

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

Ю. М. Кузнєцов Б. І. Придальний

**ТЕОРІЯ
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**
в аспектах досліджень та технічної
творчості
ПІДРУЧНИК

**Theory of Technical Systems
in Aspects of Research and Technical Creativity**
TEXTBOOK

Затверджено

*Луцьким національним технічним університетом
Підручник для здобувачів освітніх рівнів бакалавра, магістра та
доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»*



Луцьк
Вежа-Друк
2023

УДК 621.7.001.66(075.8)

K89

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради факультету транспорту та механічної інженерії ЛНТУ (протокол №5 від 11.01.2023р.), рекомендовано до друку навчально-методичною радою ЛНТУ (протокол №5 від 24.01.2023р.), схвалено вченою радою Луцького національного технічного університету (протокол №6 від 26.01.2023р.)

Рецензенти:

Кальченко В. В. – доктор технічних наук, професор (Національний університет «Чернігівська політехніка»);

Ковалевський С. В. – доктор технічних наук, професор (Донбаська державна машинобудівна академія);

Волошин В. Н. – кандидат технічних наук, доцент (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя).

Відповідальний редактор:

Перший проректор ЛНТУ **Ковальчук Надія Віталіївна**

Кузнєцов Ю. М.

K89 Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості = Theory of Technical Systems in Aspects of Research and Technical Creativity : підручник для здобувачів освітніх рівнів бакалавра, магістра та доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / Ю. М. Кузнєцов, Б. І. Придальний. – Луцьк : Вежа-Друк, 2023. – 284 с.

ISBN 978-966-940-450-3

У пропонованому підручнику наведено основні поняття технічної системи та технічного процесу з ієрархією опису, закономірностями розвитку та показниками якості. Розглянуті структура і параметри технічної системи, їх класифікація, властивості та методи оцінювання, а також закони побудови і розвитку технічних систем.

У роботі приділено значну увагу питанням дослідження, проектування, моделювання, ефективного застосування, прогнозування розвитку та генетичного синтезу і передбачення характеристик технічних систем, які створюються за допомогою сучасних методів інженерної творчості, зокрема з використанням універсальних генетичних операторів. Розглянуто також питання аналізу та синтезу технічних систем з системних позицій. Теоретичні та практичні питання ілюстровано прикладами створення машин і механізмів різного призначення.

Підручник призначений для здобувачів освіти машинобудівних спеціальностей, а також може стати у пригоді аспірантам, конструкторам і технологам, які займаються дослідженням, виробництвом та експлуатацією технічних систем різних видів. Автори присвячують випуск підручника відзначенню 125-ої річниці заснування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

УДК 621.7.001.66(075.8)

© Кузнєцов Ю. М., 2023

© НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2023

© Придальний Б. І., 2023

ISBN 978-966-940-450-3

© Луцький національний технічний університет, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМИ, СУТЬ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ	
1.1. Історія розвитку системних уявлень.....	8
1.2. Визначення систем.....	10
1.3. Суть системного підходу, формалізація уявлень систем.....	17
1.4. Типи систем і задач.....	24
Питання для самоконтролю знань.....	27
2. СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕНЬ	
2.1. Системи виду "процес".....	29
2.2. Модель системи перетворень.....	31
2.3. Види потоків у системах.....	34
Питання для самоконтролю знань.....	36
3. ТЕХНІЧНИЙ ПРОЦЕС	
3.1. Визначення і модель технічного процесу.....	37
3.2. Структура й операції технічного процесу.....	39
3.3. Класифікація та опис технічного процесу.....	41
Питання для самоконтролю знань.....	44
4. ВЛАСТИВОСТІ ТА АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
4.1. Категорії властивостей ТС.....	45
4.2. Співвідношення між властивостями ТС.....	48
4.3. Вимоги до вибору й опису критеріїв ТС.....	50
4.4. Функціональні і технологічні критерії ТС.....	51
4.5. Економічні критерії ТС.....	55
4.6. Ергономічні, екологічні та естетичні критерії ТС.....	57
4.7. Надійність ТС.....	59
4.8. Алгоритм оцінювання ТС.....	68
Питання для самоконтролю знань.....	69
5. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
5.1. Поняття про фізичне моделювання.....	71
5.2. Класифікація математичних моделей ТС.....	73
5.3. Топологічні моделі структур ТС.....	79
Питання для самоконтролю знань.....	82
6. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМ	
6.1. Методи планування експериментів при вивченні поведінки систем.....	83
6.2. Метод послідовної зміни змінних.....	85
6.3. Обробка експериментальних даних методом найменших квадратів...	85
6.4. Повний і дробовий факторні експерименти.....	88
6.5. Математична обробка експериментальних даних при багатфакторному плануванні.....	91
Питання для самоконтролю знань.....	94
7. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ	
7.1. Етапи моделювання процесів функціонування систем.....	95
7.2. Декомпозиція систем, змістовний опис.....	95
7.3. Прийняття припущень, розробка розрахункових схем.....	102
7.4. Розробка формалізованих схем і структур моделей	103

7.5.	Приклади моделювання.....	118
	Питання для самоконтролю знань.....	124
8.	ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ	
8.1.	Постановка задачі оптимального управління ТС.....	126
8.2.	Метод динамічного програмування.....	130
8.3.	Метод лінійного програмування, оптимізація вхідних змінних	133
	Питання для самоконтролю знань.....	136
9.	СИСТЕМНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
9.1.	Методологія створення ТС і роль прогнозування.....	137
9.2.	Основні поняття про процес проектування.....	142
9.3.	Стадії та етапи технічного проектування ТС.....	144
9.4.	Розробка технічного завдання на основі суспільної потреби у створенні ТС.....	146
9.5.	Загальнотехнічні основи конструювання ТС.....	150
9.6.	Проектні критерії. Поняття про функцію мети і проектні обмеження	152
9.7.	Поняття про оптимальне проектування ТС.....	154
	Питання для самоконтролю знань.....	158
10.	МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
10.1.	Постановка задачі інженерної творчості.....	159
10.2.	Системні підходи до технічної творчості.....	163
10.3.	Системні методи створення ТС.....	165
10.4.	Асоціативні методи створення ТС.....	180
10.5.	Алгоритмічні методи створення ТС.....	187
10.6.	Спеціалізовані методи створення ТС.....	193
10.7.	Вепольний аналіз.....	201
10.8.	Функціонально-вартісний аналіз (ФВА).....	207
	Питання для самоконтролю знань.....	217
11.	ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
11.1.	Закономірності розвитку і еволюція класу ТС.....	218
11.2.	Основні принципи і методи прогнозування.....	223
11.3.	Статистичні методи прогнозування.....	225
11.4.	Експертні методи прогнозування.....	228
11.5.	Методи моделювання при прогнозуванні ТС.....	230
11.6.	Прогнозування на основі аналізу інформаційних даних.....	233
	Питання для самоконтролю знань.....	236
12	СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ ЩОДО СТВОРЕННЯ І ПЕРЕДБАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НОВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	
12.1.	Генетичний підхід – ключ до створення і передбачення характеристик нових ТС.....	237
12.2.	Новий погляд на матеріальну точку як носія генетичної інформації при створенні ТС.....	251
12.3.	Універсальні генетичні оператори синтезу.....	258
12.4.	Людське мислення і штучний інтелект на прикладі синтезу затискних цангових патронів.....	265
12.5.	Використання генетико-морфологічного підходу при створенні приводів затиску для шпіндельних вузлів верстатів.....	270
	Питання для самоконтролю знань.....	278
	АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	279
	ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	282

ВСТУП

Перехід від викликів четвертої промислової революції «Індустрія 4.0» до «Індустрія 5.0», що наближається, і прогресивні потреби суспільства зумовлюють необхідність створення обладнання, технологічних процесів, методів управління і організації виробництва на основі оновлених принципів функціонування. Збільшуються не лише масштаби виробництва і номенклатура виробів, але й складність їх конструкції разом з підвищенням вимог до якості, надійності, зручності експлуатації, екологічності та інше. Все це потребує удосконалення методів проектування, виробництва й експлуатації виробів. Як наслідок - виникає все більше складних інженерно-технічних проблем, різноманітність яких стимулює появу прикладних дисциплін, призначених для розв'язання практичних задач конструювання, аналізу, синтезу, управління. Застосування креативної системи в підготовці інженерів вимагає перегляду навчальних планів і програм, упровадження нових дисциплін, пов'язаних з оволодінням прогресивними методами пошуку і створення нових технічних систем (ТС), а також методами прийняття рішень, зокрема в умовах неповної вхідної інформації із забезпеченням максимального рівня автоматизації даного процесу.

Незважаючи на різноманітність об'єктів та методів навчальних дисциплін технічного спрямування існує міждисциплінарний характер у постановці їх задач, застосуванні методик та принципів аналізу і синтезу. Це призвело до необхідності узагальнення таких знань у вигляді науки про теорію ТС, що певною мірою визначає методологію побудови інженерних наук і слугує базою для вирішення багатьох практичних завдань. Ця методологія, на відміну від репродуктивної системи, зорієнтована на креативну систему передачі і накопичення знань. Таким чином, дисципліна «Теорія технічних систем» відіграє особливу роль в організації вищої технічної освіти, оскільки забезпечує функцію логічного та систематизованого зв'язку між її основними дисциплінами.

Розширене вивчення аспектів цієї дисципліни, що стосуються досліджень та застосування творчих (неформалізованих) підходів до створення ТС, дає можливість підвищення рівня систематичності та

послідовності зв'язків не лише між освітніми компонентами теоретичного та практичного спрямувань але й освітніми рівнями. Зокрема, це важливо для забезпечення наступності між освітньо-професійними (бакалавр, магістр) та освітньо-науковою (PhD) програмами, що сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів. Окремим свідченням затребуваності навчальних матеріалів з дисципліни можна вважати значне поширення в мережі Інтернет безсистемно викладених уривків, зокрема з видань підручників десятирічної давнини авторства професорів Кузнєцова Ю.М, Новосьолова Ю.К., Луціва І.В. Це також вказує на доцільність видання підручника з оновленою науково-технічною інформацією, що викладена відповідно до принципів дидактики.

Основна ідея написання підручника **«Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості»** - створення засобу для успішного формування ключових компетентностей здобувачів вищої освіти відповідно до вимог сучасності в галузі механічної інженерії. Тобто матеріали підручника спрямовані на підвищення кваліфікації майбутнього інженера як новатора, творця і винахідника, котрий повинен в найкоротший термін упровадити нові технічні ідеї у виробництво.

Запропонований підручник містить систематизоване викладення основних понять і положень теорії технічних систем. В ньому розкривається суть системного підходу, наводиться класифікація ТС, викладаються основні принципи аналізу, синтезу, математичного моделювання і управління ТС. Особлива увага приділена питанням створення нових, більш досконалих ТС, прогнозування їх розвитку і генетичного передбачення. Питання математичного опису поведінки і структури ТС, а також їх спрямованого синтезу з використанням 5-ти універсальних генетичних операторів автори намагалися викласти популярно та із збереженням оптимального співвідношення між науковістю та доступністю.

Системність, послідовність та наступність матеріалів підручника забезпечується логічним переходом від висвітлення у його перших розділах базових, класичних уявлень, що є основою даної галузі знань, до абсолютно нових підходів при створенні і передбаченні характеристик ТС, що описані в завершальній частині підручника. Для

висвітлення традиційних уявлень про головні аспекти теорії ТС частково та у сконцентрованій формі використано матеріали основоположних праць Половинкіна О.І. "Основы инженерного творчества" (1988р.), Хубки В. "Теория технических систем" (1987р., переклад з німецької мови), Чернова Л.Б. "Основы методологии проектирования машин" (1978р.), Петракова Ю.В. «Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням» (2004р.), Шинкаренка В.Ф. «Основы теорії еволюції електро-механічних систем» (2002р.) та інших. Матеріали, що стосуються генетичного підходу при створенні і передбаченні характеристик ТС, представлені у підручнику вперше як авторська розробка, що пройшла низку апробацій у наукових заходах та виданнях. Також продемонстровано можливості застосування нових теоретичних положень для створення механізмів затиску шпindelних вузлів верстатів, що є частиною досліджень докторської дисертації Придального Б.І.

Предмет курсу – ТС з притаманними їй протиріччями, що створюють проблемну ситуацію, розв'язання якої можливе шляхом синтезу нової системи. **Метою вивчення** матеріалів підручника та відповідного навчального курсу є оволодіння методологією системного аналізу, синтезу, управління і проектування ТС.

Представлена інформація також сприяє набуттю інтегральних компетентностей та досягненню програмних результатів навчання другого і третього освітніх рівнів спеціальності «Прикладна механіка». Це забезпечено висвітленням підходів до розв'язання комплексних проблем прикладної механіки шляхом переосмислення наявних логічних зв'язків та здійснення інновацій. Зокрема, розкриті питання дисциплін «Дослідження технічних систем», «Основы надійності технічних систем», «Наукові засади прикладної механіки», «Основы технічної творчості» та ін.

Автори висловлюють подяку рецензентам за цінні критичні зауваження, більшість яких врахована під час підготовки рукопису підручника. Відгуки і побажання просимо надсилати на електронні адреси авторів: info@zmok.kiev.ua та b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua

1. ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМИ, СУТЬ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

1.1. Історія розвитку системних уявлень

У процесі розвитку цивілізації змінюється уява людей про машини. Спочатку вони розглядалися як ціле з властивими тільки їм особливостями; далі – частинами. Для означення деяких машин не було навіть спеціальних понять. Тільки після заснування технічних шкіл (Париж, 1794 р.; Прага, 1806 р.) починається процес систематизації машин і вилучення з них окремих механізмів, призначених для перетворення руху.

Не можна не згадати праць справжнього генія Леонардо да Вінчі (1452-1519 рр.), який на століття визначив хід розвитку науки і розглядав елементи і частини машин як загальні одиниці різних агрегатів, застосовуваних у військовій, гірничій та морській справі, а також у металообробці, друкарстві, ткацтві та виконанні вантажних робіт. Для полегшення людської праці з'являються також машини-двигуни (водяні, парові, електричні). Робляться перші спроби створити загальну теорію машин і механізмів, до складу якої входив би синтез механізмів, спільно зі структурою, кінематикою і динамікою машин, а також теорією автоматів.

Для підготовки фахівців у різних галузях складалися свої навчальні плани, орієнтовані на досягнення конкретних результатів для цих галузей наук. Внаслідок цього виникли відокремлені одна від одної сфери знань та професій, у яких будь-яке професійне навчання доповнювалось би багаторічним досвідом. Причина цього полягала у відсутності теорії і, як наслідок, у відсутності системи збору і класифікації винаходів та нових технологій.

Створення нових технічних засобів поряд з підвищенням вимог до них, з одного боку, і новими методами вирішення задач (наприклад, засобами обчислюваної техніки) з іншого, викликає необхідність розвитку методологічної науки “Теорія технічних систем”.

Після Другої світової війни виник один з нових напрямків у галузі теорії ТС у вигляді окремих аспектів загальної теорії, а пізніше у більш інтегрованій формі -

системотехніки. З цього моменту теорію ТС визнано основою і джерелом інформації для декількох суміжних галузей знань. Так, наприклад, теорія конструювання частково опирається на теорію ТС.

З точки зору сучасних уявлень, системність завжди була одним з методів науки – кожен вчений в минулі часи неусвідомлено оперував з системами та моделями. Найраніше була усвідомлена системність процесу пізнання, а тому дискусії з системних проблем найперше виникали у філософії, логіці, основах математики.

Вперше в конкретному вигляді М.А. Ампер у роботі "Дослідження філософії наук або аналітичний вклад класифікації всіх людських знань" (част. I – 1834 р., II – 1843 р.) поставив питання про науковий підхід до керування складними системами. Якщо Ампер лише прийшов до висновку про необхідність такої науки, то польський вчений Броніслав Трентовський, професор Фрайбургського університету, видав у 1843 р. в Познані книгу "Ставлення філософії до кібернетики як до мистецтва керування народом" (кібернетика – від грецького слова "гіберно" – адміністративна одиниця, населена людьми, як об'єкт керування, а слово "гібернет" – особа, що керує ресурсами та людьми, які населяють територію).

Питанню вивчення системності присвятив увагу А.А. Богданов (Малиновський), який видав 3 томи книги "Всеобщая организационная наука (тектология)" (1911-1925 р.р.). Він розглядав всі явища як неперервні процеси організації і дезорганізації і вважав, що рівень організації тим вищий, що сильніше властивості цілого відрізняються від простої суми його частин (пізніше цю властивість почали називати емерджентністю). А.А. Богданов довів розгляд динамічних аспектів тектології до проблем криз (тепер це є предметом теорії катастроф) як таких моментів в історії кожної системи, коли необхідна докорінна, "вибухова" перебудова її структури.

Відчутний вплив на усвідомлення деяких аспектів системності мають роботи Н. Вінера (книга "Кібернетика", 1948 р.), в яких він визначив кібернетику як "науку про управління та зв'язок в тваринах і машинах", а потім почав аналізувати процеси в людському суспільстві з погляду кібернетики. З кібернетикою пов'язаний розвиток таких

системних уявлень, як типізація моделей систем, виявлення особливого значення зворотних зв'язків у системі, підкреслення принципу оптимальності в управлінні та синтезі систем, усвідомлення значення інформації та можливості її кількісного опису, розвиток методології моделювання, особливо проведення обчислювальних експериментів із застосуванням комп'ютера.

Загальна теорія систем сформувалася як самостійна наука у другій половині ХХ століття, основоположником якої вважається австрійський фізіолог Людвіг фон Берталанфі, який в 20-30-і роки займався питаннями системного підходу при вивченні живих організмів, розвиваючи точку зору на необхідність цілісного підходу в біології та фізіології. У 1962-1968 р.р. Л. фон Берталанфі включає в загальну теорію систем багато наук: кібернетику, теорію інформації, теорію рішень, топологію, факторний аналіз, теорію множин, теорію мереж, теорію автоматів, теорію масового обслуговування, теорію графів.

Найбільш вагомий внесок у розвиток теорії систем внесли Бусленко Н.П., Гальперин І.І., Саркисян С.А., Болтянський В.Г. та інші вчені. Сьогодні теорія систем є методологічною наукою, що визначає методи і принципи аналізу, управління і синтезу систем, а це дозволяє досягнути вагомих результатів у науці і техніці.

1.2. Визначення систем

У перекладі з грецької *sistema* – ціле, що складається з частин. Сьогодні під системою розуміють множину елементів, що перебувають у відношеннях і зв'язках один з одним. Таке поняття охоплює численні сфери людського життя: світотворення, науку, релігію та інше. З цієї сукупності виділяються ТС.

Для систем характерна низка ознак. Один з перших варіантів таких ознак був сформульований Робертом Маколом. Для ТС основними ознаками є:

1. Походження системи. Система створюється людиною з різного виду обладнання і сировини.

2. Ієрархічність структури. Кожна з систем може розтинатися на окремі підсистеми, котрі в свою чергу можуть розглядатися, як сукупність окремих підсистем і

елементів. Система може бути підсистемою більшої системи. Наприклад, верстат складається з окремих агрегатів і вузлів (підсистем) і одночасно може розглядатися як підсистема машинобудівного підприємства.

3. Система володіє цільністю. Всі її частини слугують досягненню єдиної мети, а саме виробленню певної продукції за допомогою оптимізованих виходів при заданих вхідних впливах. Яка ця мета, як ми визначаємо оптимальність системи і яка природа вхідних впливів, все це часто виявляється невідомим до моменту початку конструювання (проектування). З'ясування подібних питань являє собою одну з вагомих частин проблеми.

4. Зв'язки між елементами. Наявність зв'язків між елементами, які переважають за потужністю зв'язки цих елементів з елементами, що не входять до системи.

5. Наявність інтегрованих якостей. Система володіє інтегрованими якостями, наприклад, проста сукупність деталей верстата, не об'єднаних належним чином, властивостями верстата не володіє.

6. Система є напівавтоматичною. Це означає, що частина функцій системи завжди виконується автоматами (обчислювальною машиною, автоматом), а частина функцій системи виконується людиною. Таким чином, з розгляду виключаються повністю неавтоматизовані системи, тому що вони мало ефективні. На сучасному етапі розвитку науки і техніки система може бути повністю автоматичною, роль людини зводиться до підготовки завдань для роботи системи.

Перша ознака виключає з розгляду усі природні системи, політичні системи, мистецтво, правові відносини та ряд інших цікавих систем. Далі аналізуються системи, що створені людиною (табл. 1.1). Це - матеріальні системи управління державою, галуззю, підприємством, системи зв'язку, машини, обладнання, прилади, що потрібні для задоволення потреб людини і суспільства, обладнання і прилади підприємств, науки, мистецтва, тощо. В курсі "Теорія технічних систем" переважно розглядаються механічні системи, котрі можуть бути оснащені сучасними засобами управління, накопичення і переробки інформації, а також входити до складу більших систем підприємства, галузі.

Виходячи з поняття системи, системи можна розділяти

на класи за принципом походження (рис. 1.1). При цьому окремі елементи цієї структури визначаються на підставі загальноприйнятої класифікації галузей знання. Класи ТС відповідають відомим галузям техніки – машинобудування, електротехніка, будівництво і т.п.

Таблиця 1.1 – Приклади ТС

Розподіл економіки	Технічна система	
	Призначення	Вид машини
Гірнична справа	Добування Транспортування Збагачення	Врубова машина Транспортер Збагачувальна машина
Енергетика	Видобуток пару Видобуток електрики	Паровий котел Турбіна, генератор
Металургія	Виробництво чавуну Виробництво сталі Виробництво прокату	Доменна піч Мартенівська піч Прокатний стан
Хімічна промисловість	Переробка нафти Виробництво пластмас	Резервуар Коландр
Металообробка	Обробка тиском Обробка різанням Термообробка Лиття Складання	Прес, молот Верстат Піч Машина для формування Конвеєр
Будівництво	Будівництво фундаменту Будівництво споруд Земляні роботи	Екскаватор Підйомний кран Скрепер
Транспорт	Залізничні Автомобільні шляхи	Тепловоз, вагон Автомобіль
Текстильна промисловість	Виробництво текстилю Виготовлення виробів	Ткацький верстат Швейна машина
Харчова промисловість	Переробка молока Виробництво харчових жирів	Центрифуга Прес
Медицина	Діагностика	Рентген- апарат
Сільське господарство	Обробка землі Збір врожаю	Трактор, плуг Комбайн

Але такий підхід не дає точного означення «технічний засіб», тому що згідно рис. 1.1 його можна трактувати і як об'єкт машинобудування, і як електротехніки тощо. Більше

того в останній час існують гібридні системи (наприклад, біотехнічні, до яких належать людино-машинні складні системи).

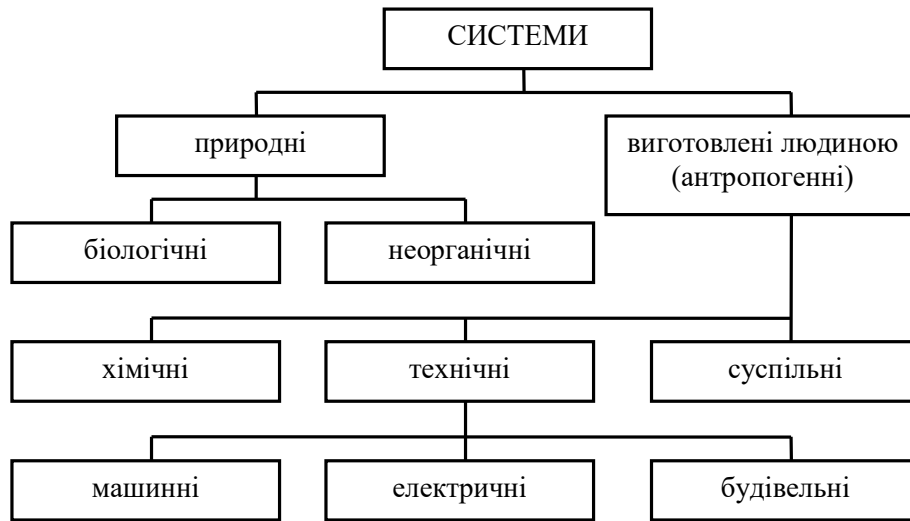


Рисунок 1.1 – Класифікація систем за їх походженням

Проектування і освоєння виробництва таких систем є дуже складним процесом (рис. 1.2) і визначає їх життєвий цикл, як сукупність взаємопов’язаних процесів їх творення, використання та послідовного удосконалення.

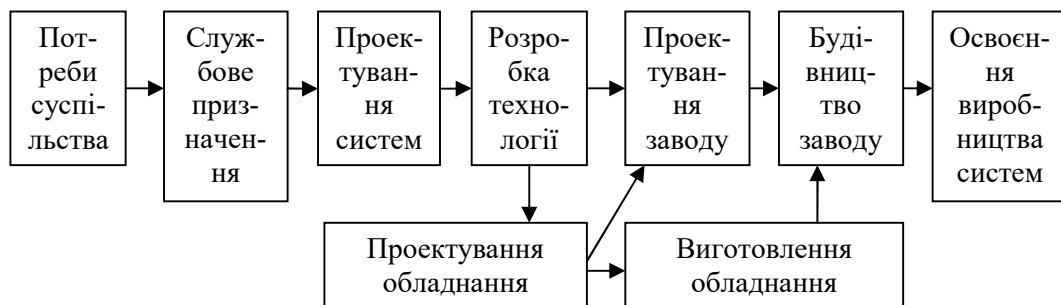


Рисунок 1.2 – Етапи освоєння виробництва систем

На першому етапі вивчають потреби суспільства, виробництва (промисловості), науки. При цьому виявляють не тільки необхідність у виробництві системи (для машинобудування – виробу), але й перспективу її виготовлення напротязі кількох років. Від цього буде залежати глибина проробки наступних рішень. На цьому ж етапі виконується попередній аналіз технічних вимог до системи і економічний аналіз доцільності освоєння її виробництва.

На наступному етапі проводиться аналіз службового призначення виробу, уточнюються технічні вимоги до виробу. При позитивному рішенні щодо освоєння виробництва приступають до конструювання системи. Конструкторський етап виконується відповідно до вимог щодо розробки проектної документації.

На етапі проектування технології розробляють технологічний процес виготовлення виробу, визначають тип виробництва (масове, серійне, одиничне), вибирають обладнання, технологічне оснащення, складають технічні завдання на проектування нового, необхідного для виробництва виробу, технологічного обладнання (верстатів, автоматичних ліній, транспортних систем, тощо). Для виробництва більшої частини нових виробів доводиться виконувати великий обсяг робіт з реконструкції діючого підприємства. Якщо програма випуску виробів достатньо велика, а виріб трудомісткий у виробництві, то перевагу віддають проектуванню і будівництву нового заводу, оснащуючи його більш сучасними засобами виробництва.

Після реконструкції або будівництва нового підприємства починається виробництво нового виробу. На цьому етапі після експлуатації дослідних партій уточнюють елементи конструкції і технології виготовлення виробу. Етап експлуатації виробу потребує створення цілої системи сервісного обслуговування. Введення в експлуатацію достатньо складних виробів, їх технічне обслуговування, як правило, виконуються або підприємством-виробником, або сервісним центром, робітники якого проходять спеціальні курси на підприємстві-виробнику.

Останнім етапом життєвого циклу виробу є його утилізація внаслідок морального або фізичного зношення. Технічні вимоги щодо утилізації, як правило, зумовлюються заводом-виробником виробу. В деяких випадках цей етап є дуже проблематичним і трудомістким. Прикладом може бути проблема утилізації військової техніки і боєприпасів.

У теорії ТС розглядаються всі етапи життєвого циклу виробу. Найбільша увага приділяється етапам конструювання і експлуатації.

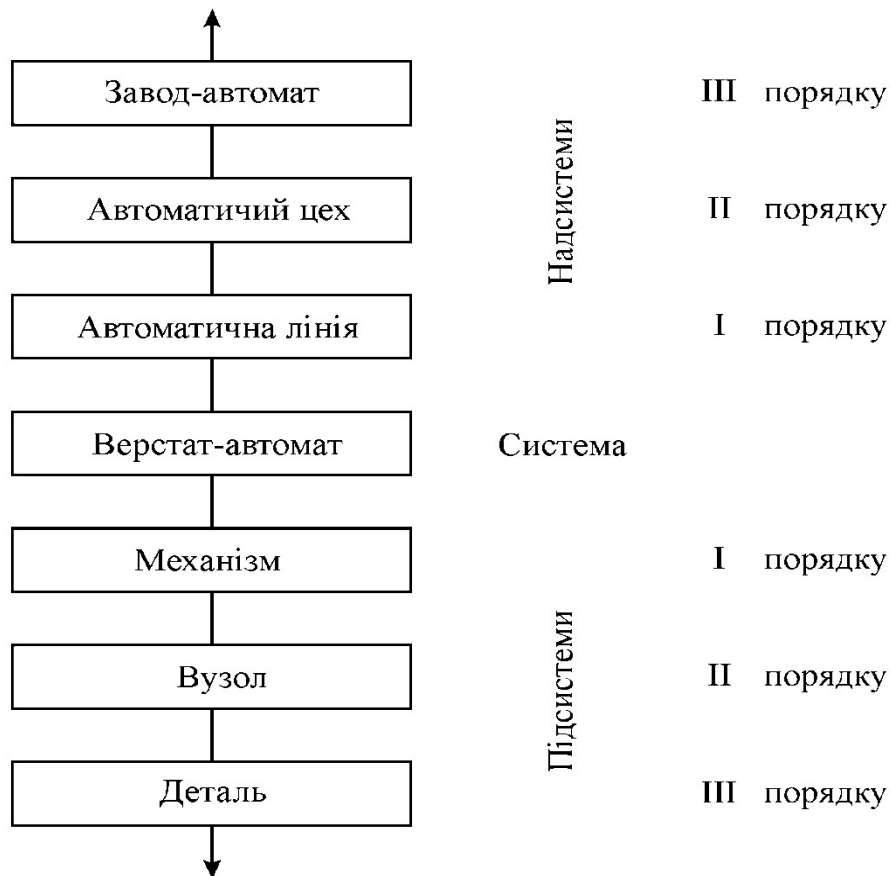


Рисунок 1.3 – Ієрархія ТС на прикладі металообробних (положення системи в ієрархії)

Структура систем (друга ознака) може бути доволі різноманітною. На рис. 1.3 наводиться приклад ієрархічної структури системи верстат-автомат, котрий може бути розбитий конструктивно на окремі підсистеми – механізми, кожний з яких в свою чергу може бути представлений сукупністю вузлів (підсистемою другого порядку). Вузли в свою чергу складаються з окремих деталей (елементи, підсистеми третього порядку).

Верстат-автомат як окрема система в той же час може розглядатися як підсистема більшої системи – автоматичної лінії (надсистема першого порядку), а автоматична лінія – як підсистема автоматичного цеху (надсистема другого порядку) і т.д.

Спираючись на третю ознаку, можна стверджувати, що кожна система має достатньо визначене службове призначення. Наприклад, холодильник повинен виробляти "мороз" і зберігати таким чином продукти, кондиціонер –

знижувати або підвищувати залежно від завдання температуру в приміщенні, автомобіль – перевозити вантажі, пасажирів або виконувати специфічні види робіт, верстати – обробляти деталі із заданими параметрами якості. Всі підсистеми, наприклад, верстата підпорядковані поставленій меті. При цьому треба мати на увазі, що поставлена мета повинна бути досягнута з врахуванням великої кількості вимог і обмежень на роботу системи. Наприклад, при конструюванні верстатів, як правило, постає задача мінімізації їх ваги і габаритів. Особливе значення в умовах жорсткої конкуренції мають економічні критерії, наприклад, собівартість виробництва системи.

Четверта ознака ТС – наявність зв'язків між підсистемами й елементами – реалізується на стадії конструювання і експлуатації. Створення оптимальних за своєю структурою і змістом зв'язків представляє собою складну наукову та інженерну задачу. Розглянемо її особливості на елементарному прикладі – підшипнику ковзання (рис. 1.4,а).

