейлера досить наочна. Проте для відношень множин кількістю три й більше така інтерпретація стає громіздкою. Оскільки для механічної обробки та складання типові відношення саме трьох множин – верстатів, інструментів і пристроїв, – їх геометрична інтерпретація неприйнятна.

Інший спосіб – відшукування відношень будь-якої кількості множин методами комбінаторики й теорії сполучень, за якого елементам множини надають буквених символічних позначень. Дослідження в цьому напрямку проводили такі вчені: Д. Венн та І. Піаже (сорокові роки ХХ століття) позначили кожен елемент буквами p, q, r, \dots , П. С. Порецький (1902 р.) – через a, b, c, \dots ,

Б. М. Кедров (п'ятдесяті роки ХХ століття) буквами – *A, B, C,...* Ці дослідники використовували спеціальні знаки для фіксування факту відсутності елементів у сполученні. Зокрема, Д. Венн та І. Піаже над буквою відсутнього елемента ставили ризку; П. С. Порецький унизу й праворуч від відповідної букви зазначав знак нуля; Б. М. Кедров за відсутності якого-небудь елемента вважав кращим просто не наводити його позначення. На жаль, під час застосування цих способів символічних позначень не передбачали принципово важливе кількісне та якісне оцінювання складових елементів. Тобто зазначена система символічних позначень елементів множин дає лише інформацію про наявність певних елементів у множині без конкретизації їх кількості та якісних ознак. Така мінімальна формалізація, достатня в разі умовного позначення логічних понять, стає недостатньою в разі символічного описування таких багатогранних за своїми властивостями множин, як знаряддя праці. Зокрема, основними знаряддями праці в механоскладальному виробництві є три якісно різних множини: верстати, інструменти та пристрої. Ці множини беруть як об'єкти класифікації. Їх сукупність «відкрита», тобто дає змогу вводити в неї інші різновиди знарядь праці.

5.2 Символічні визначення верстатів, інструментів та пристроїв як множин, що співвідносяться між собою

Верстат, інструмент і пристрій як складові частини технологічної системи так само є підмножиною великої множини знарядь праці свого типу: конкретний різальний інструмент – це представник усієї номенклатури інструменту, що випускається тощо. Множина кожного з елементів технологічної системи може бути розглянута як сполучення множин конкретних знарядь праці з різноманітними кількісними та якісними ознаками. Теоретико-множинний підхід дає змогу здійснити структурно-класифікаційний аналіз верстатів, інструментів і пристроїв як множин, що співвідносяться між собою.

Для цього беруть такі символи: множини верстатів позначають буквою *B*, інструментів – *I*, пристроїв – *П*.

Для кількісного оцінювання кожного з елементів технологічної системи використовують спеціальні коефіцієнти множинності: h , n , m . У цьому разі символічні позначення відповідно такі: B_h, I_n, Π_m .

Кожний із коефіцієнтів множинності може мати три якісно різноманітних стани:

а) дорівнювати нулю ($h = 0, n = 0, m = 0$), що означає відсутність відповідної множини або за термінологією символічної логіки – наявність порожньої множини;

б) дорівнювати одиниці ($h = 1, n = 1, m = 1$) – використання кожного зі знарядь праці в одиничній кількості;

в) бути більшим за одиницю ($h > 1, n > 1, m > 1$), тобто сполучення охоплює по кожному зі знарядь праці – загальна комбінація множин; у цьому разі h, n, m мають лише цілочислові значення.

Використання коефіцієнтів множинності дає змогу точно кількісно оцінювати будь-які скінченні множини.

Проте, крім кількісного оцінюванн, кожна множина може бути оцінена також за показниками якісного стану. Оскільки в кожній множині кількість показників, за якими можна оцінювати її якісний стан фактично дорівнює нескінченності, то показник якісного оцінювання будь-якої множини символічно може бути зображений знаком нескінченно великої кількості ознак $\sum_{i=1}^{\infty} (як)_i$.

Для зменшення громіздкості позначень зручніше замінити зазначений показник якісного оцінювання множини однією буквою, наприклад I . У цьому разі позначення верстатів, інструментів і пристроїв мають такий вигляд: B_h^I, I_n^I, Π_m^I . Водночас з'являється можливість установаження загальних принципів класифікування елементів технологічної системи. Вони полягають у тому, що за незмінності об'єктів дослідження можлива побудова будь-яких класифікаційних систем за властивостями, що нас цікавлять, – якісними ознаками. Для створення систематики достатньо виконати дві умови:

– обмежити нескінченну множину ознак якості

$l = \sum_{i=1}^{\infty} (як)_i$, вибравши певні показники, що нас цікавлять

(наприклад, наведені в табл. 5.1);

– установити правила розподілу об'єктів за цими ознаками.

5.3 Загальні принципи систематики елементів технологічної системи за ознаками механізації

Розглянемо приклад систематики верстатів, інструментів і пристроїв за таким якісним показником, як ознака механізації. Е У цьому разі показник l буде замінено на один із трьох – p , m , a – згідно з такими умовами:

– на p – за ручного використання знарядь праці (знарядь праці ручної дії);

– на m – якщо знаряддя праці механізованої дії;

– на a – якщо знаряддя праці автоматичної дії.

Зважаючи на це, елементи технологічної системи одержують такі символічні позначення:

$$B_h^p, B_h^m, B_h^a, I_n^p, I_n^m, I_n^a, \Pi_m^p, \Pi_m^m, \Pi_m^a.$$

Кожний із трьох видів знарядь праці оцінюють за цими єдиними ознаками технічного стану, що дає змогу будувати класифікацію на загальній методологічній основі. Верстат, інструмент або пристрій класифікують як ручний, механізованої або автоматичної дії за визначальними ознаками, зазначеними в таблиці 5.2. Ця класифікація знарядь праці відрізняється такими особливостями: насамперед об'єктами дослідження взяті всі три види множин основних знарядь праці механоскладального виробництва: верстати, інструменти й пристрої. Головним принципом систематизації є розподіл їх у середині свого виду за трьома показниками технічного стану, що відбиває історичний характер їх розвитку від нижчої стадії до вищої, а саме – від знарядь праці ручної дії через механізовані до автоматизованих.

Таблиця 5.1 - Можливі варіанти якісних показників

<i>Класифікаційна ознака</i>	<i>Умове позначення зняряддя праці</i>	<i>Примітка</i>
ПД, БД	ПД – переривчастої дії; БД – безперервної дії	Можливе кількісне оцінювання коефіцієнтами безперервності
НТ, ПТ, ОТ	НТ – нормальної точності; ПТ – підвищеної точності; ОТ – особливої точності	Припустимі відхилення менші в 1,6 раза. Те саме у 2,5–4 рази
Л, Ср, Вл, Вж, Ун	Л – легкі (настільні); Ср – середні; Вл – великі; Вж – важкі; Ун – унікальні	Верстати вагою: – до 0,5 т; – 10 т; – 30 т; – 100 т; – понад 100 т
СК, СВ, СН	СК – ті, що самокерують циклом; СВ – ті, що самовідновлюють цикл; СН – ті, що самоналаштовуються в разі відхилення від режимів	Переважно для класифікування верстатів
НА, АБЗ, АЗ, АЗПН	НА – напівавтомати; АБЗ – автомати без автоматичного зворотного зв'язку; АЗ – автомати з автоматичним зворотним зв'язком; АЗПН – автомати з автоматичним зворотним зв'язком, пам'яттю й самоналаштуванням	Переважно для класифікування верстатів

Таблиця 5.2 – Класифікація верстатів, інструментів і пристроїв за ознакою механізації

Умовне позначення	Клас знаряддя праці (за їх використанням)	Визначальна ознака
1	2	3
B^p	Верстати ручної дії без механізованого приводу й виконавчих органів верстата	Ручне робоче переміщення заготовки в процесі оброблення й ручний привід головного руху
B^{pp}	Верстати ручні привідні без механізованого руху предмета праці, але з механізованим приводом головного руху	Ручне робоче переміщення предмета праці в процесі оброблення як наслідок відсутності механізмів для його переміщення (так званого «самоходу») та механізований головний рух
B^m	Верстати механізовані з примусовим зв'язком виконавчого органу із заготовкою та інструментом, але без автоматизації керування циклом обробки (ручним керуванням)	Наявність механізмів для виконання основних (головного й подачі) та допоміжних рухів, але відсутність пристроїв автоматизації керування
B^a	Верстати автоматизованої (автоматичної, напівавтоматичної) дії з примусовим зв'язком виконавчого органу з заготовкою та інструментом, автоматизацією циклу обробки	Наявність механізмів для виконання основних і допоміжних рухів та пристроїв для автоматизації керування циклом обробки

Продовження таблиці 5.2

1	2	3
<i>I^p</i>	Інструменти ручні без примусового зв'язку їх із механізованим джерелом руху або виконавчого органу верстата	Приведення в дію інструмента вручну, чи його ручне робоче переміщення в процесі оброблення як наслідок відсутності механізмів для виконання основних рухів (головного й подачі)
<i>I^{рп}</i>	Інструменти ручні привідні, що мають частковий примусовий зв'язок із механізованим джерелом руху (електро-, пневмо-, гідропривідні інструменти з ручною подачею)	Ручне робоче переміщення інструмента
<i>I^m</i>	Інструменти механізовані, цілком примусово пов'язані з механізованим джерелом руху або виконавчим органом верстата, але такі, що не відновлюють свої початкові властивості	Наявність механізмів для надання інструменту основних рухів (головного й подачі), але відсутність пристроїв для механізованого відновлення початкових координат розмірного ланцюга обробки та поновлення необхідного фізичного стану робочих поверхонь інструмента
<i>I^a</i>	Інструменти автоматичних систем	Наявність механізмів для надання інструменту

Продовження таблиці 5.2

1	2	3
<i>I^a</i>	цілком примусово пов'язані з механізованим джерелом руху або з виконавчим органом верстата й автоматично відновлюють свої робочі властивості та початкові координати	основних рухів і механізмів, що автоматично керують процесами відновлення початкових налагоджувальних координат та робочих властивостей інструментів-автопідналадчиків, пристроїв для заміни спрацьованих граней або інструмента, що затупився
<i>II^p</i>	Пристрої ручної дії без примусового зв'язку з механізованим джерелом руху або з виконавчим органом верстата	Ручне встановлення (зняття) і ручне закріплення (розкріплення) заготовки
<i>III^m</i>	Пристрої механізовані, із примусовим зв'язком, механізованим джерелом руху або виконавчим органом верстата	Ручне встановлення (зняття) заготовки, але її механізоване закріплення (розкріплення)
<i>IV^a</i>	Пристрої автоматизовані, примусово пов'язані з виконавчими і командними органами верстата або механізованим джерелом руху	Автоматичні підведення, установлення й закріплення заготовки; автоматичні розкріплення, зняття та відведення обробленої деталі

5.4 Класифікація верстатів

Верстати *ручної дії* – це будь-які верстати, на яких оброблювана заготовка не має механічного зв'язку з виконавчими органами, тому предмет праці утримується робітником руками та вручну подається ним у зону обробки. У такому разі можливі два варіанти:

а) у верстата немає механізмів подачі;

б) у верстата немає не лише механізмів подачі, а й механізованого привода головного руху, тобто всі дії виконуються завдяки м'язовій енергії робітника.

За другого варіанта маємо найнижчу за своїми виробничими властивостями форму верстатів *ручної дії*, тобто з ручною подачею деталі $S_{\partial em}^P$ і ручним головним рухом V^P . Штучний час використання такої форми верстатів на 100 % є ручним. Подібні верстати в чистому вигляді на практиці трапляються дуже рідко.

Інший, технічно більш досконалий різновид верстатів *ручної дії*, так званий «*ручний привідний*», значно поширений і тепер. До них належать верстати, під час роботи на яких головний рух може бути механізованим V^M , але рух подачі предмета праці

$S_{\partial em}^P$ виконується вручну.

Протягом усього штучного часу оброблення машинний час на таких верстатах цілком перекривається ручним. Процес відбувається за безперервної й особистої участі робітника. Операторові досить на одну мить зняти руки з предмета обробки, і технологічний процес припиниться.

Прикладом найбільш поширених верстатів *ручної приводної дії* можуть бути різноманітні заточувальні верстати або так звані полірувальні «бабки». За їх допомогою за безперервної й безпосередньої *ручної праці* робітника виконуються багато зачисних та довідних операцій. Це є підставою для класифікування таких верстатів до верстатів *ручної дії*, але в розділ *привідних*, оскільки є механізований привід головного руху різання.

Під час виготовлення калібрів і лекал досить поширені

також плоскошліфувальні верстати ручної привідної дії. Їх класифікування в розділ верстатів ручної привідної дії обумовлено ручною подачею виробу, установленого на столі верстата.

Отже, якщо є ручне робоче переміщення стола (шліфувального, фрезерного та ін.), то такий верстат належить до класу ручних привідних.

Верстату може бути наданий індекс «рп» (ручної привідної дії) на різних операціях фрезерування контурів деталей за накладними копіями, якщо робітник безперервно вручну подає стіл верстату з деталлю й укріпленим на пристрої копіром до зіткнення останнього з контактною поверхнею різального інструмента ($S_{дет}^P, V^M$).

Два інших великих класи металообробних і складальних верстатів – *механізованої й автоматичної дії* – оцінюють за загальноприйнятими показниками. Їм властиві ознаки, наведені в таблиці 5.2.

5.5 Класифікація металообробних та слюсарно-складальних інструментів

Відповідно до визначальних ознак за таблицею 5.2 до класу знарядь праці *ручної дії*, що оцінюють показником I^P , належать усі інструменти, які не мають примусового зв'язку з механізованими джерелами руху. Серед них – найпростіші слюсарні металооброблювальні інструменти: напилки, шабери, ручні ножиці, слюсарні мітчики, лерки та ін.

Так само як у верстатів, між інструментами цілком ручної дії й механізованими є проміжний різновид інструментів I^{PII} – *ручні привідні*. Їх типовою особливістю є наявність ручної подачі інструментів під час механізованого виконання головного руху, тобто робота в умовах $S_{ін}^P, V^M$.

Працівник, який користується ручними привідними інструментами, частково або повністю сприймає зусилля та

обертальні моменти під час роботи, створює зусилля подачі, сприймає та гасить вібрації тощо.

Ручні привідні інструменти широко використовують в усіх видах механоскладального виробництва. Їх можна зустріти конструктивно оформленими у вигляді спеціальних ручних інструментів – так званих «машинок» для зачищення виливків, загвинчування нарізних шпильок, притирання клапанів до сідел, оброблення лопаток гідротурбін та ін. До них також належать пневмо- й електрогайковерти, електро- та пневмодрилі, шуруповерти, електроперфоратори, електро- й пневмо-шліфмашини, так звані «болгарки» (кутові шліфувальні машини), електрошабери, стрічкові електронапилки та ін. Використання ручних привідних інструментів замість ручних є істотним кроком у підвищенні культури виробництва, особливо на слюсарно-складальних, заготівельних та оздоблювальних операціях, на яких воно підвищує якість роботи та її продуктивність у 2–3 рази й більше.

Водночас проблему механізації не можна зводити до оснащення виробництва лише ручними привідними інструментами, це прояв лише початкового етапу механізації.

Є також низка недоліків, специфічні особливості ручних привідних інструментів, спеціальні умови їх використання. Установлено, що внаслідок роботи інструментами обертОВОЇ дії типу свердлильних, шліфувальних, полірувальних та інших ручних машинок із найбільш характерними для них частотами 35–250 Гц у робітника може виникати віброхвороба. І навпаки, тоді, коли робота з ними становить не більше 25–40% робочого часу, випадки віброхвороби майже не спостерігаються.

Зважаючи на це з цим раціональне використання ручних привідних інструментів передбачає загальне обмеження часу впливу вібрацій на робітника способом чергування операцій, введенням додаткових перерв тощо. Нарешті ухвалюють різні конструктивні рішення, спрямовані на скорочення або повну ліквідацію шкідливих впливів цього виду інструменту.

Інструменти ручної привідної дії використовують не лише на слюсарних роботах, а й іноді на металорізальних верстатах. Наприклад, на фізично важкій операції полірування шатунної шийки колінчастого вала натискний робочий інструмент є типовим інструментом ручної привідної дії. Операцій із подібними

інструментами залишається вже мало. Також у виробництві ще зустрічаються операції центрування базових отворів у деталях типу валів, втулок, клапанів, шпильок та ін. із використанням інструментів ручної привідної дії, наприклад на верстаті моделі 283, що надає центрувальним свердлам лише обертання. Їх робоча подача виконується лише вручну. Зусилля подачі створює сам робітник. Отже, процес здійснюється в умовах $S_{ін}^P$, V^M .