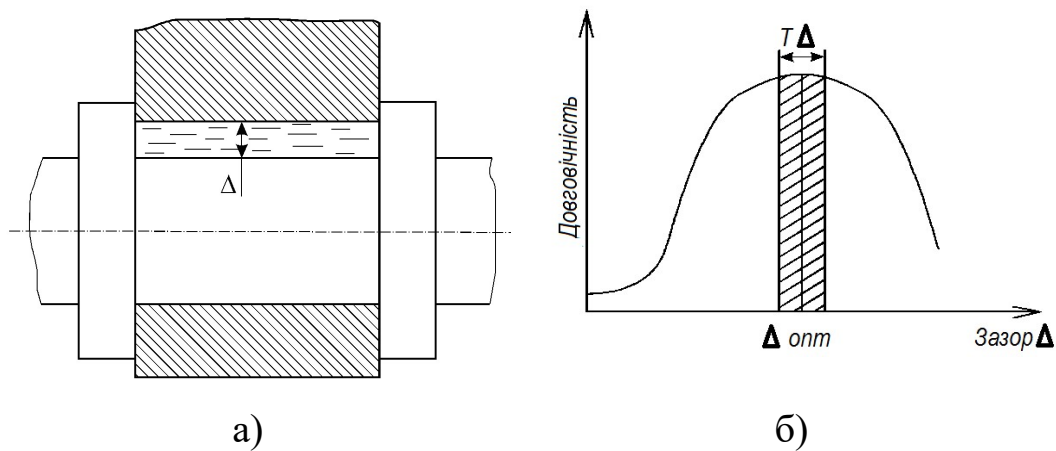


Рисунок 1.4 – Схема підшипника ковзання (а) і вплив зазору на довговічність його роботи (б)

Довговічність роботи такого підшипника залежить не тільки від матеріалів вала і втулки, але і від величини зазору Δ між ними, властивостей змащувального матеріалу, що подається в зазор, зовнішніх навантажень, температури деталей і мастила, швидкостей ковзання та інших факторів. Найбільша довговічність такого з'єднання спостерігається для заданих умов роботи при визначеній величині зазору Δ

(рис. 1.4, б), котра може бути розрахована або теоретично при фізико-математичному моделюванні процесу роботи з'єднання, або експериментально – за рахунок проведення спеціальних досліджень чи накопичення і аналізу даних з експлуатації виробу.

Якщо оптимальне значення зазору Δ_{opt} встановлено, то виникає задача його технологічного забезпечення при виготовленні виробу. Абсолютно точно не може бути виготовлена жодна деталь, жодне спряження. Якщо, наприклад, призначити на величину зазору допуск $T_{\Delta} = 10,0$ мкм, то для його забезпечення, деталі повинні бути виготовлені з допуском 5 мкм. Якщо, з метою підвищення стабільності експлуатаційних властивостей з'єднання, призначити допуск на зазор 2 мкм, то деталі повинні бути виготовлені з допуском 1 мкм. З таким допуском, наприклад, виготовляються деталі паливної апаратури дизельних двигунів.

П'ята ознака не потребує детальних коментарів. Вона визначає структуру системи і її функціональне призначення.

Шоста ознака з розвитком науки і техніки стає все більш актуальною. Сучасне машинобудування орієнтується на створення інтегрованих виробництв, у котрих всі процеси проектування виробу, технологічної підготовки виробництва, виготовлення виробу автоматизуються. У сучасному виробництві широко застосовуються автоматичні лінії, верстати-автомати і напівавтомати, верстати з ЧПК, гнучкі виробничі системи і модулі.

1.3. Суть системного підходу, формалізація уявлень систем

За даними Саркісяна С.А., суть системного підходу полягає в тому, що деяка сфера матеріального світу поділяється на дві частини, одна з яких розглядається як система, а друга – як оточення (навколишнє середовище). Обов'язковою умовою такого поділу є врахування зв'язків системи з оточенням. Так, наприклад, автомобіль може рухатись тільки в середовищі, верстат не може виробляти деталі, якщо на нього не надходять заготовки та енергія. В

подальшому систему будемо схематично зображати у вигляді чотирикутника, кола або їх комбінації (рис. 1.5).

Усі зв'язки системи з оточенням прийнято поділяти на вхідні змінні X , управляючі впливи $U(t)$, збурювальні впливи $\Omega(t)$ і вихідні змінні $Y(t)$. Крім того, сама система характеризується сукупністю параметрів стану $Z(t)$.

До вхідних змінних відносять змінні, які надходять з оточення на систему і значення яких не змінюються упродовж певного періоду спостережень. У просторі змінних вони утворюють вектор $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для автомобіля такими вхідними змінними є маса вантажу, що перевозиться, склад бензину, параметри налагодження тощо. Для технологічної операції – елементи режиму різання, що не змінюються у процесі обробки, параметри заготовки, вхідні параметри різального інструменту. Наприклад, при обточуванні зовнішньої поверхні на універсальному верстаті вибирають і встановлюють механічними перемикачами частоту обертання шпинделя верстата, поздовжню подачу, переміщення супорта верстата, глибину різання.

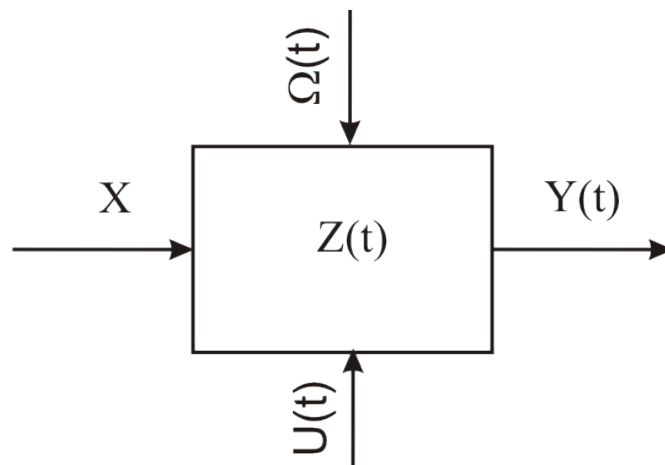


Рисунок 1.5 – Графічне зображення ТС

У процесі обробки поверхні жоден з перерахованих параметрів не змінюється.

Управляючі впливи – це такі вхідні змінні, значення яких можуть змінюватися у процесі роботи системи за заданим алгоритмом, вони утворюють вектор $U(t)=(u_1(t), u_2(t), \dots, u_k(t))$ в момент часу t . Наявність

управляючого впливу суттєво розширює функціональні властивості ТС. Прикладами управляючих впливів для автомобіля є: кермо для зміни траєкторії руху, газ для зміни швидкості руху, гальма для зупинки і зменшення швидкості руху. За механічної обробки – це елементи режиму, що змінюються у процесі обробки заготовки. Наприклад, при круглому зовнішньому шліфуванні (рис. 1.6) шліфувальному кругу надають обертовий рух з коловою швидкістю $v_k = 35 \dots 50$ м/с. Оброблювану заготовку встановлюють в центрах передньої і задньої бабок верстата і приводять до обертання зі швидкістю $v_u = 0,4 \dots 1,2$ м/с. Після вмикання обертання деталі і круга шліфованій бабці надають поперечну подачу S .

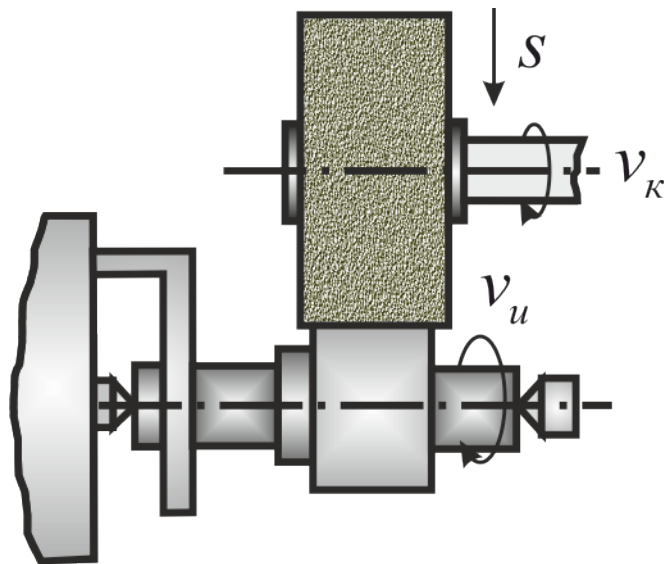


Рисунок 1.6 – Схема процесу круглого зовнішнього врізного шліфування

Для зниження трудомісткості операції і отримання високої якості поверхню обробляють із змінною подачею (рис. 1.7). Після етапу врізання на початку циклу обробки (чорновий етап) задається підвищена подача S_{max} , за якої знімається основна частина припуску. На другій ділянці циклу (чистовий етап) подача знижується в 2...3 рази, на третій ділянці (етап виходжування) подача зовсім відключається. Процес обробки продовжується за рахунок зниження пружних деформацій технологічної системи.

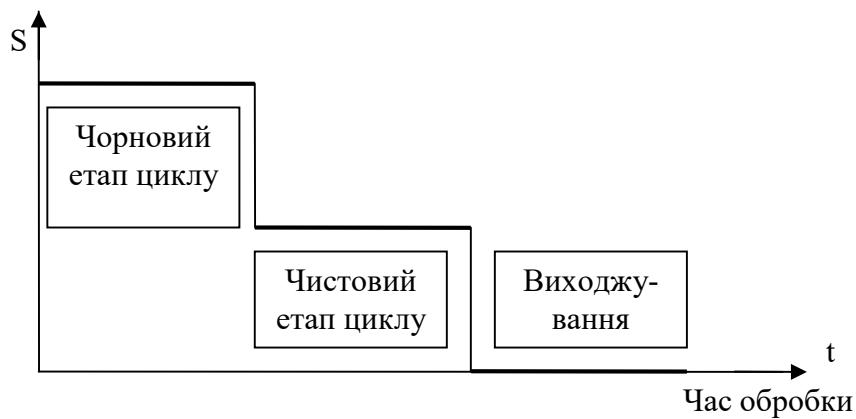


Рисунок 1.7 – Зміна поперечної подачі за період обробки однієї поверхні

Вектор збурювального впливу характеризує вплив на систему випадкових факторів, $\Omega(t) = (w_1(t), w_2(t), \dots, w_i(t))$, а також випадкових відхилень вхідних змінних, управляючих впливів і параметрів стану. За наявності збурювального впливу навіть при постійних вхідних змінних і управлінні вихідні змінні змінюються, вони є випадковими. Наприклад, при русі автомобіля до збурювального впливу відносяться випадкові нерівності дороги, коливання швидкості вітру, дефекти передач від двигуна до коліс та інші. За механічної обробки до збурювальних впливів можна віднести: коливання розміру і твердості заготовок в межах партії, коливання напруги в електричній мережі та інші. Внаслідок впливу цих факторів неможливо отримати однакові розміри у всіх деталях партії, що обробляється.

Більша частка ТС тією чи іншою мірою є стахостичними, тобто мають вектор збурювальних впливів. На практиці прагнуть зменшити вплив випадкових факторів на роботу ТС. Теорією автоматичного керування передбачається метод управління за збурювальною дією, коли вводиться контроль збурювального фактора і на підставі цього змінюється управляючий вплив. Наприклад, при механічній обробці можна контролювати розмір кожної заготовки і вводити корекцію в положення різального інструменту відносно оброблювальної поверхні.

При дії на систему змінних, управляючих і збурювальних впливів, а також внаслідок процесів, що

відбуваються в самій системі, змінюються її параметри стану, які визначаються векторами $Z(t)=(z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t))$. Так, у процесі абразивної обробки спостерігають не тільки низькочастотні і високочастотні зміни просторового розташування інструменту, заготовки і виконавчих механізмів верстата, але і параметрів стану оброблювальної поверхні, робочої поверхні інструменту. Наприклад, при шліфуванні різних надтвердих матеріалів алмазними кругами на металевій зв'язці висота виступання алмазних зерен над рівнем зв'язки h змінюється за експоненціальним законом:

$$h = h_{\text{вих}} e^{-\beta t},$$

де $h_{\text{вих}}$ - висота зерен над зв'язкою після правки круга;
 β - коефіцієнт інтенсивності зміни робочої висоти зерен;
 t - термін шліфування.

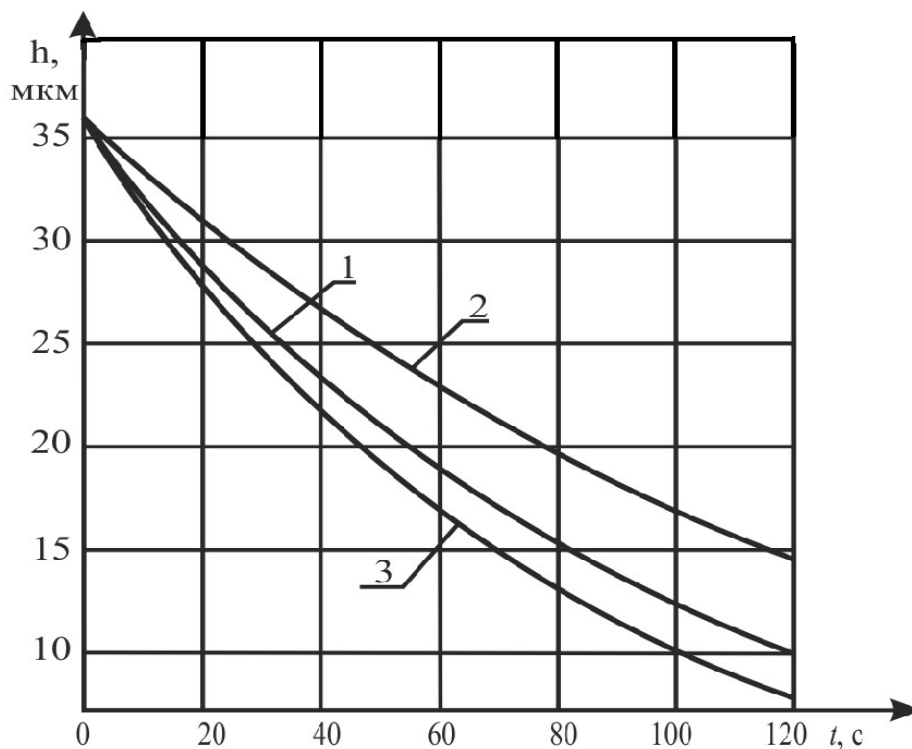


Рисунок 1.8 – Залежності зміни виступання алмазних зерен від терміну шліфування

На рис. 1.8 наводяться криві зміни висоти виступання зерен при шліфуванні ельбора-Р (крива 1), гексаніта-Р (крива 2) і діамета (крива 3).

При часі шліфування 60 секунд виступання зерен зменшується в 1,6...2,1 рази, відповідно змінюється і інтенсивність знімання матеріалу (вихідна зміна процесу).

У навколишнє середовище (оточення) від системи надходять вихідні змінні вектор $Y(t)=(y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))$. До вихідних змінних, наприклад, при експлуатації автомобіля відносять: координати його просторового розташування, техніко-економічні показники роботи, викиди відпрацьованих газів тощо. Для операції обробки заготовок – це параметри отримання деталі, техніко-економічні показники процесу обробки, для виробу – усі параметри, що передбачені технічними вимогами, собівартість його виготовлення, надійність, відповідність вимог експлуатації і деякі інші параметри.

При ієрархічному описі ТС її можна подати у вигляді сукупності підсистем (рис. 1.9), кожна з яких може мати повний набір усіх змінних і впливів.

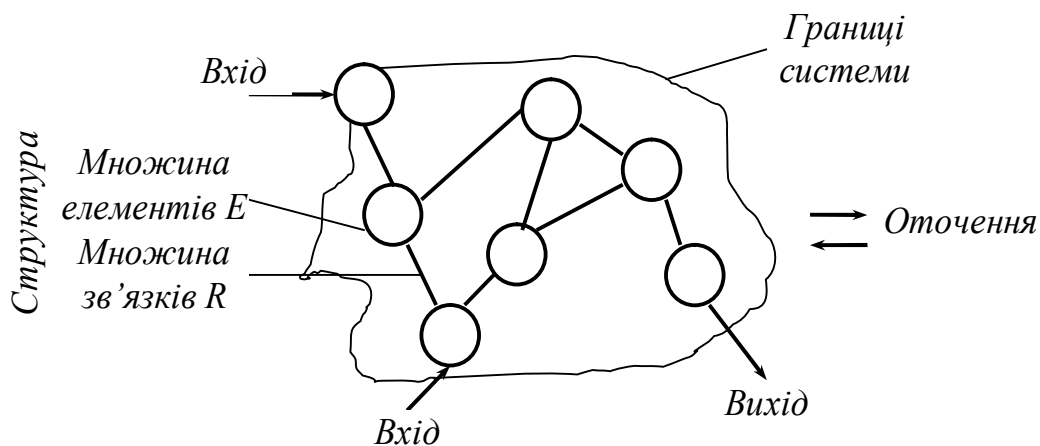


Рисунок 1.9 – Модель системи

На рис. 1.10 подається технологічний процес як система, що має n операцій (підсистем). На першу операцію з оточення поступають заготовки. Параметри заготовки (габаритні розміри, маса, властивості матеріалу, розміри оброблюваних поверхонь) є для операції вхідними змінними. Для обробки налагоджування операції виконується робітником або наладчиком. Параметри настроювання також відносять до вектору вхідних змінних. При виконанні операції на верстат подається електроенергія, мастильно-охолоджувальна рідина (МОР) з централізованої системи підприємства, стиснуте повітря тощо. Все це також вхідні

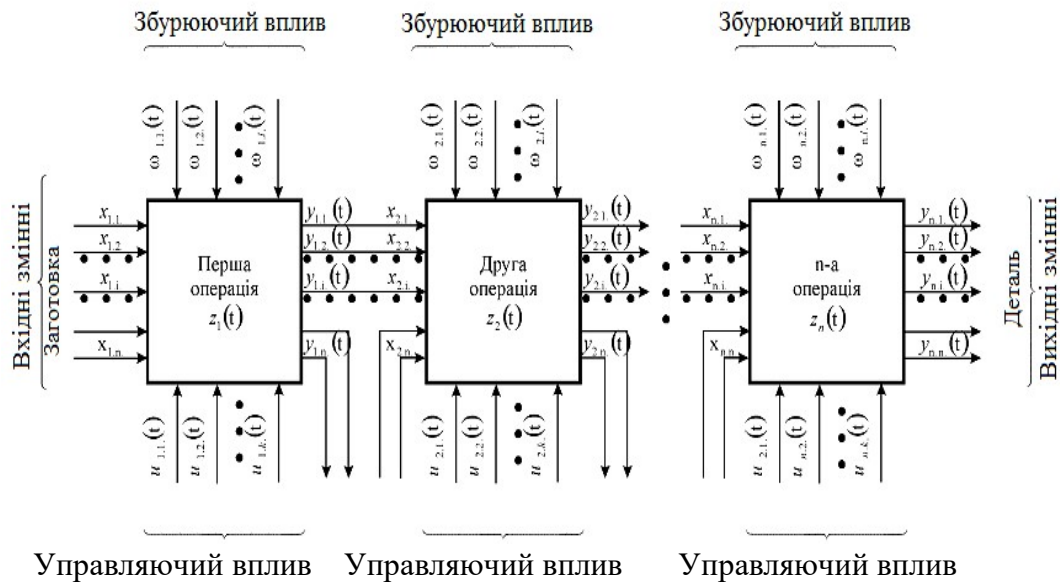


Рисунок 1.10 –Технологічний процес у вигляді системи

змінні. Крім того, до вихідних змінних можуть бути віднесені параметри встановленого інструменту, проте частіше їх розглядають як параметри початкового стану підсистеми – інструмент. Основними вихідними змінними першої операції є: розміри, відхилення форми обробленої поверхні, її шорсткість, фізико-механічні властивості поверхневого шару; витрати електроенергії, МОР, інших матеріалів; зношення інструменту, деталей верстата, відходи виробництва; витрати на заробітну плату робітника, наладчика, утримання будівлі та обладнання, накладні витрати та ряд інших параметрів. Операція може також мати вектор управляючих впливів. Параметри заготовки (об'єкта виробництва) після першої операції є вихідними змінними і виступають в ролі вхідних змінних для другої технологічної операції. Крім того, вона має власні вектори вхідних змінних, вихідних змінних, управляючого та збурюючого впливу. Параметри об'єкта виробництва (заготовки) об'єднують технологічний процес в єдину структуру, на виході якого отримують готову деталь. Операції технологічного процесу об'єднані також організаційно.

1.4. Типи систем і задач

Згідно з різними критеріями можна встановити велику кількість систем, класифікуючи їх:

а) за місцем системи в ієрархії: надсистема, система, підсистема (рис. 1.3);

б) за зв'язками з оточенням: відкриті (з певним довкіллям, тобто принаймні з одним входом або виходом); закриті або замкнуті (без зв'язку з довкіллям);

в) за характером функціонування: детерміновані (залежно від стану системи можна однозначно судити про її функціонування); стохастичні (можна тільки висловити припущення стосовно різних можливих варіантів функціонування);

г) за зміною стану: динамічні (стан змінюється в часі); статичні (стан не змінюється в часі);

д) за типом елементів (в розумінні їх конкретності): конкретні (елементами є реальні об'єкти); абстрактні (елементами є нереальні об'єкти);

е) за походженням системи (рис. 1.1): природні (створені природою); виготовлені (створені людьми);

ж) за видом елементів: системи типу "об'єкт" (елементами є речі, наприклад, двигун, машина, патрон); системи типу "процес" (елементами є операції, наприклад, виготовлення, фільтрація, перегонка, різання, шліфування);

з) за характером залежності виходів: комбінаторні (вихід залежить тільки від входу); секвентивні (вихід залежить не лише від входу);

і) за рівнем складності структури.

Найбільш суттєвими з розглянутих для ТС класифікацій є ті, що пов'язані зі зміною стану (г), характером функціонування (в) і рівнем складності (і). Більша частина ТС відноситься до складу динамічних, стан яких змінюється в часі.

Динамічні системи функціонують у просторі і часі. Кожна з них має свою історію розвитку і свій календар, а стан системи в момент часу t залежить від її стану в попередній момент часу. Так, наприклад, просторове розташування виконавчих підсистем верстата (супорта, інструмента, шпинделя) безперервно або періодично змінюється у процесі обробки заготовки, їх положення в

момент часу t_i залежить від швидкості і положення в момент часу t_{i-1} . У деяких випадках для спрощення аналізу динамічна система на заданому проміжку часу може розглядатися як статична. Такі системи прийнято називати квазістатичними. Так, наприклад, при аналізі процесу взаємодії інструмента і заготовки при різанні вважають, що геометрія інструмента протягом обробки однієї заготовки залишається постійною.

За кількістю елементів, що входять до ТС, розрізняють системи: малі ($10 \dots 10^3$ елементів); складні ($10^3 \dots 10^7$ елементів); ультраскладні ($10^7 \dots 10^{30}$ елементів) і суперскладні ($> 10^{30}$ елементів). С.А. Саркісян відносить до складних систем також всі системи, в яких, крім матеріальних потоків, функціонують інформаційні. В теорії ТС переважно розглядаються малі і складні системи. Так, наприклад, свердлильний верстат (кількість деталей верстата в залежності від моделі складає $500 \dots 900$) можна віднести до малих систем, а технологічний процес виготовлення деталі на кількох верстатах з кількістю елементів більше 10^3 – до складних систем.

Стосовно систем розглядають три характерних задачі: аналізу, оптимального керування і синтезу.

Задача аналізу містить: вивчення законів функціонування системи; розробку її математичної моделі, що дозволяє прогнозувати поведінку системи; опис структури системи; вивчення фізичних, хімічних, функціональних властивостей підсистеми і взаємодії підсистеми та елементів.

Задача оптимального керування роботою системи є однією з основних при експлуатації систем. При її розв'язанні встановлюють оптимальні зв'язки системи з оточенням і зв'язки підсистем між собою, а також визначають оптимальні закони управління системою.

Задача синтезу раціональної ТС розв'язується на стадії її створення.

Розуміння цих задач розглянемо на простому прикладі приводу головного руху токарного верстата, який включає: двигун 1, коробку швидкостей 2 з системою їх керування 3, шпіндельний вузол 4 із затиснутою в патроні 5 заготовкою 6 типу фланець (рис. 1.11).

1. Задача аналізу. Відомі: структура системи, варіанти вхідних змінних X (частота обертання двигуна n_D), стан

об'єкта Z (передатне відношення U_K коробки швидкостей, яка налаштована системою керування U). Знайти частоту обертання валів коробки швидкостей n_K , шпинделя $n_{ш}$ (вихід Y) за рівнянням балансу кінематичного ланцюга приводу головного руху:

$$n_K(Z) = n_D(X) \cdot U; \quad n_{ш}(Y) = n_A(X) \cdot U_K.$$

2. Задача оптимального керування. Відомі: структура системи, варіанти змін вхідних змінних X і управляючих впливів U . Необхідно забезпечити автоматичне регулювання приводу головного руху (U) при підрізанні (торцевій обробці) фланця з максимальною продуктивністю при умові, що швидкість різання v залишається постійною при зміні діаметру обробки $d(t)$, тобто $v = \pi d n_{ш} = const$ в будь-який проміжок часу. При початку підрізання $d = d_{max}$ частота $n_{ш} = n_{ш min}$, а в кінці підрізання $d = d_{min}$, частота обертання $n_{ш} = n_{ш max}$ з умови

$$d_{max} \cdot n_{ш min} = d_{min} \cdot n_{ш max} = d n_{ш} = const.$$

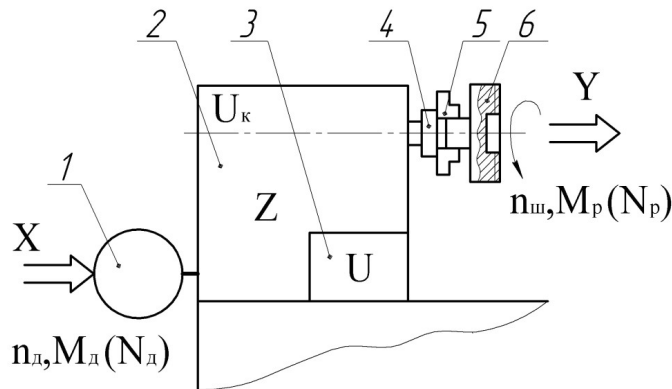


Рисунок 1.11 – Привод головного руху токарного верстату з різними системами керування

Досягнути цього можна різними шляхами. Наприклад, при використанні двигуна з регульованою частотою обертання або варіатора для безступінчастої зміни передатного відношення.

3. Задача синтезу. Відомі: варіанти вхідних змінних X (наприклад, номенклатура електродвигунів, що випускаються, з частотою обертання n_D), можливі варіанти управління і вихід Y (частота обертання шпинделя $n_{ш}$).

Спроекувати коробку швидкостей (стан Z) при обраній системі керування нею. Виконується кінематичний синтез, який забезпечує необхідне передатне відношення

$$U_K = \frac{n_{III}(Y)}{n_D(X)}.$$

Такі ж задачі розв'язуються, коли мова йде про силові (M_D, M_P), енергетичні (N_D, N_P), динамічні та інші характеристики ТС у стадії їх проектування, модернізації і експлуатації.

Задачі синтезу можна проілюструвати на прикладі мотор-шпинделів (М-Ш) та підсистем шпинделя з електроприводами, які розвинуті до патентноспроможного рішення і захищені патентами України на винаходи №№ 116050; 120169; 126641.

Наприклад, створений новий клас ЕМ-об'єктів: багатошпиндельних вузлів при одному статорі, реалізація яких можлива з мінімальними витратами з М-Ш, що виробляються різними фірмами. Запропоновані морфологічні моделі дозволяють систематизувати досить великий обсяг знань про морфологію в компактному вигляді, дають можливість формалізувати процес упорядкування множини варіантів, розміщених у моделі. Якість морфологічної моделі, яка є початковим етапом морфологічних досліджень, багато в чому визначає остаточний результат пошуку рішення проблеми при синтезі. Розробка морфологічних моделей є початковим етапом морфологічних досліджень – морфологічним аналізом, метою якого є класифікації досліджуваного об'єкта або множини об'єктів.

Електромеханічні системи (ЕМ – системи) типу М-Ш, що почали широко використовуватися у виробництві, можуть бути несамодіючі, тобто мають тільки оберти n , а для поступального руху використовуються додаткові неспіввісні приводи подач. Останнім часом з'явилися самодіючі М-Ш, що можуть реалізувати як обертовий, так і поступальний рух, і становлять різноманітність видів, що розвиваються. Такі самодіючі М-Ш доцільно застосовувати у металообробних комплексах, токарних, фрезерних, свердлильних, шліфувальних, багатоцільових та ін. верстатах. З подальшим розвитком техніки у верстатобудівній галузі з'являться інтелектуальні (розумні) М-Ш типу Smart Spindle.

Питання для самоконтролю знань

1. Сформулювати поняття системи.
2. У чому суть системного підходу?
3. Чи можливо розглядати верстат, автомобіль, прес, мобільний телефон, комп'ютер як технічні системи?
4. Чим відрізняється динамічна система від статичної?
5. Чи можливо розглядати ділянку, цех, машинобудівне підприємство як систему?
6. Назвіть вхідні змінні і параметри стану операції фрезерування при аналізі її як системи.
7. У чому суть принципу ієрархії для систем?
8. Що є управляючим впливом для верстатів з ЧПК?
9. Які з перерахованих параметрів можна віднести до збурюючого впливу: параметри налагодження верстата, відхилення геометричних параметрів заготовки, коливання температури середовища, відхилення напруги електричного струму?
10. Назвіть основні задачі, які розв'язуються в теорії технічних систем.
11. Що таке мотор-шпиндель?
12. Чим відрізняється самодіючий мотор-шпиндель від несамодіючого?

2. СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕНЬ

2.1. Системи виду "процес"

Термін "процес", на якому зупинимося більш детально, означає, що щось здійснюється, відбувається, тобто змінюється в часі. Поруч з природними процесами людина організує штучні процеси з метою здійснення необхідних або бажаних для неї змін. Вони слугують задоволенню людських потреб. Хоча людина і підкоряється законам природи, все ж вона може прискорити, підсилити або покращити деякі природні процеси або їх властивості. Цілеспрямована зміна певних об'єктів має для людей життєву важливість. Штучні процеси, в котрих ті чи інші властивості об'єкта дії (операнда) отримують відповідні зміни за участю людей і технічних засобів, внаслідок чого досягається бажаний стан операнда, будемо називати перетворенням (рис. 2.1).

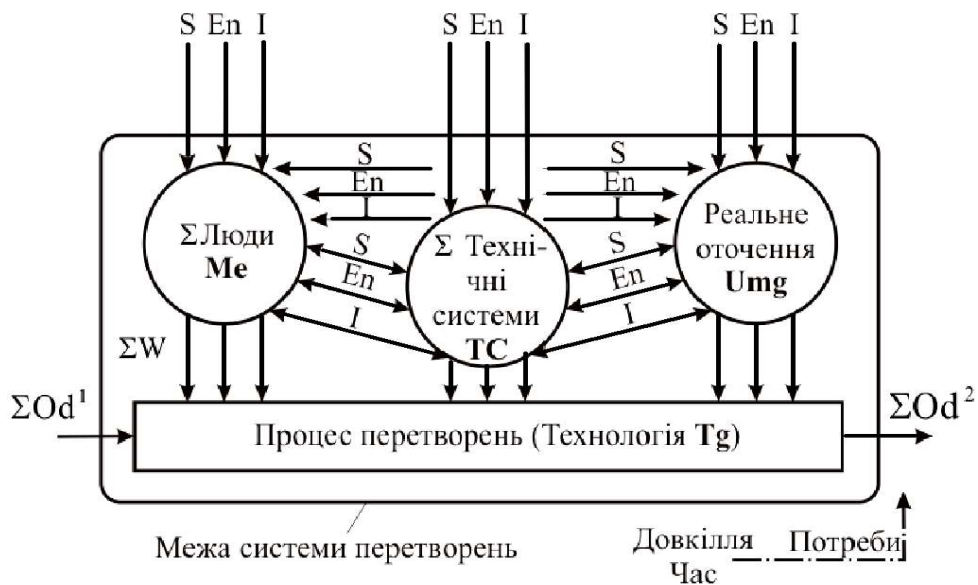


Рисунок 2.1 – Модель системи перетворень

Термін "операнд" (Od) обраний як загальна назва усіх предметів, систем і станів, що підлягають цілеспрямованому перетворенню. Як правило, операнд у конкретній теорії ТС розглядається як частина (підсистема, елемент) системи. Перетворення є наслідком певних дій, заснованих на фізичних, хімічних або біологічних явищах і їх описують деякою інструкцією, рецептом, алгоритмом, технологією. До

наук, що досліджують перетворення в будь-якій певній галузі, відносяться, наприклад, термодинаміка, технологія виробництва, тощо.