До I^{PII} належать також інструменти з ручною подачею на свердильних, токарних і револьверних верстатах (що переміщуються за допомогою пінолей, супортів або головок) та інструменти з ручною подачею на багатьох інших видах металорізальних верстатів. Це такі інструменти, як різці, свердла, зенкери, розгортки, шліфувальні кола на внутрішньо-шліфувальних верстатах, що подають вручну за допомогою шпіндельних головок, та ін. (див. рис. 5.1).

Інструменти іншого класу – *механізованих* знарядь праці – запускають лише механізми, без участі людини. Вони характеризуються наявністю головного руху V^M і подачі $S_{ін}^P$. Типовими представниками цього класу механізованих знарядь праці є металообробні інструменти, використовувані на будь-яких верстатах, здатних передавати інструментам усі рухи, необхідні для виконання робочого процесу.

Для сучасного етапу розвитку машинобудування характерним є принципово новий підхід до використання металообробних інструментів. Автоматичний процес на окремому верстаті, у групі верстатів або автоматичній лінії потребує самоналаштування та самовідновлення експлуатаційних якостей не лише від самих верстатів, а й від різальних інструментів. Саме це зумовило появу нового класу інструментів із показником I^a , призначених для використання в автоматичних верстатах і системах.



Рисунок 5.1 – Приклади інструментів із ручною подачею типу I^{PI} (ручних привідних)

З відомими, звісно, умовностями, властивими будь-якій систематиці, як визначальну ознаку для цього класу інструментів можна взяти їх специфічні можливості із самовідновлення різальних (робочих) властивостей і початкових налагоджувальних координат. Крім того, передбачене оцінювання тих властивостей конкретного інструмента, що в таблиці 5.2 належать до розряду першочергово рекомендованих.

Новий клас інструментів I охоплює як одиничні інструменти, так і їх налагодження, блоки й спеціальні автоматизовані інструментальні пристрої. Одним із практичних нюансів нової класифікації є обов'язкове урахування тієї обставини, що не можна, помістивши звичайний інструмент на автоматизований верстат, надати такому інструментові індекс нової техніки I^a .

Якщо на револьверний автомат установити звичайне свердло, то сам факт установки інструмента в автоматичну систему не додасть йому властивостей відповідності цій системі та не дасть змоги оцінювати його індексом I^a . Як і раніше, таке свердло буде мати позначення I^m , доки не одержить спеціальних конструктивних удосконалень відповідно до особливостей цього автоматичного процесу, що покращить ефективність його дії та надасть йому функціональної здатності самовідновлюватися.

Значно конструктивно змінені й перероблені згідно з умовами автоматичного підведення, використання та виведення із зони різання, наприклад, пальцеві фрези, що заокруглюють зубці (рис. 5.2). Вони встановлені на верстаті мод. 3106В, який працює в автоматичній лінії виготовлення двовінцевих циліндричних зубчастих коліс.

Для точіння роторів електродвигунів на токарному автоматі 1А933Б було конструктивно перероблено різець, забезпечено стабільну розмірну стійкість, а державку оснащено регульованим упором. За допомогою автоматичної гідросистеми в разі зношення різця відбуваються його автоматичне видалення й заміна новим (рис. 5.3).

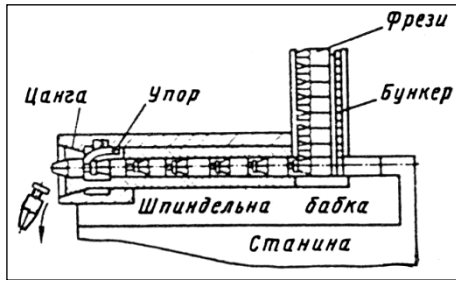


Рисунок 5.2 – Автоматичне використання фрез, що заокруглюють зубці

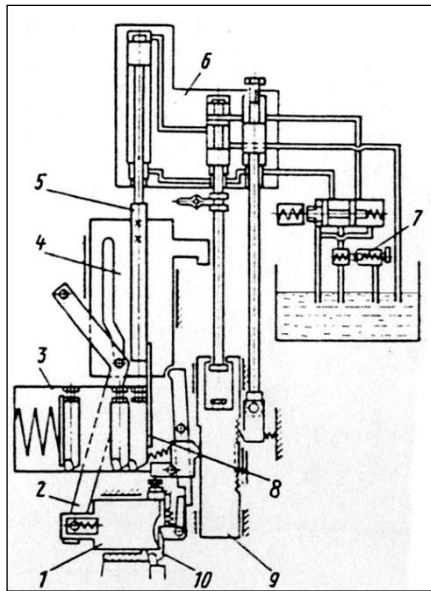


Рисунок 5.3 – Автопідналагоджування різців із системою зворотного зв'язку:

- 1 – каретка; 2 – важіль відведення каретки в позицію заміни різця; 3 – касета із запасними різцями; 4 – копій заміни зношеного різця; 5 – штовхач нового різця в робочу позицію;
- 6 – гідросистема; 7 – золотник керування циклом;
- 8 – виштовхувач зношеного різця; 9 – копій автопідналагоджування частково зношеного різця і його подачі в сторону деталі; 10 – робочий різець

Інший варіант автопідналагоджування різців у разі їх спрацювання зображений на рисунку 5.4. Саме таке конструктивне рішення самопоновлення початкових налагоджувальних координат і робочих властивостей різального інструмента прийняла американська фірма «Сандстренд». Автоматизований блок із 10 різців призначений для точіння роторів невеликих електродвигунів. Час роботи кожного з інструментів залежить від команд датчика зворотного зв'язку, що спрацьовує в момент перевищення заданих розмірів оброблюваної деталі через спрацювання різця.

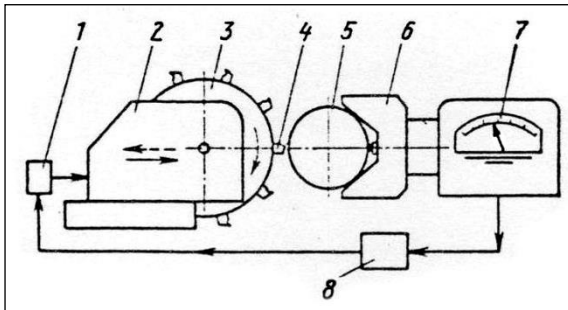


Рисунок 5.4 – Механізм автопідналагоджування різців у разі їх спрацювання:

- 1 – виконавчий механізм; 2 – полозки; 3 – різцевий барабан;
- 4 – різець; 5 – оброблювана деталь; 6 – вимірювальна скоба датчика зворотного зв'язку; 7 – відліково-командний пристрій;
- 8 – підсилювач імпульсів

5.6 Класифікація встановлювальних і слюсарно-складальних пристроїв

Загальні принципи класифікації встановлювальних пристроїв, застосовувані в механоскладальному виробництві, залишаються тими самими, що й для верстатів та інструментів. Визначальні ознаки їх систематизації зазначені в таблиці 5.2.

За ознаками механізації встановлювальні пристрої поділяють на три основні класи.

До *першого* класу (IP) належать найпростіші пристрої з *ручними*, наприклад гвинтовими, затискачами. Пристрої ручної дії малопродуктивні, не гарантують надійності закріплення деталей, сили закріплення в них нестабільні.

Цих недоліків позбавлені пристрої *другого* класу – *механізовані* (IP^m). У них ручні дії можуть бути потрібними лише для встановлення й зняття деталей, якщо вироби не занадто важкі. На операціях механічного оброблення та складання використовують різноманітні механізовані пристрої, що значно перевершують за своїми можливостями пристрої першого класу.

До *третього*, найбільш досконалого класу пристроїв *автоматичної дії* (IP^a) належать ті, у яких механізовано не лише закріплення та розкріплення деталі, а й усі інші дії. Без участі людини, наприклад зі спеціального приймача магазинного або бункерного типу та за допомогою командних пристроїв, пов'язаних із роботою виконавчих органів верстата, деталі в потрібний час і заданою кількістю надходять у зону оброблення, а потім, також без участі людини, механізовано виводяться з неї. Прикладом пристрою третього класу може бути кондуктор автоматичної дії для свердління отворів у деталях типу валів або втулок (рис. 5.5).

Пристрої автоматичної дії пов'язані з іншими знаряддями праці – верстатом та інструментом – не лише просторово (контактом), а й кінематично. У цьому виявляється якісно нова особливість пристроїв третього класу.

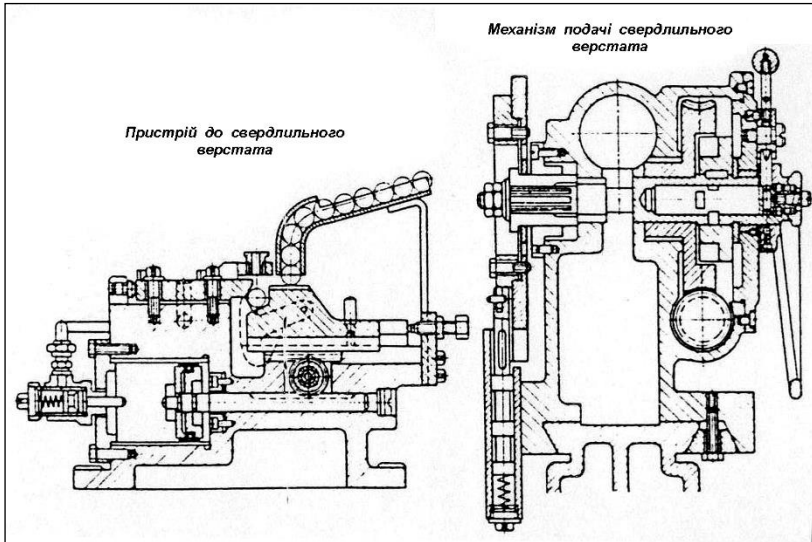


Рисунок 5.5 – Автоматизований кондуктор для свердління виду Π_1^a

Необхідно також зазначити, що для оцінювання технічного стану і структури пристроїв, здебільшого, використовують поняття *коефіцієнта оснащеності*, під яким розуміють відношення кількості всіх видів пристроїв до кількості найменувань оброблюваних деталей. Такий усереднений показник доцільний лише в першому наближенні, оскільки він описує множину різноманітних предметів лише кількісно, без урахування їх якості. Структурний аналіз дає змогу, зокрема, розглядати загальний коефіцієнт оснащеності $K_{осн}$ як структурно складний показник, що складається з трьох якісно різноманітних складових:

$$K_{осн} = \frac{\sum \Pi^l}{\sum Д} = \frac{\Pi^p + \Pi^m + \Pi^a}{\sum Д} = \frac{\Pi^p}{\sum Д} + \frac{\Pi^m}{\sum Д} + \frac{\Pi^a}{\sum Д} = K_{осн}^p + K_{осн}^m + K_{осн}^a ,$$

де ΣD – загальна кількість найменувань деталей, оброблюваних у пристроях;

$K_{осн}^p$, $K_{осн}^m$, $K_{осн}^a$ – коефіцієнти оснащення за видами механізації пристроїв: ручної, механізованої та автоматизованої дії.

?

Запитання для самоперевірки

- 1 Як можна формалізувати об'єкти?
- 2 Хто з учених займався питаннями інтерпретації множин?
- 3 Чому верстати, інструменти й пристрої є трьома основними множинами знарядь праці механоскладального виробництва?
- 4 Які символічні позначення верстатів, інструментів і пристроїв як множин? Що таке коефіцієнти множинності та показники якісного оцінювання множин?
- 5 Наведіть класифікацію верстатів за ознакою механізації.
- 6 Наведіть класифікацію інструментів за ознакою механізації.
- 7 Наведіть класифікацію пристроїв за ознакою механізації.



Тема 6 Дослідження технологічних процесів механоскладального виробництва на рівні середніх та елементарних структурних утворень

6.1 Класифікація елементів технологічної системи та їх оцінювання за стадіями розвитку

Будь-яке знаряддя праці (наприклад, елементи технологічної системи – верстат, пристрій, інструмент) у своєму розвитку проходять три стадії:

а) коли знаряддя праці є носієм вищої продуктивності, кращої якості обробки, найменшої собівартості (так звана «нова техніка», для її оцінювання використовують показник «*H*», тобто позначення від слова «новий»);

б) згодом воно стає часто використовуваним у виробництві й загальнопоширеним (показник – «*3П*», тобто позначення від слова «загальнопоширений»);

в) останній етап існування знаряддя праці – поява нового кращого зразка (етап морального або технічного старіння, показник – «*СТ*», тобто позначення від слів «старий», «застарілий»).

У такому разі застосовуючи теоретико-множинний підхід до елементів технологічної системи, можна побудувати їх класифікацію, що враховує технічний стан верстатів (*B*), інструментів (*I*) та пристроїв (*П*), що разом із оброблюваною деталлю становлять єдину технологічну систему:

$$B_h^{CT}, B_h^{3П}, B_h^H, I_n^{CT}, I_n^{3П}, I_n^H, П_m^{CT}, П_m^{3П}, П_m^H.$$

Наведена класифікація має важливе значення для виявлення внутрішніх резервів і можливих удосконалень технологічних процесів. Аналіз класифікаційних видів елементів технологічної системи також дає змогу визначити момент виведення застарілої техніки з виробництва та її заміни новою.

Для оцінювання знярядь праці показниками технічного (морального) стану, тобто для класифікації верстатів, інструментів і пристроїв до розряду *нової, загальнопоширеної* або *застарілої* техніки (із відповідними індексами «Н», «ЗП», «СТ»), використовують розглянуту далі методику.

У результаті вдосконалення зняряддя праці може перейти зі стану «ЗП», що оцінюють 100%-м рівнем продуктивності, у розряд «Н» із певним підвищеним рівнем продуктивності. Необхідно визначити межі, за якими верстатам, інструментам і пристроям можуть бути надані індекси «Н».

Для умовних розрахунків візьмемо щорічні темпи зростання продуктивності праці в розмірі 10 %.

Умова зростання продуктивності праці, якщо завдання рівномірні, може бути описана експоненціальною кривою

$$Q_t = Q_o \cdot q^t, \quad (6.1)$$

де Q_t – рівень продуктивності праці в будь-який t -й період часу;
 Q_o – вихідний розрахунковий рівень продуктивності праці;
 q – середнє значення коефіцієнта щорічного зростання продуктивності праці.

За умови $Q_o = 1$ та $q = 1,1$ рівняння (6.1) матиме вигляд

$$Q_t = 1,1^t. \quad (6.2)$$

Графік функції (6.2) з усіма необхідними для побудови координатами наведено на рисунку 6.1.

Щоб забезпечити постійний технічний прогрес, елементи технологічної системи та інші технічні засоби повинні мати резервні запаси продуктивності. Так створюють умови для стійкої роботи виробничо-технічних систем аж до вичерпання тим або іншим засобом наявного в ньому резерву продуктивності, тобто до морального (технічного) старіння систем. У такому разі з'являється можливість дослідження взаємного зв'язку між запасами продуктивності й часом їх витрати відповідно до запланованих темпів зростання продуктивності праці. Прийmemo такі умовні позначення:

i – порядковий номер удосконалення виробничо-технічних

систем;

Q_{yi} – рівень умовної усередненої продуктивності i -го вдосконалення;

ΔQ_{yi} – розмір перевищення усередненого рівня продуктивності i -го вдосконалення над її початковим рівнем (характеристика зростання резервної продуктивності);

F_{ei}, F_{ni} – оцінки однакових обсягів випуску продукції на i -му етапі функціонування системи, підраховані відповідно до зміни продуктивності за експонентою F_{ei} або умовно-горизонтальним рівнем продуктивності F_{ni} ;

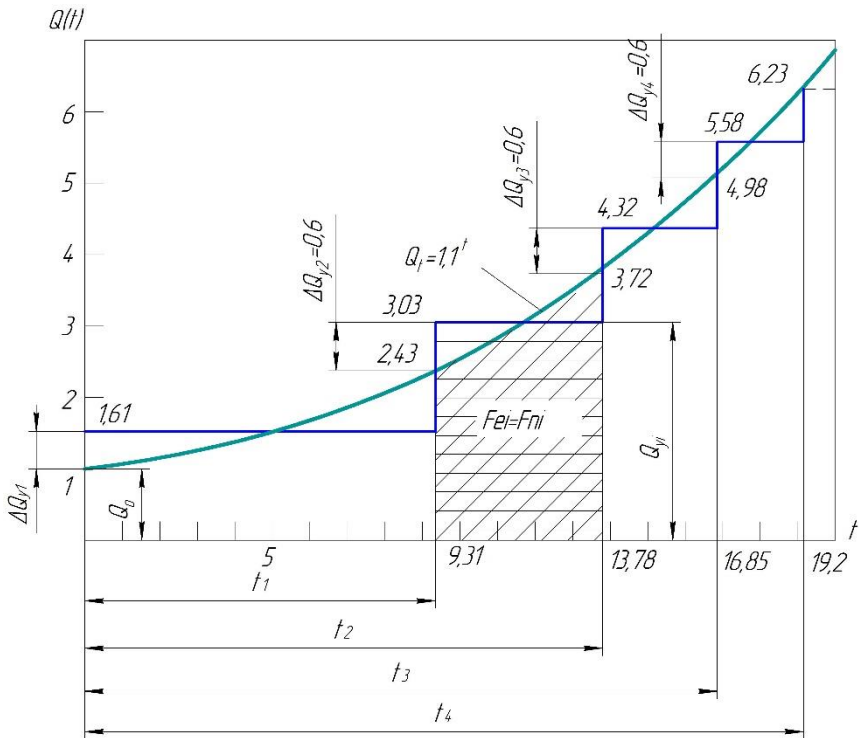


Рисунок 6.1 – Графік до розрахунку меж технічної новизни технологічних систем

t_i – календарний термін використання i -го вдосконалення (наприклад, років);

t_{oi} – час оптимального функціонування i -ї системи між її вдосконаленнями. За наведеними визначеннями

$$t_{oi} = t_i - t_{i-1} \quad (6.3)$$

Задача 1

Необхідно обчислити періоди оптимального функціонування технологічних систем між часом їх удосконалення й моментом морального старіння за різноманітних $i = (1, 2, 3 \text{ і т. д.})$ залежно від характеристик зростання резервної продуктивності праці та темпів її витрати.

Розв'язання

За основу беруть положення, що оптимальним періодом функціонування i -ї системи можна вважати час t_{oi} , протягом якого повністю витрачається резерв продуктивності, потенційно закладений у систему в результаті її вдосконалення. За цей період система спроможна видати обсяг продукції, що відповідає добутку продуктивності праці на час, який у тих самих координатах (див. рис. 6.1) графічно обумовлений площею.

Цю величину можна обчислити двома способами. У разі зміни продуктивності, наприклад, за експонентою (6.2) площа, що відповідає обсягу виробництва продукції на i -му етапі, становитиме

$$F_{ei} = Q_o \int_{t_{i-1}}^{t_i} q^t dt . \quad (6.4)$$

Площа F_{ei} заштрихована на рисунку 6.1 похилими лініями. Але цей самий обсяг продукції F_{ei} можна оцінити за площею рівновеликого їй прямокутника F_{ni} , заштрихованого горизонтальними лініями, тобто

$$F_{ni} = F_{ei} . \quad (6.5)$$

Розмір цієї площі дорівнює

$$F_{ni} = Q_{yi}(t_i - t_{i-1}). \quad (6.6)$$

Надалі можна виключити з розрахунку умовне усереднення рівня продуктивності Q_{yi} і враховувати замість нього вплив характеристики зростання резервної продуктивності ΔQ_{yi} . Як впливає з початкових умов,

$$Q_{yi} = q^{t_i-1} + \Delta Q_{yi}. \quad (6.7)$$

Спільне розв'язання рівнянь (6.4), (6.5), (6.6) та (6.7) приводить до встановлення загальної залежності

$$q^{t_i} - q^{t_i-1} - \frac{\ln q}{Q_o} (q^{t_i-1} + \Delta Q_{yi})(t_i - t_{i-1}) = 0. \quad (6.8)$$

За загальним рівнянням (6.8) знаходимо частинні розв'язки.

За першого вдосконалення системи, вважаючи в рівнянні (6.8) $i = 1$, $q = 1,1$, $t_o = 0$ та $\Delta Q_{y1} = 0,61$, знаходимо

$$1,1^{t_1} - 0,1534t_1 - 1 = 0. \quad (6.9)$$

Методом послідовних наближень (методом ітерацій, методом Ньютона або розкладанням у ряд Тейлора) визначаємо, що рівняння (6.9) перетворюється на тотожність за умови $t_1 = 9,31$ року. Шуканий термін оптимальної дії першого вдосконалення відповідно до формули (6.3)

$$t_{o1} = t_1 - t_o = 9,31 \text{ (року)}.$$

Необхідне потім друге вдосконалення системи буде оптимальним до часу t_2 , що можна знайти, підставивши в рівняння (6.8) частинні значення: $i = 2$, $\Delta Q_{y2} = 0,6$, $q = 1,1$ та $q^{t_i-1} = 1,1^{t_2-1} = 1,1^{t_1} = 1,1^{9,31} = 2,43$.

Тоді умова другого вдосконалення буде мати вигляд

$$1,1^{t_2} - 0,289t_2 + 0,259 = 0. \quad (6.10)$$

За $t_2 = 13,78$ року рівняння (6.10) перетворюється на тотожність. Час оптимальної дії другого нововведення до морального старіння системи буде

$$t_{o2} = t_2 - t_1 = 13,78 - 9,31 = 4,47 \text{ (року)}.$$

За наступного – третього – циклу вдосконалень, підставивши в рівняння (6.8) частинні значення $i = 3$, $\Delta Q_{y3} = 0,6$, $q = 1,1$ та $q^{i-1} = 1,1^{3-1} = 1,1^{t_2} = 1,1^{13,78} = 3,72$, будемо мати

$$1,1^{t_3} - 0,412t_3 + 1,955 = 0. \quad (6.11)$$

Одержане рівняння (6.11) справедливе за умови $t_3 = 16,85$ року. До цього часу продуктивність досягне значення

$$Q_3 = q^{t_3} = 1,1^{16,85} = 4,98,$$

тобто зросте приблизно вп'ятеро.

Такий рівень відповідає необхідним загальним темпам розвитку економіки.

Для машинобудування може виявитися недостатньо трьох циклів удосконалень. Третя технологічна система може морально застаріти, і період її оптимального функціонування становитиме

$$t_{o3} = t_3 - t_2 = 16,85 - 13,78 = 3,07 \text{ (року)}.$$

Буде потрібно ще одне – четверте – комплексне вдосконалення. Використавши в рівнянні (6.8) частинні значення $i = 4$, $\Delta Q_{y4} = 0,6$, $q = 1,1$ та $q^{i-1} = 1,1^{4-1} = 1,1^{t_3} = 1,1^{16,85} = 4,98$, матимемо

$$1,1^{t_4} - 0,532t_4 + 3,981 = 0. \quad (6.12)$$

Зважаючи на це $t_4 = 19,19$ року. Продуктивність за ці роки зросте до $Q_4 = q^{t_4} = 1,1^{19,19} = 6,23$ від початкового розміру. Такий

рівень забезпечує машинобудуванню вищі темпи розвитку порівняно із загальними темпами розвитку інших галузей економіки. Скорочення періодів оптимальної дії в результаті подальших удосконалень свідчить про вичерпання можливостей техніки та доцільність заміни її іншою.

Отже, застосовуючи розглянуту методику, можна встановлювати кількість циклів удосконалень, розраховувати тривалість оптимального функціонування системи після кожного нововведення, визначати моменти їх морального старіння.

Задача 2

Необхідно визначити межі моральної (технічної) новизни елементів технологічної системи.

Розв'язання

Загальний запас резервної продуктивності ΔQ_{pi} поділяють на декілька частин, одну з яких забезпечують оновленими знаряддями праці (верстатами, інструментами, пристроями). Використовують такі формули:

$$j\Delta Q_{pi} = \sum Q_i, \quad (6.13)$$

$$\sum Q_i = Q_B^H + Q_I^H + Q_{II}^H, \quad (6.14)$$

$$Q_B^H : Q_I^H : Q_{II}^H = X_B : I_I : Z_{II}, \quad (6.15)$$

де Q_B^H, Q_I^H, Q_{II}^H – прирости продуктивності праці у відсотках від удосконалень верстата, інструмента та пристрою, за яких їх класифікують до розряду нової техніки;

X_B, Y_I, Z_{II} – статистично визначені вагові частки цих приростів продуктивності.

Спільне розв'язання рівнянь (6.13), (6.14), (6.15) приводить до знаходження шуканих значень Q_B^H, Q_I^H, Q_{II}^H ,

справедливих у межах свого етапу вдосконалення.

Наприклад, загальне зростання продуктивності праці на

розглянутому раніше другому етапі вдосконалення становило

$$\Delta Q_{p2} = q^{t2} - q^{t1} = 3,72 - 2,43 = 1,29.$$

Нехай $j = 0,25$ цього резерву забезпечують покращенням верстатів, інструментів та пристроїв, тобто

$$0,25 \cdot 1,29 = 0,32 = Q_B^H + Q_I^H + Q_{II}^H.$$

Використовуючи дані статистичних обстежень підприємств, визначаємо, що $Q_B^H : Q_I^H : Q_{II}^H = 5 : 3 : 2$ (як приклад). Тоді знаходимо значення зростання продуктивності, за якими елементи технологічної системи переходять до розряду «*H*» – нової техніки:

$$Q_B^H = 16,1 \% ; Q_I^H = 9,7 \% ; Q_{II}^H = 6,4 \%.$$

Вважаючи продуктивність загальнопоширеної техніки («*ЗП*») такою, що дорівнює 100 %, а застарілої («*СТ*») – меншою за 100 %, з огляду на знайдені значення меж технічної новизни складемо таблицю (див. табл. 6.1) результатів.

Таблиця 6.1 – Показники технічного (морального) стану верстатів, інструментів та пристроїв

Знаряддя праці та його позначення	Початковий рівень продуктивності праці, %		
	« <i>H</i> »	« <i>ЗП</i> »	« <i>СТ</i> »
Верстат (<i>B</i>)	116,1	100	< 100
Інструмент (<i>I</i>)	109,7	100	< 100
Пристрій (<i>II</i>)	106,4	100	< 100

6.2 Стохастична природа технологічної операції й технологічного процесу

Розгляд властивостей елементів технологічної системи створює необхідні передумови для наукового аналізу сутності, структури й перспектив удосконалення самої технології.

Відомо, що основною структурною одиницею кожного технологічного процесу є *операція*. Саме на операції конкретно проявляється взаємодія основних елементів виробництва – людини, знарядь праці та деталі. Але операція – не лише основне, а й масове, множинне явище. Зокрема, технологічні процеси виготовлення і складання літаків охоплюють до 400 000 різноманітних операцій, а процеси виготовлення, складання та випробувань парових турбін – більше ніж 450 000. На машинобудівному підприємстві середнього обсягу, що виготовляє кілька видів різних виробів, кількість операцій технологічних процесів можуть обчислювати сотнями тисяч.

У такій безлічі операцій складно орієнтуватися без науково обґрунтованих принципів і вибирати оптимальні рішення. На практиці є непоодинокими випадки далеко не кращих структурних побудов операцій. Тому застосовують різноманітні способи впорядкування їх множин. Операції диференціюють і концентрують, типізують, групують, класифікують.

До початкових способів упорядкування множини різноманітних явищ належать класифікації. Проте і операції, і технологічні процеси, що є складними системами, мають свої особливості внутрішньої побудови, а також нерідко – складно передбачуваний результат взаємодії складових цієї системи елементів.

На відміну від *детерміністських* систем, однозначно обумовлених дією їх змінних, виробничі й технологічні процеси подібно до *стохастичних* систем на зміну параметрів незалежних змінних реагують спектром імовірності законів розподілу очікуваних результатів або імовірністю появи тих або інших комбінацій їх значень (рис. 6.2 та 6.3). *Стохастичний процес* (від грец. слова *stochasis* – «здогад») – це випадковий, імовірнісний процес, характер зміни якого в часі точно

прогнозувати неможливо. Проте за допомогою рівнянь і коефіцієнтів кореляції можна знайти такий показник зв'язку між параметрами технологічного процесу, що нас цікавлять, вони перебуватимуть у межах від 0 (за відсутності зв'язку) до 1 (за наявності функціональної залежності).



Рисунок 6.2 – Функціональна схема детерміністської системи

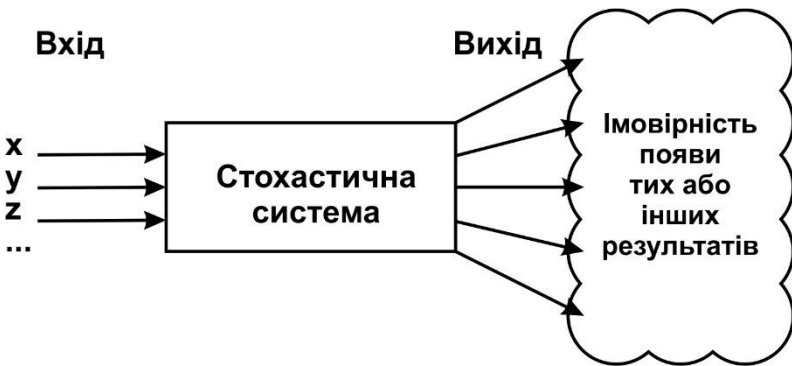


Рисунок 6.3 – Функціональна схема стохастичної системи

Узагальнено взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу (ТП) може бути описаний, наприклад, у вигляді виразу

$$\Phi (ТП, Д, Зг, N, Тв, Во, Вм, В, І, П) = 0,$$

де $Д$ – деталь або виріб, що виготовляють;
 $Зг$ – заготовка;

N – програма випуску;

Tв – тип виробництва (одиничний, серійний, масовий);

Vo – вид організації виробництва (потокове, непотокове);

Vм – вид механізації виробництва (ручне виконання, механізоване, автоматизоване);

B, I, П – верстати, інструменти, пристрої, використані в технологічному процесі або операції, що розглядають.

Саме різними комбінаціями взаємозалежних між собою факторів і визначається безмежна різноманітність технологічних процесів (рисунок 6.4).

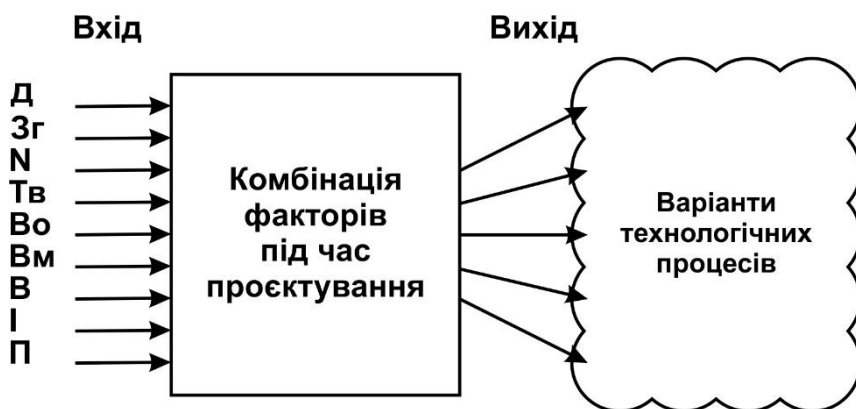


Рисунок 6.4 – Багатоваріантність процесу проєктування технологічних процесів

Водночас після первинного опрацювання, коли перших шість параметрів (*Д, Зг, N, Tв, Vo, Vм*) набули відомої стабільності, подальші варіанти технологічних процесів починають залежати від вибору знарядь праці – верстатів, інструментів і пристроїв. Успіх виконання того або іншого виробничого завдання визначається насамперед раціональним вибором знарядь праці, їх технічним станом, рівнем механізації та автоматизації, методом їх використання. Наприклад, замість шести роздільних поточкових ліній, використовуваних на одному з тракторних заводів для обробки шести видів колінчастих і

розподільних валів, було створено дві потоково-сполучені лінії. Виготовлення таких самих деталей стало можливим за наведених далі показників. Установлено устаткування на 102 одиниці менше, ніж було потрібно для таких самих цілей за попереднім варіантом; зайнято виробничої площі менше на 2 600 м²; зменшена кількість задіяних верстатників та інженерно-технічних робітників на 210 осіб.

Дослідження стохастичної природи виробничих і технологічних процесів дає змогу зробити такі висновки:

1) поява найбільш істотних різновидів технологічних процесів залежить насамперед від *різновиду устаткування, інструментів і технологічного оснащення*. Такі варіанти виникають як результат використання різних за структурою й конструкцією машин;

2) порівняння варіантів являє собою зіставлення результатів впливу на один і той самий предмет обробки різних систем знарядь праці;

3) з урахуванням вищезазначеного *загальна структурна модель технологічного процесів* може одержати більш розшифрований вигляд:

$$L - \sum_{i=1}^{\infty} 3Pr_i - D,$$

де $\sum_{i=1}^{\infty} 3Pr_i$ означає теоретично нескінченну множину знарядь

праці та їх комбінацій, за допомогою яких людина L може по-різному впливати на один і той самий предмет праці (оброблення) – деталь (заготовку) D .