Дії на операнд виконуються операторами, якими можуть виступати інші підсистеми й елементи. Ці дії є їх вихідними змінними $\sum W$.

У ТС процеси перетворення, як правило, завжди нерозривно пов'язані з об'єктом. Об'єкти (верстат, доменна піч, машина, піднімальний кран тощо) створюються спеціально для здійснення певного процесу.

Наприклад, при електрохімічному нанесенні покриттів процес передбачає розчин металу на аноді, пересування катіонів, їх нейтралізацію і осідання на катоді (рис. 2.2).

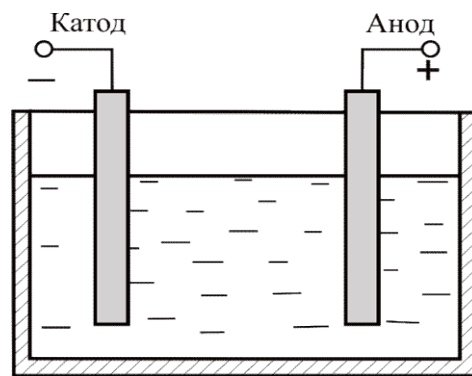


Рисунок 2.2 – Схема гальванічного процесу

Однак цей процес не може бути здійснений без спеціального устаткування, до складу якого входять ванна, устаткування подачі і регенерації електроліту, система електрозабезпечення, система керування. Крім того, необхідно враховувати і той факт, що в процесі функціонування змінюються не тільки параметри стану операнда, але й параметри об'єкта. Так, наприклад, при обробці матеріалу різанням змінюються геометричні параметри інструменту, при роботі двигуна – його температурний режим, з'являється в процесі експлуатації зношення деталей, при роботі електронних систем змінюються під дією теплових потоків опори провідників та інших елементів. Без урахування змін параметрів об'єкта часто буває неможливою кількісна оцінка закономірностей роботи системи.

2.2. Модель системи перетворень

Процес перетворення є дуже складним процесом. Він складається з великої кількості етапів, підетапів, підпроцесів і операцій. Наприклад, при виробництві різних виробів він містить в собі: видобуток корисних копалин (наприклад, руди), первинну переробку сировини (збагачення), виробництво напівфабрикатів (чавуну, сталі), виготовлення заготовок (литво, штампування), обробку заготовок (механічна, термічна, електрохімічна), складання і випробування виробів. На кожному з цих етапів у перетворенні можуть брати участь люди і ТС.

Великий вплив на процес перетворення справляє "середовище" (реальне оточення), рис. 2.3. З розглянутого прикладу випливає, що основою для побудови моделі системи перетворень (рис. 2.3) є: бажані перетворення операнда (об'єкта перетворення), що досягаються цілеспрямованими впливами матеріального (S), енергетичного (En) або інформаційного (I) типів.

Ці три типи впливів за будь-якого перетворення здійснюються людьми (ΣMe), технічними системами (ΣTS) і оточенням (Umg) (див. рис. 2.1).

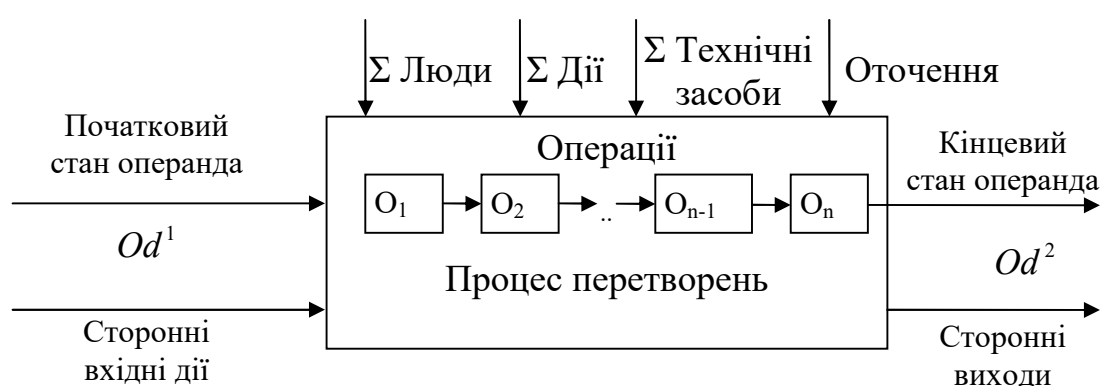


Рисунок 2.3 – Модель процесу перетворень

Приклади систем перетворень наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Приклади систем перетворень

Перетворення	Технологія	Дії	Участь операторів у дії		
			Люди ΣMe	Техн. системи ΣTS	Оточення Umg
Сталева деталь м'яка → тверда	Гартування	Розігрів (у термопечі) Охолодження (у масляній ванні)	Робітники (виймання з печі, операція гартування)	Термічна піч, ванна з маслом	Електричний струм ← тепло →
Матеріали → верстат	Конструювання і виробництво	Ескізне проектування Розрахунки Робоче проектування Вибір технології Комплектація обладнання Матеріальне постачання Виготовлення деталей Складання Випробування Регулювання	Конструктор, рахівник, технолог, постачальник, складальник, дослідник, випробувач, контролер, адміністратор, програміст	Довідники, технічні проспекти, канцелярські приладдя, ЕОМ, верстати, інструменти, технологічне оснащення, вимірвальні інструменти, преси, системи контролю	Цех (освітлення, опалення, вентиляція, водопровід, каналізація і т. п.)

Інтерпретація моделі перетворень дозволяє зробити такі висновки:

1. Для задоволення потреб людей або вибирається необхідний об'єкт, або задається потрібний стан операнда. Цей стан (Od^2) є метою перетворення.

2. Операндами перетворень можуть бути живі істоти, зокрема люди, а також матеріальні, енергетичні та інформаційні об'єкти.

3. Вибирають відповідний початковий стан операнда Od^1 як вхідну величину. Стан Od^2 може бути досягнутий з декількох початкових станів Od^1 .

4. Зміна $Od^1 \rightarrow Od^2$ називається перетворенням.

5. Перетворення виникає або з незадовільного стану Od^1 або потребою в Od^2 .

6. Перетворення виконується на підставі деякої технології, яка представляє собою упорядковану сукупність цілеспрямованих часткових змін. Стан операнда Od^2 може бути досягнутий різними методами (технологіями).

Між процесом дії і процесом перетворення існує причинний зв'язок, а саме - зміни операнда у процесі перетворень (ΣE) викликаються діями (ΣW) ТС як причини. З іншого боку, ця причина (дія системи) є наслідком ланцюжка дій в системі, ініційованих вхідними впливами на систему.

Обробка речовини, енергії або сигналів передбачає виконання за допомогою технічних об'єктів деякої чітко визначеної послідовності операцій. У зв'язку з цим технологією будемо називати спосіб, метод або програму перетворення речовини, енергії або інформаційних сигналів із заданого початкового стану у заданий кінцевий стан за допомогою певних технічних об'єктів.

Різноманітність технологій така ж велика, як і різноманітність технічних об'єктів, і завдяки інженерному творенню продовжує швидко підвищуватись. Наприклад, існують різні технології виготовлення болтів і гайок, переробки руди тощо.

Останнім часом великого значення набули так звані інформаційні технології, де додатковим інструментом перетворень є моделювання, наприклад, моделювання процесу на ЕОМ за допомогою математичних моделей.

2.3. Види потоків у системах

Функції системи реалізуються через потоки енергії, людей, матеріальні та інформаційні. Потік (зв'язок) – це важливий з точки зору розгляду системи обмін речовиною, енергією, інформацією між елементами та зовнішнім середовищем (оточенням) й елементами системи.

Структура системи визначається певними потоками з деякою затримкою в часі, необхідному для перетворень, у певних випадках потребує регулювання та реагування у вигляді зворотних зв'язків. Під впливом потоків структура системи може змінюватися. Потоки, які є необхідними для збереження первісної структури, називаються підтримувальними, а ті, що є результатом дії системи та її структури – потоками продукції.

Організаційна структура системи накладає обмеження на комунікаційні потоки, що в ієрархічній системі можуть бути закріплені за певними “каналами”, межі яких не визначені у чітких фізичних термінах, однак їх вплив може бути дуже реальним. У кожній структурі існує певна ієрархія потоків (між елементами, підсистемами, системою та зовнішнім середовищем).

Особливе значення в системах мають інформаційні потоки (особливо у складних штучних системах), бо в багатьох випадках вони є домінуючими, визначальними і супроводжують інші потоки – матеріальні, енергетичні та людські, дії яких фіксуються у вигляді інформації.

Інформація в системі вивчається з різних точок зору: отримання, зберігання, передачі, перетворення, фільтрації і вимірювання.

Інформаційні моделі системи використовують для аналізу і мінімізації потоків даних та зменшення їх об'єму, виявлення як дублювання інформації, так і дублювання шляхів її передавання тощо.

Поняття інформації має високий ступінь універсальності, бо функціонування - це перетворення вхідної інформації у вихідну шляхом прийняття певних рішень в системі.

Потужність речовинних і енергетичних зв'язків оцінюється порівняно просто за інтенсивністю потоку речовини або енергії.

Стан системи – це зафіксовані значення характеристик системи, важливі для цілей дослідження. Зміна довільної

серед цих характеристик означатиме перехід системи до іншого стану. Набір станів ще не є процесом.

Процес – це набір станів системи, який відповідає впорядкованій неперервній або дискретній зміні деякого параметру, що визначає характеристики чи властивості системи. Процес зміни станів системи в часі відображає динаміку системи.

Не маючи конкретної системи, можна через потоки їх розрізняти і далі реалізовувати, починаючи з формулювання основної функції і пошуку ідеї її реалізації.

Наприклад, затискні механізми можна розрізняти за напрямком силових (енергетичних) потоків, силових контурів, напрямком дії сили затиску, що наведено на рис. 2.4, де позначено: p – тиск в гідроциліндрі затиску; S – сумарна осьова сила затиску в приводі (або вході затискного патрону); T – сумарна радіальна сила затиску на вході затискного патрону; T_1, T_2, T_3 – радіальна сила затиску кожним затискним елементом (губкою трипелюсткової цанги або кулачком трикулачкового патрону); M – електродвигун; $M_{кр}$ – крутний момент на вході гвинтової передачі.

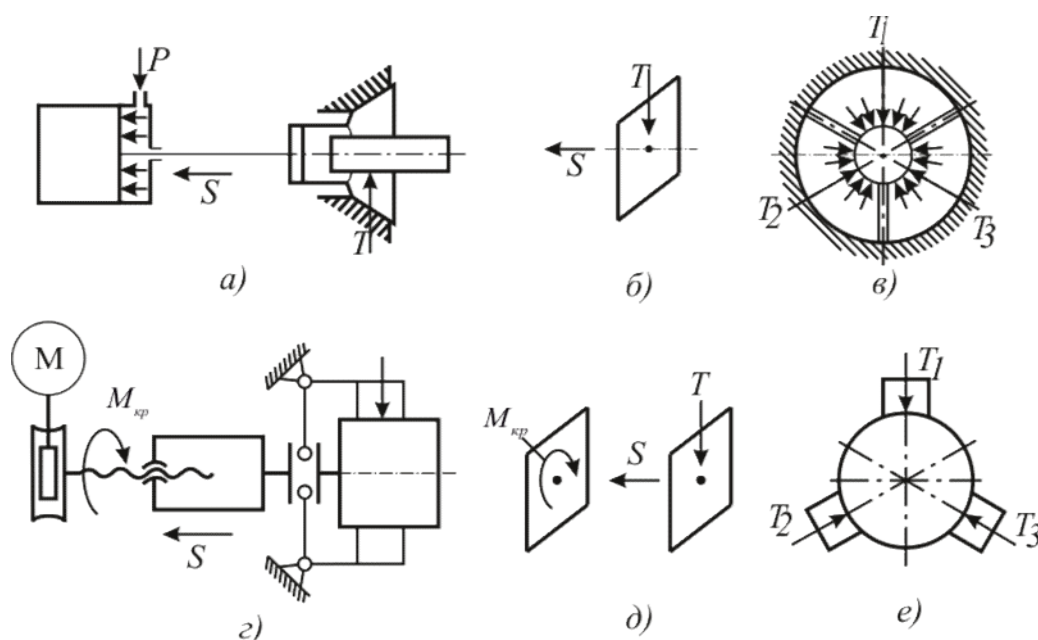


Рисунок 2.4 – Затискні механізми: (а) – з гідравлічним приводом, його силовий потік (б), замкнений закритий силовий контур цангового патрону (в); (г–з) електромеханічним приводом, його силовий потік (д), замкнений відкритий силовий контур важільно-кулачкового патрону (е)

Питання для самоконтролю знань

1. Чим відрізняються системи виду "об'єкт" і "процес"?
2. Чи завжди "процес" пов'язаний з "об'єктом"?
3. Що таке "операнд"?
4. Чи можливо "операнд" розглядати як частину (елемент) ТС?
5. Які види впливу на "операнд" можна виділити при аналізі процесу перетворення?
6. В чому полягає процес при штамповці заготовки?
7. Назвіть основні етапи перетворення сировини у виріб на машинобудівному підприємстві.
8. Визначить роль людей, ТС, енергії, інформаційного забезпечення при виробництві виробів із сировини.
9. Які види потоків існують в системах?
10. Наведіть приклад затискного механізму з іншим силовим потоком, силовим контуром затискного патрону, іншим напрямком дії сили затиску.

3. ТЕХНІЧНИЙ ПРОЦЕС

3.1. Визначення і модель технічного процесу

Модель технічного процесу (ТП) будується на відношеннях у системі перетворень (рис. 3.1, табл. 3.1). Узагальнений ТП визначає перетворення операнда без точної вказівки того, "чим", "хто", "коли" і "де" його виконують.

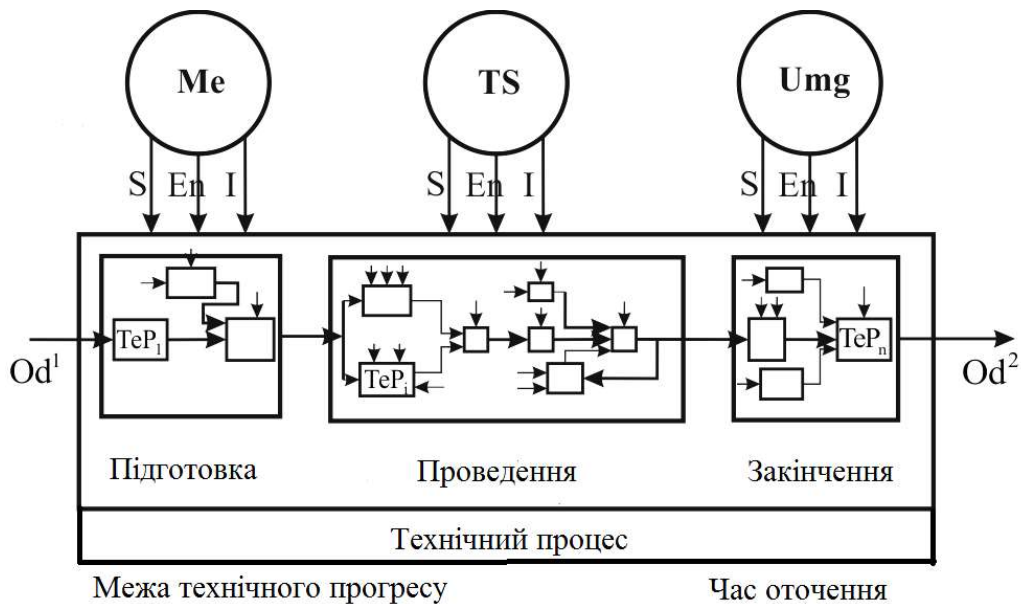


Рисунок 3.1 – Структура моделі технічного процесу

Опис будь-якого ТП повинен містити відповіді на такі запитання:

а) що є операндом і які його стани (початковий, кінцевий і проміжний)?

б) за допомогою яких перетворень (технології) досягається сукупне перетворення $Od^1 \rightarrow Od^2$ в межах наявних умов - природних явищ, суспільних законів та інших обмежень?

в) якими діями (матеріальними, енергетичними, інформаційними) можуть бути реалізовані часткові перетворення (хоча б приблизно)?

г) якими операторами виконуються окремі дії?

Приклади, наведені в табл. 3.1, містять відповіді на поставлені запитання. В кожному конкретному випадку інформація вводиться безпосередньо в графічне зображення ТП, де зв'язки стають більш виразними.

Вважаючи, що бажаний стан є виходом (результатом) ТП, для цього процесу треба визначити такі показники, які є його характерними ознаками: кінцевий стан операнда; технологічний принцип; типи і послідовність операцій (дій), які відповідають обраній технології; результат кожної операції; розподіл за операціями результатів, який відповідає постановці задачі і необхідному кінцевому результату.

Застосування моделі ТП доцільно тільки у тих випадках, коли в перетвореннях можуть брати участь люди, а ТС, яка використовується, має характер "машини", тобто дозволяє досягнути потрібного результату без участі інших ТС. На рис. 3.2 подано приклад графічного зображення технічних процесів функціонування на прикладі заміни шарикопідшипника.

Таблиця 3.1 – Приклади моделі технічного процесу

Операнд		Спосіб перетворення		Дії		
Вид	Стан		Технологічний принцип TgPz Підпроцес TeP	над матеріалами, енергією і інформацією		
	Вхідний	Вихідний		↓ S	↓ En	↓ I
Сталь Ст50	Заготовка	Деталь	TgPzi: обточування TeP ₁ : встановити і затиснути заготовку TeP ₂ : включити оберти TeP ₃ : перемістити різець відносно заготовки зі зняттям стружки TeP ₄ : виміряти TeP ₅ : звільнити, деталь покласти в контейнер готової продукції	ТС ТС ТС ТС ТС	Me ТС ТС Me ТС	Me Me Me Me+ ТС Me

У математичній формі стан операнда записується так:

$$Od^1 = \begin{bmatrix} E_1^1 \\ E_2^1 \\ \vdots \\ E_n^1 \end{bmatrix}; \quad Od^2 = \begin{bmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ \vdots \\ E_n^2 \end{bmatrix}$$

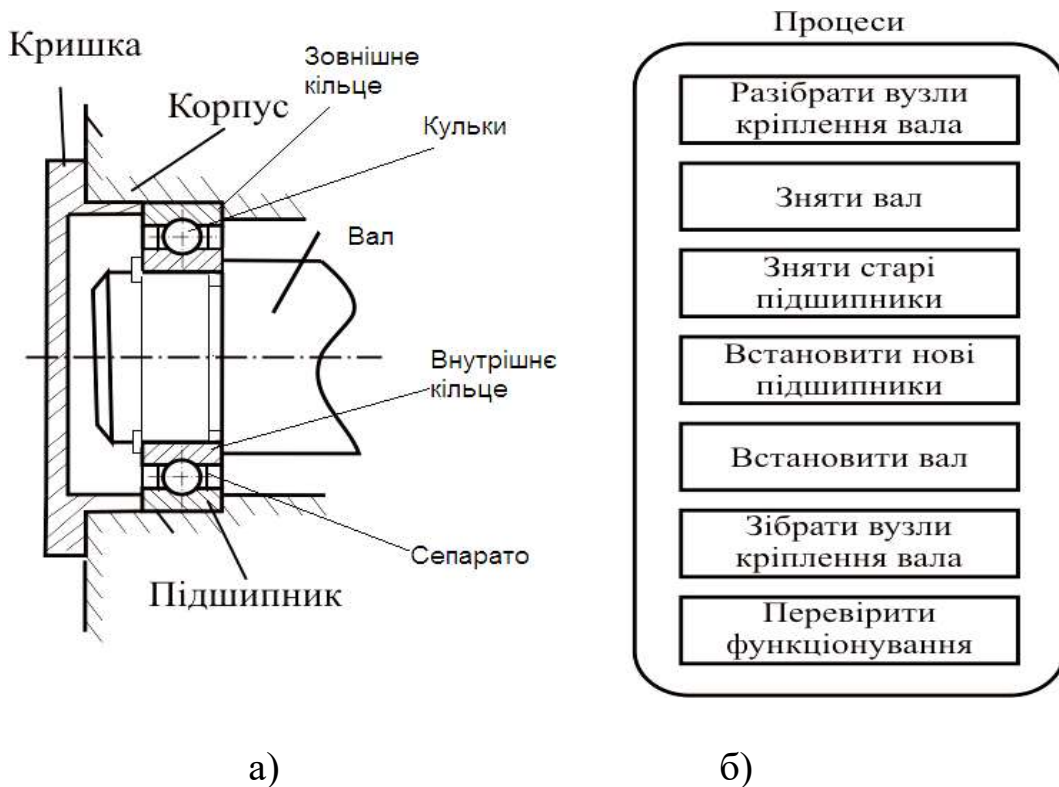


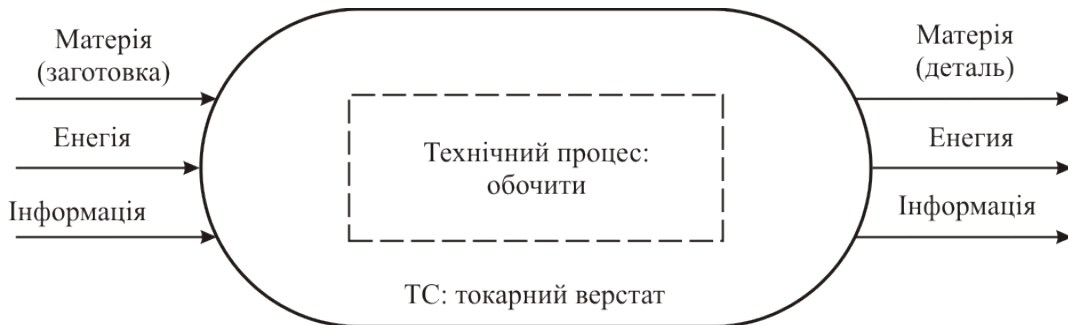
Рисунок 3.2 – Технічний процес у ТС при зміні шарикопідшипника: а – конструктивна схема; б – послідовність скадання-розкладання

3.2. Структура й операції технічного процесу

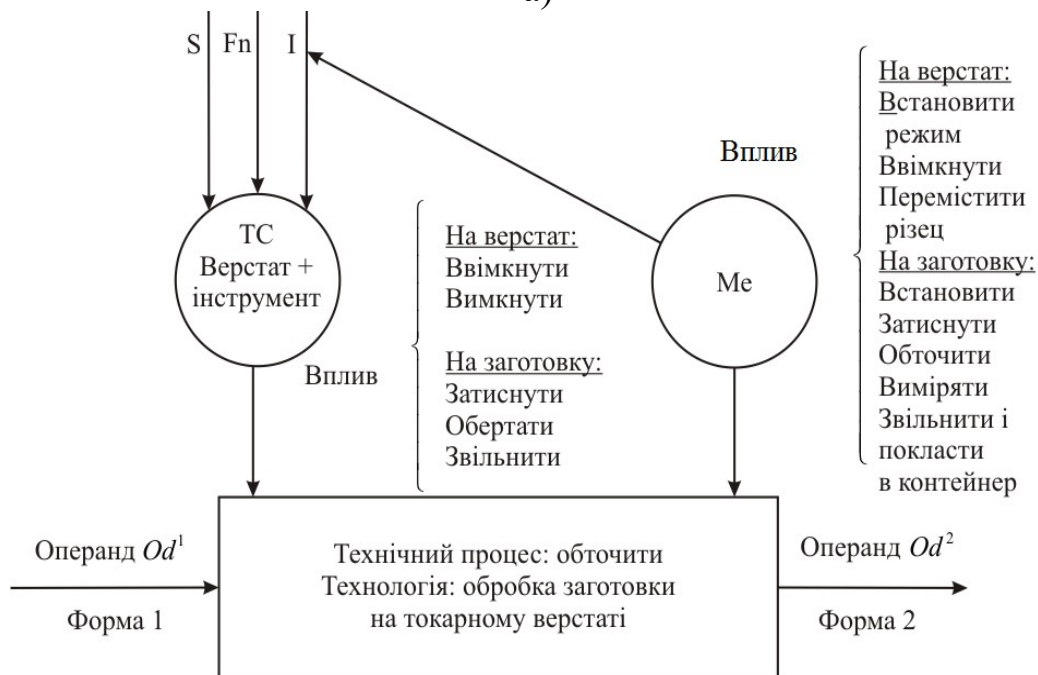
Операцією називають елементарний процес, який відповідає одній робочій дії. Структура ТП залежить в першу чергу від технології, яка може вдосконалюватися у часі згідно з прогресом знань і складається з окремих операцій у певній послідовності.

Розрізняють операції: робочі (за яких для досягнення бажаної зміни властивостей операнду, наприклад, заготовка -

деталь (рис. 3.3), використовують ті чи інші фізичні закони і явища); обслуговування (змащування, усунення стружки, охолодження, ...); підготовчі (затиск деталі, підведення супорта, ...); керування та регулювання (вимірювання, наладка верстата, зміна робочого режиму, ...); погодження (складання, ув'язка частин проекту, ...). Показники ТП наведені в табл. 3.2.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Приклад побудови моделі процесу перетворень (заготовка-деталь): а - заготовка є входом ТС; б - заготовка обробляється в ТП за рахунок впливів токарного верстата і токаря

Таблиця 3.2 – Показники технічного процесу

Показники	Технічні	Економічні	Планові
Операнд Вхід Вихід	Матеріал, розміри, форма, стан поверхні, тиск, температура та інше	Ціна Витрати	Кількість Термін (строк) Постачаль- ник
Технологія	Специфікація операцій Послідовність операцій	Витрати	Час роботи Оператор Робоче місце
Оператор- робітник	Спеціальні знання. Досвід. Особисті якості	Заробітна плата	Години роботи Кількість робітників
Технічна система	Функціональні Експлуатаційні Естетичні Ергономічні Маніпуляційні властивості тощо	Ціна Експлуатаційні витрати	Час постачання Кількість Постачальник
Спеціальна інформація	Перелік типів інформації Джерела інформації	Витрати	Термін (строк) Робітник Робоче місце
Умови оточення	Фізичні: розташування, потреба в просторі, температура, вологість, освітлення, шум	Витрати	Термін (строк) Оператор Робоче місце
	Психологічні: робоча обстановка	Продуктив- ність праці	
	Соціальні: суспільні умови	Економічна ситуація	

3.3. Класифікація та опис технічного процесу

ТП можна класифікувати за різними ознаками (показниками) (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Класифікація технічних процесів

Показники	Класи процесів
Операнд	Процеси переробки матерії. Процеси переробки енергії. Процеси переробки інформації. Процеси, які пов'язані з біологічними об'єктами
Явища, на котрих базуються робочі дії	Фізичні. Механічні. Електричні. Теплові. Хімічні. Біологічні. Комбіновані
Робоча дія	Транспортування. Сортування. Подрібнення. Обробка. Складання
Спосіб робочої дії	Ручна праця. Використання сили тварин. Механізований процес
Спосіб керування і регулювання	З участю людини. Автоматизований процес
Складність процесів	Операції. Підпроцеси.. Складні процеси
Співвідношення між входом і виходом	Об'єднання: кількість входів більша кількості виходів. Розподілення: кількість входів менша кількості виходів
Характер протікання перетворення	Безперервний процес. Дискретний (перервний) процес. Детермінований процес. Випадковий процес.


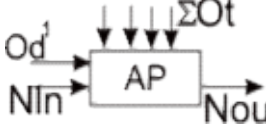

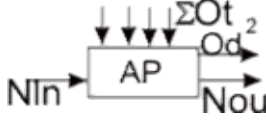
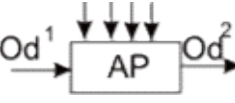
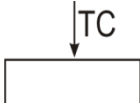
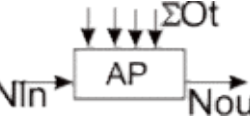
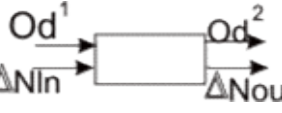
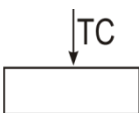
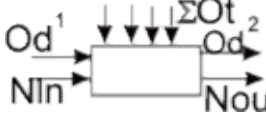
Об'єднавши типи операндів зі способами зміни, перетворювання структури, форми, просторових (транспортування) і часових (зберігання) координат, маємо основні види ТП (табл. 3.4). В табл. 3.4 прийняті такі позначення [75]: Od^1 - початковий стан операнда; Od^2 - необхідний кінцевий стан операнда; NIn - побічні входи; ΔNou - побічні виходи; $\sum Ot$ - оператори; AP - робочий процес; TS - технічна система; MS - машина система; ΔNIn - розподілення (відхилення) побічних входів; ΔNou - розподілення (відхилення) побічних виходів; ΔTS - відхилення параметрів ТС; ΔAP - відхилення параметрів робочого процесу; ΔMS - відхилення параметрів машинної системи.

Можуть бути використані такі способи опису (зображення) технічних процесів:

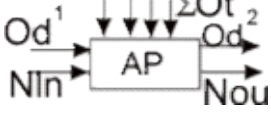
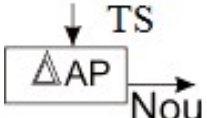
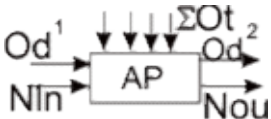
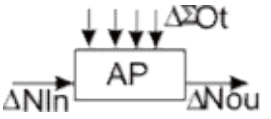
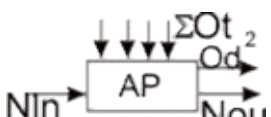
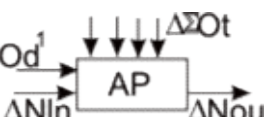
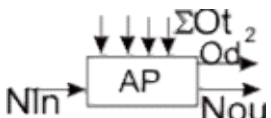
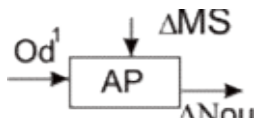
- а) блок-схеми (прямокутники з текстом або рисунком);
- б) граф (ребра - процеси, вузли - стани операндів);
- в) часова діаграма;

- г) математичний опис; д) словесний опис;
- є) спеціальний опис (зображення) (наприклад, опис на мові Ляпунова або завдяки символам, наприклад, Ø90 H7 - виконати діаметр 90 з допуском H7).

Таблиця 3.4 – Типові інженерні задачі в галузі технічних процесів

Ситуація	Дано	Знайти	Діяльність
1	2	3	4
Для задоволення потреб потрібний новий продукт			Процес проектування при заданому виході
Для наявного матеріалу шукають застосування			Процес проектування при заданому виході
Для заданих операндів робочого процесу і всіх операторів шукають ТС			Створення (придбання) ТС
Для існуючого виробництва з комплектом обладнання шукають робота (операнд)			Робота на замовлення
Для розробленої ТС шукають можливості застосування			Нове застосування існуючої ТС

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4
Побічний вихід існуючого застосування шкідливий			Розробка системи ліквідації побічного виходу (Nou)
Необхідно підвищити економічну ефективність виробництва			Раціоналізація технічного процесу
Наявне виробництво повинно бути перебудоване на нову програму			Підготовка серійного виробництва
На наявному виробництві повинен бути виготовлений новий об'єкт (в єдиному примірнику)			Підготовка одиничного виробництва

Питання для самоконтролю знань

1. Назвіть основні елементи структури технічного процесу.
2. Що повинно міститися в описі ТС?
3. Які способи перетворення застосовують під час механічної обробки заготовок на токарному або фрезерному верстатах?
4. Наведіть приклади операцій технічного процесу.
5. Назвіть основні показники технічного процесу.
6. Наведіть 2-3 приклади типових інженерних задач в галузі технічних процесів.