У топологічних образах сукупність способів таких варіантних впливів, що йдуть від людини до виробу, можна уявити складним багатомірним простором. Клас об'єктів репрезентує топологічний простір, якщо він поєднує деяке сімейство підмножин, що містить:

- а) переріз будь-якої пари своїх множин;
- б) об'єднання будь-яких зі своїх множин.

6.3 Узагальнена структурна модель технологічної операції

Усе різноманіття варіантів реальних технологічних процесів, які складаються з різних окремих операцій, цілком коректно впорядковують у *чотири класи*, побудовані за єдиними принципами, за спільними основними властивостями.

Виконати це завдання можна декількома способами. *Перший*, досить наочний, – *метод геометричної інтерпретації* відношень множин за допомогою кіл Ейлера для трьох множин A , B і C . Між цими множинами можуть бути різні логічно припустимі відношення: незалежність, включення, тотожність та переріз. У них початкові елементи – множини A , B , C – стають підмножинами нових структурних утворень.

Найбільш загальним видом відношень множин є *переріз*. Нескладно помітити, що в разі перерізу трьох підмножин A , B , C можливі *чотири* принципово різних утворення (чотири класи):

I клас – нульвимірної, або порожньої множини, що містить у собі частину простору без жодного початкового елемента. У діаграмах Венна клас порожньої множини позначають символом \overline{ABC} , у Порецького – через $A_oB_oC_o$, риска над символом або знак нуль свідчать про відсутність цього елемента;

II клас – одновимірних множин, що містять по одному елементу A або B , чи C (це частини кіл, що залишилися поза зоною перетину);

III клас – двовимірних множин, що складається зі сполучень початкових елементів (це частини кіл, що містять по дві підмножини $A \cap B$, $A \cap C$, $B \cap C$);

IV клас – тривимірних множин, що поєднує всі три початкові елементи ($A \cap B \cap C$ – це частина простору, у якій перетнулися всі три підмножини).

Замість абстрактних множин A , B і C розглянемо конкретні скінченні множини верстатів – B , інструментів – I та пристроїв – Π , що беруть участь у виконанні технологічних операцій. У цьому разі відношення B , I , Π також можуть дати тільки *чотири* принципово різні структурні утворення:

I клас – клас безелементної множини (порожньої, нульвимірної множини, позначуваної \emptyset);

II клас – одноелементних множин, що складаються з B , I і Π ;

III клас – двохелементних множин вигляду $B \cap \Pi$, $B \cap I$, $I \cap \Pi$;

IV клас – тривимірної множини $B \cap I \cap \Pi$.

Проте для докладного розкриття змісту множин усередині кожного класу метод геометричної інтерпретації виявляється практично непридатним. Для цього краще дотримуватися принципів *комбінаторики* й *теорії сполучень*. У такому разі можна іти двома шляхами – методом дедукції, тобто давати загальний аналітичний розв'язок і знаходити за ним усі часткові наслідки, або методом індукції – іти від часткових розв'язків до загального. Зручніше застосувати перший розв'язок.

Беруть вихідне положення: будь-яка найбільш розвинута за своїми структурними можливостями технологічна операція механоскладального виробництва може бути описана узагальненою *структурною моделлю*:

$$L - B_h^l I_n^l \Pi_m^l - D,$$

де L – людина (виконавець, оператор);

D – деталь (заготовка, виріб);

B , I , Π – множини верстатів, інструментів і пристроїв, що формують операцію;

$l = \sum_1^{\infty} (\text{як})_i$ – визначник якісних показників кожного зі знарядь

праці;

h , n , m – коефіцієнти множинного оцінювання (коефіцієнти множинності) кожної з цих множин праці (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Коефіцієнти множинності верстатів, інструментів і пристроїв

Зміст, вкладений у коефіцієнт множинності	Символічне позначення	Кількісні приклади		
		Паралельна, одночасна дія	Послідовна, рівномірна дія	Нерівномірна послідовна дія (паралельно-послідовна)
Кількість робочих органів верстата, що несуть інструменти, тобто кількість шпинделів або супортів, робочих головок або індивідуальних верстатів, спільно використовуваних на одному робочому місці в межах однієї операції	h	4	$\Sigma 4 = 1 + 1 + 1 + 1$	2 + 1 + 1
Загальна кількість інструментів, використовуваних на операції	n	8	$\Sigma 8 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1$	4+2+2*
Загальна кількість деталей, установлюваних в одному або декількох пристроях та оброблюваних на одній операції; загальна кількість використовуваних у пристрої місць за встановлення в кожне місце по одній деталі**	m	4	$\Sigma 4 = 1 + 1 + 1 + 1$	2+1+1
* Установлено по два інструменти в кожному шпинделі. ** Обробляються чотири деталі				

6.4 Структурні моделі та приклади безелементних, одно-, дво- і триелементних операцій

У результаті заміни якісного показника «*l*» на «*H*», «*3П*», «*СТ*» (новий, загальнопоширений, застарілий) і перетворення способом надання тим або іншим коефіцієнтам множинності *h*, *n*, *m* нульових значень можна одержати чотири класи технологічних операцій (для спрощення параметри *Л* та *Д* не пишемо):

а) 1-й клас (*безелементні операції*) – при $h = n = m = 0$ маємо нульмірну множину;

б) 2-й клас (*одноеlementні операції*) – якщо по чергово прирівняти будь-які два коефіцієнти множинності до нуля, тобто за $h = n = 0, m \neq 0$ або $h = m = 0, n \neq 0$, або $n = m = 0, h \neq 0$ для однопозиційної, одноінструментної, одномісної обробок маємо такі підмножини:

$$B_1^H, B_1^{3П}, B_1^{СТ}, I_1^H, I_1^{3П}, I_1^{СТ}, П_1^H, П_1^{3П}, П_1^{СТ},$$

а для багатопозиційних, багатоінструментних і багатомісних процесів маємо підмножини

$$B_h^H, B_h^{3П}, B_h^{СТ}, I_n^H, I_n^{3П}, I_n^{СТ}, П_m^H, П_m^{3П}, П_m^{СТ};$$

в) 3-й клас (*двоelementні операції*) – якщо по чергово прирівняти до нуля кожний з трьох коефіцієнтів множинності, тобто за $m = 0, h \neq 0, n \neq 0$, або $n = 0, h \neq 0, m \neq 0$ або $h = 0, n \neq 0, m \neq 0$, маємо 108 структурно різноманітних підмножин операцій, наприклад

$$B_1^H I_1^{3П}, B_h^{3П} I_n^{СТ}, I_1^{СТ} П_m^{СТ}, I_n^{3П} П_1^{3П}, B_h^H П_m^{3П} \text{ і т. д.};$$

г) 4-й клас (*триelementні операції*) – за $h \neq 0, n \neq 0, m \neq 0$, маємо 216 підмножин операцій, наприклад

$$B_h^H I_n^H П_m^{3П}, B_1^{3П} I_n^{3П} П_1^{СТ}, B_h^{СТ} I_n^{СТ} П_m^{СТ}, B_1^{СТ} I_1^{3П} П_1^{3П} \text{ і т. д.}$$

Використовуючи відповідність якісних «Н», «ЗП», «СТ» до показників «а», «л», «р» (автоматизований, механізований, ручний), розглянемо приклади класів операцій.

Безелементні операції здійснюються без верстатів, інструментів та пристроїв, наприклад природне старіння металів (операції типу \mathcal{D}), сушіння пофарбованих поверхонь на відкритому повітрі, природне розмагнічування, ручне складання (операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{D}$), перенесення на собі деталей, огляд неозброєним оком готової продукції, прослуховування виробу, що струшується, для виявлення сторонніх предметів і та ін.

Одноелементні операції відбуваються із використанням або лише одного верстата, або лише одного інструмента, або лише одного пристрою, наприклад:

1) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_1^p-\mathcal{D}$ (під час механічного оброблення – операції з використанням шаберів, напилків, ножиць, слюсарних мітчиків і плашок; на слюсарно-складальних роботах – викруток, гайкових ключів; на контрольних роботах – плит, лінійок, калібрів, індикаторних приладів ручної дії тощо);

2) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_n^{p\Pi}-\mathcal{D}$ (застосування багатощпindelьних головок для закручування відразу декількох гайок);

3) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_n^m-\mathcal{D}$ (шабріння площин пневмоелектричним шабером);

4) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{B}_1^m-\mathcal{D}$ (загвинчування з тарованим зусиллям клапана з його тарілкою);

5) операції типу $\mathcal{B}_h^a-\mathcal{D}$ (процес контролю й сортування деталей типу кульок, роликів, втулок, поршневих кілець за допомогою спеціальних автоматів);

6) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_m^l-\mathcal{D}$ (згинальні, пресові, слюсарно-складальні, контрольні роботи);

7) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_1^p-\mathcal{D}$ (пошук статичного дисбалансу деталей обертання, що виконують вручну на роликах, дисках або ножах);

8) операції типу $\mathcal{L}-\mathcal{I}_1^m-\mathcal{D}$ (різноманітні контрольні операції за допомогою контрольно-вимірювальних пристроїв);

9) операції типу $\Pi_m^a - \mathcal{D}$ (автоматичний контроль).

Двоелементні операції відбуваються із використанням двох елементів Т-системи й містять у собі три великі структурних підмножини:

$$L-I_n^l \Pi_m^l - \mathcal{D}, \quad L-B_h^l I_n^l - \mathcal{D}, \quad L-B_h^l \Pi_m^l - \mathcal{D}.$$

До операцій типу $L-I_1^p \Pi_1^p - \mathcal{D}$ належать слюсарні або слюсарно-підгінні та складальні роботи, виконувані вручну над деталями або вузлами, закріпленими в пристроях ручної дії (ручне шабріння, загвинчування нарізних пар, згинання труб і смуг роликками вручну, склепування немеханізованим засобом, підрубання зубилом та ін.):

1) операції типу $L-I_1^m \Pi_1^m - \mathcal{D}$ (ручне обпилювання гострих кромek колінчастого вала, утримуваного в пристрої власною вагою; індекс \underline{m} у записі свідчить про відсутність ручного закріплення деталі);

2) операції типу $L-I_2^m \Pi_1^m - \mathcal{D}$ (пневматичне пресування двома інструментами штифтів у тіло виробу, установленого в механізований пристрій);

3) операції типу $I_n^a \Pi_m^a - \mathcal{D}$ (використання автоматичної викрутки та автоматизованого пристрою, що безупинно подає гвинти в зону складання нарізного з'єднання);

4) операції типу $L-B_1^{pp} I_1^m - \mathcal{D}$ (обробка поверхонь деталей на полірувальних бабках або стрічково-полірувальних верстатах);

5) операції типу $L-B_1^m I_2^m - \mathcal{D}$ (згинальні й виправильні роботи, виконувані на верстатах із використанням спеціальних інструментів-роликів);

6) операції типу $B_h^a I_n^a - \mathcal{D}$ (на автоматизованих верстатах – захоплення деталей маніпуляторами-кліщами, установлення деталей у складальний вузол; наживлення й загортання кріплення);

7) операції типу $L-B_1^M P_1^M -D$ (виправлення деталі типу вал у пристрої на гідравлічному пресі);

8) операції типу $L-B_h^I P_m^I -D$ (штампування, може бути позначено також $L-B_h^I P_m^I -D$).

Триелементні операції є найбільше структурно досконаліми, і тому мають кращі виробничі та техніко-економічні можливості. Вершиною розвитку структурних моделей є досконалі операції типу

$$L-B_{h_onm.}^H I_{n_onm.}^H P_{m_onm.}^H -D,$$

у яких використовують оптимальні кількості технічно новітніх елементів технологічної системи, зокрема автоматичної дії

$$B_{h_onm.}^a I_{n_onm.}^a P_{m_onm.}^a -D.$$

Можливі певні різновиди структурного описування технологічних операцій. Зокрема, під час її структурного оцінювання може виникнути потреба в характеризованні пайової участі людини. Для цього передбачений додатковий коефіцієнт множинності, що стосується об'єкта «людина», тобто в структурній формулі елемент L буде мати вигляд

$$L_{l_i}^u,$$

де l_i – кількість людей (робітників), зайнятих на операції;

u – кваліфікація (розряд) робітника.

Коефіцієнт l_i найчастіше дорівнює 1, оскільки один оператор здебільшого працює на одному верстаті; у разі обслуговування ним декількох верстатів значення коефіцієнта l_i обернено пропорційне кількості цих верстатів, наприклад $l_i = 1/4$ у разі роботи одного оператора на чотирьох верстатах. Коефіцієнт l_i може бути і більшим за 1, якщо на одному верстаті (машині) працюють кілька людей. Зокрема під час обслуговування унікального карусельного верстата на операції

розточування циліндрів турбін робочим-карусельником і його помічником $L_i = 2$.

?

Запитання для самоперевірки

- 1 Які три стадії відповідно до теоретико-множинної класифікації проходить у своєму розвитку будь-який елемент технологічної системи?
- 2 Як знайти період оптимального функціонування і-ї системи?
- 3 Які результати розрахунку свідчать про вичерпання можливостей техніки й доцільності заміни її іншою?
- 4 Чим детерміністська система відрізняється від стохастичної?
- 5 Який вигляд має узагальнена структурна модель технологічної операції.
- 6 Які структурні моделі й приклади безелементних і одноелементних операцій ви знаєте?
- 7 Які структурні моделі та приклади дво- та триелементних операцій ви знаєте?
- 8 Які операції є найбільш структурно досконалими й мають кращі виробничі та техніко-економічні можливості?



Тема 7 Особливості багаторівневого проєктування технологічних процесів і систем

7.1 Нерівномірність розвитку й старіння елементів технологічної системи

Технологічні системи, що є складними системами, містять у собі інші системи (підсистеми), зокрема системи *ВІІІ* (верстат-інструмент-пристрій). Системи *ВІІІ*, що формують структуру операції і визначають її виробничі та техніко-економічні можливості, являють собою не викристалізовану конструкцію, а динамічний процес, що змінюється в часі.

Морально-технічна єдність (МТЄ) систем *ВІІІ* загалом залежить від закономірностей проходження технічного прогресу. Статистико-ймовірнісні дослідження (наприклад, С. М. Ямпольського) виявляють наявність пропорційності між загальним вираженням технічного прогресу й відносною швидкістю зміни його істотних показників, таких, наприклад, як темпи зростання продуктивності праці, його енергооснащеність та ін.

Зокрема, у період стабільного розвитку економіки будь-який вибраний для дослідження конкретний або узагальнений показник технічного прогресу, що позначають через y , може бути поданий у вигляді залежності

$$y = y_0 e^{\lambda t},$$

де λ – коефіцієнт пропорційності, постійний для цього показника;

t – час.

Іншими словами, темпи технічного прогресу і його характерних показників являють собою функцію часу, описану експонентною залежністю. У такому разі загальна закономірність впливу фактору часу на розвиток техніки також специфічно проявляється в особливостях розвитку технології. Зокрема,

кожний з елементів використовуваної в механоскладальному виробництві системи *VIII* принципово відрізняється від іншого своїм службовим призначенням і конструктивним виконанням. Зважаючи на цю й певні інші причини, терміни фізичного спрацьовування кожного індивідуального знаряддя праці неоднакові. Проте в елементів системи *VIII* водночас із фізичним зношуванням є ще і моральне старіння. Воно відбувається не лише з окремими знаряддями праці, а і їх групами, типами, системами, моделями.

Періоди оптимального функціонування в складі єдиної технологічної операції у верстатів, інструментів і пристроїв не збігаються. У цьому виражається об'єктивний закон нерівномірності розвитку й старіння елементів системи VIII, що містить у собі технологічна система.

Зважаючи на стохастичний характер досліджуваних явищ, такі періоди не можна розглядати лише як однозначно встановлені величини. Кожний із періодів являє собою математичне очікування реальних термінів використання множини конкретного виду знарядь праці до їх морального зношування.

Статистично одержані дані свідчать про те, що, наприклад, нові моделі токарних верстатів з імовірністю настання події $P = 0,9$ (тобто 90 %) можуть з'являтися в терміни від 4,62 до 8,58 року. За іншої імовірності, наприклад $P = 0,95$, межі довіри набудуть інших значень – від 4,02 до 9,48 року. Зрозуміло, що для інших видів верстатів періоди появи нових моделей будуть відрізнятися від наведених вище.

Аналогічно на підставі фактичних даних визначають терміни оптимальної дії інструментів і пристроїв. Оскільки вихідні значення в них інші, ніж у верстатів, самі межі довіри також мають свої особливі значення. Для інструментів такі терміни зазвичай менші ніж для верстатів. Причиною є відносна порівняно з верстатами простота конструкції багатьох інструментів, менша трудомісткість та металоємність, значно коротший фізичний термін служби, а іноді й мінімальні витрати на їх покращання для досягнення високої ефективності.

Ці об'єктивні умови в поєднанні із суб'єктивними факторами (активна діяльність винахідників і раціоналізаторів на

виробництві, а також робота наукових та дослідницьких організацій) приводять до того, що за даними статистичних обстежень приблизно через кожні 2–4 роки в промисловості або впроваджують нові ефективні робочі інструменти, або істотно вдосконалюють старі.

Представники останнього елемента системи *BIII* – верстатні пристрої – також мають свої особливі терміни оптимальної всталеної роботи. Її тривалість обмежується моральним старінням, яке виявляється в момент появи значних удосконалень пристроїв або їх нових зразків, що істотно покращують умови проведення процесу й підвищують його продуктивність. За результатами обстеження низки промислових підприємств періоди оптимального використання встановлювальних пристроїв до їх морального старіння зазвичай довші, ніж у різальних інструментів, але коротші, ніж у верстатів. Проте можливі й інші прояви неоднаковості періодів розвитку знарядь праці – елементів системи *BIII*, або закону неоднаковості періодів оптимальної дії кожного її елемента.

Періодом морально-технічної сталості роботи верстата, інструмента або пристрою вважатимемо час його функціонування до появи кращого зразка, тобто до його морального старіння, і візьмемо такі позначення:

E_g – математичне очікування періоду морально-технічної сталості функціонування верстата;

E_i – те саме для інструмента;

E_n – те саме для пристрою.

Відповідно до визначення

$$E_g = \int_{t_g}^{T_g} tF(t)dt, \quad E_i = \int_{t_i}^{T_i} t\varphi(t)dt, \quad E_n = \int_{t_n}^{T_n} t\Phi(t)dt.$$

Інтервали сталої дії верстатів $|T_g - t_g|$, інструментів $|T_i - t_i|$ та пристроїв $|T_n - t_n|$ являють собою межі довіри їх математичних очікувань.

У цьому разі закон нерівномірності розвитку елементів системи *BIII* узагальнено можна записати як нерівність

$$|T_e - t_e| \neq |T_i - t_i| \neq |T_n - t_n|,$$

або

$$E_e \neq E_i \neq E_n.$$

Прорив у розвитку будь-якого елемента системи знарядь праці (що фактично означає ізольоване підвищення виробничих можливостей верстата, інструмента або пристрою) може спричинити неузгодженість системи й порушення оптимальності дії МТЄ.

Для використання внутрішніх резервів, утворених на операції, потрібне покращання до нового, вищого рівня й технічного стану двох інших видів знарядь праці. Якби система *ВІІІ* мала однакові періоди функціональної сталості кожного свого елемента, технологічні процеси могли б зберігати оптимальність своєї дії T на весь час сталості системи *ВІІІ*, що дорівнював би, наприклад, часу сталості верстатів, тобто виявилася б можливою рівність

$$T = |T_e - t_e|.$$

У дійсності цього немає. Нерівномірність розвитку елементів системи *ВІІІ* руйнує їх МТЄ значно частіше, тобто

$$T < |T_e - t_e|,$$

або інакше $T = \frac{T_e - t_e}{j}$,

де j – коефіцієнт зниження сталості, що залежить від конкретних виробничих і загальнотехнічних умов.

Із закону нерівномірності розвитку елементів системи *ВІІІ* можна зробити такі важливі висновки.

1 Гармонійних, оптимально побудованих систем *ВІІІ* довгостроково не існує, оскільки через якийсь статистично ймовірний проміжок часу один із трьох елементів системи стрибкоподібно виривається вперед і МТЄ порушується. У такому разі можуть морально застаріти не лише два інших елементи, а й уся система *ВІІІ* разом з обумовленою нею технологічною

операцією.

2 Нерівномірність розвитку елементів системи *ВІІІ* призводить до скорочення часу оптимальної дії операції, тобто зменшує період стабільності налаштування на МТЄ порівняно з періодом появи нових зразків якого-небудь найбільш сталого елемента, переважно верстата.

3 Моменти технічного порушення стабільності функціонування операцій не є суворо визначеними й мають випадково-ймовірнісний характер математичного очікування, розподіленого в інтервалі (t, T) періоду дії найбільш сталого елемента

$$E = \int_t^T tF(t)dt .$$

4 Розладнання операцій, що виникають у такому разі та не мають змоги саморегулювання МТЄ, неминуче потребують планомірної періодичної заміни застарілих МТЄ новими, більш досконалими, з новими технічними можливостями.

5 Після низки послідовних перебудов операцій на нові МТЄ й вичерпання внутрішніх можливостей припиняють їх подальше удосконалення, і настає перехід до принципово нових знарядь праці та інших методів обробки.

7.2 Неузгодженість технологічної системи в разі ізолюваного вдосконалення її елементів

Процеси механізації й перетворення морально застарілих малоелементних операцій на триелементні на практиці часто стихійні. Проте найкращих результатів можна досягти лише в разі використання визначених у такому разі об'єктивних закономірностей. Насамперед *неприпустиме застосування*

принципу випадкових сполучень знарядь праці. Наприклад, не можна як завгодно з'єднувати між собою верстат із будь-яким кінематично придатним для операції інструментом і довільно вибраним пристроєм.

Для оптимального ведення технологічного процесу, його найкращого функціонування обов'язкове таке сполучення його окремих показників (продуктивності, собівартості, якості, рівня механізації тощо), за якого узагальнена характеристика його прогресивності набуває значення, вищого за нормативні або середньостатистичні для теоретично найкращих аналогічних передових процесів.

На вибір способу гармонізації (узгодження) системи *BIII*, що входить у технологічну систему, істотно впливають суб'єктивні та об'єктивні причини. Перші обумовлюють випадковість вибору того або іншого рішення, другі – особливості самого характеру систем знарядь праці.

Природа будь-якої системи *BIII* двоїста й суперечлива. Насамперед знаряддя праці в такому разі є органічною єдністю трьох елементів, тобто вони є власне *системою*. Проте водночас кожен елемент системи – верстат, інструмент або пристрій – має *порівняну самотійність* індивідуального розвитку, тобто замість системи перед нами постають її відособлені елементи. Така двоєдина сутність системи *BIII* створює об'єктивні передумови для двох напрямків її вдосконалення: комплексного (відразу всіх компонентів) та окремого (елементами).

Аналіз показує, що водночас з окремими високоефективними комплексними вдосконаленнями планомірного комплексного вдосконалення операцій відразу за всіма трьома елементами системи *BIII* здебільшого не проводять. На одних операціях модернізують верстати, на інших – інструменти, на третіх – пристрої.

За даними обстеження частка комплексних удосконалень на машинобудівних підприємствах у 80–90-ті роки минулого сторіччя становила менше, ніж 20 %. Підтверджена перевага окремих удосконалень – найпростіших і доступних, але нерідко найменш ефективних. Типовий приклад некомплексного вдосконалення репрезентований на схемі покращання операції точіння валиків (рис. 7.1).

На верстаті (B_1^H) встановлено пристрій для автоматизації обробки – сучасний гідравлічний супорт. Проте різець залишився без будь-яких удосконалень, на рівні застарілих зразків (I_1^{CT}). Пристроєм є ручний гвинтовий хомутик, запропонований ще Леонардо да Вінчі півтисячоліття тому (Π_1^{CT}). Структурна модель нового стану знарядь праці – $B_1^H I_1^{CT} \Pi_1^{CT}$. Такий структурний стан системи *VIII* свідчить про неправильне, суперечливе з'єднання засобів автоматики із середньовічним пристроєм ручної дії, а отже, відсутність технічної єдності знарядь праці.

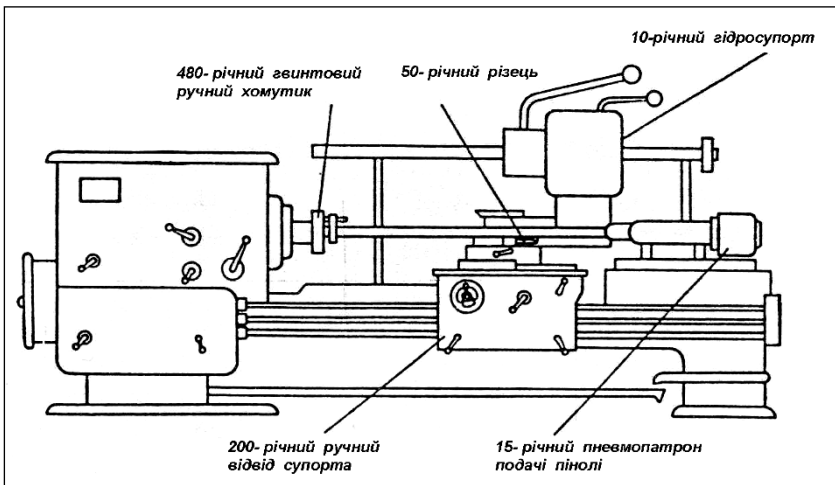


Рисунок 7.1 – Приклад некомплексного вдосконалення системи *VIII* на токарній операції (модернізовано лише верстат)

Згідно з вимогами виробництва цю неузгоджену систему *VIII* необхідно привести до оптимального стану: повинні бути встановлені швидкодійні пристрої, що спрацюватимуть від гідропривода верстата, і виготовлені нові високопродуктивні різальні інструменти.

Як у кожній системі, ізольована зміна хоча б одного елемента системи *VIII* може призвести до порушення її морально-технічної єдності та узгодженості дій елементів, що до

неї входять. Більше того, ізольоване вдосконалення лише одного елемента може принести замість користі шкоду. Унаслідок ізольованих одиничних удосконалень системи *VIII* часті *два види неузгодженостей*: один із них (*явний*) виражається в аваріях, а інший (*прихований*) – розладнанням МТЕ системи, відсутністю когерентності дії окремих її елементів та оптимальності виконання технологічного процесу.

Розглянемо приклад, що ілюструє обидва види неузгодженостей. На операції точіння валів (рис. 7.2) спочатку вдосконалили лише один елемент – різальний інструмент; замість звичайних прохідних різців був використаний удосконалений різець 3 конструкції В. Колесова. Це дало змогу відразу підвищити подачу і продуктивність обточування у 2–2,5 рази. Проте незабаром нормальний хід процесу став порушуватися аваріями: відбувалися поломки деталі 1 механізму подачі верстата.

Прості заміни зламаних деталей механізму на нові ні до чого не привели: аварії верстатів не припинялися. Явні показники – аварії верстатів – стали наслідком неузгодженості системи *VIII*, спричиненої відособленим удосконаленням одного з трьох її елементів. Виникла очевидна необхідність налагодження всієї системи, насамперед верстата, відповідно до нових можливостей інструмента.

Ученими була досліджена динаміка різання на великих подачах, знайдені нові значення зусиль різання. Верстати були модернізовані відповідно до зростання зусилля подачі. Тепер у системі *VIII* два з трьох її елементів – верстати та інструменти – виявилися вдосконаленими за єдиним технічним планом, у результаті чого поломки (*явні збурювання системи*) припинилися. Проте оскільки не всі знаряддя праці було приведено в повне узгодження й оптимальну взаємну відповідність (поза полем зору залишалися пристрої), система стала зазнавати другого виду неузгодженості – *прихованого збурювання*. Операція проходила далеко не в кращому режимі, тому що перетворилася на процес майже цілком ручної дії. Якщо раніше допоміжні ручні прийоми робітника щодо закріплення-розкріплення деталей і відгону каретки супорта у вихідне положення займали 20–25 % штучного часу, то тепер робітник змушений витратити на ручні прийоми

75–80 % часу. Відбулося явище *розмеханізації* процесу внаслідок скорочення лише машинної частини штучного часу. Так проявилось приховане збурювання системи *ВІІІ*, що виникло через неузгодженість і відсутність її комплексного вдосконалення.

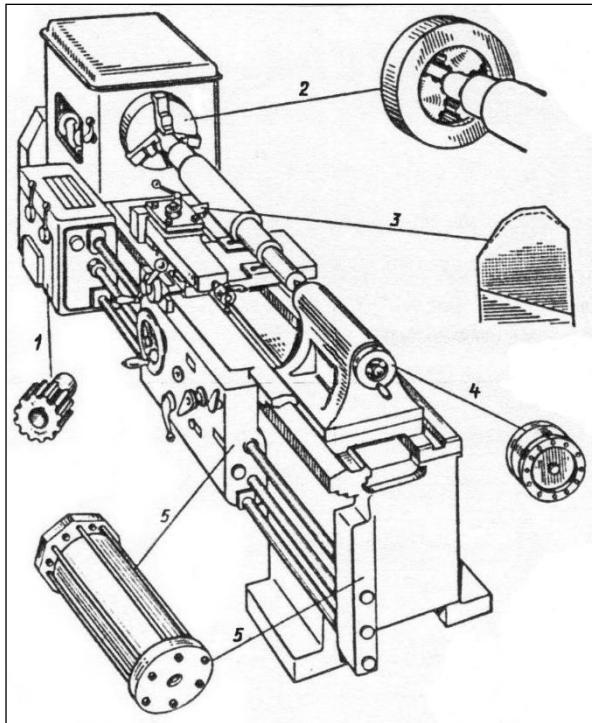


Рисунок 7.2 – Два види неузгодженостей системи *ВІІІ* унаслідок ізолюваного вдосконалення її елементів

Для усунення цього виду збурювань системи знарядь праці довелося вдосконалити і третій її елемент – пристрій. Ручні гвинтові патрони 2 було замінено швидкодійними механізованими: довелося повернутися до верстата, модернізувавши задню бабку встановленням пневмопатрона 4

подачі пінолі та поставити пневмоциліндр 5 для прискореного повернення каретки. Лише після повного узгодження налагодження всіх трьох елементів на нову МТЄ система *VIII* стала постійно й надійно забезпечувати виконання підвищеного обсягу робіт за кращої якості обробки.

Отже, некритичне застосування лише одиничних ізольованих удосконалень знарядь праці різко знижує наявні виробничі можливості, штучно зменшує реально досяжний обсяг випуску продукції.

7.3 Функціональна, часова та просторова структура технологічного процесу

Необхідно зазначити, що в кожному технологічному процесі можна виділити *функціональні, часові й просторові зв'язки* між його різноманітними структурними елементами. Кожному виду зв'язку відповідає своя структура. Тому можна говорити про *функціональну, часову та просторову структури* технологічного процесу і його частин S_ϕ , S_ϵ , S_n .

Функція будь-якого технологічного процесу полягає в перетворенні φ_{mn} деталі з вихідного стану заготовки O_o на кінцевий O_k , що обумовлений конструкторським кресленням:

$$\varphi_{mn} : O_o \rightarrow O_k.$$

Функція кожної операції полягає в перетворенні деталі з одного проміжного стану на інший:

$$\varphi_i : O_{i-1} \rightarrow O_i.$$

Проміжний стан O_i характеризує форму, міжопераційні розміри деталі та їх точність, фізико-механічні властивості поверхонь деталі, одержані в результаті виконання i -ї операції. Стан O_{i-1} позначає наведені властивості деталі-заготовки, що

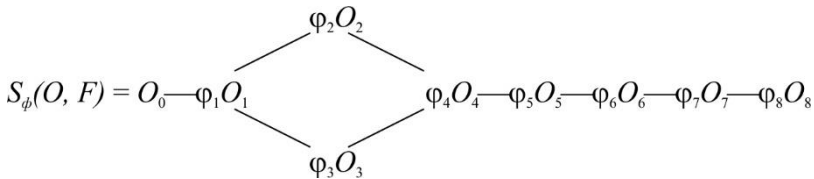
надходить до операції. Перетворення φ_i відповідає виду технологічної операції (токарна, фрезерна та ін).

Функціональні зв'язки операцій характеризуються станом деталі, що надходить із попередньої операції на наступну, і можуть бути записані як відношення

$$O_{i-1} \varphi_i O_i.$$

Сукупність взаємозв'язаних відношень, у яких правий елемент O_i одного відношення є лівим елементом іншого $O_i \varphi_{i+1} O_{i+1}$, утворює *граф функціональної структури* технологічного процесу $S_{\varphi}(O, F)$. Вершинам графа відповідають стани деталі O_i , а ребрам – позначення операцій або переходів $F\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k\}$, за допомогою яких деталь перетворюється з одного стану в інший.