4. ВЛАСТИВОСТІ ТА АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1. Категорії властивостей ТС

Властивість слід детермінувати як ознаку ТС. Ознакою може служити, наприклад, здатність поводити себе певним чином або відповідати певній вимозі. Через ті чи інші властивості дається характеристика ТС. При цьому для об'єктивного аналізу важливо, щоб оцінювані властивості і критерії оцінки могли бути визначені кількісно.

Найважливіше, що характеризує ТС, - це присутність у неї бажаних властивостей, бо ТС є лише носієм необхідної робочої функції і відповідно передбачуваної поведінки. На етапі постановки задачі чи замовлення ТС бажані властивості ТС називають вимогами. Щоб відповідати заданим вимогам, ТС повинна не лише виконувати бажану робочу функцію, але і володіти значною мірою певними властивостями. ТС завжди є носієм найрізноманітніших властивостей, але тільки міра цих властивостей (цінність) має вирішальне значення.

Усі властивості ТС можна класифікувати за різними категоріями.

У першу чергу виділяють а) зовнішні та б) внутрішні властивості. При цьому виходять із системного принципу. Зовнішні властивості визначають як відношення системи до її оточення. Внутрішні властивості при цьому виявляються як відношення між елементами системи. Користувача ТС цікавлять більше зовнішні властивості.

За причинним зв'язком властивості класифікують на а) вхідні дії (причина) і б) функції (наслідок). Між вхідними діями і функціями існують причинні відношення. Наприклад, недостатня жорсткість станини токарного верстата є причиною похибки обробки деталей. Послідовність причини і дії в часі проявляється у вигляді процесу.

За функціональною залежністю підрозділяють а) залежно змінні та б) незалежно змінні властивості. Існує, наприклад, залежність між міцністю і температурою матеріалу; швидкістю руху об'єкта і його кінетичною енергією. Всі ці властивості перебувають між собою у функціональній залежності, яка може бути виражена аналітично. Ті властивості, на які здійснюється вплив,

називаються залежними змінними (міцність). Ті властивості, які здійснюють вплив на інші, називаються незалежним змінними (матеріал, форма, габарити). Одні і ті ж властивості в різних ТС можуть виступати як залежні чи незалежні.

За можливістю кількісного визначення властивості ТС класифікують на ті, що а) визначаються легко; б) визначаються важко; в) не визначаються кількісно. Коли неможливо оцінити кількісно властивості, застосовується оцінка на основі системи балів за зростаючими рівнями (класами).

За значимістю властивості класифікують на а) дуже важливі (не замінімі) - функція, безпека; б) важливі - надійність, термін служби, ціна; в) менш важливі - можливість довгого зберігання; г) не суттєві для функціонування - зовнішній вигляд, колір. Очевидною є відносність такої ознаки класифікації, бо значимість певних властивостей ТС дуже залежить від конкретних обставин.

Надзвичайно важливою є класифікація властивостей за фізичною сутністю. Виділяють властивості:

- а) геометричні - габарити, симетрія, форма, міжосьова відстань;
- б) кінематичні - швидкість, прискорення;
- в) механічні - міцність, пружність, прогин;
- г) теплові - нагрів, теплопровідність, теплоізоляція;
- д) електричні і магнітні - ємність, напруга, опір, індуктивність;
- е) оптичні - фокусна відстань, поляризація;
- ж) акустичні - шум, звукова частота;
- з) хімічні - концентрація, корозія, хімічна активність.

Така класифікація наочно демонструє різноманітність ТС і відповідає структурі галузей знань.

Жодної із наведених систем класифікацій властивостей ТС недостатньо для повної характеристики властивостей. У зв'язку з цим, з точки зору методології конструкторської діяльності, побудована класифікація властивостей за потребою в конструкторській роботі (табл. 4.1). Відповідні запитання розкривають сутність наведених категорій, а приклади властивостей полегшують розуміння такої класифікації.

Таблиця 4.1 – Класифікація властивостей ТС за потребою в конструкторській роботі

Категорія	Ключове запитання	Приклади властивостей
Функція. Дія	Які функції системи? Що робить система?	Робоча функція. Допоміжна функція. Підготовча функція. Керування і регулювання. Узгодження
Функціонально зумовлені властивості V_e	Які умови характерні для даної функції?	Продуктивність. Швидкість. Розміри. Маса. Функціональні параметри
Виробничі властивості V_d	Наскільки придатна система для виробничого процесу?	Безпека експлуатації. Надійність Витрати енергії. Ремонтоздатність
Ергономічні властивості E_{rg}	Як обслуговується система і який вплив здійснює на людину?	Зручність обслуговування. Вимоги до оператора
Естетичні властивості A_u	Як система сприймається естетично?	Колір, зручність. Привабливість
Маніпуляційні властивості D_i	Придатна система для транспортування, зберігання?	Відповідає умовам транспортування, зберігання
Характеристики поставок планування L_P	Коли ТС може бути поставлена? В якій кількості виготовляється?	Доступність. Продукція серійного виробництва
Правові норми C_N	Чи відповідає правовим нормам?	Відповідає. Порухення патентного права
Технологічні властивості F_e	Наскільки ТС відповідає прийнятій технології?	Відповідає технології. Відповідає умовам монтажу
Економічні властивості W_e	Наскільки економічним є процес виробництва?	Експлуатаційні видатки. Ціна
Конструктивні властивості K_o	Як реалізуються зовнішні властивості?	Структура. Габарити. Форма. Матеріал. Якість поверхні. Поле допуску. Тип виробництва
Якість виготовлення H_e	Хто і як виготовив ТС?	Переваги і недоліки виготовлення

4.2. Співвідношення між властивостями ТС

Для отримання сукупної оцінки ТС необхідно отримати співвідношення між її властивостями. Загальний алгоритм визначення таких співвідношень зображено на рис. 4.1. Алгоритм передбачає визначення кількісних співвідношень у випадку існування причинного або іншого зв'язку між властивостями.

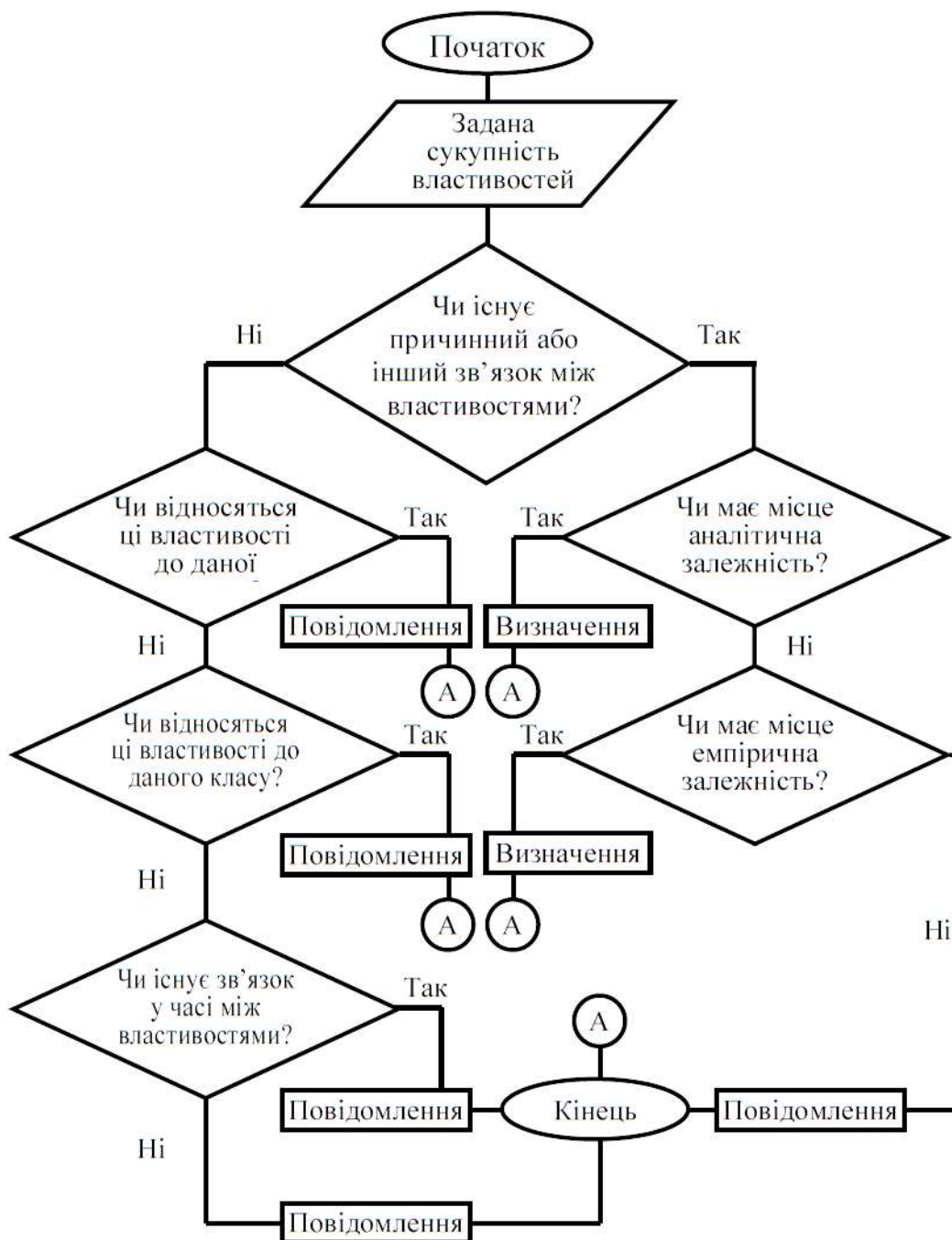


Рисунок 4.1 – Загальний алгоритм визначення співвідношень між властивостями ТС

Якщо ж такого зв'язку не вдається встановити, то здійснюється аналіз належності властивостей до того чи іншого ієрархічного рівня співвідношення властивостей і формується відповідна інформація (повідомлення) для подальшого дослідження.

Дуже складні співвідношення між властивостями можна виразити засобами матричного числення, математичними символами. Важливо оцінити і співвідношення між категоріями властивостей (рис. 4.2). У готового виробу внутрішні елементарні властивості

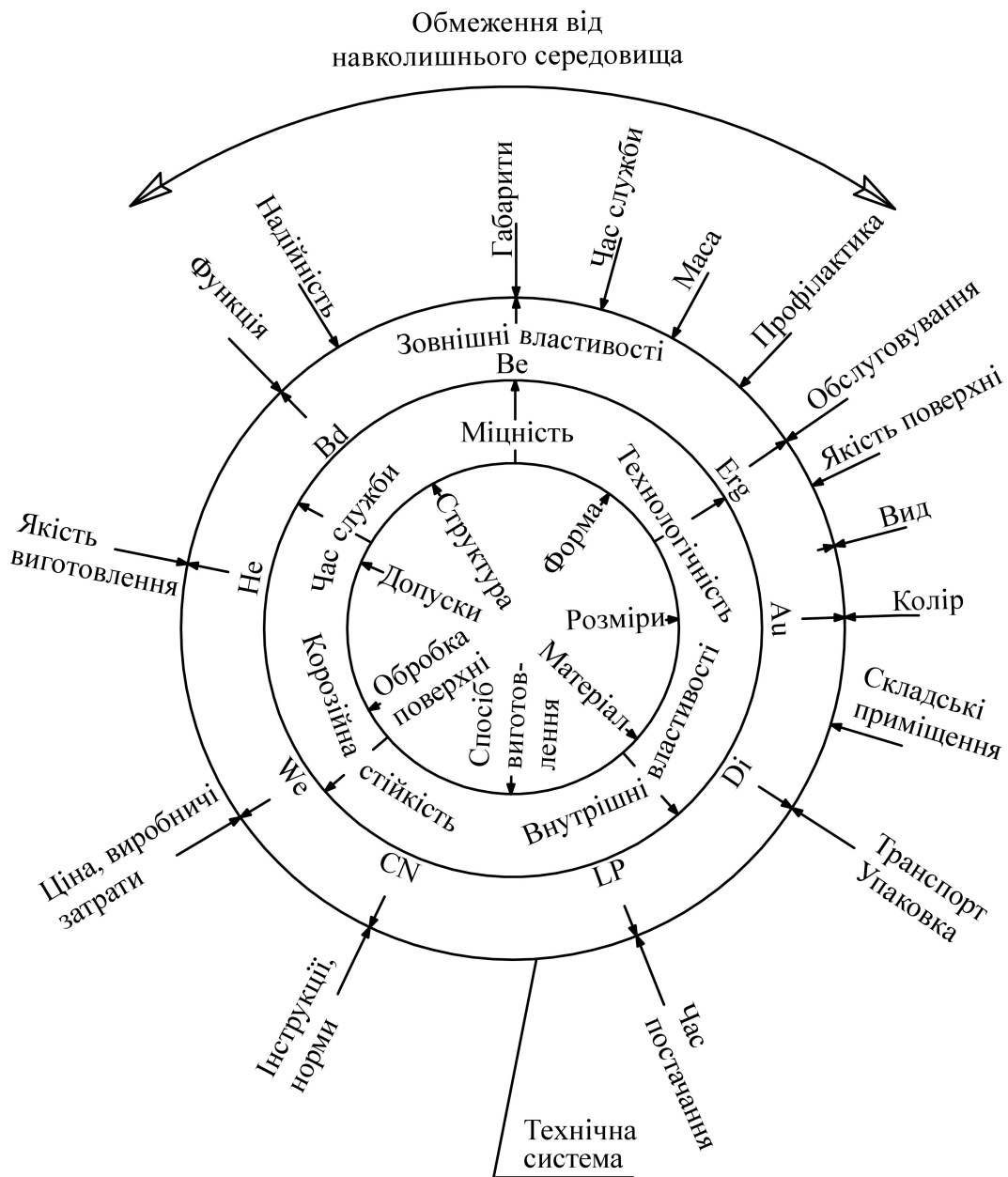


Рисунок 4.2 – Співвідношення між категоріями властивостей (див. табл. 4.1)

(конструктивні і технологічні) є визначальними для зовнішніх властивостей, які визначають у свою чергу економічні властивості. Рис. 4.2 ілюструє надзвичайну складність співвідношень. Складність ще більше зростає з урахуванням співвідношень між властивостями на нижчих рівнях.

4.3. Вимоги до вибору й опису критеріїв ТС

Серед властивостей і показників ТС є такі, що мають тенденцію монотонної зміни чи тенденцію підтримання на певному рівні при досягненні своєї межі. Ці показники усвідомлюються як міра досконалості і прогресивності, їх називають критеріями ТС і визначають одночасно як критерії розвитку і критерії якості. Значення критеріїв ТС є особливо важливим для розробки нових виробів на рівні кращих світових досягнень.

Кожна ТС має, як правило, декілька критеріїв розвитку. Принцип прогресивного розвитку для кожного нового покоління ТС полягає у покращенні одних і не погіршенні інших критеріїв.

Єдиний набір критеріїв ТС включає такі чотири групи:

- функціональні критерії, які характеризують найважливіші показники реалізації функції ТС;
- технологічні критерії, пов'язані з можливістю і простотою виготовлення ТС;
- економічні критерії, які визначають економічну доцільність реалізації функції ТС;
- антропологічні критерії, пов'язані з питаннями людського фактору чи дією позитивних і негативних факторів на людей, викликаних створенням ТС.

Цілком можливо визначити умови і вимоги щодо вибору й опису критеріїв ТС. Як критерії розвитку можуть бути вибрані тільки такі параметри ТС, які допускають можливість кількісної оцінки на основі вимірювання. Критерій повинен мати такі одиниці виміру, які дозволяють зіставляти ТС у різних країнах і в різний час. Найкраще користуватися безрозмірними питомими величинами.

Умови визначальності передбачають, що як критерій можуть бути прийняті такі параметри ТС, які найперше

характеризують її ефективність і здійснюють визначальний вплив на розвиток ТС.

При виборі критеріїв ТС повинна бути забезпечена також умова постійності.

Умова мінімальності і незалежності визначає, що вся сукупність критеріїв розвитку повинна містити лише такі, що не можуть бути логічно виведені із інших критеріїв і не можуть бути їх прямим наслідком.

Опис кожного критерію ТС містить такі дані: 1) сутність критерію, час і причини його виникнення; 2) формулу чи спосіб вимірювання критерію; 3) діапазон і характер зміни значень критерію в часі; 4) оцінку ступеня загальності критерію за певною шкалою (належність до певного класу чи групи класів ТС); 5) оцінку перспективності критерію (актуальність зростає чи знижується); 6) основні способи і засоби покращення критерію.

4.4. Функціональні і технологічні критерії ТС

Для кожної ТС функціональні критерії розвитку є кількісними характеристиками основних показників реалізації функції ТС. Найбільш важливими серед них є критерії продуктивності, точності і надійності.

Критерій продуктивності є інтегральним показником рівня розвитку техніки, який безпосередньо залежить від ряду параметрів, що певним чином впливають на продуктивність праці. Ці параметри є частковими функціональними критеріями і можуть бути вимірними або обчисленими за певною залежністю.

Це, зокрема,

1) швидкість обробки об'єкта (число обертів чи операцій за одиницю часу, швидкість руху робочих органів машини, протікання хімічної реакції і т.д.);

2) фізичні і хімічні параметри (температура, тиск, напруга та інші), що певним чином впливають на інтенсивність обробки технічного об'єкта чи предмета обробки;

3) ступінь механізації праці, який визначено як співвідношення механічної роботи, виконуваної власне ТС, до всієї механічної роботи, виконуваної сумарно ТС і людиною при виготовленні продукції;

4) ступінь автоматизації, який дорівнює відношенню кількості керованих операцій, виконуваних власне ТС, до загальної кількості операцій, виконуваних сумарно ТС і людиною;

5) неперервність процесу обробки, яка детермінується як співвідношення числа операцій, виконуваних з використанням неперервних процесів, до загального числа операцій з використанням неперервних і перервних процесів дії на предмет обробки. При цьому під неперервними процесами розуміють обертовий, поступальний рух чи беззупинкову обробку, а під перервними - зворотно-поступальний рух, операції із зупинками і т.д.

Критерій точності також включає окремі часткові критерії, зокрема, точності: вимірювання; обробки матеріалу чи сировини; позиціонування; обробки потоку енергії; обробки потоку інформації.

На сьогодні розроблено і розвинуто багато способів, методів і прийомів вимірювання, оцінки і дослідження точності, які описані у спеціальній літературі, наприклад, в методичному посібнику Карпенка В.А. В окрему сферу науки оформилось вивчення проблеми точності металорізальних верстатів. При цьому передбачається формування вимог до точності, її моделювання на основі сучасних методів, інженерний розрахунок, випробування на точність і експериментальні дослідження балансу точності обробки, напрацювання рекомендацій щодо підвищення точності.

Надзвичайно важливим є критерій надійності. Надійність визначається як властивість ТС зберігати свою працездатність із заданою ймовірністю протягом певного проміжку часу. Критерій надійності є інтегральним і містить у собі часткові критерії:

1) безвідмовність, що визначається ймовірністю $P(t)$ того, що в заданому інтервалі часу $t=T$ (у межах заданого напрацювання) не виникає відмова ТС;

2) довговічність, що може характеризуватися рядом показників, наприклад коефіцієнтом технічного використання

$$T_d = \frac{T_o}{T_o + T_{i\delta}},$$

де T_o - час роботи ТС за певний період експлуатації;
 $T_{i\delta}$ - сумарний час простоїв об'єкта при його ремонті й технічному обслуговуванні;

3) ремонтпридатність, яка визначає можливості ТС до попередження, виявлення й усунення відмов і пошкоджень шляхом проведення ремонтного й технічного обслуговування;

4) збережуваність – здатність ТС зберігати свої експлуатаційні властивості при її зберіганні і транспортуванні.

Зазначені функціональні критерії продуктивності, точності і надійності надзвичайно сильно взаємовпливають один на одного, їх актуальність і вага завжди були вищими порівняно з іншими групами критеріїв.

Технологічні критерії головним чином забезпечують всебічну економію праці при виготовленні ТС і підготовці її до експлуатації. Виділяють технологічні критерії трудомісткості виготовлення; технологічних можливостей; використання матеріалів; розчленування ТС на елементи.

Критерій трудомісткості виготовлення ТС дорівнює відношенню сумарної трудомісткості P_c проектування, виготовлення і підготовки до експлуатації виробу до головного показника R ефективності ТС: $K_T = P_c / R$. Таким чином, цей критерій представляють як питому трудомісткість виготовлення на одиницю отримуваної ефективності. В табл. 4.2 наведено приклади вибору головного показника ефективності для різних ТС.

Таблиця 4.2 – Головні показники ефективності ТС

Приклади ТС	Показники ефективності	
	Назва	Розмірність
Двигуни, генератори Засоби транспорту	Потужність. Маса вантажу за одиницю часу	кВт кг/год
Технологічні матеріали	Продуктивність	м ³ /год, м/год, шт/год
Муфти, редуктори	Крутний момент	Нм
Сільськогосподарські плуги	Ширина плуга	м

Критерій K_T є монотонно спадною функцією при зіставленні різних поколінь ТС. Актуальність його залишається високою і незмінною.

Будь-яка ТС може складатись не більше як з п'яти типів елементів: A_c - стандартних чи отримуваних у готовому вигляді; A_y - уніфікованих, які запозичені із існуючих ТС; A_{01} - оригінальних, виготовлення яких не виключає труднощів; A_{02} - оригінальних, виготовлення яких викликає значні труднощі, проте їх можна подолати; A_{03} - оригінальних, виготовлення яких викликає принципові труднощі, які поки що неможливо подолати.

Критерій технологічних можливостей, який відображає простоту і принципову можливість виготовлення ТС, визначається за формулою

$$K_{TM} = \varepsilon \frac{A_c + k_y A_y + k_{01} A_{01} + k_{02} A_{02}}{A_c + A_y + A_{01} + A_{02} + A_{03}},$$

де $\varepsilon = 1$ при $A_{03} = 0$; $\varepsilon = 0$ при $A_{03} > 0$; k_y, k_{01}, k_{02} - вагові коефіцієнти ($k_y > k_{01} > k_{02}$); $A_c, A_y, A_{01}, A_{02}, A_{03}$ - кількість найменувань відповідних елементів. Частковими випадками цього узагальненого критерію є: критерій стандартизації ($k_y = k_{01} = k_{02} = 0$); критерій уніфікації ($k_y = 1; k_{01} = k_{02} = 0$). Розглядуваний критерій стимулює виключення абсолютно нетехнологічних елементів A_3 і мінімізацію елементів A_{02}, A_{02}, A_y відповідно до їх вагових коефіцієнтів.

Критерій технологічних можливостей відображає фактор спадковості в техніці аналогічно закону Дарвіна у живій природі. При переході від одного покоління ТС до іншого критерій K_{TM} сприяє найбільше зберіганню і використанню перевірених практикою функціональних елементів і технології.

Через те, що доля відходів, які отримуються при виготовленні ТС, значною мірою залежить від технологічних процесів і технологічного обладнання, існує і діє технологічний критерій використання матеріалів. Він визначений як співвідношення маси G виробу до маси M використаних матеріалів: $K_{\text{вм}} = G/M$ (при цьому закуплені комплектуючі елементи не враховуються).

Критерій $K_{\text{вм}}$ є монотонно зростаючою функцією в інтервалі $0 < K_{\text{вм}} < 1$, яка іноді може мати стрибкоподібні зростання, пов'язані з переходом на нові високопродуктивні

технологічні процеси чи дешеві матеріали. Величину $K_{\text{вм}}$ можна також інтерпретувати як коефіцієнт корисного використання матеріалів, бо за змістом, характером і діапазоном зміни він близький до енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД).

При розробці ТС може видатися, що раціональніше виготовити її з меншої кількості елементів. Наприклад, деякі прості вузли можна замінити однією нероз'ємною деталлю і т.п. Проте ілюзорне спрощення конструкції, поряд з позитивними моментами, часто приносить значні втрати. Більші розчленування часто скорочують час і трудомісткість виготовлення ТС в цілому, полегшують і розширюють уніфікацію і стандартизацію з відповідними перевагами і т.д. Завжди існує оптимальне розчленування ТС на вузли і деталі, яке значно спрощує технологію розробки, виготовлення, ремонту і модернізації виробів.

Критерій розчленування ТС на елементи забезпечує у кожному новому поколінні виробів наближення до оптимального розподілу на елементи. Цей критерій стосується будь-якої ТС, яка складається більш, ніж з одного елемента.

4.5. Економічні критерії ТС

До економічних критеріїв ТС відносять критерії витрат матеріалів, енергії, витрат на інформаційне забезпечення, габаритних розмірів ТС.

Всебічна економія матеріалів зумовлена факторами зниження вартості ТС (вартість матеріалів складає 25-65 % собівартості); економією енергії при експлуатації (значна частина енергії витрачається на здійснення різноманітних рухів); зниження транспортних і завантажувально-розвантажувальних витрат.

Критерій витрат матеріалу дорівнює відношенню маси G ТС до її головного показника R ефективності: $K_m = G/R$. Таким чином, критерій представляє собою питому масу матеріалів на одиницю отримуваної ефективності. Критерій K_m має дуже давню історію. Актуальність його залишається високою і незмінною. K_m , як правило, є монотонно спадною функцією за умови, що зіставлення ТС проводиться за одним і тим же показником R .

Критерій витрат енергії характеризує витрати енергії при виготовленні чи експлуатації ТС. Через те, що задоволення потреб людей жорстко обмежується енергетичними можливостями, витрати енергії намагаються звести до мінімуму. Критерій розраховують за формулою

$$K_e = \frac{W + E}{R},$$

де W - повні витрати енергії за час T експлуатації ТС; E - витрати енергії при виготовленні ТС. Оскільки для більшості ТС $W \gg E$, то отримуємо простішу формулу для критерію: $K_e = W / R$.

В інженерній практиці широко використовують ще одну модифікацію цього економічного критерію - коефіцієнт корисної дії $ККД = W_k / W_n$, де W_k - корисна робота (енергія); W_n - затрачена робота (енергія). Критерій K_e , як правило, є монотонно спадною функцією, а $ККД$ - монотонно зростаючою в інтервалі $0 < ККД < 1$, причому мається на увазі порівняння ТС з однаковим принципом дії.

Останнім часом у зв'язку з широким використанням комп'ютерної техніки зросли витрати на підготовку й обробку інформації. Критерій витрат на інформаційне забезпечення формулюється як співвідношення $K_{iz} = S/R$, де S - витрати на підготовку й обробку інформації, включаючи вартість та експлуатацію ЕОМ, програмного і інформаційного забезпечення і т.п. Це монотонно спадна функція, проте можливі і стрибки, пов'язані з переходом на нову техніку.

Критерій габаритних розмірів ТС передбачає можливість зниження габаритних розмірів ТС і їх елементів, що пов'язано із отриманням таких переваг: зменшення площі й об'єму приміщень, в яких знаходяться ТС; зменшення площі землі, яку займають або ТС, або відповідні споруди; збільшення корисного об'єму (в ТС типу літальних апаратів, суден і т.п.); скорочення витрат на захист ТС (витрати на корпуси, кожухи, покриття); скорочення витрат на транспортування ТС.

Критерій габаритних розмірів дорівнює відношенню основних габаритних розмірів V ТС до його ефективності: $K_p = V/R$). Якщо найбільш важливим є зниження об'єму, то

$V=LBH$, якщо - зниження площі, то $V=LB$ і т.д.(L-довжина, B -ширина, H- висота)

Критерій K_p є монотонно спадною функцією за умови, що порівнюються покоління ТС за одним і тим же показником R .

4.7. Ергономічні, екологічні та естетичні критерії ТС

Ця група критеріїв складає антропологічні критерії розвитку ТС, які забезпечують їх пристосування до людини, зниження дискомфорту і шкідливих впливів від їх функціонування.

Ергономічністю вважають властивість людино-машинної системи змінювати свою ефективність залежно від ступеня використання оператора. Критерій ергономічності конкретної ТС дорівнює відношенню реальної ефективності системи людина-машина до максимально можливої ефективності цієї системи. Цей критерій можна інтерпретувати як коефіцієнт корисної дії людини в людино-машинній системі. Критерій розглядається як монотонно зростаюча функція, яка прямує до границі, рівної одиниці.

Актуальність і значимість ергономічного критерію в останній час значно зростає. Це викликало формування і розвиток нової науки - ергономіки, основна прикладна орієнтація якої полягає в оптимальному проектуванні складних людино-машинних систем. Основними напрямками ергономіки є:

- антропометрія, яка передбачає вимірювання тіла людини з метою використання отриманих даних при проектуванні ТС, оптимізації розмірних співвідношень, економії рухів оператора;

- інженерна психологія, яка вивчає взаємозв'язок людини і техніки і їх взаємодію з орієнтацією на оптимальний розподіл функцій між ними;

- фізіологія і гігієна праці.

З останнім напрямком пов'язаний критерій безпеки ТС. Багато ТС, виготовлена ними продукція і сировина можуть чинити шкідливий вплив на людину: викликати

пошкодження органів різного ступеня і навіть мати смертельні наслідки. Критерій безпеки має своєю тенденцією знизити й усунути шкідливі впливи ТС на людей. Його можна визначити за формулою

$$K_o = \sum_{i=0}^n \beta_i \gamma_i S_i / S_{in},$$

де S_i і S_{in} - величина і нормативно допустиме значення і-го шкідливого чи небезпечного фактору; (β_i - ваговий коефіцієнт і-го фактору відповідно до градації за важкістю за умови, що $\sum_{i=0}^n \beta_i = 1$; n - кількість шкідливих і небезпечних факторів; $\gamma_i = 1$, а при $S_i \geq S_{in}$ - $\gamma_i = 1/\beta_i$.

Критерій безпеки має відношення до всіх класів ТС, які здійснюють чи можуть здійснювати шкідливий чи небезпечний вплив на людину.

Критерій екологічності або критерій охорони навколишнього середовища регулює взаємовідносини між природою і ТС з точки зору комфортності і можливості життя людей. У загальному вигляді критерій можна виразити залежністю

$$K_{ек} = \frac{S_n + S_k}{S_o},$$

де S_n - площа території, на якій є недопустимі забруднення (вище норми); S_k - площа території, на якій є критичні для людини забруднення; S_o - вся площа регіону.

Цей критерій повинен впливати на вибір засобів мінімального впливу на природу, обґрунтування нормативів забруднень, розробку компенсаційних заходів. У питаннях охорони навколишнього середовища кардинальне значення має психологічний фактор. При розв'язуванні конструкторсько-технологічних проблем слід намагатись знизити $K_{ек}$.

Естетичний критерій ТС є критерієм краси. Естетичний вплив ТС повинен відповідати найкращим почуттям людини, високому рівню культури. Краса будь-якого виробу складається із внутрішньої, чи функціональної, краси і додаткової - декоративної. Функціональна краса зумовлена в першу чергу законами фізики і створюється на основі глибокого знання і відчуття фізичної сутності роботи

ТС. Декоративна краса визначається законами психофізіологічної дії певних образів на навколишніх людей. Функціональна і декоративна краса повинні гармонійно й оптимально доповнювати одна одну.

Естетичний критерій передбачає гармонізацію форми при композиції ТС. Однією із умов виникнення художніх якостей форми є просторова єдність всіх її елементів, яка створює цілісне сприйняття форми. Вона досягається такими закономірностями як співвідношення, пропорції, ритм всіх елементів (ліній, поверхонь, фактури, маси, кольору), що утворюють форму. При розчленуванні поверхонь і об'ємів форми проявляються такі її властивості, як масштабність, статичність, динаміка. Співвідношення є засобом гармонізації форми.