Функціональна структура визначає частково упорядковану послідовність перетворень деталі зі стану заготовки в кінцевий. Наприклад, формула функціональної структури



позначає таку послідовність перетворень. Спочатку деталь зі стану заготовки O_0 за допомогою операції φ_1 перетворюється на стан O_1 . Далі можливо виконання операцій φ_2 або φ_3 . З погляду забезпечення параметрів точності деталі послідовність їх виконання не має значення: таке положення можна спостерігати під час обробки другорядних поверхонь. Потім за допомогою операції φ_4 деталь перетворюється на новий проміжний стан O_4 , і так доти, доки не буде одержаний необхідний кінцевий стан деталі O_8 . На рисунку 7.3 зображено граф функціональної структури відповідного технологічного процесу.

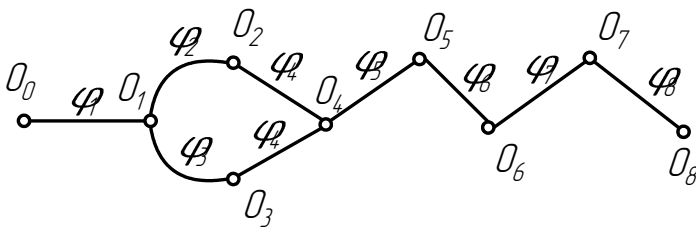


Рисунок 7.3 – Граф функціональної структури технологічного процесу

Наведемо інший приклад аналізу функціональної структури під час вибору варіантів механічної обробки. Технологічний процес одержання отвору $\varnothing 120H7$ може охоплювати декілька різних методів обробки (перетворень), серед яких найбільш поширені такі:

- 1) φ_1 – розточування обдирне;
- 2) φ_2 – розточування чорнове;
- 3) φ_3 – розточування напівчистове;
- 4) φ_4 – зенкерування;
- 5) φ_5 – розточування чистове;
- 6) φ_6 – розгортання;
- 7) φ_7 – чистове протягування.

Заданий кінцевий квалітет IT7 буде одержаний способом послідовного переходу від більш грубого квалітета (попередньої та чорнової обробки) до точнішого (чистових методів). Водночас на кожній стадії обробки отвір буде мати певну точність одержаного розміру: O_0 – стан отвору в заготовці; O_1 – стан отвору після обробки з точністю IT14; O_2 – із точністю IT12; O_3 – із точністю IT10; O_4 – із точністю IT9; O_5 – із точністю IT7.

Зважаючи на це, можна записати варіанти функціональної структури технологічного процесу, що відповідають орграфу, зображеному на рисунку 7.4:

$$\Phi_1 = O_0 \varphi_1 O_1 \varphi_2 O_2 \varphi_3 O_3 \varphi_5 O_5,$$

$$\Phi_2 = O_0 \varphi_1 O_1 \varphi_2 O_2 \varphi_3 O_3 \varphi_6 O_5,$$

$$\Phi_3 = O_0 \varphi_1 O_1 \varphi_2 O_2 \varphi_4 O_3 \varphi_6 O_5,$$

$$\Phi_4 = O_0 \varphi_1 O_1 \varphi_2 O_2 \varphi_3 O_3 \varphi_4 O_4 \varphi_5 O_5.$$

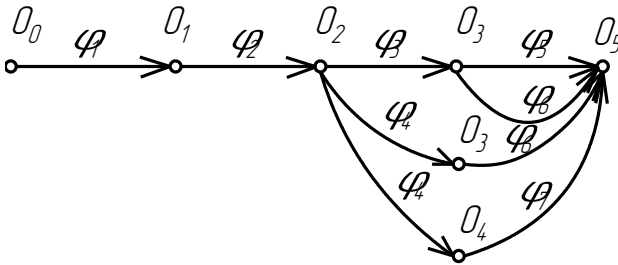


Рисунок 7.4 – Орграф

Критерієм оцінювання того або іншого варіанта маршруту обробки повинна бути технологічна собівартість у конкретних умовах виробництва.

Остаточну послідовність виконання операцій визначають за *часовою структурою* технологічного процесу. Часову впорядкованість елементів процесу задають трьома типами відношень: $\varphi_i \rho \varphi_{i+1}$ або $\varphi_i \cdot \varphi_{i+1}$ (послідовне виконання φ_i та φ_{i+1}), $\varphi_i \omega \varphi_{i+1}$ (одночасне виконання) і $\varphi_i \tau \varphi_{i+1}$ (зсув за часом на розмір τ початку виконання щодо φ_i).

Сукупність зазначених відношень утворює *граф* $S_\theta(F, \Omega)$ *часової структури* технологічного процесу або різних його компонент. Множина вершин графа відповідає операціям, переходам, прийомам, а множина ребер – відношенням, що відбивають відповідно послідовне, одночасне або зі зсувом фаз виконання операцій, переходів. Наприклад:

$$S_\theta(F, \Omega) = \varphi_1 \cdot (\varphi_2 \omega \varphi_3) \cdot \varphi_4 \cdot (\varphi_5 \omega \varphi_6) \tau_1 \varphi_7 \omega \varphi_8.$$

Це означає, що операції φ_2 та φ_3 виконуються одночасно, φ_7 зсунута за фазою на τ_1 щодо $(\varphi_5 \omega \varphi_6)$, а φ_8 виконується одночасно з нею. Граф відповідної часової структури зображено на рисунку 7.5.

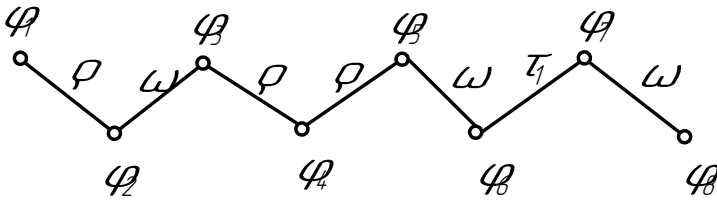


Рисунок 7.5 – Граф часової структури технологічного процесу

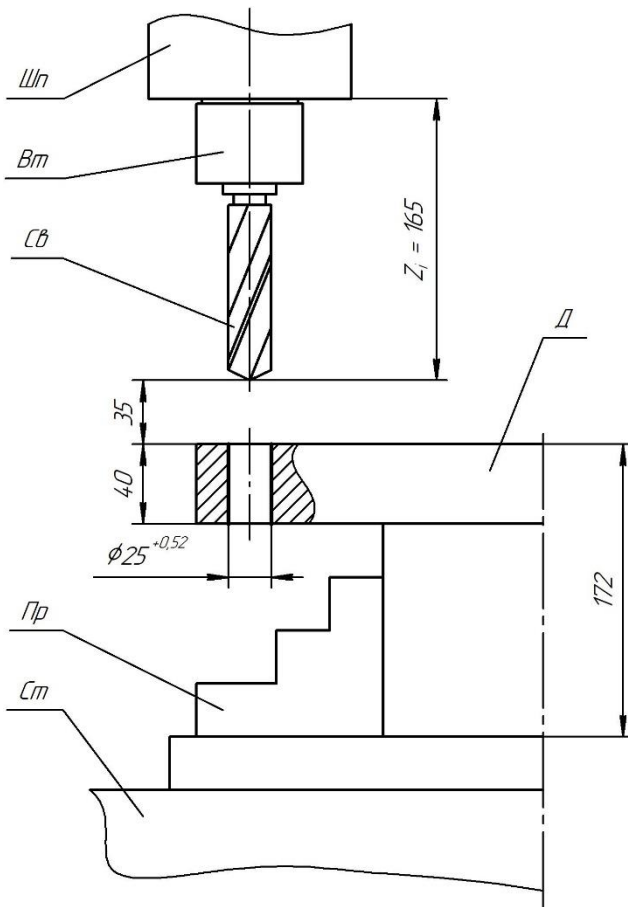


Рисунок 7.6 – Ескіз налагодження технологічної операції свердління

Просторова структура технологічної системи може бути описана графом $S_n(T, B)$, множина вершин T якого відповідає елементам системи, а множина ребер B – відношенням, що визначають взаємне розміщення елементів у просторі, їх розмірні й точнісні зв'язки. Зокрема, граф просторової структури операції характеризує компонування елементів верстата в робочій зоні, тобто взаємне розміщення в просторі шпинделя, стола, пристрою, деталі, інструмента, а також розмірні зв'язки між ними (рис. 7.6 та 7.7).

На рисунках узяті такі умовні позначення: D – деталь; $Шп$ – шпиндель; Bm – втулка; $Cв$ – свердло; $Пр$ – верстатний пристрій; $Cт$ – стіл верстата.

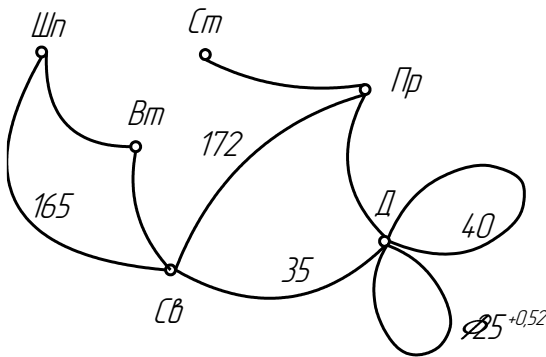


Рисунок 7.7 – Граф просторової структури технологічної операції

7.4 Теоретичні закономірності побудови принципової схеми технологічного процесу

Рівень проектування процесів обробки, якому відповідає початкова стадія деталізації проектних рішень, у технології машинобудування є найменш дослідженим та обґрунтованим. У працях багатьох учених наведені різні рекомендації щодо складу

й змісту проєктних завдань, виконуваних на цій стадії. Одні дослідники, наприклад, у початковий період виділяють розроблення основних напрямків проєктування технологічних процесів, з обліком яких надалі можна формувати різні варіанти технології виготовлення конкретних деталей. У такому разі звертають увагу на те, що під час визначення основних напрямків варто більше висвітлювати питання вибору видів заготовок, термічних операцій і методів обробки основних поверхонь, менше часу приділяючи вибору верстатів та структури операцій, тому що ці завдання виконують під час проєктування маршруту обробки й операцій.

Є також інша точка зору на ступінь деталізації технологічних рішень на першій стадії проєктування. Відповідно до неї до початкової стадії проєктування належать складання плану процесу, що охоплює формування операцій і визначення їх послідовності, вибір устаткування та технологічних баз, розроблення операційних ескізів, пов'язування вибраних операцій з етапами технологічного процесу та ін.

Якщо згідно з першим варіантом початковий період проєктування пов'язаний із визначенням основних напрямків розроблення технологічного процесу й характеризується найменшим ступенем деталізації проєктних рішень, то відповідно до другого плану процесу містить у собі рішення всіх основних завдань із формування маршруту обробки деталі. За традиційних методів проєктування технолог формує основні напрямки або розробляє план процесу на основі загальних рекомендацій і наявного досвіду. Формалізація процесу технологічного проєктування в обох варіантах утруднена. У першому разі це пов'язано з недостатньою визначеністю структури основних напрямків, а в другому – з недостатністю вихідних і довідково-нормативних даних для формального виконання всіх завдань, передбачених у плані процесу. Зважаючи на це виникає завдання обґрунтування ступеня деталізації технологічних рішень на першому рівні проєктування й визначення системних характеристик принципової схеми процесу. Водночас необхідно враховувати, що ступінь деталізації технологічних рішень у принциповій схемі повинен бути таким, що можна одержати на основі наявних до початку проєктування вихідних даних і

технічних обмежень. Вихідними технологічними поняттями на цьому рівні проектування є методи та об'єкти обробки (поверхні та об'ємні елементи деталей). Об'єкти обробки характеризуються початковим O_0 , проміжними O_i і кінцевим O_k станами. Між методами та об'єктами обробки простежується зв'язок, описуваний функцією методу

$$\mu_i : O_{i-1} \rightarrow O_i.$$

Зазначене відношення задає технологічне перетворення за допомогою методу μ_i об'єкта обробки з попереднього стану O_{i-1} на O_i , що має більш високі значення точнісних параметрів або фізико-механічних властивостей. Тому як вихідні посилання вибирають такі системні принципи й технологічні закономірності, що впливають на вибір методів обробки, порядок їх виконання і параметри станів оброблюваних поверхонь деталей та їх елементів.

Одним із важливих системних принципів, від якого залежить вибір елементів процесу обробки, є *принцип технологічної сумісності*. Він визначає таку спільність елементів технологічної системи за сукупністю структурних і функціональних властивостей, завдяки якій елементи поєднуються в систему й забезпечують її функціонування відповідно до заданих вимог. На основі цього принципу формулюють наведені далі вихідні *посилання*.

Посилання 1 Методи та об'єкти обробки є технологічно сумісними, якщо форма об'єкта, його розмірні, точнісні параметри й фізико-механічні властивості можуть бути одержані цим методом.

Наступні два вихідних посилання відображають похибки, що виникають у результаті механічної обробки і які необхідно враховувати під час побудови технологічного процесу.

Посилання 2 Упродовж механічного оброблення завдяки піддатливості елементів технологічної системи похибки

попередньої обробки або заготовки ε_{i-1} усуваються неповністю, і тому в зменшеному й зміненому вигляді передаються деталі на виконуваний операції $\varepsilon_i = \eta\varepsilon_{i-1}$. Відбувається уточнення деталі за різними характеристиками точності. Це фундаментальне теоретичне положення широко вивчене та описане в літературі.

Посилання 3 Під час механічного оброблення в результаті зняття припусків і напусків деталей деформується від перерозподілу внутрішніх напружень, і внаслідок цього виникають похибки форми та взаємного розміщення її елементів.

Похибки ε_σ , пов'язані із зазначеним видом деформації, мають особливо великі значення за обдирання та чорнової обробки нежорстких заготовок, за яких знімаються значні припуски. Під час подальших напівчистової й чистої обробки вони тим менші, чим менші величини припусків, що знімають. Повністю ця деформація проявляється через деякий час після обробки. Отже, похибки ε_σ залежать від жорсткості деталі J_D , величин припусків z і часу t , що пройшов після обробки,

$$\varepsilon_\sigma = f(J_D, z, t).$$

Нижченаведені три посилання відображають явища, що відбуваються впродовж оброблення деталі термічними методами і які необхідно враховувати під час побудови принципової схеми процесу.

Посилання 4 Похибки деталі ε^Σ за різними характеристиками точності після термообробки збільшуються порівняно з похибками попередньої механічної обробки і визначаються векторною сумою

$$\varepsilon^\Sigma = \varepsilon_{i-1}^M + \varepsilon_i^T.$$

Передатне відношення похибок, одержаних після термообробки, до похибок попередньої механічної обробки можна обчислити за формулою

$$\eta_{i,i-1}^T = \frac{\varepsilon_{i-1}^M + \varepsilon_i^T}{\varepsilon_{i-1}^M} = 1 + \frac{\varepsilon_i^T}{\varepsilon_{i-1}^M}.$$

Воно завжди більше за одиницю. Унаслідок виникаючих під час термооброблення деформацій ε_i^T деталь втрачає раніше одержану точність.

П о с и л а н н я 5 Під час термічного й хіміко-термічного оброблення фізико-механічні властивості матеріалу змінюються за глибиною r перетину деталі $H_{RC} = f(r)$. Зважаючи на це, необхідна твердість H_{RC} та інші характеристики матеріалу можуть бути одержані лише до певної глибини r_m . Наприклад, під час азотування глибина шару становить $r_m \approx 0,3-0,5$ мм, а зона найбільшої твердості поширюється на глибину $r_m \approx 0,1$ мм.

П о с и л а н н я 6 У результаті термічного та хіміко-термічного впливу, проведеного для одержання високих фізико-технічних властивостей, оброблюваність матеріалу механічними методами погіршується (у цьому разі не розглядають термообробку заготовок для покращення оброблюваності матеріалу).

Наведені посилання відображають найбільш загальні й безперечні функціональні властивості відношення $\mu_i: O_{i-1} \rightarrow O_i$, установлені технологічною наукою та практикою, що впливають із принципу технологічної сумісності. Розглянуті посилання незалежні одне від одного. Жодне з них не може бути логічно виведеним з інших. Вихідні посилання не суперечливі. Це означає, що технологічний факт, зафіксований в одному посиланні, не суперечить іншим, одержаним з інших посилань.