При виборі кольору необхідно вирішувати питання, пов'язані з його характеристиками, фізіологією зору і емоційною дією на людину. Правильне використання кольору при фарбуванні обладнання та інтер'єру цеху зменшують втомлюваність робітника, підвищують продуктивність праці. Основними характеристиками кольору є тон, насиченість, яскравість, контрастність. Існують три теорії використання кольору у художньому конструюванні ТС: 1) динамічного кольору; 2) оптимальних кольорів; 3) узгоджених кольорів. Таким чином, інженерно-технічні рішення мусять бути гармонійними. Людина повинна і відчувати і розуміти глибину та багатогранність їх краси.

4.7. Надійність ТС

Надійність функціонування має для сучасних систем важливіше значення. Наприклад, система керування польотами літаків містить близько мільйона первинних елементів, що тісно взаємодіють між собою. Якщо не будуть вжиті спеціальні заходи забезпечення надійності, то від виходу з ладу будь-якого опору, конденсатора або іншого елемента може залежати безпека пасажирів. У міру ускладнення систем стає більш складною і оцінка їх надійності.

Для оцінки функціональної надійності ТС часто використовують ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$. Якщо відмови хоча б одного з елементів системи приводять до

повної або часткової втрати її працездатності, то надійність системи з n елементами у фіксований момент часу t визначається за формулою

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Наприклад, якщо система має $n = 20$ взаємозв'язаних елементів і ймовірність безвідмовної роботи кожного з них упродовж 600 годин (для автомобіля 30000...60000 км пробігу) становить 0,99, то ймовірність безвідмовної роботи всієї системи-автомобіля розраховується, як $P(t) = 0,99^{20} = 0,81$, тобто за достатньо високої надійності елементів надійність всієї системи з практичного погляду стає незадовільною.

Для підвищення надійності роботи систем застосовуються різні методи. Наприклад, при резервуванні у випадку відмови одного елемента його функції виконує інший елемент або елемент, що перебуває в резерві. Очевидно, що більшість складних систем можуть виконувати свої функції за умови, що частина їх елементів перебуває в неробочому стані. Наприклад, міський пасажирський транспорт продовжує обслуговувати населення, якщо частина його тролейбусів або автобусів поламані або перебувають у ремонті. На машинобудівному підприємстві у разі відмови одного або декількох верстатів випуск продукції продовжується. Цілком очевидно, що відмови елементів не можуть поліпшити ефективність роботи системи. У зв'язку з цим може бути обраний більш інформативний показник надійності ТС.

Припустимо, що величина R є критерієм ефективності деякої складної системи і є можливість обчислювати її за заданими параметрами системи і впливів зовнішнього середовища. Визначимо критерій при припущенні, що всі елементи системи абсолютно надійні R^H . Крім того, обчислимо цей критерій, вважаючи, що відмови елементів можуть проходити з інтенсивностями, які відповідають заданим імовірнісним характеристикам R^0 . Тоді величина відношення $\beta_i = R^0 / R^H$ може бути прийнята як показник надійності складної системи.

При оцінці надійності складних систем необхідно враховувати можливість заміни й відновлення елементів, що

відмовили. Так, під час механічної обробки зношується і підлягає заміні різальний інструмент (для універсальних верстатів кожні 60...80 хв, для автоматизованого устаткування 180...240 хв), що враховується при нормуванні операцій. При експлуатації автомобіля підлягає періодичній заміні мастило, повітряний, масляний і паливний фільтри, що виконується при технічному обслуговуванні. Для оцінки надійності таких систем виконують розрахунки за потоками відмов і відновлень фінальної ймовірності.

Для багатьох ТС потоки відмов і відновлень можна віднести до найпростіших. Основними ознаками таких потоків є: стаціонарність, відсутність післядії, ординарність.

Потік подій називається стаціонарним, якщо ймовірність потрапляння того чи іншого числа подій на ділянку часу довжиною τ залежить тільки від довжини ділянки і не залежить від того, де саме на осі t розташована ця ділянка.

Потік подій називається потоком без наслідків, якщо для будь-яких ділянок часу, що не перетинаються, число подій, що потрапляють на один з них, не залежить від числа подій, що потрапляють на інші.

Потік подій називається ординарним, якщо ймовірність потрапляння на елементарну ділянку Δt двох і більше подій значно мала порівняно з ймовірністю влучення однієї події.

Найпростіший потік відіграє в теорії масового обслуговування особливо важливу роль. По-перше, найпростіші і близькі до найпростішого потоки часто трапляються на практиці. По-друге, навіть у разі потоку заявок (відмов), які відрізняються від найпростішого, часто можна одержати задовільні за точністю результати, замінивши потік будь-якої структури найпростішим з тією ж щільністю.

Для найпростішого потоку проміжок часу між довільними двома подіями має щільність розподілу ймовірностей за показниковим законом

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (4.1)$$

де λ - щільність потоку (середнє число подій, які припадають на одиницю часу).

Математичне очікування m_i , дисперсія D_i й середньоквадратичне відхилення σ_i проміжку часу між довільними двома сусідніми подіями в найпростішому потоці обчислюються за залежностями:

$$m_i = 1/\lambda;$$

$$D_i = 1/\lambda^2;$$

$$\sigma_i = 1/\lambda.$$

З урахуванням припущення про пуасоновський характер потоку відмов і про показовий закон розподілу часу обслуговування, рівняння (4.1), дозволяє використати для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ТС з врахуванням відновлень апарат марковських раптових процесів (на честь російського математика А.А. Маркова).

У ланцюгах Маркова чітко визначені стани системи $S_1, S_2 \dots S_n$. Перехід зі стану в стан може здійснюватися в неперервні та дискретні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n і визначається ймовірностями відповідних подій. Ланцюги Маркова добре ілюструються графом стану системи, на якому колами або чотирикутниками зображують самі стани, а стрілками - напрями переходів. Якщо над стрілками зазначені інтенсивності переходів, то граф називається розміченим графом станів (рис. 4.3).

Марковські процеси з дискретним станом і безперервним часом (неперервні ланцюги Маркова) характеризують функціонування системи, в якій перехід із стану до стану виникає у випадкові моменти часу, а самі стани дискретні, наприклад, виникнення відмов, несправностей.

Маючи дані щодо щільностей розподілів ймовірностей переходів P_{ij} , можна розрахувати ймовірності станів системи в різні моменти часу, тобто визначити ймовірність знаходження системи в першому, другому і т.д. станах.

Ці ймовірності розраховують із системи диференціальних рівнянь А.Н. Колмогорова, які представляють за такими правилами:

1) у лівій частині рівняння поміщають похідні ймовірностей відповідних станів, наприклад dP_1/dt ;

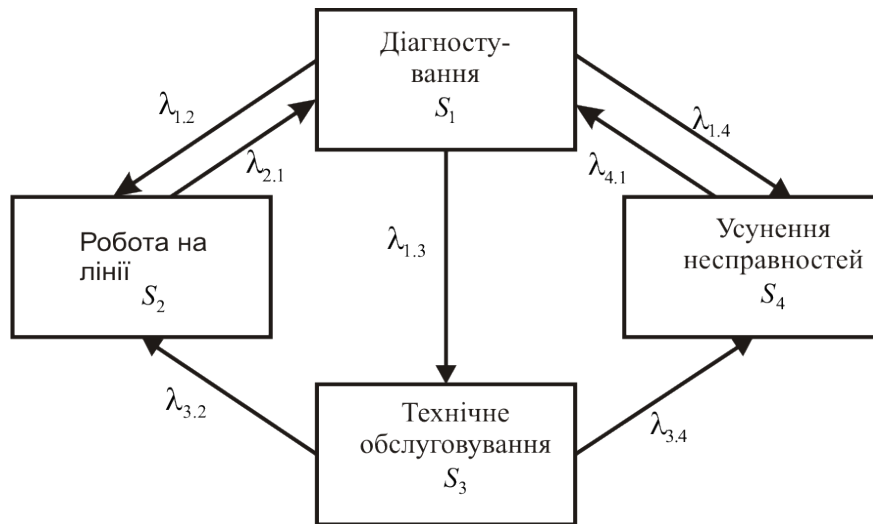


Рисунок 4.3 – Розмічений граф станів для марковського процесу з неперервним часом

2) права частина містить стільки членів, скільки переходів (стрілок у розміченому графі) пов'язані з даним станом;

3) кожний член правої частини рівняння дорівнює добутку інтенсивності потоку на ймовірність того стану, з якого перехід здійснюється;

4) знак «+» ставиться перед членом правої частини рівняння при переході до визначеного стану, а знак «-» при виході з визначеного стану.

Наприклад, для розміченого графу станів (рис. 4.3), записується така система рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3} + \lambda_{1,4})P_1 + \lambda_{2,1}P_2 + \lambda_{4,1}P_4; \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{1,2}P_1 + \lambda_{3,2}P_3 - \lambda_{2,1}P_2; \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{1,3}P_1 - (\lambda_{3,2} + \lambda_{3,4})P_3; \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{1,4}P_1 + \lambda_{3,4}P_3 - \lambda_{4,1}P_4. \end{aligned} \right. \quad (4.2)$$

Так звані граничні ймовірності (при $t \rightarrow \infty$) визначають із наведеної системи рівнянь (4.2), у якій ліві частини дорівнюють нулю, і враховують умову, що $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ (умова нормування). Обчислюються при цьому фінальні ймовірності, які характеризують середній

час перебування системи на інтервалі спостереження у відповідних станах S_1, S_2, S_3, S_4 .

Як приклад виконаємо аналіз випадкових процесів відмов функціонування підсистем автомобіля. Для цього побудуємо граф його можливих станів (рис. 4.4).

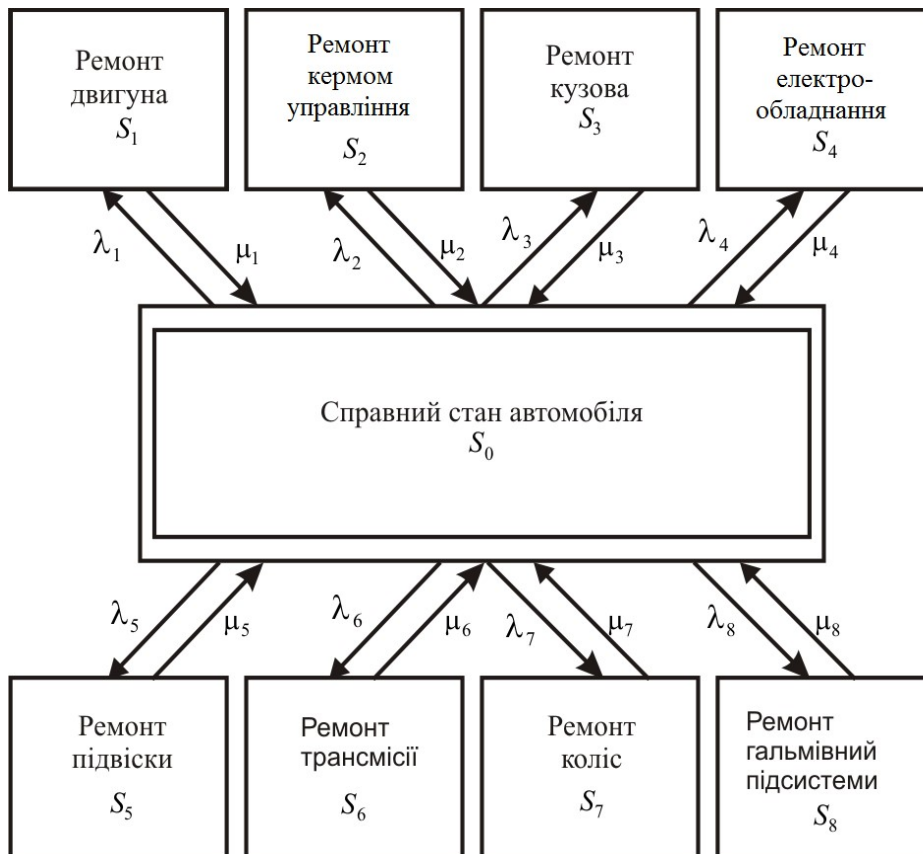


Рисунок 4.4 – Граф станів ТС-автомобіля з урахуванням відмов і відновлень

Автомобіль може перебувати у справному стані (стан S_0), а також у станах, зумовлених відмовами його підсистем: S_1 - ремонт двигуна (кривошипно-шатунний механізм, механізм газорозподілу, підсистеми охолодження, змащення, живлення); S_2 - ремонт рульового керування (кермовий механізм і привод, підсилювачі приводів); S_3 - ремонт кузова (салон, капот, двері); S_4 - ремонт електроустаткування (електропостачання, запалювання, висвітлення, сигналізація); S_5 - ремонт підвіски (амортизатор, пружина, важелі, шарніри); S_6 - ремонт трансмісії (зчеплення, роздавальна коробка, передача, диференціал, що ведуть мости, колісна передача); S_7

- ремонт коліс (шини, маточини, підшипники); S_8 - ремонт гальмівних підсистем (гальмові механізми, підсилювач гальмового привода, привод гальма).

Імовірність знаходження автомобіля в кожному з розглянутих станів позначимо відповідно $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$. Стан автомобіля визначиться сукупністю рівнянь фінальних ймовірностей:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) = P_1\mu_1 \\ + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4 + P_5\mu_5 + P_6\mu_6 + P_7\mu_7 + P_8\mu_8; \\ P_1\mu_1 = P_0\lambda_1; \\ \dots \\ P_8\mu_8 = P_0 \cdot \lambda_8. \end{cases} \quad (4.3)$$

Система розв'язується за допомогою умови нормування: сума всіх ймовірностей дорівнює одиниці.

$$P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_8 = 1. \quad (4.4)$$

У системі рівнянь інтенсивність λ характеризує вхідний потік – потік відмов (середнє число заявок на ремонт, що надходять в одиницю часу), інтенсивність μ - вихідний потік (середнє число заявок на ремонт, виконаних в одиницю часу).

Припускається, що потік відновлень є найпростішим потоком, у якому тривалість часу відновлення має показниковий закон розподілу.

Підставляючи отримані із системи рівнянь (4.3) вирази для $P_1 = P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}$; $P_2 = P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}$; ... $P_8 = P_0 \frac{\lambda_8}{\mu_8}$, у рівняння умови нормування (4.4) запишемо залежності для розрахунку ймовірностей станів

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_3 / \mu_3 + \lambda_4 / \mu_4 + \lambda_5 / \mu_5 + \lambda_6 / \mu_6 + \lambda_7 / \mu_7 + \lambda_8 / \mu_8)^{-1}; \\ P_1 = P_0 \cdot \lambda_1 / \mu_1; \\ \dots \\ P_8 = P_0 \cdot \lambda_8 / \mu_8. \end{cases} \quad (4.5)$$

Дослідження параметрів потоків відмов функціонування механізмів, вузлів конкретної моделі автомобіля виконують за результатами реальних умов експлуатації за певний період (наприклад, за рік). Відмови, які спостерігаються в період обкатування, а також поломки в

результаті аварій з розгляду виключаються, тобто розглядається сталий режим роботи. Середній час між двома відмовами відповідних підсистем автомобіля, а також середній час ремонту (заміни, відновлення), підсистеми що вийшла з ладу, підраховують на основі даних технічної служби автотранспортного підприємства.

Аналіз і розрахунки дозволяють виявити найменш надійні вузли й розробити комплекс заходів для підвищення безвідмовності роботи рухомого складу автотранспортного підприємства.

Приклад складання вихідних даних за параметрами потоків відмов і відновлень для шліфувального верстата ЧПК моделі 3М151Ф2 наведений у табл. 4.3. Розмічений граф станів для розглянутого прикладу аналогічний наведеному на рис. 4.3 при усуненні стану S_8 й заміні найменувань станів.

Розрахунки за наведеною вище методикою під час використання системи рівнянь виду (4.5) дозволяють одержати чисельні значення ймовірностей безвідмовної роботи системи P_0 й підсистем $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$.

Таблиця 4.3 – Параметри потоків відмов і відновлень підсистем і елементів ТС верстата моделі 3М151Ф2

№	Підсистеми, елементи верстата	Середній час напрацювання на відмову T_i , год.	Інтенсивність потоку відмов λ_i , год ⁻¹	Середній час відновлення T_{ei} , год	Інтенсивність потоку відновлення μ_i , год ⁻¹	λ_i / μ_i
1	Привод головного руху	-	-	-	-	0,050
2	Привод подачі	-	-	-	-	0,030
3	Інструментальна підсистема	10	0,1	1,0	1,0	0,100
4	Завантажувальний пристрій	210	0,004	3,3	0,3	0,013
5	Гідросистема	167	0,006	2,0	0,5	0,012
6	Електросистема	83	0,012	1,4	0,7	0,017
7	Система ЧПК	125	0,008	2,5	0,4	0,020

$$P_0 = (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_3 / \mu_3 + \lambda_4 / \mu_4 + \lambda_5 / \mu_5 + \lambda_6 / \mu_6 + \lambda_7 / \mu_7)^{-1} = \\ = (1 + 0,05 + 0,03 + 0,1 + 0,013 + 0,012 + 0,017 + 0,02)^{-1} = 0,81;$$

$$P_1 = P_0 \lambda_1 / \mu_1 = 0,05 * 0,81 = 0,041; P_2 = P_0 \lambda_2 / \mu_2 = 0,03 * 0,81 = 0,024;$$

$$P_3 = P_0 \lambda_3 / \mu_3 = 0,1 * 0,81 = 0,081; P_4 = P_0 \lambda_4 / \mu_4 = 0,013 * 0,81 = 0,011;$$

$$P_5 = P_0 \lambda_5 / \mu_5 = 0,012 * 0,81 = 0,010;$$

$$P_6 = P_0 \lambda_6 / \mu_6 = 0,017 * 0,81 = 0,014;$$

$$P_7 = P_0 \lambda_7 / \mu_7 = 0,02 * 0,81 = 0,016.$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи верстата $P_0 = 0,81$, а найбільш слабкою його підсистемою є інструментальна, тому що ймовірність її знаходження в неробочому стані через вихід з ладу інструмента $P_3 = 0,081$.

При використанні розглянутого підходу за оцінкою надійності потрібно бути впевненим у тому, що параметри потоків відмов і відновлень розподілені за показниковим законом, стаціонарні й не мають післядій. Для цього необхідно обов'язково перевіряти експериментальні дані на їхню відповідність показниковим законам розподілу.

Для сучасних ТС оцінка якості керування є однією з найбільш складних сторін загальної оцінки ефективності системи. Риси саморегулювання, самоорганізації властиві не тільки живим істотам, але й багатьом ТС, а також їхнім елементам. При зміні керуючих впливів змінюються деякі параметри стану системи. Метою управління, як правило, є прагнення підвищити ефективність ТС. Якщо йдеться про найкраще оптимальне керування, то зрозуміло, що показник ефективності при такому керуванні повинен мати екстремум. Тому як критерій управління необхідно вибирати власне критерій ефективності. Якщо відомі кілька варіантів управління, то задання найбільш ефективного вибору можуть бути вирішені простим порівнянням. Так, для двох варіантів вигреш у критерії ефективності розраховують за простою залежністю

$$\beta_{упр} = R_A / R_B,$$

де R_A і R_B – розрахункові значення критерію ефективності для варіантів А і В.

У разі більш складних ситуацій завдання вирішується методами теорії оптимального керування.

Критерій заводо захищеності визначає ступінь збереження системою своїх функціональних характеристик за наявності збурювальних впливів. Для оцінки обчислюють критерій ефективності при роботі системи без перешкод $R_{норм}$ і за наявності зовнішніх і внутрішніх перешкод $R_{ном}$. Тоді величина $\beta_n = R_{норм} / R_{ном}$ може бути прийнятою як показник заводо захищеності складної системи.

Як зазначалося, умови функціонування складних систем тією або іншою мірою відрізняються від нормальних. У зв'язку із цим виникає поняття сталості. Під сталістю функціонування системи розуміють її здатність зберігати необхідні властивості в умовах дії збурень. При аналізі динамічних систем, що описуються звичайними диференціальними рівняннями, застосовуються різні критерії. Наприклад, за визначенням сталості, за Ляпуновим, збурення обмежені будь-якою малою величиною. При розгляді стохастичної сталості збурювання є випадковими величинами за заздалегідь застереженими ймовірнісними характеристиками.

4.8. Алгоритм оцінювання ТС

Оцінювання ТС передбачає вибір критеріїв і проведення оцінки. Характеристики можливих критеріїв ТС описані вище у цьому розділі.

У принципі можливі три схеми оцінювання; вони характеризуються запитаннями, наведеними в табл. 4.4.

Критеріальна оцінка, відповідно до схем оцінювання, представлених в табл. 4.4, здійснюється за алгоритмами, які схематизовані на рис. 4.5. У процесі оцінювання здійснюються такі процедури: а) вибір узагальненого показника; б) вибір критеріїв оцінки (властивостей); в) визначення критеріальних оцінок; г) перетворення оцінок в узагальнений показник.

Таблиця 4.4 – Схеми оцінювання

	Оцінювана ТС	Типове
	Реалізована технічна система	Яка технічна система?
I	Постановка задачі (перелік вимог) і варіант рішення чи зразок	Чи відповідає система (модель) даній постановці?
II	Постановка задачі і різні можливі рішення, які технічно відповідають постановці задачі	Яке рішення краще (оптимальне)?

Оцінювання здійснюється двома способами: а) інтуїтивно; б) об'єктивно, тобто на основі визначальних критеріїв.

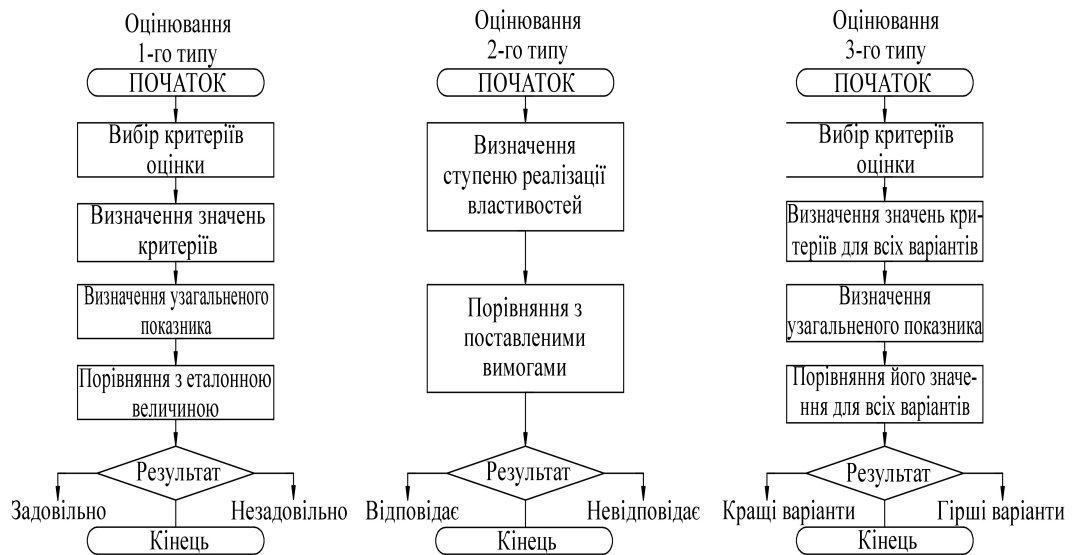


Рисунок 4.5 – Схеми оцінювання (див. табл. 4.4)

Інтуїтивна оцінка не може бути повністю зігнорована. Вона визначається не лише суб'єктивними відчуттями, але і часто – багаторічним досвідом. Це особливо важливо за недостатньо повної інформації, що характерно для початкових етапів проектування.

Питання для самоконтролю знань

1. Назвіть основні властивості ТС.
2. Які критерії оцінки ТС знаєте?

3. Перерахуйте вимоги до вибору й опису критеріїв ТС.

4. Дайте коротку характеристику критеріїв продуктивності, точності і трудомісткості ТС.

5. Яка роль економічних критеріїв при оцінці ТС?

6. Чи потрібно використовувати при оцінці ТС ергономічні, екологічні і естетичні критерії і в чому їх суть?

7. Як оцінювати надійність ТС?

8. Розрахуйте ймовірність безвідмовної роботи ТС, яка містить 5 елементів, якщо відомі відповідні ймовірності кожного з них: 1 – 0,99; 2 – 0,97; 3 – 0,98; 4 – 0,91; 5 – 0,96.

9. Розрахуйте ймовірність безвідмовної роботи ТС, яка містить 10 елементів з ймовірністю кожного з них, що дорівнює 0,99.

10. Що таке фінальна ймовірність безвідмовної роботи і як вона визначається?

5. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

5.1. Поняття про фізичне моделювання

Як правило, глибокий аналіз ТС на сучасному етапі розвитку неможливий без розробки моделей їх функціонування. Так, неможливо створити сучасний двигун без моделювання процесів наповнення камери згоряння, запалювання паливної суміші, кінематики і динаміки переміщення деталей поршневої групи, зчеплення, коробки передач, трансмісії. Слід нагадати також, що створення сучасних літаків стало можливим лише завдяки розвитку аеродинаміки в теорії літальних апаратів.

Найбільш важливими видами фізичного моделювання є натурне, або макетне, та експериментальне моделювання.

При макетному моделюванні виготовляють макет, який становить фізичну модель досліджуваної ТС або її елементів (частин, вузлів). Ця модель, як правило, реалізує одну або декілька характеристик ТС чи фізичного процесу, який проходить в ТС. Макет може бути наочною моделлю ТС, наприклад, металорізального верстату, яка відтворює компоновку верстату в масштабі, або, наприклад, тепловою моделлю станини верстату для аналізу теплових деформацій.

Характеристика, що реалізується, чи процес в макеті повинні мати фізичну природу оригіналу. За результатами досліджень макету, який схожий з реальною конструкцією, роблять висновок про доцільність того чи іншого конструктивного рішення. Широко застосовують макетування при відпрацюванні компонованих рішень ТС з точки зору технічної естетики й ергономіки. Макетування використовують і під час оцінки конструктивних варіантів деталей несучих систем. В цьому випадку макет, наприклад, станини виготовляють із оргскла чи іншого легкооброблюваного матеріалу.

Надзвичайно ефективним є макетне моделювання при пошуку конструктивних рішень систем керування обладнання. Воно дозволяє підібрати основні елементи системи і відлагодити їх взаємозв'язок. Достовірність рекомендацій, отриманих при макетуванні, залежить від правильності розрахунків значень коефіцієнтів подібності, за

допомогою яких результати досліджень макета переносять на реальну конструкцію. Обмеження можливостей макетування в основному проявляються під час імітації технічних процесів, а також при варіюванні конструктивними параметрами макету.

Експериментальне моделювання полягає у відпрацюванні конструкції ТС на стенді, який імітує основні вузли ТС і умови її роботи. Зменшення вартості експериментального стенду досягається за рахунок виготовлення лише тих вузлів, працездатність яких викликає сумнів. Змінюючи конструктивні елементи стенду, досягають такого запасу працездатності цих вузлів, який може гарантувати необхідні характеристики проектованої ТС.

Кінцевий висновок про якість ТС і необхідні конструктивні зміни може дати тільки виробничий експеримент. Перевагою експериментального моделювання є максимальна достовірність технічних рішень, що в свою чергу, забезпечує скорочення часу і матеріальних затрат на доробку ТС. Основні недоліки - нижчі, ніж при макетному моделюванні, можливості експериментальної установки в частині варіювання конструктивних рішень і значна вартість. Експериментальне моделювання є особливо необхідним при розробці ТС, які використовують нові технологічні процеси чи нові конструктивні рішення.

При фізичному моделюванні значення певної величини x_n в натурних умовах отримують із значення відповідної величини x_m на моделі за допомогою ділення на коефіцієнт подібності k_x : $x_n = x_m / k_x$.

Для кожного роду величин коефіцієнт подібності (масштаб) повинен бути постійним; наприклад, відношення $l/L = k_l$ лінійних розмірів моделі l до схожих розмірів у натурних умовах L повинне дорівнювати одному і тому ж числу. Якщо коефіцієнти подібності вибрані для деяких основних видів величин, то коефіцієнти подібності для довільних видів величин визначаються за чіткими формулами. Наприклад, швидкості v і прискорення a є похідними видами величин від лінійних розмірів і проміжків часу

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad \text{і} \quad a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Тому відповідні коефіцієнти подібності k_v і k_a пов'язані з коефіцієнтами подібності лінійних розмірів і проміжків часу співвідношеннями

$$k_v = \frac{k_L}{k_t} \quad \text{і} \quad k_a = \frac{k_v}{k_t} = \frac{k_L}{k_t^2}.$$

Таким чином, теорія фізичного моделювання опирається на теорію розмірностей фізичних величин.

5.2. Класифікація математичних моделей ТС

Моделі ТС можуть формулюватися різними мовами (мова графічних побудов, мова хімії, біології, тощо). Якщо модель формулюється мовою математики, то її розуміють як математичну (ММ).

ММ системи прийнято називати сукупність чотирьох елементів: 1) простору станів; 2) простору вхідних змінних; 3) простору вихідних змінних; 4) співвідношень, які пов'язують вхідні та вихідні змінні і вектор стану системи.

ММ служать для опису властивостей і оцінок ТС. При побудові ММ дослідник на практиці має справу з реальною ситуацією (рис. 5.1), що висуває "задачу", на яку необхідно дати "відповідь".

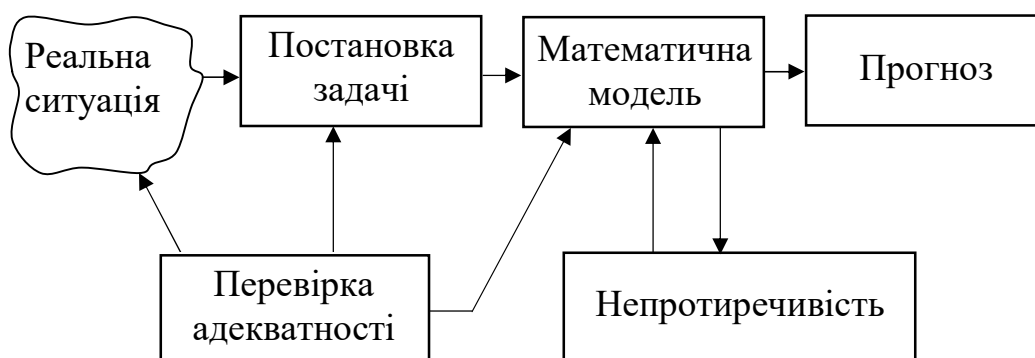


Рисунок 5.1 – Схема побудови математичної моделі

Процес постановки задачі полягає у схематизації (ідеалізації) емпіричної ситуації, тобто виділенні основних або суттєвих особливостей ТС чи явища. Цей процес часто відіграє вирішальну роль, бо в реальному явищі бере участь багато процесів, і воно надзвичайно складне.

Наступний крок полягає в перекладі цих факторів мовою математичних понять і величин і постулюванні співвідношень між ними. Це надзвичайно непроста стадія моделювання і до того ж характеризується великою різноманітністю підходів. Після побудови ММ здійснюють її перевірку. Адекватність моделі (тобто здатність відобразити властивості ТС з похибкою не вище заданої) до деякої міри перевіряється вже в ході постановки задачі. Рівняння та інші математичні співвідношення, сформульовані в моделі, постійно зіставляються з початковою ситуацією. Сама математична основа моделі повинна бути несуперечливою і підпорядковуватись всім звичним законам математичної логіки. Справедливість моделі залежить від її здатності адекватно описувати реальну систему. При цьому, як правило, адекватність моделі має місце лише в обмеженій області зміни зовнішніх змінних - області адекватності ММ.

До ММ висувають також вимоги універсальності, точності і економічності.

В узагальненому вигляді структуру ММ можна зобразити блок-схемою, показаною на рис. 5.2, де наведені основні ознаки класифікацій і типи ММ.