Сукупність вихідних посилань не є повною й замкнутою. У разі впровадження нових методів обробки та матеріалів, що істотно впливають на побудову технологічного процесу, до наявних вихідних посилань необхідно додати нові. Вони повинні відображати закономірності нових методів, що варто враховувати під час побудови технологічного процесу. На основі посилань 1–6 формулюють низку *тверджень*, що визначають вибір методів обробки, види та взаємне розміщення механічної й термічної обробки, що забезпечують найбільш ефективно досягнення необхідних точнісних параметрів і фізико-механічних властивостей деталі та її окремих елементів.

Припустимий метод обробки поверхні вибирають порівнянням його функціональних можливостей, тобто параметрів стану O_i^M , із необхідними значеннями точнісних параметрів і фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні. На основі посилання 1 формулюють твердження, що визначає структуру алгоритмів вибору припустимих методів обробки.

Твердження 7.1 Припустимими із заданої множини методів обробки $M = \{M_i\}$ будуть ті, що забезпечують одержання необхідних форм оброблюваної поверхні Φ^{Π} , точності її розмірів τ^{Π} і взаємного розміщення δ_{ij}^{Π} , шорсткості $Ш^{\Pi}$ і фізико-механічних властивостей H_{RC}^{Π} , тобто

$$M_{\text{ДОП}} \in \{M_i\}, \quad (7.1)$$

$$\Phi^{\Pi} \in \{\Phi_i^M\}, \quad (7.2)$$

$$\tau^{\Pi} = (\tau_{EK} \div \tau_{\text{ДОП}})^M, \quad (7.3)$$

$$Ш^{\Pi} = (Ш_{EK} \div Ш_{\text{ДОП}})^M, \quad (7.4)$$

$$\delta_{ij}^{\Pi} = (\delta_{EK} \div \delta_{\text{ДОП}})^M, \quad (7.5)$$

$$H_{RC}^{\Pi} = (H_{RC}^1 - H_{RC}^2)^M, \quad (7.6)$$

$$H_{RC}(i-1) \leq H_{RC.\text{ДОП}}^M. \quad (7.7)$$

Співвідношення (7.1) системи означає, що форма оброблюваної поверхні повинна бути елементом множини форм, одержуваних за допомогою цього методу. Співвідношення (7.2)–(7.6) свідчать про те, що значення точнісних параметрів і фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні повинні перебувати в межах від економічно доцільних $\tau_{ЕК}$, $\delta_{ЕК}$, $Ш_{ЕК}$ до технічно припустимих значень $\tau_{ДОП}$, $\delta_{ДОП}$, $Ш_{ДОП}$ для цього методу обробки. Величини економічних та технічно досяжних значень τ , δ , $Ш$, H_{RC} одержані на основі узагальнення досвіду виготовлення деталей. Їх визначають за заводськими нормами й довідковою літературою.

Нерівність (7.7) характеризує величини припустимих для цього методу значень фізико-механічних властивостей поверхні ($HВ$, H_{RC}), одержаних у результаті попередньої обробки. Ці значення повинні бути такими, щоб забезпечити нормальні умови різання та ефективну обробку поверхні вибраним методом. Співвідношення (7.1)–(7.7) утворюють *математичну модель вибору припустимого методу обробки поверхні*. Вона є основою для побудови алгоритмів виконання зазначеного завдання.

Наступне твердження визначає види й послідовність методів обробки, необхідних для одержання заданих кресленням параметрів оброблюваної поверхні зі стану заготовки.

Твердження 7.2 Для одержання заданих точнісних параметрів поверхні та базуючись на результатах аналізу впливу піддатливості технологічної системи, види, послідовність і кількість переходів визначають за такими співвідношеннями:

$$M_1 : O_0(\varepsilon_0) \rightarrow O_1(\varepsilon_1), \quad (7.8)$$

$$M_2 : O_1(\varepsilon_1) \rightarrow O_2(\varepsilon_2), \quad (7.9)$$

...

$$M_i : O_{i-1}(\varepsilon_{i-1}) \rightarrow O_i(\varepsilon_i), \quad (7.10)$$

...

$$M_k : O_{k-1}(\varepsilon_{k-1}) \rightarrow O_k(\varepsilon_k). \quad (7.11)$$

Ці твердження доводять на основі посилання 1. Співвідношення (7.8) показує, що із заготовки $O_0(\varepsilon_0)$ із точнісними параметрами $\varepsilon_0 = (\tau_0, \delta_0, \Pi_0)$ за допомогою методу M_1 досягають проміжного стану $O_1(\varepsilon_1)$, точнісні параметри якого через посилання 1 будуть більшими, ніж у заготовки $\varepsilon_0 > \varepsilon_1 > \varepsilon_k$. Обробляючи цю поверхню вдруге методом M_2 , одержуємо новий проміжний стан $O_2(\varepsilon_2)$, що характеризується вищою точністю, ніж $O_1(\varepsilon_1)$. Цей процес триває доти, доки поверхня не набуває необхідної точності $\varepsilon_k \leq \varepsilon_{\text{чеп}}$. За певних умов для досягнення заданої точності поверхні може знадобитися лише один перехід. Для одержання необхідних фізико-механічних властивостей поверхні у співвідношення (7.8)–(7.11) уносять перетворення поверхні (або деталі загалом) термічними або хіміко-термічними методами

$$M_i^T : O_{i-1}(\varepsilon_{i-1}^M) \rightarrow O_i^T(\varepsilon_i^T).$$

Послідовність методів обробки, необхідних для досягнення потрібних розмірних, точнісних параметрів і фізико-механічних властивостей поверхні, називають *елементарним процесом*, або *маршрутом обробки поверхні (МОП)*. Подавши перетворення $M_i : O_{i-1}(\varepsilon_{i-1}) \rightarrow O_i(\varepsilon_i)$ як відношення $O_{i-1}(\varepsilon_{i-1})M_iO_i(\varepsilon_i)$, одержимо *функціональну модель МОП* у вигляді послідовності перетворень поверхні з початкового стану O_0 на кінцевий O_K :

$$\text{МОП} = O_0(\varepsilon_0)M_1O_1(\varepsilon_1)\dots M_KO_K(\varepsilon_K).$$

У *МОП* кожному виду технологічного перетворення $O_{i-1}(\varepsilon_{i-1})M_iO_i(\varepsilon_i)$ відповідає похибка обробки, що визначають за формулою $\varepsilon_i = \eta \cdot \varepsilon_{i-1}$. Підставивши замість ε_{i-1} його значення $\varepsilon_{i-1} = \eta_{i-1}\varepsilon_{i-2}$, а замість ε_{i-2} – відповідно $\varepsilon_{i-2} = \eta_{i-2}\varepsilon_{i-3}$, і так до останньої операції, одержимо відому формулу для визначення результуючої похибки на останньому переході *МОП*

$$\varepsilon_k = \eta_k \varepsilon_{k-1} \dots \eta_1 \varepsilon_0 \dots$$

Із цього твердження випливає важливий *висновок*: чим вищі точнісні параметри оброблюваної поверхні та її фізико-механічні властивості, тим більшу кількість переходів за інших однакових умов (матеріалу деталі, жорсткості системи та ін.) необхідно для їх досягнення. Зважаючи на це маршрути обробки головних поверхонь через їх високу точність будуть мати більше переходів, ніж маршрути обробки допоміжних поверхонь.

Положення термообробки «покращення» у технологічному процесі визначають на основі такого твердження.

Твердження 7.3 Якщо величина прожарювання r_T менша ніж мінімальний розмір B_i найбільшого S_{max} за величиною перетину заготовки $r_T < \min B_i(S_{max})$, то термообробку «покращення» варто виконувати після попередньої механічної обробки, коли основні припуски й напуски будуть зняті; якщо ж $r_T \geq \min B_i(S_{max})$, термообробку потрібно виконувати в заготовці перед механічною обробкою.

У першому разі буде досягнуто найбільшої глибини прожарювання деталі, у другому – прожарювання заготовки по всьому перетину, а процес механічної обробки не перериватиметься термічною операцією.

Твердження 7.4 Якщо сумарна похибка деталі від попередніх механічної та термічної обробок не перевищує

заданих кресленням величин $\varepsilon_{i-1}^M + \varepsilon_i^T \leq \varepsilon_{\text{чеп}}$, то термообробку, потрібну для одержання високих фізико-механічних властивостей, призначають наприкінці технологічного процесу. У протилежному разі вона повинна передувати етапу остаточної механічної обробки.

За першого варіанта, базуючись на посиланні 5, планування термообробки наприкінці технологічного процесу є найбільш економічним і не збільшує трудомісткості механічних операцій, тому що вони не будуть перериватися операціями термічної обробки, зазвичай виконуваними в окремих цехах. Такий порядок застосовують для неточних і жорстких деталей або невідповідальних поверхонь у деталях високої точності. Призначення термічної обробки перед завершальними етапами дасть змогу зменшити обсяг механічної обробки важкооброблюваного загартованого матеріалу до значень, мінімально необхідних для одержання потрібних точнісних параметрів деталі.

На основі наведених посилань і тверджень формулюють наступне твердження, що визначає структуру принципової схеми технологічного процесу.

Твердження 7.5 За недостатньої жорсткості деталі та необхідності її термообробки для одержання високих точнісних параметрів і фізико-механічних властивостей технологічний процес виготовлення деталі поділяють на низку послідовних *етапів*, у кожному з яких передбачають однорідні за характером та точністю методи обробки різних поверхонь і деталі загалом.

Відповідно до вибору поверхні як базового структурного елемента деталі загальну функцію технологічного процесу розчленовують на сукупність підфункцій елементарних процесів обробки окремих поверхонь $\Phi \rightarrow \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, описуваних такими перетвореннями:

$$\lambda_{\Pi 1} : \mathcal{Z}_1(\varepsilon_1^0) \rightarrow \Pi_1(\varepsilon_1^k), \quad (7.11)$$

$$\lambda_{\Pi 2} : \mathcal{Z}_2(\varepsilon_2^0) \rightarrow \Pi_2(\varepsilon_2^k), \quad (7.12)$$

...

$$\lambda_{\Pi_n} : Z_n(\varepsilon_n^0) \rightarrow \Pi_n(\varepsilon_n^k), \quad (7.13)$$

де $\lambda_{\Pi_1}, \lambda_{\Pi_2}, \dots, \lambda_{\Pi_n}$ – елементарні процеси обробки поверхонь деталі;

$Z_1(\varepsilon_1^0), \dots, Z_n(\varepsilon_n^0)$ – параметри оброблюваних поверхонь у заготовці;

$\Pi_1(\varepsilon_1^k), \dots, \Pi_n(\varepsilon_n^k)$ – точнісні параметри й фізико-механічні властивості поверхні згідно з кресленням.

На підставі твердження 7.2 загальні вирази функцій елементарних процесів можуть бути розгорнуто записані як функціональні моделі маршрутів обробки поверхонь деталі. У результаті співвідношення (7.11)–(7.13) наберуть вигляду

$$Z_1(\varepsilon_1^0) M_1 \Pi_1(\varepsilon_1^1) \dots M_i \Pi_1(\varepsilon_1^k), \quad (7.14)$$

$$Z_2(\varepsilon_2^0) M_2 \Pi_2(\varepsilon_2^1) \dots M_i \Pi_2(\varepsilon_2^k), \quad (7.15)$$

$$\dots, \quad (7.16)$$

$$Z_n(\varepsilon_n^0) M_c \Pi_n(\varepsilon_n^1) \dots M_i \Pi_n(\varepsilon_n^k).$$

Під час оброблення поверхонь одного виду (наприклад, площин) застосовують різні методи: стругання, фрезерування, шліфування, шабрування та ін. Зважаючи на це кількість варіантів *МОП* стає більшою, і їх можуть формувати на основі наступного твердження.

Твердження 7.6 Якщо для обробки поверхні певного виду Π_k і точності $\varepsilon = (\tau, \delta, \text{Ш})$ можуть бути застосовані різні методи обробки $M = \{M_q\}$, то можливі варіанти маршрутів обробки такої поверхні утворюють граф $H(Z, M)$, вершинам якого відповідають стани поверхні, а дугам – множина методів обробки, за допомогою яких ці стани можуть бути досягнуті.

Функція методу обробки як перетворення M поверхні з одного стану O_{j-1} на інший O_j (більш точний), може бути інтерпретована дугою графа $O_{j-1} M O_j$ із вершинами O_{j-1} та

O_j . Якщо для досягнення точнісних параметрів O_j стану поверхні можна застосувати різні методи обробки M_1, M_2, \dots, M_b , то сукупність їх функцій утворить підграф із вершиною O_j . Кожен зі станів $O_{j-1,q}$ етапу $(i-1)$ аналогічно відображається в множину станів етапу $(i-2)$ і так доти, доки попередні стани не будуть збігатися з параметрами заготовки або начорно обробленої деталі.

У результаті одержують граф можливих варіантів маршруту обробки поверхні певного класу, у деякі вершини якого можуть входити кілька ребер. Це означає, що запропоновані методи обробки характеризуються однаковими точнісними параметрами проміжних станів. Тому будь-який із можливих шляхів на графі з O_o в O_k буде одним із варіантів *МОП*.

Важливим є також те, що, ґрунтуючись на посиланні 3, для усунення похибок, спричинених деформацією деталі від перерозподілу внутрішніх напружень під час зняття великих припусків і напусків, стає необхідним розрив у часі між чорною, чистою й остаточною обробками поверхонь деталі. За цей час зазначені деформації встигнуть виявитися і в результаті подальшої обробки їх буде усунуто. Відповідно до поділу *МОП* на переходи різної точності механічну обробку високоточних деталей поділяють на *чорнову, чистову, остаточну та оздоблювальну*.

Крім того, відповідно до тверджень 7.3 і 7.4 процес механічної обробки може багаторазово перериватися термічними операціями. На підставі зазначених міркувань одержана множина *МОП* може бути поділена по вертикалі на непересічні підмножини (етапи) так, щоб методи обробки, загальні за класом (заготівельні, механічні, термічні) та видом, у межах одного класу входили в один етап

$$E_i = \{M_1\Pi_1(\varepsilon_1^1), M_2\Pi_2(\varepsilon_2^1) \dots M_c\Pi_n(\varepsilon_n^1)\}. \quad (7.17)$$

У результаті такого розчленовування співвідношення (7.11)–(7.13) можуть бути перетворені на таблицю, у якій кожен

рядок таблиці відповідає етапу технологічного процесу, а кожен стовпець – маршруту обробки окремої поверхні. Одні етапи належать до всієї деталі (наприклад, заготівельний E_1 або термічний E_3 етап), інші – до сукупності окремих поверхонь.

У виразі (7.17) сукупність методів обробки $\lambda = \{M_1, M_2, \dots, M_c\}$ узагальнено характеризує вид технологічного перетворення λ на i -му етапі, а множина станів окремих поверхонь $O_{oi} = \{P_1(\varepsilon_1^1), P_2(\varepsilon_2^1) \dots P_n(\varepsilon_n^1)\}$ – стан деталі, одержаний у результаті її обробки на етапі E_i . Зважаючи на це функція E_i етапу визначають як перетворення деталі зі стану $O_{E,i-1}$, досягнутого на попередньому ($i-1$) етапі, на стан $O_{E,i}$ на виконуваному етапі $O_{E,i-1} \lambda_i O_{E,i}$.

Етапи механічної обробки в певному порядку чергуються з термічними й утворюють *принципову схему технологічного процесу*. Отже, основним структурним елементом принципової схеми є етап обробки.

Загалом функціональна структура принципової схеми процесу характеризується послідовністю перетворень оброблюваної деталі з початкового стану на заготівельному етапі на стани $O_{E,1}, O_{E,2}, \dots, O_{E,n}$ на проміжних і вирішальних етапах:

$$S^T(\lambda, O_E) = O_{E0} \lambda_1 O_{E1} \lambda_2 O_{E2}, \dots, \lambda_n O_{En}.$$

Часова структура принципової схеми технологічного процесу являє собою впорядковану послідовність етапів обробки деталі

$$S_B(E, \Omega) = E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n.$$

Зокрема, заготівельний етап властивий більшості деталей. Виняток становлять ті з них, що виготовляють, наприклад, із каліброваного прутка на токарних автоматах. Необхідність чорного етапу характеризується низкою

евристичних критеріїв, що відображають обсяг чорнової обробки та певні організаційні фактори. Їх визначають за окремим алгоритмом.

Стан деталі на заготівельному етапі описують завданням виду заготовки (пруток, труба, кування, виливок та ін.), а в чорновому – переліком ділянок деталі, з яких знімають напуски й припуски $O_{E2} = \{G_1, G_2, \dots, G_q\}$. Наприклад, у деталях класу «тіла обертання» необхідно зазначити чорнову обробку зовнішнього контуру та центрального отвору, а для площинних і корпусних деталей установлюють перелік плоских ділянок та груп співвісних отворів, що підлягають чорновій обробці.

На чистовому етапі здійснюють напівчистову й чистову обробки основних поверхонь деталі та остаточну – другорядних (невеликих і неточних отворів, площин, пазів та ін.). Зважаючи на це на чистовому етапі поверхні деталі можуть оброблятися в один або кілька переходів (свердління – нарізування різьблення, свердління – розточування).

Подальшому поділу технологічного процесу на етапи сприяють, зокрема, термообробка й хіміко-термічні операції, проведені для одержання необхідних фізико-механічних властивостей деталі або її окремих елементів.

Для конкретної деталі залежно від матеріалу та типу термообробки деякі етапи можуть бути відсутніми. Наприклад, деталі невисокої точності без загартування обробляють лише на перших етапах, а за певних умов – на одному етапі. Це стосується насамперед обробки жорстких невеликих деталей із виливків, поковок і пруткового матеріалу. Проте навіть за комплексної обробки деталей на агрегатних верстатах в окремі позиції групують чорнову й чистову обробки деталі.

На різних підприємствах кількість етапів також може змінюватися. Зокрема, на підприємствах приладобудування чорновий етап часто є відсутнім.

7.5 Параметрична оптимізація операції й технологічного процесу

Технологічний процес механоскладального виробництва і його елементи є дискретними, тому завдання синтезу полягає у визначенні їх структури. Якщо серед варіантів структури шукають найкращий у деякому змісті, то таке завдання синтезу називають *структурною оптимізацією*.

Розрахунок оптимальних параметрів (режимів різання, параметрів якості та ін.) технологічного процесу або операції (переходу) за заданої структури з позиції деякого критерію називають *параметричною оптимізацією*, що передбачає визначення таких значень параметрів x , за яких певна функція $F(x)$, названа *цільовою функцією*, або *функцією ефективності* (наприклад, приведені витрати, технологічна собівартість, штучний час, штучна продуктивність, технологічна продуктивність, допоміжний час та ін.), набуває екстремального значення.

Можливості поставлення й виконання завдань структурної оптимізації обмежені, тому під оптимізацією часто розуміють лише параметричну оптимізацію.

Для ефективної оптимізації в технологічному проєктуванні використовують математичні моделі й такі методи математичного програмування, як лінійне, цілочислове, динамічне, геометричне та ін.

У технологічному проєктуванні операційні моделі, описані методами математичного програмування, записують так:

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &\rightarrow \min(\max), \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_j, j = \overline{1, m}, \\ a_{1i} \leq x_i &\leq a_{2i}, i = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\}$$

де всі керовані x_i можуть набувати значення з множини $[a_{1i}, a_{2i}]$ дійсних чисел;

$F(x)$ і $g_i(x)$ – скалярні функції своїх аргументів;

b_j – задані дійсні функції.

У технології машинобудування подібні завдання виникають під час визначення оптимальних режимів обробки. У цьому разі можуть бути застосовані методи лінійного й нелінійного програмування.

Застосування методу лінійного програмування спричиняє труднощі, пов'язані з лінійністю критерію оптимальності та обмежень. Наприклад, для призначення плану чорнової обробки поверхні заготовки повинні бути враховані обмеження, пов'язані з технічними даними устаткування, характеристиками різального інструменту, розмірами деталі та ін. Ці обмеження виражають через параметри переходів (робочих ходів) – режими різання (t – глибина різання, S – подача, V – швидкість різання) і відповідні величини, що характеризують умови обробки (потужність приводу устаткування; допустима сила, що діє на механізм подачі верстата; міцність і стійкість різального інструменту, допустиме переміщення заготовки під дією сил різання).

Застосовують також різні методи пошуку, що виключають повне перебирання (наприклад, регулярного пошуку для визначення оптимальних режимів різання під час оброблення східчастих валів на токарному гідрокопіювальному напівавтоматі). Задають вихідні дані (розміри й матеріал деталі, різальний інструмент, глибину різання, твердість вузлів верстата, циклові та нециклові втрати часу роботи устаткування). Потрібно знайти режим обробки, що задовольняє умови за її точністю, шорсткістю поверхні, потужністю, яка витрачається на різання, кінематикою верстата, і такий, що приводить цільову функцію до максимуму.

Упродовж параметричної оптимізації математичні моделі оцінюють із погляду придатності їх використання для виконання технологічних завдань у виробничих умовах. Їх оцінюють за допомогою статистичного аналізу способами:

- 1) порівняння двох методів виконання конкретного технологічного завдання – математичного моделювання й використання нормативних даних: у цьому разі перевіряють гіпотезу відповідності значень двох вибірок;

- 2) перевірки математичної моделі на чутливість впливу випадкових факторів;

- 3) перевірки математичної моделі на її адекватність реальному технологічному процесу.

7.6 Структурний синтез під час проєктування технологічних процесів

В основу виконання завдань структурного синтезу різної складності покладено перебирання варіантів рахункової множини. Під час нього кожна спроба охоплює: створення (пошук) чергового варіанта, ухвалення рішення про заміну раніше вибраного варіанта на новий і продовження або припинення пошуку нових варіантів.

Завдання структурного синтезу під час автоматизованого технологічного проєктування залежать від рівня складності. У найбільш простих із них (*першого* рівня складності) задають структуру технологічного процесу або його елементів (операції, переходу). У цьому разі часто використовують таблиці застосовуваності (табличні моделі).

Для повного перебирання варіантів структури зі скінченної множини необхідно задавати перелік усіх елементів цієї множини (*другий* рівень складності структурного синтезу). Такий перелік створюють як каталог типових варіантів структури, наприклад, типових технологічних маршрутів. Водночас для конкретного класу (групи, підгрупи або виду) деталей установлюють так званий *узагальнений маршрут обробки*. Він містить у собі перелік операцій обробки, характерний для визначеного класу, підкласу або групи деталей. Перелік є впорядкованим і являє собою множину індивідуальних маршрутів. Ці маршрути мають типову послідовність та зміст, відображаючи для підприємства або галузі передовий виробничий досвід.

Необхідною умовою внесення індивідуального маршруту в узагальнений є наявність області перерізу операцій, наприклад маршрутів $M1$ і $M2$, як непорожньої множини $M1 \cap M2 \neq 0$. Важливою характеристикою (критерієм оптимальності) формування узагальненого маршруту є потужність перерізу множин операцій індивідуальних маршрутів (кількість однакових операцій, що входять у цей переріз без обліку відношень порядку елементів множини).

Кожній операції узагальненого маршруту відповідає логічна функція. Логічна функція залежить від умов, що

враховують геометричні особливості поверхонь, вид заготовки, необхідну точність обробки, якість поверхневого шару деталі, розмір партії, габарити деталей.

Індивідуальні технологічні маршрути будують способом їх виділення з узагальненого маршруту. Вихідними даними такої побудови є умови, характерні для конкретної деталі. Для певних операцій, загальних для всіх оброблюваних деталей класу (групи), логічна функція відсутня.

За *третього* рівня складності структурного синтезу виконують завдання вибору варіанта структури в множині з великим, але кінцевим результатом відомих варіантів. Для цього використовують спеціальні алгоритми спрямованого перебирання (наприклад, дискретного лінійного програмування), послідовні, ітераційні та ін.; зведення завдання до повного перебирання способом обмеження області пошуку на стадії формування вихідних даних. Наприклад, оптимізація плану обробки поверхні являє собою завдання структурного синтезу, за якого вибір варіанта плану відбувається в множині з великою, але скінченною кількістю відомих варіантів. Для пошуку оптимального варіанта використовують алгоритми дискретного програмування, знаходять умови, які повинен задовольняти оптимальний багатокроковий процес ухвалення рішень. Подібний аналіз називають *динамічним програмуванням*.

Найскладніший – *четвертий* рівень структурного синтезу – спрямований на створення принципово нових технологічних процесів і вирішується так званім *пошуковим конструюванням*.

Одним зі способів пошукового конструювання є застосування методу евристичних прийомів:

- 1) з'ясування або формулювання технічного завдання;
- 2) вибір одного або декількох варіантів (прототипів) технологічного процесу;
- 3) аналіз прототипів, виявлення їх недоліків і формулювання завдання у вигляді відповідей на такі запитання:
 - а) які показники якості в прототипі технологічного процесу синтезу та наскільки бажано їх покращити;
 - б) які нові параметри якості деталі повинен забезпечити створюваний технологічний процес і які параметри якості повинні втратити розглянутий прототип;
- 4) виконання завдання.

7.7 Методи проєктування технологічних процесів

Під автоматизацією проєктування розуміють систематичне використання ЕОМ у його процесі за обґрунтованого розподілу функцій між людиною та ЕОМ і вибору методів автоматизованого виконання технологічних завдань.

Розрізняють проєктування трьох видів: *неавтоматизоване, автоматизоване та автоматичне.*

За *неавтоматизованого* проєктування всі перетворення описів об'єкта і (або) алгоритму його функціонування або алгоритму процесу, а також подання описів на різних мовах здійснює людина. За *автоматизованого* проєктування все вищенаведене є результатом взаємодії людини та ЕОМ, а за *автоматичного* – участь людини непотрібна.

За автоматизованого проєктування проєктувальник повинен виконувати творчі завдання, а ЕОМ – завдання, функції яких пов'язані насамперед із виконанням нетворчих або розумово-формальних процесів під час проєктування.

Подальший розвиток теорії проєктування та обчислювальної техніки дає змогу поступово передавати ЕОМ виконання і творчих завдань.

Продуктивність праці технолога-проєктувальника підвищують:

1) удосконаленням системи проєктування, зокрема систематизацією самого процесу проєктування й покращанням праці проєктувальників;

2) комплексною автоматизацією нетворчих функцій проєктувальника в процесі проєктування;

3) розробленням імітаційних моделей для автоматичного відтворення діяльності людини, його здатності ухвалювати рішення в умовах повної та часткової невизначеності актуальних ситуацій.

За ступенем поглибленості розробок розрізняють кілька рівнів проєктування: розроблення принципової схеми технологічного процесу, проєктування технологічного маршруту обробки деталі, проєктування технологічних операцій, розроблення програм керування для верстатів із ЧПК.

На кожному рівні процес технологічного проектування (проектування технологічних процесів та їх оснащення) подають як виконання сукупності завдань.

Під час виконання технологічного завдання взаємодія технолога-проектувальника з ЕОМ являє собою процес обміну інформацією в певному режимі. Розрізняють два основних режими: *пакетний* (автоматичний) і *діалоговий* (оперативний).

За пакетного режиму *технолог-користувач* і *програміст* здебільшого не мають прямого зв'язку з ЕОМ. Тексти програм, результати їх перевірки й виконання технологічного завдання передаються через оператора машині. Пакет прикладних програм є комплексом програм, що функціонують під загальною програмою керування, і призначений для виконання певного класу близьких одне до одного технологічних завдань, наприклад проектування технологічного маршруту обробки деталей певного класу (групи), збирання вузлів і складальних операцій заданого типу.

За оперативного режиму *технолог-проектувальник-користувач* безпосередньо пов'язаний з ЕОМ через мережу або індивідуальний термінал. Він одержує повідомлення ЕОМ досить швидко, через інтервал часу, що не порушує природного ходу його думки. Діалоговий режим доцільно застосовувати тоді, коли цей метод єдиний або ефективний.

Діалоговий режим доцільний у разі виконання творчих завдань, для якого потрібний евристичний підхід (розпізнавання геометричних образів деталей, розмірних і топологічних зв'язків між елементарними геометричними образами з метою оптимального вибору схем базування, проектування маршруту обробки, складання та ін.). Ці й багато інших завдань можуть бути виконані ефективно лише способом синтезу творчих процесів людини та «функцій» машинних програм. Водночас за діалогового режиму значно збільшуються витрати на створення програмного забезпечення, зростають витрати на проектування, але можна розробляти пакети програм, що дають змогу накопичувати досвід проектування й формувати алгоритми класифікації, генерування понять, поводження.

Зважаючи на вищезазначене, на сьогодні вирішують питання створення автоматизованих систем проектування технологічних процесів у режимі діалогу з подальшим

переходом до пакетного (автоматичного) режиму більш високого рівня способом використання програм навчання.

?

Запитання для самоперевірки

- 1 Яка суть закону нерівномірності розвитку та старіння елементів технологічної системи?
- 2 До чого призводить ізольоване вдосконалення елементів технологічної системи?
- 3 Що містять у собі формули й графи функціональної, часової та просторової структури технологічного процесу і його частин?
- 4 У чому полягає принцип технологічної сумісності методів та об'єктів обробки?
- 5 Які математична модель вибору припустимого методу обробки поверхні й функціональна модель маршруту обробки поверхні (МОП)?
- 6 Що охоплює етап обробки як основний структурний елемент принципової схеми технологічного процесу?
- 7 Особливості параметричної оптимізації операції та технологічного процесу.
- 8 Які чотири рівні складності структурного синтезу під час проєктування технологічних процесів?
- 9 Які ви знаєте методи проєктування технологічних процесів?



Список літератури

1. Кушніров П. В. Системно-структурне моделювання технологічних процесів : конспект лекцій / П. В. Кушніров. – Суми : СумДУ, 2005. – 115 с.
2. Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Системно-структурне моделювання технологічних процесів» / Укл. П. В. Кушніров. – Суми : СумДУ, 1999. – 43 с.
3. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи та обов'язкового домашнього завдання з курсу «Системно-структурне моделювання технологічних процесів» / Укл. П. В. Кушніров. – Суми : СумДУ, 2000. – 27 с.
4. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – Киев: Техніка, 1975. – 768 с.
5. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 832 с.
6. Пальчевський Б. О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація) / Б. О. Пальчевський. – Львів : Світ, 2001. – 232 с.
7. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки : навчальний посібник / За ред. Ю. Г. Леги / А. А. Тимченко. – К. : Либідь, 2004. – 288 с.
8. Роїк, О. М. Системний аналіз [Електронний ресурс] / О. М. Роїк, А. А. Шиян, Л. О. Нікіфорова. – Вінниця : ІРВЦ ВНТУ, 2017. – Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmib/32royik_systemnyj_analiz/txt/zmist.html
9. Добротвор І. Г. Системний аналіз [Електронний ресурс] : навчальний посібник / І. Г. Добротвор, А. О. Саченко, Л. М. Буяк. – Тернопіль: ТНЕУ, 2019. – 200 с. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/30197>
10. Катренко А. В. Системний аналіз : підручник / А. В. Катренко. – Львів : Новий Світ. – 2009. – 396 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – Т.1. – 656 с.
12. Цветков В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Минск : Наука и техника, 1979. – 264 с.
13. Полуянов В. Т. Структурные преобразования в технологии механосборочного производства / В. Т. Полуянов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 280 с.
14. Руденко П. А. Проектирование технологических процессов в машиностроении / П. А. Руденко. – Киев : Вища шк., 1985. – 255 с.
15. Бахрушин В. Є. Математичні основи моделювання систем : навчальний посібник / В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя : Класичний приватний університет, 2009. – 224 с.
16. Діордіященко О. В. Самостійна робота студентів у ВНЗ [Електронний ресурс] / О. В. Діордіященко. – Харків : Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2006. – Режим доступу : http://www.rusnauka.com/ONG_2006/Pedagogica/17894.doc.htm.
17. Pacurar A. C. Applications of Design for Manufacturing and Assembly. Chapter 1. Introductory Chapter : Applications of Design for Manufacturing and Assembly [Electronic resource] / A. C. Pacurar. – IntechOpen, 2019. – 100 p. Access mode : <https://www.intechopen.com/books/7460>.
18. Kostogryzov A. Probabilistic Modeling in System Engineering. Chapter 1. Probabilistic Modelling in Solving Analytical Problems of System Engineering [Electronic resource] / A. Kostogryzov. – IntechOpen, 2018. – 290 p. Access mode : <https://www.intechopen.com/books/6584>.
19. Mathematical Modeling of Technological Processes / 8th International Conference, CITech 2015 (September 24–27, 2015). – Almaty : Springer.

Електронне навчальне видання

Кушніров Павло Васильович,
Євтухов Артем Віталійович,
Дегтярьов Іван Михайлович

СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки А. В. Євтухова
Редактор О. В. Федяй
Комп'ютерне верстання П. В. Кушнірова

Для оформлення обкладинки використане фонове зображення
з інтернет-ресурсу за таким [посиланням](#).

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,31. Обл.-вид. арк. 8,43.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.