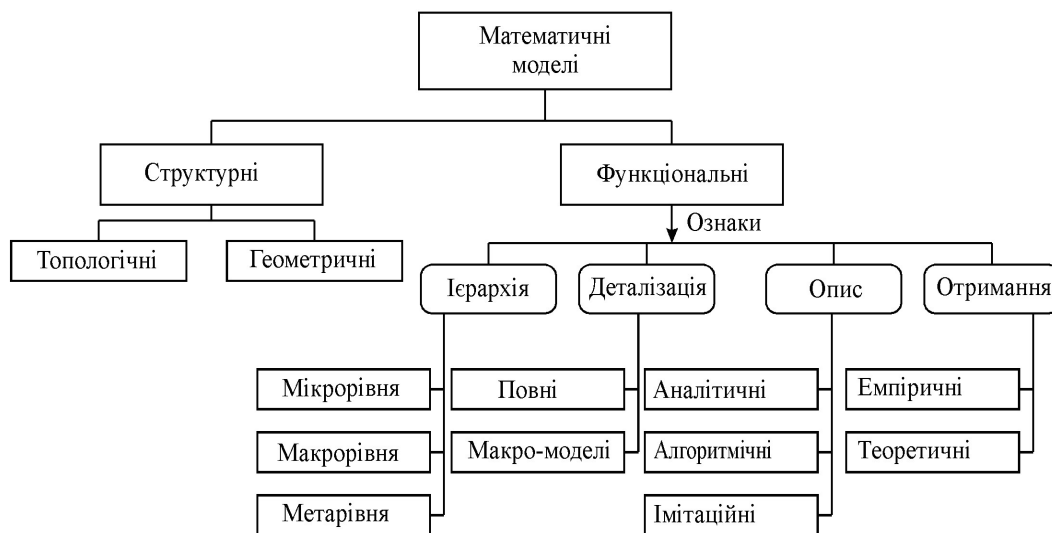


Рисунок 5.2 – Класифікація математичних моделей

За характером відображуваних властивостей ТС поділяють ММ на структурні і функціональні.

Структурні ММ призначені для відображення структурних властивостей ТС. Розрізняють ММ топологічні і геометричні. У топологічних моделях відображають склад і

взаємозв'язки елементів. У геометричних ММ відображаються геометричні властивості ТС. В них додатково до відомостей про взаємне розміщення елементів містяться дані, наприклад, про форму деталей.

Функціональні ММ призначені для відображення фізичних та інформаційних процесів, що відбуваються в ТС при її функціонуванні. Як правило, функціональні ММ становлять системи рівнянь, які пов'язують фазові змінні, внутрішні, зовнішні і вихідні параметри.

Використання принципів блочно-ієрархічного підходу до проектування і творення ТС приводить до появи ієрархії математичних моделей проєктованих ТС. Залежно від місця в ієрархічному описі ММ відносять до мікро-, макро- і метарівня.

Особливістю ММ на мікрорівні є відображення фізичних процесів, що відбуваються в неперервних просторі і часі. Прикладом ММ на мікрорівні - диференціальні рівняння в частинних похідних, де незалежними змінними є просторові координати і час. За допомогою цих рівнянь розраховують поля механічних напружень і деформацій, електричних потенціалів, тисків, температур і т.п.

На макрорівні використовують укрупнену дискретизацію простору за функціональною ознакою, що призводить до представлення ММ на цьому рівні у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь. У цих рівняннях незалежною змінною є час t , а вектор залежних змінних складають фазові змінні, які характеризують стан укрупнених елементів дискретизованого простору: сили і швидкості механічних систем, напруги і сили струму електричних систем і т.п. Такі ММ придатні для аналізу як динамічних, так і усталених станів ТС.

На метарівні моделі як елементами вважають достатньо складні сукупності деталей. Метарівень характеризується великим різноманіттям типів використовуваних ММ. Для багатьох ТС математичними моделями є так само системи звичайних диференціальних рівнянь, але вони вже описують взаємні зв'язки між елементами ТС. ММ на метарівні є також системи логічних рівнянь, що описують процеси перетворення сигналів. Важливий клас ММ на метарівні складають моделі систем масового обслуговування, які застосовують для опису процесів функціонування

інформаційних та обчислювальних систем, виробничих дільниць, ліній та цехів.

За ступенем деталізації опису в межах кожного ієрархічного рівня виділяють повні ММ і макромоделі.

За способом опису (представлення) властивостей ТС функціональні ММ поділяють на аналітичні та алгоритмічні.

Прикладами імітаційних ММ можуть служити моделі динамічних об'єктів у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь і моделі систем масового обслуговування, які задані в алгоритмічній формі.

Теоретичні ММ створюються в результаті дослідження процесів і їх закономірностей, які характерні для розглядуваного класу об'єктів і явищ.

Емпіричні ММ отримують в результаті вивчення зовнішніх проявів властивостей ТС за допомогою вимірювань фазових змінних на зовнішніх входах і виходах і обробки результатів вимірювань.

Залежно від урахування збурень розрізняють детерміновані і стохастичні ММ. ММ називається детермінованою, якщо кожній реалізації вхідних змінних і вектора управління відповідає одна визначена реалізація вихідних змінних. ММ називається стохастичною, якщо кожній реалізації вхідних змінних і вектора управління відповідає достатньо визначений ймовірний розподіл її вихідних змінних. Що більше факторів враховує ММ, то вона складніша, повніше і точніше описує функціонування системи.

Для складних систем, як правило, жодна модель не може з достатньою точністю відтворити всі її функції. Тому будують не одну, а кілька моделей і залежно від мети застосовують ту чи іншу. При цьому одні моделі можуть бути детерміновані, інші – стохастичні. Так, наприклад, модель заводу, що враховує тільки середню кількість робітників, які кожний день беруть участь у виробничому процесі, і середня кількість отриманих за день матеріальних засобів, є детермінованою. Модель того ж заводу, яка враховує випадкові добові коливання кількості робітників внаслідок невиходу на роботу через різні обставини і випадкові добові коливання отриманих заводом матеріальних засобів, буде стохастичною.

Незалежно від математичного апарату, який

використовується у моделюванні систем, розрізняють два основних підходи: перший полягає в описі поведінки системи, другий – в описі процесів її функціонування.

При описі поведінки системи не розкривається її внутрішній зміст, система представляється у вигляді “чорної скриньки”, яка має входи і виходи. Вивчається реакція системи (зміна вихідних параметрів) при зміні вхідних змінних і управляючих впливів. Інформація про поведінку системи може бути отримана або при спостереженні за її роботою, або за рахунок проведення спеціальних експериментальних досліджень.

ММ, що реалізується за результатами обробки експериментальних даних, має вигляд

$$Y(t) = F(X;U(t)). \quad (5.1)$$

Опис поведінки систем достатньо широко використовується при аналізі й управлінні ТС. В першу чергу він застосовується для таких ТС, при теоретичному моделюванні яких, у зв'язку із складністю процесів системи, неможливо отримати адекватні моделі. Так, для розрахунку режимів різання за механічної обробки використовуються емпіричні залежності, які отримані обробкою великого об'єму експериментальних даних. Наприклад, швидкість різання на операції точіння визначається за залежністю

$$v = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y},$$

де T – стійкість інструменту, хв.; t – глибина різання, мм; S – подача, мм/об; m , x , y – емпіричні коефіцієнти, що визначаються експериментально; C_v – коефіцієнт пропорційності; K_v – поправочний коефіцієнт.

При моделюванні процесів функціонування системи виконують її декомпозицію. Систему розчленовують на окремі підсистеми, вивчають закони функціонування кожної з них, встановлюють взаємодії підсистем. ММ підсистем і системи в цілому представляють у вигляді функцій переходів і виходів. Функції переходів установлюють зв'язок параметрів стану системи з вхідними змінними і управляючим впливом. В загальному вигляді вони записуються так:

$$Z(t) = \Phi(Z(t_0); X; U(t); t), \quad (5.2)$$

де $Z(t_0)$ – параметри стану системи в початковий момент часу.

Функції виходів встановлюють зв'язок вихідних змінних з параметрами стану системи

$$Y(t) = F_y(Z(t)). \quad (5.3)$$

Розкриття функцій (5.2) і (5.3) і їх представлення в параметричному вигляді становить складну науково-технічну задачу, розв'язанню якої присвячено багато досліджень процесів і операцій. З метою пояснення розглянемо приклад обробки деталі на токарному верстаті. Як відомо, при механічній обробці значний вплив на точність спричиняють пружні деформації технологічної системи. Розрахункова схема впливу пружних деформацій технологічної системи на розмір оброблюваної поверхні наводиться на рис. 5.3.

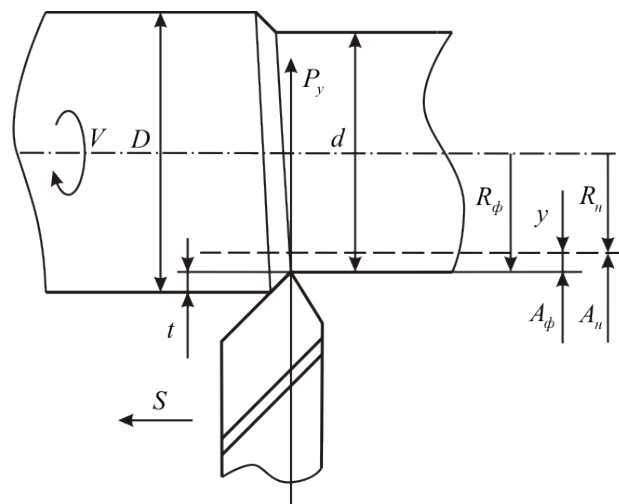


Рисунок 5.3 – До розрахунку впливу пружних деформацій технологічної системи на розмір оброблюваної поверхні

При токарній обробці різець налагоджується на розмір A_n . За відсутності пружних деформацій повинна бути отримана поверхня радіусом R_n . При різанні виникає радіальна складова сили різання P_y , під дією якої система, яка має жорсткість J , деформується на величину y . Фактичне розташування різця відносно деталі визначається розміром A_ϕ , дійсний радіус обробленої поверхні буде R_ϕ . Відмітимо вхідні змінні, параметри стану і вихідні змінні системи.

Вхідні змінні: діаметр заготовки D , швидкість різання v , подача S , розмір статичного налагодження A_n . Параметри

стану системи: глибина різання t , радіальна складова сили різання P_y , величина пружних деформацій y , фактичне розташування різця відносно деталі, розмір A_ϕ , радіус обробленої поверхні R_ϕ . Функції переходів – рівняння (5.2) для даної системи буде мати вигляд:

$$P_y = f(D; v; S; A_n); \quad y = f(P_y; J); \quad R_\phi = f(R_n; A_n; y).$$

Радіальна складова сили різання P_y може бути обчислена за емпіричними залежностями, наведеними в довідниковій літературі,

$$P_y = C_p \cdot v^n \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p,$$

де C_p – коефіцієнт пропорційності; K_p – поправочний коефіцієнт; x, y, n – показники степеня.

Пружні деформації розглядаються за радіальною силою різання і жорсткістю технологічної системи за відомою залежністю

$$y = \frac{P_y}{J}.$$

Функція виходів – рівняння (5.3) запишеться у вигляді:

$$d = 2(R_n + y) = 2R_\phi.$$

5.3. Топологічні моделі структур ТС

Математичне представлення структур ТС реалізуються топологічними і геометричними ММ.

Топологічні моделі найчастіше застосовують для опису ТС, що складається із великої кількості елементів, при розв'язку задач прив'язки конструктивних елементів до певних просторових позицій (наприклад, задачі компоновки обладнання, розміщення деталей, маршрути транспортування). Стосовно моделювання технічних процесів, то топологічні моделі прив'язані до відносних моментів часу (наприклад, при розробці розкладів, технологій виготовлення чи складання). Топологічні моделі можуть мати форму графів, таблиць, (матриць), списків і т.п.

Розглянемо як приклад структурну модель робототехнічного комплексу (РТК). Комплекс (рис. 5.4, а) складається із двох токарних верстатів з ЧПК

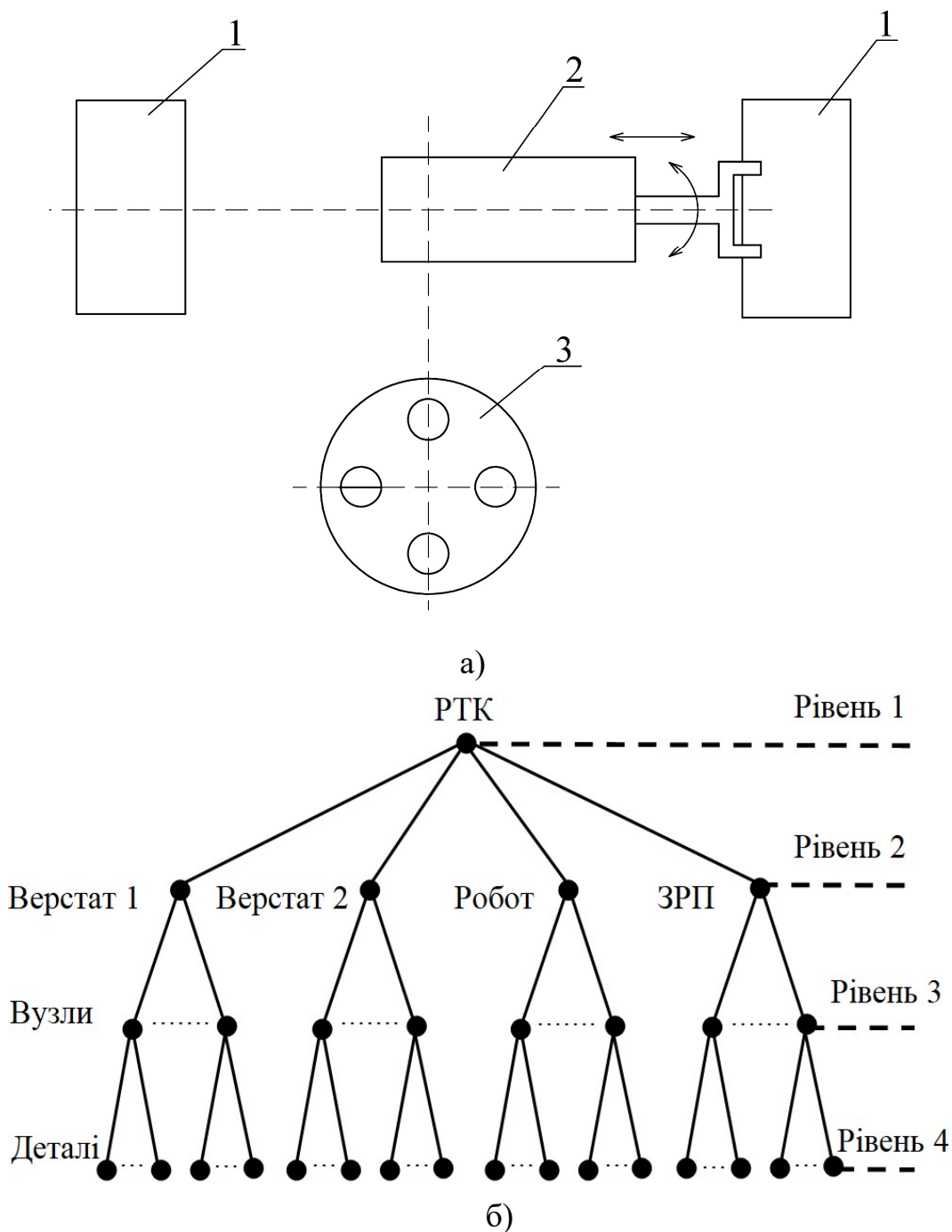


Рисунок 5.4 – Робототехнічний комплекс: а) компоновка, б) ієрархічна структура

Ієрархічна структура РТК (рис. 5.4, б) представлена деревоподібним графом.

Робототехнологічний комплекс є вищою системою (рівень 1) відносно до елементів другого рівня (верстати, робот, ЗРП); з іншого боку, елементи другого рівня є вищими системами для елементів третього рівня – вузлів, наприклад шпиндельного вузла, приводу головного руху, несучої системи і т.д. На рівні 4 розміщені деталі вузлів.

Структурнологічна модель маршруту технологічного процесу обробки зубчастого колеса (рис. 5.5) включає матрицю властивостей деталі, опис логічних співвідношень між властивостями і граф $G(T,C)$ взаємозв'язку операторів ($T=\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ – оператори; $C=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – дуги графу) за можливою послідовністю їх використання. Зубчасте колесо має властивості (поверхні) F_1, F_2, F_3 .

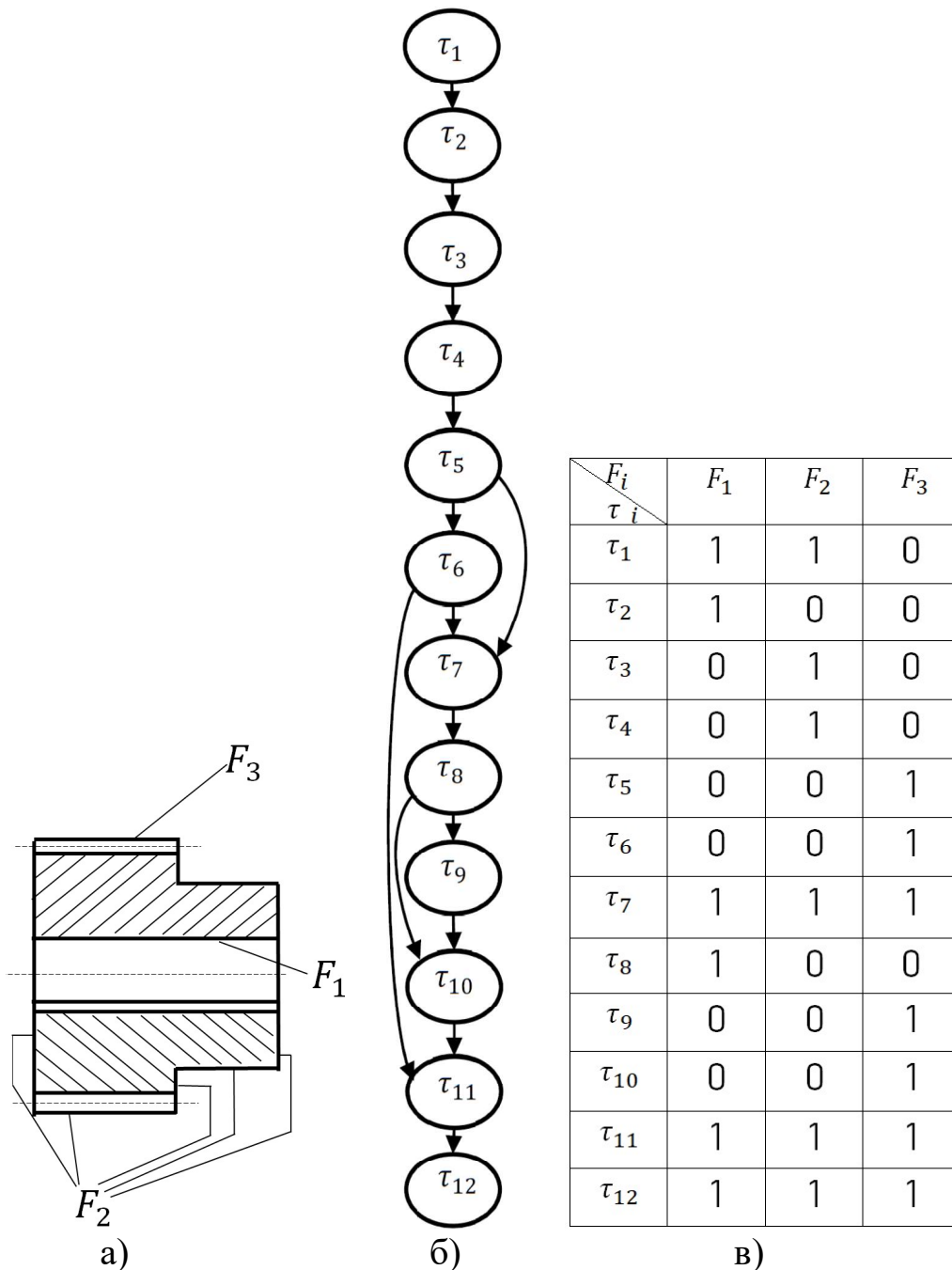


Рисунок 5.5 – Структурно-логічна модель маршруту обробки зубчастого колеса: а – зубчасте колесо; б – граф; в – матриця сіткова

Вершинами графу взаємозв'язку операторів є оператори (в цьому випадку операції обробки): τ_1 - отримання заготовки; τ_2 - протягування базового отвору; τ_3 - чорнове обточування контуру зубчастого колеса; τ_4 - чистове обточування контуру зубчастого колеса; τ_5 - чорнова нарізка зубчастого профілю; τ_6 - чистова нарізка зубчастого профілю; τ_7 - термообробка; τ_8 - фінішна обробка базового отвору; τ_9 - шліфування зубчастого профілю; τ_{10} - притирка зубчастого профілю; τ_{11} - мийка; τ_{12} - контроль.

Геометричні ММ можуть бути представлені сукупністю рівнянь ліній і поверхонь; алгебраїчних співвідношень, що зображають вироби із типових конструктивних елементів. Геометричні ММ застосовують при розв'язанні задач проектування в машино- і приладобудуванні, радіоелектроніці, для оформлення конструкторської документації, при заданні вхідних даних на розробку технологічних процесів виготовлення деталей.

Питання для самоконтролю знань

1. Назвіть переваги та недоліки макетного та експериментального моделювання.
2. Що таке критерій подібності і як він розраховується для лінійних розмірів?
3. Назвіть особливості моделей на мікро-, макро- і метарівнях.
4. Чим відрізняються підходи до опису поведінки і моделювання процесів функціонування?
5. Запишіть у загальному вигляді функції переходів і виходів, які застосовуються під час моделювання процесів функціонування системи.
6. Дайте приклади структурно-логічних моделей системи

6. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМ

6.1. Методи планування експериментів при вивченні поведінки систем

Опис поведінки системи можливо провести такими методами:

1. За рахунок спостереження за роботою системи, накопичення досвіду її експлуатації, створення неформалізованих моделей.

2. Спостереженням за роботою системи з реєстрацією вхідних і вихідних змінних і подальшою обробкою статистичних даних.

3. Постановкою спеціальних експериментів, при проведенні яких змінюються вхідні змінні, дії, що управляють, і реєструються вихідні змінні. Результати обробляються і представляються у вигляді таблиць, графіків, залежностей.

Перший метод є достатньо поширеним при експлуатації технічних систем. Наприклад, водій при керуванні автомобілем не використовує жодних залежностей, проте він знає, яку швидкість потрібно включити, з яким зусиллям натиснути на газ, щоб в тій або іншій ситуації забезпечити необхідні параметри руху. В результаті спостереження за роботою системи в його пам'яті сформована модель її поведінки, яка і служить інструкцією.

Другий підхід використовується також достатньо широко. Накопичення статистичного матеріалу і його аналіз дозволяє ухвалювати правильні рішення під час керівництва підприємством, галуззю і часто є джерелом для створення різних нормативів. Такі нормативи, наприклад, розробляються на багатьох автотранспортних підприємствах для розрахунку витрати палива і нормування трудомісткості автотранспортних перевезень.

Третій метод є найбільш інформативним. Він дозволяє не тільки отримати моделі поведінки систем в аналітичному вигляді, але і намітити шляхи вдосконалення ТС. При його реалізації виконують спеціальні експериментальні дослідження. Оптимальний варіант при цьому отримують,

якщо експериментальні дослідження заздалегідь сплановані і розроблена методика їх проведення.

Всі методи планування експериментів можна розділити на 2 групи:

1. Методи пасивного планування експериментів.
2. Методи активного планування експериментів.

При застосуванні методів пасивного планування план проведення експериментів складають один раз і при виконанні експериментальних досліджень його, як правило, не змінюють. Найбільш яскравим представником цієї групи є метод послідовної зміни змінних. При застосуванні методів активного планування експерименти ставляться невеликими серіями, результати кожної серії обробляються і аналізуються. За необхідності створюється план наступної серії, яка також ставиться, і результати якої також обробляються. Процедура триває до отримання бажаного результату. До зазначених методів активного планування належать: повний факторний експеримент, дробовий факторний експеримент, метод латинських квадратів, симплекс-градкове планування і ряд інших.

6.3. Метод послідовної зміни змінних

Дослідження поведінки системи методом послідовної зміни змінних виконують у такій послідовності:

- визначають вихідні і вхідні змінні, між якими необхідно встановити зв'язок;
- призначають межі і рівні зміни вхідних змінних;
- проводять експериментальні дослідження, змінюючи тільки одну вхідну змінну, залишаючи інші постійними;
- після вивчення впливу на вихідні змінні першої вхідної змінної переходять до постановки дослідів із зміни другої, третьої і так далі змінних;
- після закінчення експериментальних досліджень їх результати аналізуються і представляються у формі таблиць, графіків, залежностей.

Наведемо приклад дослідження впливу на витрату бензину Q (вихідна змінна) швидкості руху автомобіля V і маси вантажу m , що перевозиться (вхідні змінні). Визначимо

залежність (5.1), яка для цього прикладу має вигляд $Q=f(V;m)$.

Встановимо межі зміни величин і рівні їх варіювання. Проводимо виміри витрати бензину при швидкостях $V=40; 80; 120$ км/год і масі вантажу, що перевозиться $m=2 \cdot 10^3; 4 \cdot 10^3; 6 \cdot 10^3$ кг. Результати експериментів зведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати вимірів витрати палива

№ досл. i	Швидкість $x_1 = V$, км/год	Маса вантажу, що перевозиться $x_2 = m$, кг	Витрати бензину $y = Q$ літрів на 100 кілометрів для дослідів		
			1, 4, 7, 10, 13	2, 5, 8, 11, 14	3, 6, 9, 12, 15
1,2,3	40	$4 \cdot 10^3$	18	15	16
4,5,6	80	$4 \cdot 10^3$	17	18	17
7,8,9	120	$4 \cdot 10^3$	20	23	21
10,11,12	80	$2 \cdot 10^3$	15	14	12
13, 14, 15	80	$6 \cdot 10^3$	20	19	20

Результати експериментів можуть бути представлені також у вигляді графіків і у вигляді залежностей. Найчастіше для обробки експериментальних даних застосовують метод найменших квадратів.

6.4. Обробка експериментальних даних методом найменших квадратів

Для представлення результатів експериментів у вигляді залежності підбирається вид рівняння. Найчастіше з метою апроксимації експериментальних даних застосовуються залежності вигляду:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n; \quad (6.1)$$

де y - вихідна величина; $x_i, (i = 1, \bar{n})$ - вхідні

параметри; $a_i, (i = 1, \bar{n})$ - коефіцієнти моделі.

Модель (6.1) є досить загальною, тобто параметри її можуть бути різними функціями (наприклад $x_p = \sin \omega_p$; $x_i = x_i^2$ $x_i = x_i' x_i'$; $x_p = s_{in} \omega_q$ і так далі). Істотно, що модель лінійна по відношенню до невідомих коефіцієнтів a_i . Так, при розрахунку режимів різання за механічної обробки застосовують залежності типу

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2},$$

які приводиться до вигляду (6.1) логарифмування.

Для кожної точки експериментальних даних можна скласти за (6.1) умовне рівняння для розрахунку значень вихідної змінної

$$y_i' = a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_n x_{ni}$$

і, порівнюючи значення y_i з експериментальними даними, підрахувати квадрат відхилення (помилку) за формулою

$$\delta_i^2 = (y_i - y_i')^2 = (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni})^2, \quad (6.2)$$

де y_i і y_i' відповідно експериментальне й отримане за моделлю значення вихідної величини в i -тій точці; $x_{ki}, (k = 1, 2, \dots, n)$ - значення вхідних параметрів в i -тій точці.

Рівняння вигляду (6.2), що складаються для всіх N точок таблиці експериментальних даних, утворюють так звану систему головних рівнянь Гауса. Підсумовуючи рівняння вигляду (6.2) для всіх N експериментальних крапок, отримаємо

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^N \delta_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - y_i')^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni})^2. \quad (6.3)$$

Метод найменших квадратів полягає в мінімізації виразу (6.3). Мінімальне значення Δ^2 називається залишковою сумою квадратів (позначається RSS). Інакше кажучи, метод полягає в такому розрахунку оцінок коефіцієнтів моделі $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, для яких вираз (6.3) мінімальний.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i - Na_0 - a_1 \sum_{i=1}^N x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N y_i x_i - a_0 \sum_{i=1}^N x_i - a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 = 0 \end{cases} \quad (6.6)$$

Для розглянутого прикладу (табл.6.1) при дослідженні впливу на витрату бензину швидкості автомобіля (досліди 1...9) маємо:

$$\sum_1^9 y_i = 18 + 15 + 16 + 17 + 18 + 17 + 20 + 23 + 21 = 165$$

$$\sum_1^9 x_i = 40 + 40 + 40 + 80 + 80 + 80 + 120 + 120 + 120 = 720;$$

$$\sum_1^9 x_i^2 = 67200; \quad \sum_1^9 y_i x_i = 13800.$$

$$\left. \begin{aligned} 165 - 9a_0 - 720a_1 &= 0 \\ 13800 - 720a_0 - 67200a_1 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Розв'язуючи отриману систему, визначимо: $a_0 = 13,33$; $a_1 = 0,0625$. Залежність витрати палива від швидкості запишеться:

$$Q = 13,33 + 0,0652V.$$

Залежність (6.1) у разі необхідності може бути доповнена додатками другого, третього і так далі порядку змінних. Загальний хід визначення коефіцієнтів при цьому зберігається.

6.5. Повний і дробовий факторні експерименти

Недоліком методів пасивного планування експериментів є велика трудомісткість і складність обліку взаємодії вхідних змінних. Мета активних методів планування – отримати максимум інформації за мінімальних витрат засобів і часу, при виконанні мінімальної кількості експериментів. Для досягнення цього змінюють не одну, а декілька вхідних змінних. При проведенні повного факторного експерименту при двох змінних і двох рівнях варіювання план експерименту графічно може бути представлений у такому вигляді (рис. 6.1).

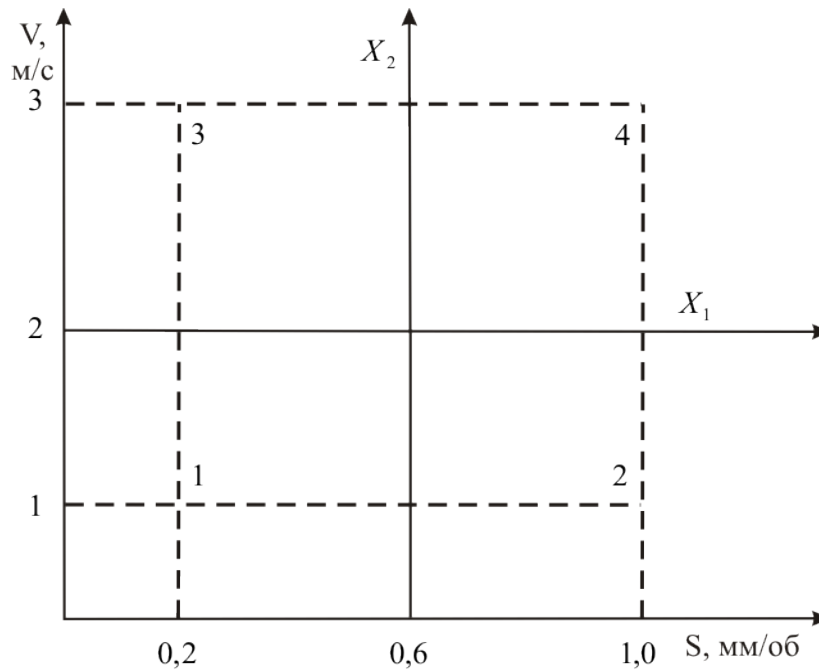


Рисунок 6.1 - Графічне представлення плану повного факторного експерименту

При дослідженні впливу режиму різання на стійкість різального інструменту T одночасно змінюватимемо швидкість різання V і подачу S , досліди проводимо при значеннях змінних, що визначені точками 1, 2, 3, 4 плану. Умови проведення дослідів запишемо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 - Матриця планування експериментів

№ досліду	№ точки	S , мм/об	V , м/с	x_1	x_2
1	2	3	4	5	6
1	1	0,2	1	-1	-1
2	2	1,0	1	+1	-1
3	3	0,2	3	-1	+1
4	4	1,0	3	+1	+1

Для уніфікації процедури планування і обробки експериментальних даних уведемо нову систему координат x_1, x_2 з початком в центрі плану ($S=0,6$ мм/об, $V=2$ м/с). Виберемо масштаб нових змінних так, щоб при мінімальних значеннях V і S (нижній рівень варіювання) змінні x_1, x_2 дорівнювали -1 , а при максимальних значеннях V і S (верхній рівень варіювання) $+1$. Розрахунок координат точок в новій системі виконується за залежністю

$$x_1 = \frac{S - S_0}{\varepsilon_s},$$

де S_0 – значення змінної на основному рівні $S_0=0,6$;
 ε_s – інтервал варіювання змінною (для S він дорівнює $0,6-0,2=0,4$).

Так, для точки 1 маємо $x_{11}=(0.2-0.6)/0.4= -1$; для точки 2 $x_{12}=(1-0,6)/0,4=+1$.

Матриця планування в новій системі координат записана в табл. 6.2, колонки 5 і 6. Для скорочення запису одиниці при складанні матриці опускають. Для трьох змінних при двох рівнях планування план експерименту визначатиметься вісьмома вершинами паралелепіпеда (рис. 6.2). Матриця планування наведена в табл. 6.3.

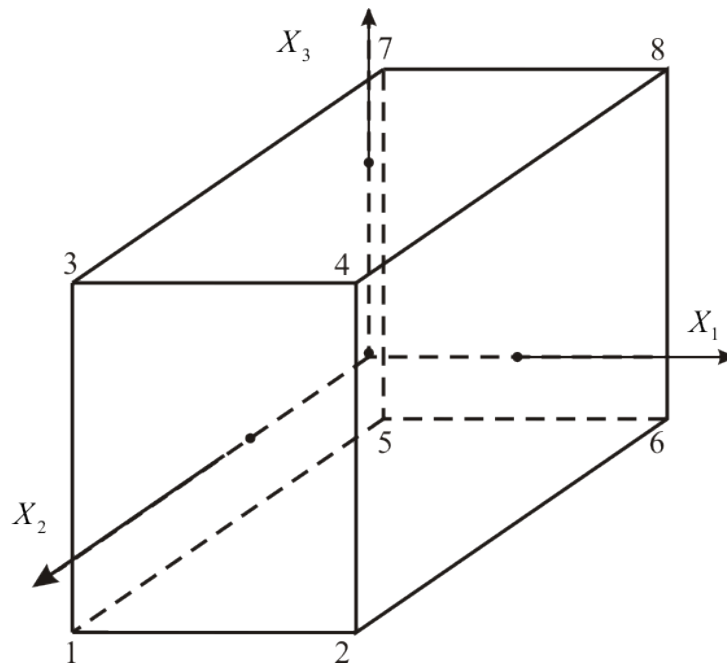


Рисунок 6.2 – Графічне представлення плану експериментів при трьох вхідних змінних

При чотирьох змінних повний факторний експеримент міститиме 16 дослідів, при п'яти – 32 дослідів і т.д. В загальному випадку число дослідів за повного факторного експерименту визначається залежністю

$$N = m^k,$$

де m – число рівнів варіювання; k – число факторів.

Таблиця 6.3 - Матриця планування повного факторного експерименту при трьох змінних

№ досліду	1	2	3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	+	-	+
4	-	-	+
5	-	+	-
6	+	+	-
7	+	+	+
8	-	+	+

Таким чином, при збільшенні числа змінних число дослідів зростає у геометричній прогресії.

З метою зниження числа дослідів використовується не весь, а тільки $1/2$, $1/4$, $1/8$ частина плану повного факторного експерименту. Варіанти вибору планів дробових факторних експериментів приводяться в довідниковій літературі.

Відзначимо основні властивості матриць повного і дробового факторного експерименту: 1. Симетричність щодо центру експерименту: алгебраїчна сума елементів колонки кожного фактора дорівнює нулю. 2. Сума квадратів елементів кожної колонки дорівнює числу точок плану експерименту. 3. Сума порядкових добутоків елементів будь-яких двох колонок дорівнює нулю (властивість ортогональності).

6.6. Математична обробка експериментальних даних при багатофакторному плануванні

Розглянемо послідовність обробки експериментальних даних при багатофакторному плануванні на прикладі дослідження швидкості різання (фактор x_1) і подачі (фактор x_2) на стійкість інструменту (фактор y). Дані експериментальних досліджень зведені в табл. 6.4.

При складанні матриці (табл. 6.4) стовбчик $x_1 x_2$, що визначає взаємодію змінних, отриманий їх добутком. Матриця доповнена колонкою x_0 для розрахунку коефіцієнта a_0 . З метою можливості визначення дисперсії і оцінки

відтворюваності в кожній точці плану виконано по два досліди. Математична модель процесу представляється лінійним поліномом, який для цього прикладу має вигляд

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2. \quad (6.7)$$

Таблиця 6.4 - Результати експериментальних досліджень

№ точки	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	\bar{y}	S^2	y	$(\bar{y} - y)^2$
1	+	-	-	+	67,0	68,0	67,5	0,5	67,0	0,25
2	+	+	-	-	55,9	57,1	56,5	0,72	57,0	0,25
3	+	-	+	-	62,1	62,8	62,5	0,32	63,0	0,25
4	+	+	+	+	53,4	53,6	53,5	0,02	53,0	0,25

Обробку експериментальних даних виконаємо у такій послідовності:

1. Оцінка відтворюваності процесу. При однаковому числі паралельних дослідів при кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність процесу (відсутність значних відхилень) визначають за критерієм Кохрена. Порівнюють максимальну величину дисперсії з сумарною. Критерій обчислюють за формулою

$$G = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}.$$

Якщо розрахунковий критерій виявляється менше табличного або рівним йому, то процес вважається відтворюваним. Для виконаних експериментів $G=0,72/1,56=0,46$; $G_{\text{табл}}=0,9065$, отже, процес є відтворюваним.

2. Якщо процес відтворюваний, то визначають дисперсію відтворюваності або помилку дослідів

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_y^2}{N}.$$

Для прикладу $S_y^2 = 1,56/4=0,39$.

3. Обчислення коефіцієнтів полінома виконують за залежностями

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N}; \quad a_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j}{N},$$

де x_{ij} - значення i -ої змінної в j -й рядку; \bar{y}_j - середнє значення вихідної змінної в j -й рядку.

Для прикладу $a_0=240$, $0/4=80$; $a_1=(-1)67,5+(+1)56,5+(-1)62,5+(+1)53,5/4=-5$; $a_2=-2$; $a_3=0,5$.

Залежність для розрахунку вихідної змінної, рівняння (6.7), з урахуванням набутих значень коефіцієнтів набуде вигляду

$$y = 80 - 5x_1 - 2x_2 + 0.5x_1x_2. \quad (6.8)$$

4. Виконаємо оцінку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо дотримується нерівність

$$|a_i| \leq \Delta a_i = t_{1-\alpha/2} \frac{S_Y}{\sqrt{N}},$$

де $t_{1-\alpha/2}$ визначається за таблицями, для прикладу

$$t_{1-\alpha/2}=2.77 \text{ і } \Delta a = 2.77 \frac{\sqrt{0.39}}{\sqrt{4}} = 0.86.$$

У рівнянні (6.8) незначущий коефіцієнт $a_3=0.5$. З урахуванням цього, рівняння перепишеться

$$y = 80 - 5x_1 - 2x_2. \quad (6.9)$$

5. Оцінка адекватності лінійної моделі виконують за критерієм Фішера, для чого визначають дисперсію адекватності

$$S_A^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{N - k - 1},$$

де k – число коефіцієнтів лінійної моделі без урахування a_0 ; y_j - розрахункові за рівнянням (6.7), для прикладу за рівнянням (6.9), значення y_j .

$$\text{Для прикладу } S_A^2 = \frac{1}{4 - 2 - 1} = 1.$$

Критерій Фішера за дисперсією адекватності обчислюють за рівнянням

$$F = \frac{S_A^2}{S_y^2}$$

Для прикладу $F=1/0,39=2,6$. Табличне значення критерію дорівнює 8.7. Отже, отримана лінійна модель є адекватною реальному процесу.

Для отримання моделі другого порядку матриця планування доповнюється центральною і «зірковими» точками.

Питання для самоконтролю знань

1. Чим принципово відрізняються методи пасивного й активного планування експериментів?
2. Сплануйте експерименти для вивчення впливу швидкості різання і подачі на стійкість інструменту.
3. У чому суть методу найменших квадратів?
4. Приведіть до лінійного вигляду залежність $T = C \cdot v^x \cdot S^y$ для використання методу найменших квадратів.
5. Складіть матрицю планування при 2-х вхідних змінних.
6. Складіть матрицю планування при 3-х вхідних змінних.
7. Що таке адекватність математичної моделі і як вона визначається при багатofакторному плануванні експериментів?

7. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ

7.1. Етапи моделювання процесів функціонування систем

Побудова моделі повинна бути простою, а сама модель зрозумілою для тих, хто безпосередньо її використовуватиме.

Академік А.А. Дородніцин увів поняття ієрархії ММ. Згідно з принципами цієї ієрархії, кожна модель нижчого рівня не повинна суперечити моделі вищого рівня. На найнижчому рівні розміщено ММ конкретних процесів і простих явищ.

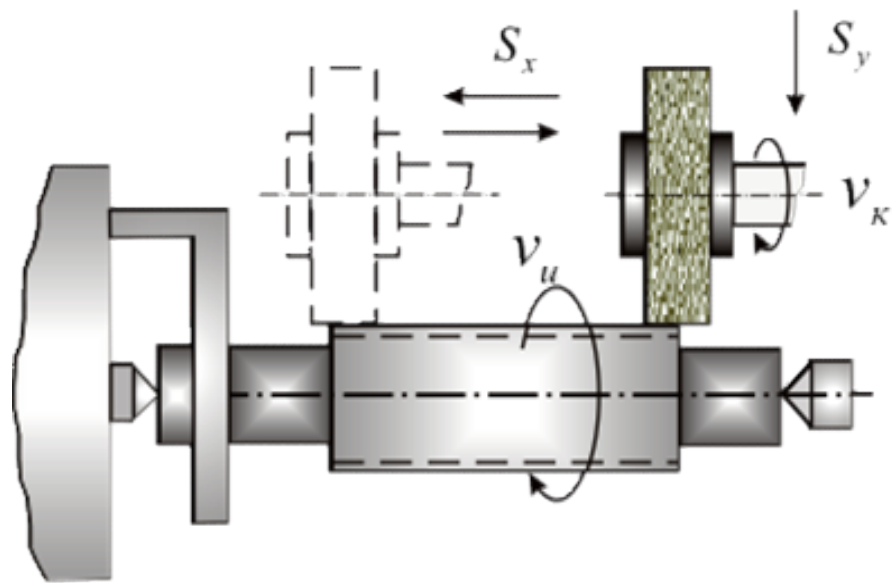
Моделювання процесів функціонування складних ТС включає такі основні етапи:

1. Постановка задачі моделювання системи.
2. Декомпозиція системи або її розчленування на підсистеми до необхідного рівня.
3. Змістовний опис роботи кожної з підсистем і системи в цілому.
4. Ухвалення припущень.
5. Розробка формалізованих схем і моделей.
6. Переробка формалізованих схем в ММ системи.
7. Перевірка адекватності і стійкості розробленої ММ.

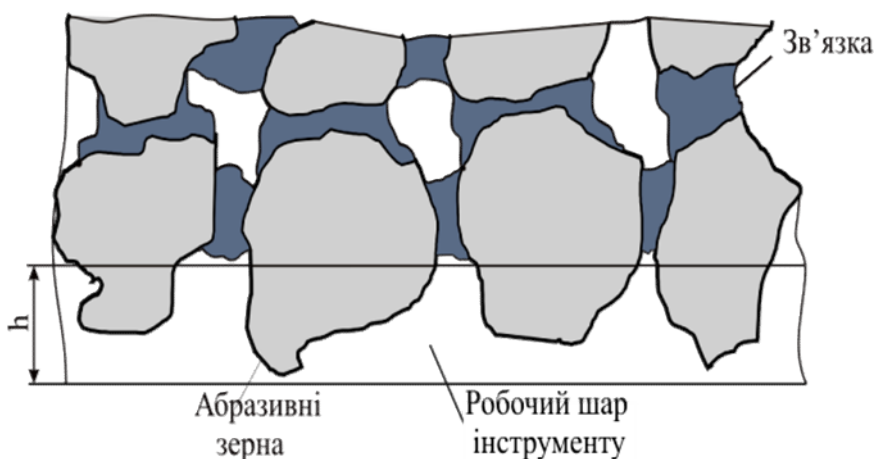
7.2. Декомпозиція систем, змістовний опис

При декомпозиції систему розділяють на окремі підсистеми й елементи. При цьому встановлюють всі зв'язки кожної з підсистем із навколишнім середовищем і один з одним. Декомпозиція є достатньо складним і трудомістким етапом. При проведенні декомпозиції часто виконується і змістовний опис роботи системи і підсистем, при якому дається достатньо докладний, фізично обґрунтований словесний опис процесів і структури складових її явищ, визначаються початкові умови. Цьому етапу приділяється достатньо велика увага. Помилки в змістовному описі призводять до отримання неадекватних ММ, до марної трати

часу науковця. Наведемо приклад декомпозиції і змістовного опису операції круглого зовнішнього шліфування (рис. 7.1).



а)



б)

Рисунок 7.1 – Схема круглого зовнішнього осцилюючого шліфування (а) і робочий шар інструменту (б)

При шліфуванні з поздовжньою подачею (осцилююче шліфування), як і при шліфуванні за методом врізання (див.рис.1.7.), кругу надають обертального руху з коловою швидкістю $v_k = 35...50 м/с$, деталі $v_u = 0,4...1,2 м/с$. Крім того, деталь разом зі столом верстата виконує зворотно-поступальний рух, що забезпечує обробку всієї поверхні. Поперечну подачу S надають шліфувальній бабці верстата або в кінці кожного проходу чи після одного подвійного

ходу. Для шліфування використовують спеціальний абразивний інструмент (шліфувальний круг), який виготовляють з абразивного матеріалу та зв'язки (рис.7.1, б). Як абразивний матеріал використовують речовини природного, штучного чи синтетичного походження високої міцності та твердості, порошки яких здатні обробляти поверхні інших твердих тіл: природний корунд, електрокорунд, карбіди кремнію, синтетичні алмази, ельбор та інше. Синтетичні матеріали отримують з використанням спеціальних технологій. Так, при виготовленні електрокорунда використовують шихту з природних бокситів та інших речовин. Електрокорунд містить 95...99% окису алюмінію. Карбід кремнію отримують в електропечах опору, він містить 97...99% SiC. Після плавки абразивний матеріал дроблять та розсіюють. При виготовленні інструменту абразивний порошок з потрібною величиною зерна змішують зі зв'язкою, виконують пресування заготовки потрібної форми та термічно, а потім механічно оброблюють. При встановленні на верстат круг балансують та правлять (обточують на верстаті алмазом металічним олівцем) для надання правильної геометричної форми. Робоча поверхня інструменту після правки (рис.7.1,б), виглядає, як сукупність вершин зерен, що виступають над зв'язкою інструменту.

При контакті робочої поверхні інструменту з матеріалом заготовки відбувається видалення припуску одночасно великою кількістю абразивних частинок, які заглиблюються в матеріал, що оброблюється, та зрізають найдрібніші стружки. Глибина різання зерном становить при чистовій обробці 5...15 мкм, при тонкому шліфуванні – 0,5...5 мкм.

Закономірності процесу різання матеріалу одиничним абразивним зерном співставні з процесом різання лезовим інструментом. При обробці пластичних матеріалів утворюється зливна та ступінчаста стружка, при обробці крихких – стружка сколювання. Однак, на відміну від лезових інструментів, абразивні інструменти не мають суцільних різальних кромки, оскільки чисельні абразивні зерна на робочій поверхні перебувають на деякій відстані одне від іншого. Зерна розташовані хаотично і мають неправильну геометричну форму з відмінними передніми

кутами. У процесі обробки різальні кромки зерен частково руйнуються та вириваються зі зв'язки круга, пори інструменту забиваються стружками матеріалу, що оброблюється, інструмент втрачає свою різальну здатність. Для відновлення різальної можливості періодично виконують правку круга.

За функціональними ознаками операція може бути розбита на підсистеми верстату, пристосування, інструменту, заготовки, МОР (рис. 7.2). Кожна з підсистем має свій набір властивостей, параметрів стану, історію розвитку, вектор вхідних і вихідних змінних, вектор збурюючих дій. Управління процесом здійснюється підсистемою верстата, в яку може бути включена і підсистема пристосування. При обробці на автоматизованому устаткуванні з метою забезпечення управління необхідно виділяти також підсистему числового програмного керування.

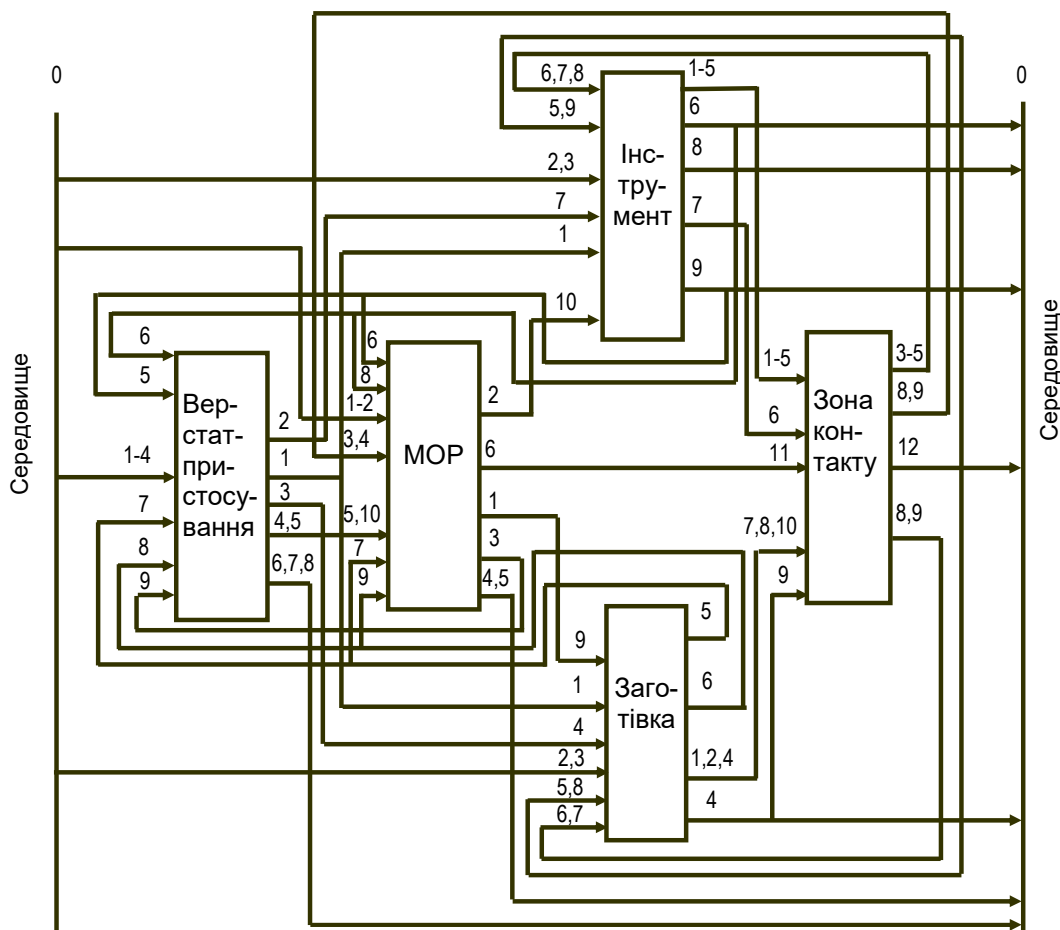


Рисунок 7.2. – Приклад схеми, що будується розробниками для виявлення зв'язків між підсистемами операції шліфування

Під час вмикання верстата його вузли і виконавчі елементи починають переміщуватися, змінюються координати (параметри стану) підсистем. Через вузли пристосувань рушійні сили і моменти передаються на входи підсистем заготовки, інструменту, МОР. При зближенні інструменту і заготовки внаслідок пружних деформацій у технологічній системі з'являється радіальний тиск інструменту на виріб, під дією якого абразивні зерна занурюються в оброблюваний матеріал, виникає зона контакту інструменту із заготовкою.

Виділення зони контакту в окрему підсистему (рис. 7.2) дещо умовне, оскільки вона є областю взаємного проникнення абразивних зерен в оброблюваний матеріал і виступів нерівностей заготовки в проміжки між зернами. В той же час в зоні контакту відбуваються складні процеси, не властиві зокрема ні інструменту, ні заготівці. При русі кромки інструменту окреслюють в заготовці поверхні різання. Ординати точок утворюють послідовність, яка є випадковим багатовимірним процесом. Сукупність таких поверхонь різання може розглядатися як випадкове поле.

Процес різання в зоні контакту супроводжується пластичними, пружними, температурними деформаціями, хімічною взаємодією оброблюваного матеріалу з матеріалом інструменту, компонентів МОР. Одночасно з копіюванням форми кромки виникають хвилі пластичної деформації, сколювання і виривання поверхневих шарів матеріалу заготовки, налипання і приварювання частинок матеріалу, загальмованого на ріжучих кромках інструменту і в порах круга. В результаті змінюються розміри раніше сформованих нерівностей. На поверхні з'являються подряпини, кратери, виступи, що за формою, розподілом і розмірами відносяться до різних сукупностей. Процеси пластичних, пружних деформацій, крихкого руйнування залежать від геометрії, кінематики і динаміки руху ріжучих кромки і тому можуть бути віднесені до вторинних процесів формоутворення. Їх випадкові поля, як правило, корельовані з сукупністю поверхонь різання.

Процеси стружкоутворення, контакту і тертя інструменту з оброблюваним матеріалом пов'язані з появою сил різання, виділенням великої кількості тепла, зносом і руйнуванням ріжучих кромки. Сили різання і тепловий потік

викликають пружні і температурні деформації інструменту, заготовки, вузлів верстата, пристосування, що призводить до зміни їх просторового розташування і відповідної зміни розмірів і форми зони контакту. Зношення і руйнування кромки зумовлює зміну їх числа, форми, розподілу, що, у свою чергу, впливає на параметри сукупності поверхонь різання, процеси стружкоутворення, параметри оброблюваної поверхні.

У структурній схемі (рис. 7.2) це відбито зворотними зв'язками, без урахування яких часто буває неможливою якісна і особливо кількісна оцінка процесу. Найбільш характерно це для чистових процесів обробки заготовок абразивними інструментами, для яких точність прогнозу повинна бути на порядок вищою, ніж для операцій попередньої обробки. При виконанні системно-структурного аналізу необхідним є опис властивостей підсистем, зв'язків між ними, законів функціонування підсистем і системи в цілому. Властивості підсистем включають: тимчасові, просторові, просторово-часові, фізико-механічні і хімічні характеристики. Вхідні і вихідні змінні відображають зв'язки (відношення) в системі і утворюють її структуру. Перехід вхідних змінних до вихідних здійснюється через параметри стану підсистем. Послідовний аналіз властивостей, зв'язків, станів, законів функціонування підсистем забезпечує їх повний просторово-часовий опис. Так, для підсистеми абразивного інструменту встановлюють:

1. Тимчасові характеристики (календар підсистеми): а) час роботи інструменту до повного зношення; б) стійкість інструменту між правками; в) час обробки заготовки; г) час проходу; д) час обороту заготовки; е) час обороту круга; ж) час проходження зерном зони контакту; з) нескінченно малий проміжок часу.

2. Вхідні змінні і початкові умови: а) початкове просторове положення; б) початкова геометрія робочої поверхні інструменту, фізико-механічні властивості зерна і зв'язки; в) початкова температура; г) рушійні сили і моменти; д) сили і моменти реакцій; е) швидкість зношування інструменту; ж) швидкість зношування і руйнування ріжучих кромки; з) тепловий потік із зони контакту; і) параметри, що

характеризують вплив на інструмент МОР; к) зміна кількості, геометрії і властивостей налипаючих частинок матеріалу.

3. Координати (параметри) стану: а) координати положення щодо системи; б) швидкості і прискорення руху інструменту і ріжучих кромок; в) поточна температура; г) поточні розміри, форма інструменту, число, форма, розподіл ріжучих кромок, пор; д) фізико-механічні і хімічні властивості матеріалів зерна і зв'язки; е) кількість, геометрія і властивість налипаючих частинок матеріалу.

4. Вихідні змінні: а) координати положення щодо заготовки; б) швидкості руху інструменту і ріжучих кромок; в) розміри, форма інструменту, число, форма, розподіл ріжучих кромок; г) фізико-механічні і хімічні властивості матеріалу зерна і зв'язки; д) кількість, геометрія і властивості налипаючих частинок матеріалу; е) параметри теплового потоку в МОР, верстат і середовище.

Докладний аналіз основних параметрів стану, вхідних і вихідних змінних для зони контакту подано в табл. 7.1. На структурній схемі (рис. 7.2) вхідні і вихідні змінні відмічені відповідними цифрами, що дозволяє дати наочне представлення зв'язків між підсистемами. Так, в підсистему зони контакту надходять вихідні змінні з підсистем заготовки 1, 2, 4, інструменту 1-5.

Таблиця 7.1 - Основні вхідні змінні, параметри стану і вихідні змінні зони контакту заготовки з інструментом операції шліфування

Вхідні змінні, початкові умови	Параметри стану	Вихідні змінні
1	2	3
1.Просторове розташування інструменту 2.Швидкості руху інструменту і ріжучих кромок 3.Розміри, форма інструменту, число,	1.Форма і розміри зони 2.Параметри процесу стружкоутворення 3.Реакції на зерно, зв'язку, оброблюваний	1.Сили реакції на інструмент, заготовку, МОР 2.Тепловий потік в інструмент, заготовку, стружку, МОР, навколишнє

Продовження табл. 7.1

1	2	3
<p>форма, розподіл ріжучих кромок</p> <p>4.Властивості матеріалів зерна і зв'язки</p> <p>5.Параметри частинок матеріалу, що налипають на інструмент</p> <p>6.Сили, що діють від інструменту на заго-товку.</p> <p>7.Просторове розташування заготовки</p> <p>8.Швидкості руху заготовки</p> <p>9.Розміри, форма оброблюваної поверхні, розміри, форма, число, розподіл одиничних рисок. Властивості матеріалу поверхневого шару</p> <p>10.Сили, що діють від заготовки на інструмент</p> <p>11.Охолоджуюча, змащувальна і хімічна дія МОР</p>	<p>матеріал, МОР</p> <p>4.Поточні швидкості переміщень ріжучих кромок в оброблюваному матеріалі</p> <p>5.Форма, число і розподіл поверхонь різання</p> <p>6.Поточні розміри і форма поверхонь різання</p> <p>7.Параметри процесів пластичних, пружних, температурних деформацій</p> <p>8. Параметри теплового поля</p> <p>9.Швидкість зношування абразивного матеріалу</p> <p>10.Розміри і форма одиничних зрізів</p> <p>11.Вірогідність виривання і руйнування зерна</p> <p>12.Форма і розміри частинок абразиву, що сколюються</p>	<p>середовище</p> <p>3.Швидкість зносу інструменту</p> <p>4.Швидкість зношування ріжучих кромок</p> <p>5.Зміна геометрії, числа і властивостей частинок матеріалу, що налипають на інструмент</p> <p>6.Швидкість знімання матеріалу</p> <p>7.Зміна розмірів, форми, шорсткості поверхні, фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалу</p> <p>поверхневого шару заготовки</p> <p>8.Зміна хімічного складу МОР</p> <p>9.Форма і розміри одиничних стружок і частинок абразиву</p>

7.3. Прийняття припущень, розробка розрахункових схем

Спрощення структури і процесів модельованої системи проводять при синтезі моделі за рахунок обліку тільки невеликого числа найбільш важливих і відкидання неістотних змінних. З іншого боку, модель повинна володіти певним ступенем адекватності системі, що вивчається, забезпечувати необхідну точність отримуваної інформації, бути гнучкою, тобто до деякої міри інваріантною кількісним і якісним змінам параметрів модельованого об'єкта. Модель повинна бути також конструктивною, тобто дозволяти приймати рішення про якнайкращі варіанти структури, схеми функціонування, значеннях параметрів. Таким чином, допущення приймаються з метою спрощення ММ. Обумовлюється, які чинники можуть бути виключені, як такі, що мало впливають на процес. Наприклад, при вивченні руху автомобіля можна вважати, що щільність повітря, вміст у ньому кисню постійні. За механічної обробки за час обробки однієї поверхні часто вважають, що інструмент не змінює своєї геометрії.

Кожне з допущень повинне бути строго обгрунтованим. Рекомендується провести оцінку похибки ММ при ухваленні того або іншого допущення.

Як правило, виведення ММ на мікрорівні супроводжується складанням розрахункових схем. Прикладом такої схеми може служити схема, яка представлена на рис. 5.3. Розрахункові схеми повинні містити всі вхідні змінні, всі параметри стану і всі вихідні змінні, які будуть включені до математичної моделі системи. Найбільш наочні приклади розрахункових схем можна знайти в курсі фізики.

7.4. Розробка формалізованих схем і структур моделей

При моделюванні систем використовується різноманітний математичний апарат від найпростішого до найбільш складного. Все залежить від складності розв'язуваного завдання. Так, наприклад, якщо поставлено завдання визначити частоту обертання шпинделя верстата за частотою обертання первинного валу коробки швидкостей

верстата (рис. 7.3), то модель подається у вигляді простих алгебраїчних залежностей.

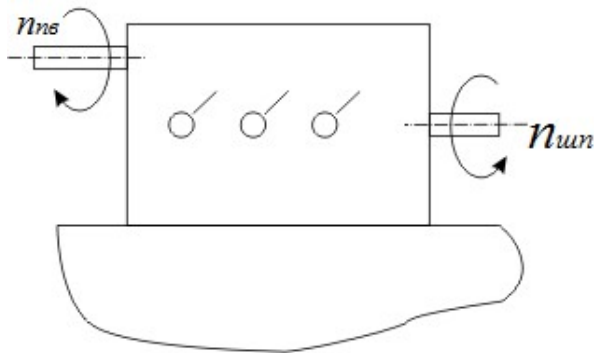


Рисунок 7.3 – Схема коробки швидкостей верстата

швидкостей, при зміні положень яких або переміщуються зубчасті колеса, або перемикаються муфти зчеплення. Параметрами стану підсистеми є частоти обертання валів коробки, що визначаються передатними відношеннями $u_1, u_2 \dots u_n$, де n – число кінематичних передач від первинного валу до шпинделя верстата. Вихідна змінна підсистеми – частота обертання шпинделя $n_{шп}$ обчислюється

$$n_{шп} = n_{не} u .$$

Якщо поставлено завдання досліджувати динаміку роботи коробки швидкостей, то математична модель значно ускладнюється.

Тільки для одного валу, що має одне зубчасте колесо (рис. 7.4), вібропереміщення (параметри стану) описуються системою трьох диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} I\ddot{\varphi} &= M_g(t) + mr\ddot{x} \sin \varphi - mr\ddot{y} \cos \varphi \\ m\ddot{x} + kx &= mr\varphi^2 \cos \varphi + mr\ddot{\varphi} \sin \varphi \\ m\ddot{y} + ky &= mr\varphi^2 \sin \varphi - mr\ddot{\varphi} \cos \varphi \end{aligned} \right\} ,$$

де I, m, r – момент інерції, маса й ексцентриситет зубчастого колеса; k – коефіцієнт жорсткості; φ – миттєвий кут обертання зубчастого колеса,

Вхідною змінною коробки швидкостей (підсистеми верстата) є частота обертання первинного валу $n_{не}$, яка визначається частотою обертання двигуна і параметрами передачі двигун – вал. До дій підсистеми, що здійснює керування, відносяться ручки

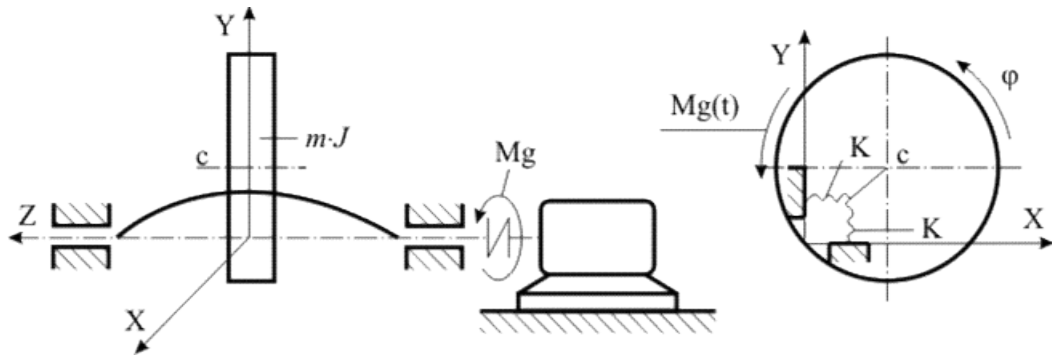


Рисунок 7.4 – Схема для розрахунку вібропереміщення вала коробки швидкостей

Ще складніші моделі використовуються при описі технологічних процесів і операцій. Так, при моделюванні процесів шліфування застосовують диференціальне й інтегральне числення, теорію ймовірності і випадкових процесів, теорію поля, теорії оптимального і автоматичного управління. У загальному вигляді для абразивного інструменту формалізована модель може бути записана такими функціями переходів і виходів

$$Z_u = Q_u(Z_0^u, X_c^u, Y_{np}^u, Y_{ст}^u, Y_{зк}^u, Y_{сож}^u, t); \quad (7.1)$$

$$Y_u = F_u(Z_u, t), \quad (7.2)$$

де індексами u позначена належність векторів підсистемі інструменту, індексами $c, np, ст, зк, сож$ - належність векторів середовищу, пристосуванню для правки круга, верстата, зоні контакту, МОР.

Найбільш раціональним для опису динаміки зміни параметрів стану ТС є застосування математичного апарату лінійної алгебри з використанням диференціальних рівнянь. Це пояснюється, по-перше, наявністю добре розвинутого аналітичного апарату і чисельних методів розв'язку звичайних диференціальних рівнянь; по-друге, наявністю загальнодоступних якісних методів дослідження рішень, зокрема методів оцінки стійкості, аналізу поведінки рішень в околицях особливих точок і т. д.; і, по-третє, прозорістю і природністю звичайного диференціального рівняння як ММ для опису процесів переходу реальних об'єктів з одного стану в інший під дією зовнішніх і внутрішніх причин. На основі таких моделей успішно вирішуються багато завдань автоматичного управління. Проте багато процесів в ТС

описуються залежностями нелінійного вигляду. В цьому випадку завдання аналізу і синтезу систем значно ускладнюється. Так, наприклад, знімання матеріалу на операціях круглого зовнішнього шліфування Δr обчислюється за рівнянням

$$\Delta r = \frac{t_{\phi}^2}{1,478t_{\phi} + \frac{13,66v_u}{K_c(v_k \pm v_u)n_z\sqrt{D_s\rho_s}}}, \quad (7.3)$$

де t_{ϕ} – фактична глибина різання; v_u – швидкість виробу (деталі); v_k – швидкість круга; n_z – число абразивних зерен на одиниці робочої поверхні інструменту; D_s – еквівалентний діаметр; ρ_s – радіус заокруглення при вершині абразивного зерна; K_c – коефіцієнт стружкоутворення, який враховує, що не весь метал відокремлюється з об'єму різу, а частина його витісняється, утворюючи на краях різу навалювання.

У залежності (7.3) t_{ϕ} , v_k , v_u можуть змінюватися протягом обробки не тільки партії, але і однієї заготовки. Швидкість круга зменшується із зменшенням діаметру круга при його зношуванні, фактична глибина різання залежить від подачі, яка змінюється при обробці поверхні по циклу (див. рис. 1.8).

При обробці ряду виробів, наприклад, валків холодної прокатки, подача і швидкість круга можуть змінюватися безперервно, що призводить до відповідної зміни фактичної глибини різання.

Для приведення нелінійних моделей до лінійного вигляду, з метою можливості використання математичного апарату лінійної алгебри, проводять їх лінеаризацію. Найчастіше в основу лінеаризації береться розкладання аналітичної неперервної функції в ряд Тейлора. Приймається допущення, що зміна параметра відбувається в межах малих відхилень в околиці точки, в якій система знаходиться в даний момент часу.

Розглянемо узагальнений приклад лінеаризації, представленій диференціальним рівнянням другого порядку:

$$F(y, \dot{y}, \ddot{y}, x, \dot{x}) = 0, \quad (7.4)$$

де x і y – вхідна і вихідна змінні.

Нехай значення змінних в початковій точці, в околиці

якої ми досліджуємо відхилення, будуть $y=y_0$, $x=x_0$ і відповідно $\dot{y}=\dot{y}_0$, $\dot{x}=\dot{x}_0$. Рівняння (7.4) для вказаної точки прийме вигляд

$$F_0(y_0, \dot{y}_0, \ddot{y}_0, x_0, \dot{x}_0) = 0. \quad (7.5)$$

При малих відхиленнях від вибраної точки матимемо:

$$y = y_0 + \Delta y; \quad \dot{y} = \dot{y}_0 + \Delta \dot{y}; \quad x = x_0 + \Delta x; \quad \dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x}.$$

Підставляючи ці вирази в рівняння (7.4) і розкладаючи неявну функцію в ряд Тейлора, прийдемо до рівняння

$$F_0(y_0, \dot{y}_0, \ddot{y}_0, x_0, \dot{x}_0) + \Delta x \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]_0 + \Delta \dot{x} \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right]_0 + \Delta y \left[\frac{\partial F}{\partial y} \right]_0 + \Delta \dot{y} \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right]_0 + \Delta \ddot{y} \left[\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right]_0 + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \left[\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right]_0 + \frac{1}{2} (\Delta y)^2 \left[\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right]_0 + \dots = 0$$

Неважко показати, що $\Delta \dot{y} = (\Delta y)'$ і $\Delta y'' = (\Delta y)''$.

Відкидаючи члени з малостями другого порядку й вище і враховуючи рівняння (7.5), отримаємо рівняння малих відхилень в лінеаризованому вигляді:

$$\Delta x \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]_0 + \Delta \dot{x} \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right]_0 + \Delta y \left[\frac{\partial F}{\partial y} \right]_0 + \Delta \dot{y} \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right]_0 + \Delta \ddot{y} \left[\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right]_0 = 0.$$

Розглянемо приклад, лінеаризації, наведений у роботах Петракова Ю.В. Лінеаризувати залежність сили різання (її складових) від параметрів різання в точці з координатами: глибина різання $H_0=1$ мм, подача $S_0=0,23$ мм/об, швидкість різання $V_0=100$ м/хв. Оцінити точність лінеаризації при відхиленні цих параметрів: $\Delta H=0,3$ мм, $\Delta S=0,03$ мм/об, $\Delta V=20$ м/хв.

Залежність складової сили різання, як відомо, має вигляд

$$P = C_p H^x S^y V^n k,$$

де приймемо $C_p=3000$; $x=0,9$; $y=0,6$; $n=-0,3$; $k=1$.

Згідно із загальною формулою лінеаризації, лінійна залежність у межах малих відхилень параметрів повинна мати такий вигляд:

$$\Delta P = k_1 \Delta H + k_2 \Delta S + k_3 \Delta V.$$

Визначимо коефіцієнти, які є значеннями частинних похідних першого порядку в деякій точці лінеаризації:

$$k_1 = \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right)_0 = C_p x H^{x-1} S^y V_0^n k = 3000 \times 0,9 \times 1^{-0,1} \times 0,23^{0,6} \times 100^{-0,3} = 280,8$$

$$k_2 = \left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_0 = C_p y H^x S^{y-1} V_0^n k = 3000 \times 0,6 \times 1^{0,9} \times 0,23^{-0,4} \times 100^{-0,3} = 813,9$$

$$k_3 = \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_0 = C_p n H^x S^y V_0^{n-1} k = 3000 \times (-0,3) \times 1^{0,9} \times 0,23^{0,6} \times 100^{-1,3} = -0,9$$

Таким чином, лінеаризована залежність має вигляд:

$$\Delta P = 280,8 \cdot \Delta H + 813,9 \Delta S - 0,9 \Delta V.$$

Тепер оцінимо точність лінеаризації. Для цього спочатку розрахуємо силу різання в точці лінеаризації за нелінійною залежністю (т. А на рис. 7.5)

$$P_0 = C_p H_0^x S_0^y V_0^n k = 3000 \times 1^{0,9} \times 0,23^{0,6} \times 100^{-1,3} \times 1 = 312H$$

Потім розрахуємо силу різання знову за нелінійною залежністю в заданій точці оцінки (т. В на рис. 7.5):

$$P_i = C_p H_B^x S_B^y V_B^n k = 3000 \times 1,3^{0,9} \times 0,33^{0,6} \times 120^{-0,3} \times 1 = 465H$$

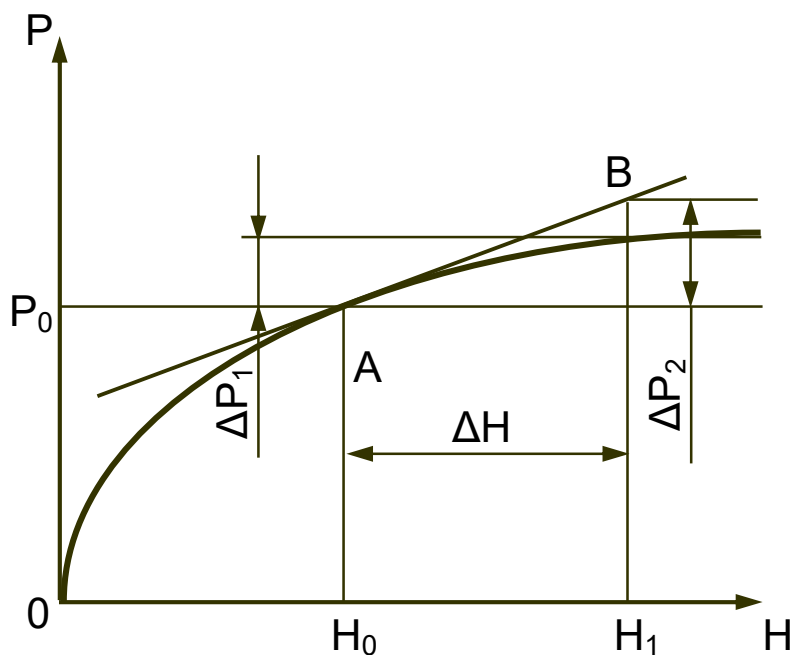


Рисунок 7.5. До оцінки точності лінеаризації

Визначимо різницю згідно з нелінійними залежностями:

$$\Delta P_1 = P_n - P_0 = 465 - 312 = 153 \text{ Н}$$

Далі розраховуємо цю різницю згідно з лінійною залежністю:

$$\Delta P_2 = 280.8 \times 0.3 + 813.9 \times 0.1 - 0.9 \times 20 = 147.6 \text{ Н}.$$

Таким чином, точність такого методу лінеаризації при заданих відхиленнях складає:

$$\delta = \frac{153 - 147,6}{153} \times 100 \% = 3,5\% .$$

З відомих підходів моделювання найбільш ефективним для аналізу ТС є підхід, заснований на аналізі простору станів системи. Його суть полягає в описі змін деякою кількістю диференціальних рівнянь першого порядку відносно змінних стану з початковими умовами, що визначаються з рівнянь перехідних станів. Поняття стану вперше ввів Тюрінг у 1936 р. Початок широкому використанню цього підходу для розв'язку задач автоматизації управління поклали російські учені А.А. Фельдбаум, А.М. Летов, А.И Лурье. Значний вплив на розвиток теорії в даній області надали роботи Кальмана.

При використанні цього підходу стан лінійної безперервної системи визначається рівняннями:

$$\dot{z}(t) = A(t)z(t) + B(t)u(t); \quad (7.6)$$

$$y(t) = D(t)z(t) + G(t)u(t), \quad (7.7)$$

де $z(t)$ і $\dot{z}(t)$ - вектори параметрів стану системи і їх похідних; $u(t)$ - вектор дій, що управляють, до складу якого включені і вхідні змінні; $y(t)$ - вектор вихідних змінних; $A(t)$ - матриця коефіцієнтів; $B(t)$ - матриця управління; $D(t)$ - матриця виходу; $G(t)$ - матриця обходу системи.

Для лінійної системи з випадковими параметрами рівняння стану (7.6) може бути записане у вигляді

$$\dot{z}(t) = A(r)z(t) + B(r)u(t),$$

де матриці A і B є функціями вектора випадкових параметрів r .

Рівняння (7.6) і (7.7) є лінійними аналогами функцій переходів (7.1) і виходів (7.2). При аналізі детермінованих процесів вважається, що матриці A і B не залежать від збурень. Методи розв'язку залежностей (7.6) і (7.7)

визначаються складом змінних і матриць коефіцієнтів. Якщо параметри стану системи не залежать один від одного, то система розпадається на ряд незалежних рівнянь. Інакше, система рівнянь повинна бути доповнена рівняннями, що встановлюють зв'язок параметрів один з одним. Виведення рівнянь стану є початковим етапом аналізу і синтезу систем у сучасній теорії управління. Розглянемо загальний хід аналізу простору станів системи.

Лінійна стаціонарна система або процес можуть бути описані системою лінійних диференціальних рівнянь, яка у векторно-матричній формі представляється у вигляді

$$\frac{dv(t)}{dt} = Av(t), \quad (7.8)$$

де A – матриця коефіцієнтів; $v(t)$ – вектор стовбець, що є вхідними змінними u і координати z системи:

$$v = \begin{bmatrix} u \\ z \end{bmatrix}.$$

Якщо вхідні змінні розглядати спільно із змінними стану системи, тобто включити їх до числа координат системи, то вектор v можна вважати вектором стану системи збільшеної розмірності.

Як ілюстрацію розглянемо систему другого порядку, що описується рівнянням

$$\ddot{z}(t) + a\dot{z}(t) + bz(t) = u(t).$$

Щоб записати це рівняння у векторно-матричній формі, покладемо

$$z_1 = z \text{ і } z_2 = \dot{z}_1$$

і тоді отримаємо

$$\dot{z}_1 = z_2; \quad (7.9)$$

$$\dot{z}_2 = u - bz_1 - az_2. \quad (7.10)$$

Розглянемо спочатку випадок $u=0$. Позначаючи $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b & -a \end{bmatrix}$, рівняння (7.9) і (7.10) запишемо у вигляді

$$\frac{dz}{dt} = Az.$$

Нехай тепер вхідна дія u має вигляд ступінчастої функції. Тоді

$$\begin{aligned}\dot{u} &= 0; \\ \dot{z}_1 &= z_2; \\ \dot{z}_2 &= u - bz_1 - az_2.\end{aligned}$$

Позначимо

$$v = \begin{bmatrix} u \\ z \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -b & -a \end{bmatrix}$$

і рівняння (7.9), (7.10) приведемо до вигляду

$$\frac{dv}{dt} = Av,$$

де A – матриця коефіцієнтів системи збільшеної розмірності.

Нехай тепер задані початкові умови для рівняння (7.8), тобто відомий вектор $v(0^+)$. Застосовуючи перетворення Лапласа до рівняння (7.8), знаходимо

$$sV(s) - v(0^+) = AV(s)$$

або

$$[sI - A]V(s) = v(0^+),$$

Звідси знаходимо, що зображення за Лапласом вектора стану $v(t)$ має вигляд

$$V(s) = [sI - A]^{-1} v(0^+), \quad (7.11)$$

де I – одинична матриця.

Застосовуючи зворотне перетворення Лапласа до рівняння (7.11), отримуємо

$$v(t) = L^{-1} \{ [sI - A]^{-1} \} v(0^+). \quad (7.12)$$

Позначаючи

$$\hat{O}(t) = L^{-1} \{ [sI - A]^{-1} \},$$

рівняння (7.12) запишемо

$$v(t) = \hat{O}(t)v(0^+). \quad (7.13)$$

Матриця $\Phi(t)$ називається розширеною вектором-стовбцем переходу системи.

Разв'язок рівняння (7.8) має вигляд

$$v(t) = e^{At}v(0^+). \quad (7.14)$$

Порівнюючи формули (7.13) і (7.14), знаходимо

$$\hat{O}(t) = e^{At};$$

$$\hat{O}(t) = L^{-1} \{ [sI - A]^{-1} \},$$

що дозволяє обчислити $\Phi(t)$.

Для дискретних систем рівняння (7.6) і (7.7) записуються у вигляді

$$Z(t) = AZ(t-1) + BU(t) + C\Omega(t); \quad (7.15)$$

$$Y(t) = D(Z(t)). \quad (7.16)$$

Згідно із залежністю (7.15), стан системи у момент часу t визначається її станом у момент часу $t-1$ і значеннями параметрів управління і збурення у момент часу t . Особливістю дискретних процесів є наявність переривників, які визначають тривалість інтервалів часу від $t-1$ до t . Для технологічних процесів і окремих технологічних операцій таких тимчасових переривників може бути досить багато. Так, для токарних операцій можна виділити: час обробки однієї поверхні; час обробки однієї заготовки; час стійкості інструменту; час нормальної роботи пристосування; час роботи верстата до капітального ремонту.

За класифікацією Ю.Ту, технологічні операції обробки різанням можуть бути віднесені до нестандартних систем із змінною частотою переривання. Тимчасова шкала квантування, наприклад, операції шліфування, за своєю структурою достатньо складна і містить від 10 до 12 частот переривання. Сукупність частот переривання для процесу врізного шліфування може бути представлена матрицею

$$T = \begin{bmatrix} T_{kk} \\ T_{ok} \\ T_{kz} \\ T_{oz} \\ T_{\zeta} \\ T_o \\ T_{un} \\ T_u \\ T_{np} \\ T_{cm} \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \text{де } T_{kk} - \text{ час контакту базової ділянки} \\ \text{поверхні круга із заготовкою;} \\ T_{ok} - \text{ час одного оберту круга;} \\ T_{kz} - \text{ час контакту ділянки заготовки з} \\ \text{кругом;} \\ T_{oz} - \text{ час одного оберту заготовки;} \\ T_{\zeta} - \text{ час етапу циклу обробки;} \\ T_o - \text{ основний час обробки однієї} \\ \text{заготовки;} \\ T_{un} - \text{ час роботи інструменту між} \\ \text{правками;} \\ T_u - \text{ час роботи інструменту до повного} \\ \text{зношення;} \\ T_{np} - \text{ час роботи пристосувань до} \end{array}$$

заміни або ремонту;

T_{cm} – час роботи верстата до технічного обслуговування або ремонту.

Зміна параметрів стану системи описується при цьому різницевиими залежностями. На мікрорівні усередині інтервалу часу від $t-1$ до t система підпорядковується законам безперервних систем. Методи аналізу простору станів для дискретних систем детально проаналізовані в роботі Ю.Ту. Загальний хід аналізу простору станів для дискретних систем полягає у такому.

Кожен з періодів переривання вищої тривалості (порядку) включає декілька інтервалів наведеного нижче порядку. Сукупність інтервалів утворюють ієрархічну структуру. Тривалість інтервалів непостійна і залежить не тільки від конструктивних особливостей елементів системи і законів зміни дій, що управляють, але й від стану системи у момент часу t . Щоб зв'язати послідовні стани системи в часі, зробимо допущення, що похідна вектора стану у момент часу t не залежить від передісторії розвитку системи, а тільки від її поточного стану. Це дозволяє описати процес векторно-матричним диференціальним рівнянням

$$z'(t) = f[z(t), u(t), t], \quad (7.17)$$

де f - векторна функція змінних стану.

Для інтервалу тривалістю τ диференціальне рівняння (7.17) для нестандартної дискретної системи має вигляд

$$\frac{dv(\lambda)}{d\lambda} = Av(\lambda), \quad (7.18)$$

де A - розширена матриця коефіцієнтів системи; $\lambda = t - nT$ и $0 < \lambda \leq T$; $v(\lambda)$ - вектор-стовбець з вхідних змінних u_i і параметрів z_j системи

$$v(\lambda) = \begin{bmatrix} u(\lambda) \\ z(\lambda) \end{bmatrix}; \quad u(\lambda) = \begin{bmatrix} u_1(\lambda) \\ u_2(\lambda) \\ \vdots \\ u_n(\lambda) \end{bmatrix}; \quad z(\lambda) = \begin{bmatrix} z_1(\lambda) \\ z_2(\lambda) \\ \vdots \\ z_k(\lambda) \end{bmatrix}.$$

Розв'язок рівняння (7.18) має вигляд

$$v(\lambda) = \Phi(\lambda)V(0^+), \quad (7.19)$$

де $V(0^+)$ – вектор початкових умов; $\Phi(\lambda)$ - розширена

матриця переходу визначається $\Phi(\lambda)=L^{-1}[sI-A]^{-1}$, (L^{-1} - перетворення Лапласа; I – одинична матриця).

У термінах змінної t рівняння (7.19) набуде вигляду

$$v(t)=\Phi(t-nT)v(nT^+). \quad (7.20)$$

Замінюючи в рівнянні (7.20) $v(nT^+)=Bv(nT)$ (B - матриця початкових умов), і вводячи позначення $H(t-nT)=\Phi(t-nT)B$, остаточно отримаємо

$$v(t)=H(t-nT)v(nT).$$

Розглядаючи послідовні стани системи при $n=0$; $n=1$; ... $n=n-1$ і проводячи пряме і зворотнє Z - перетворення отримаємо загальний розв'язок рівняння стану системи

$$v(nT)=Z^{-1}[I-z^{-1}H(T)]^{-1} \cdot v(0). \quad (7.21)$$

Узагальненням рівняння (7.21) на випадок дискретної системи, що має основний період переривання і переривання вищої частоти, отримана залежність

$$V(t)=\Psi(t-nT)V(nT), \quad (7.22)$$

де $\Psi(t-nT)$ визначається рекурентним співвідношенням

$$\Psi_i(t-nT)=H_i(t-nT-t_i)H_{i-1}(t_i-t_{i-1})\dots H_1(t_2-t_1)H_0(t_1),$$

де T – тривалість основного періоду переривання; t_1, t_2, \dots, t_i - тривалість інтервалів переривання вищої частоти, мають різну тривалість.

Залежність (7.22) дозволяє повністю описати поведінку системи на всіх інтервалах основного періоду. Вона зручна для реалізації на сучасних ЕОМ, оскільки припускає послідовний розв'язок системи у просторі часу t . Таким чином, задача аналізу поведінки системи зводиться до послідовного розрахунку її параметрів в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_i на інтервалах переривання T_1, T_2, \dots, T_N .

Залежність (7.22) отримана за умови $v(nT^+)=v(nT^-)$. При функціонуванні багатьох ТС, наприклад при обробці матеріалів різанням, після переривання проводиться або часткове, або повне відновлення параметрів системи або її підсистем (заміна заготовки, правка круга, заміна інструменту, пристосування). У цьому випадку зміна i -го параметра системи може бути представлено залежністю

$$z_{ij}(\tau)=z_{ij-1}+A_{ij-1}(j-1)+A_{zij}\left(\tau-\sum_{k=1}^{j-1}\tau_{\delta k}\right),$$

де A_{ij-1} - оператор, що враховує відновлення i -го параметра системи після виконання $j-1$ -го циклу (перед початком j -го циклу); A_{zij} - оператор, що визначає зміну параметра системи при роботі в j -ом циклі; τ_{ok} - час виконання k -го циклу.

Оператори відновлення і зміни параметрів стану ТС можуть істотно залежати від номера виконуваного циклу. Так, наприклад, правка круга (відновлення його робочої поверхні) при шліфуванні може виконуватися або після обробки однієї, або партії деталей. Відновлення не завжди є повним. Якщо, наприклад, після обробки десяти деталей за рахунок правки стан робочого шару інструменту (число ріжучих кромки, їх розподіл по глибині шару, виступ над рівнем зв'язки) відновлюється, то радіус круга зменшується (на 1...2 мм). Внаслідок цього знижується швидкість різання на 0,2...0,5%. На перший погляд, це є неістотним, але потрібно врахувати, що одним кругом до повного зношення обробляють 1000...3000 деталей і його радіус від правки до правки зменшується від 375 мм до 200 мм. Це призводить до зниження швидкості різання відповідно в 1,9 рази.

У зв'язку із зміною параметрів стану час одного циклу також може істотно змінюватися. Так, при оптимальному управлінні рекомендується розраховувати закони зміни дій, що управляють, для кожного циклу, з урахуванням фактичного стану системи.

Розв'язок залежності (7.22) може бути спрощеним за рахунок використання принципів паралельного програмування, заснованих на можливості розгляду багатовимірної системи як сукупності n одновимірних систем. Це дозволяє проводити незалежну оцінку впливу вхідних змінних на виходи операції. Крім того, аналіз отриманих залежностей показує, що при проведенні такої оцінки необхідно обчислювати не тільки абсолютні значення вихідних змінних, але і перші, а у ряді випадків і другі похідні.

Один і той же процес може розглядатися як дискретний, так і безперервний. Дано чисельну оцінку можливості заміни дискретних моделей процесів на безперервні. Для аналізу візьмемо для процесу шліфування

інтервал з найменшою тривалістю T_{kk} (час контакту базової ділянки поверхні круга із заготовкою).

Базова ділянка поверхні абразивного інструменту визначається числом, формою, розподілом різальних кромek (див. рис. 7.1 б). При контакті із заготовкою змінюються всі параметри базової ділянки. Простежимо за зміною числа різальних кромek n_z (числа зерен на поверхні круга в процесі обробки в робочому шарі інструменту h). Для i -го контакту воно визначається за рівнянням

$$n_{zi} = n_{zi-1} + z_{zi} - n_{zi} P_{pi}, \quad (7.23)$$

де n_{zi-1} и n_{zi} - число зерен після $i-1$ -го і i -го контакту; z_{zi} - число зерен, що з'являються на поверхні при зносі круга з глибинних шарів інструменту; P_{pi} - ймовірність руйнування і вивання зерна при i -тому контакті.

У загальному випадку z_{zi} залежить від числа зерен на поверхні після правки n_0 , закону розподілу зерен по глибині інструменту, радіального зношення круга P_{pi} - від міцності закріплення зерен і сил різання, що виникають в зоні контакту, які є випадковими величинами. Якщо прийняти z_{zi} і P_{pi} постійними, то розв'язок залежності (7.23) приводить до рекурентного співвідношення:

$$n_{zi} = n_{z1} + \left(n_{z1} - \frac{z_3}{P_p} \right) \left\{ -1 + \left[1 - iP_p + \frac{i(i-1)}{2!} P_p^2 + \dots + (-1)^j \frac{i(i-1)\dots(i+1-j)}{2!} P_p^j + (-1)^{i-1} P_p^{i-1} \right] \right\}.$$

Члени в квадратних дужках є біномом з позитивним показником, на підставі цього, вважаючи $i = \nu_k \tau$

$$n_z = \frac{z_3}{P_p} + \left(n_{z0} - \frac{z_3}{P_p} \right) (1 - P_p)^{\nu_k \tau}, \quad (7.24)$$

де ν_k - частота обертання круга; τ - час роботи круга після правки.

Розглянемо безперервний процес $n_z(\tau)$. Для цього в рівнянні (7.23) замінимо n_{zi} на $n_{zi-1} + \Delta n_{zi}$, після перетворень отримаємо

$$(1 - P_p) \Delta n_{zi} + n_{zi-1} P_p - z_3 = 0.$$

Вважаючи $\Delta n_z = n'_z \tau_\epsilon$, де τ_ϵ - час контакту поверхні круга із заготовкою, отримаємо диференціальне рівняння

$$n'_z + \frac{P_p}{\tau_k (1 - P_p)} n_z - \frac{z}{\tau_k (1 - P_p)} = 0.$$

Розв'язок рівняння за початкових умов $n_z(0^+)$ має вигляд

$$n_3(\tau) = \frac{z_3}{P_p} + \left(n_{30} - \frac{z_3}{P_p} \right) e^{-P_p \nu_k \tau}. \quad (7.25)$$

У табл. 7.2 наводиться порівняння значень $n_3(\tau)$, розрахованих за залежностями (7.24) і (7.25) при $n_0 = 5.2 \cdot 10^6$ $1/\text{м}^2$, $P_p = 0.1$ і 0.01 , $\nu_k = 32$ Гц, $z_3/P_p = 2 \cdot 10^6$ $1/\text{м}^2$.

Таблиця 7.2 - Значення $n_3(\tau)$, отримані за залежностями (7.24) і (7.25)

Час роботи інструменту, τ	Число контактів, m	Розрахункові значення $n_3(\tau)$			
		Залежність (7.24)		Залежність (7.25)	
		$P_p = 0.1$	$P_p = 0.01$	$P_p = 0.1$	$P_p = 0.01$
0.25	8	4.3725	4.9526	4.4388	4.9539
0.50	16	2.5930	4.7247	2.6461	4.7267
1.00	32	2.1100	4.3199	2.1306	4.3235
2.00	64	2.0038	3.6819	2.0054	3.6877
4.00	128	2.0000	2.8840	2.0000	2.8896
8.00	256	2.0000	2.2442	2.0000	2.2474
16.00	512	2.0000	2.0186	2.0000	2.0191

При заміні дискретної моделі на безперервну для даного прикладу відхилення $n_3(\tau)$ складають до 1.5%, що у ряді випадків є допустимим. Відхилення збільшуються з підвищенням інтенсивності процесу шліфування. У розглянутому прикладі ми вважали, що z_3 і P_p постійні. Насправді вони нелінійно залежать від дії, що управляє. З урахуванням цього, похибка безперервної моделі стає ще більшою, тому для аналізу процесу шліфування слід використовувати дискретну модель.

Вплив збурень в залежності (7.6) визначається зміною значень коефіцієнтів матриць. У рівнянні стану дискретних систем (7.15) вони представлені додатковим членом. Склад збурень може бути достатньо різноманітним. Виділяють зовнішні і внутрішні перешкоди. Зовнішні перешкоди виявляються у відхиленнях від норми дій на складну систему з боку зовнішнього середовища. Поширеними прикладами зовнішніх перешкод, що впливають на роботу складних

систем, є атмосферні і промислові шуми в радіоприймальних пристроях, інтенсивний рух пішоходів в роботі транспорту, порушення режимів постачання сировини та складових при роботі підприємства і т.д.

Прикладами збурень, спричинених внутрішніми перешкодами в складних системах, можуть служити помилки в координатах літаків через власні шуми радіоприймальних пристроїв і ліній передач, порушення технологічних режимів і виробничих ритмів підприємства через низьку якість інструменту, засобів контролю технології або поганої організації праці.

Якщо збурюючі чинники призводять до зміни значень коефіцієнтів матриці в рівнянні (7.6), то задача зводиться до пошуку математичних сподівання цих коефіцієнтів і їх залежності від часу функціонування системи, При рішенні цього питання опис параметрів простору стану виконується аналогічно детермінованому процесу. У разі необхідності виявлення параметрів відхилень вихідних змінних від їх математичного очікування (закону розподілу, дисперсії, середньоквадратичного відхилення) в рівнянні (7.7), задача може бути розв'язана методами імітаційного статистичного моделювання. Наприклад, може бути застосований метод Монте-Карло. Оцінка значень параметрів системи при дії збурень може бути виконана за результатами вимірювання вхідних змінних. Для цього використовують фільтри Вінера і Калмана Б'юсі.

У ряді випадків, наприклад в системах масового обслуговування, випадкові чинники не є малими відхиленнями, а відображають собою суть функціонування системи. При їх описі використовують методи теорії ймовірностей і теорії випадкових процесів. Розглянемо це на конкретному прикладі функціонування технологічних систем механічної обробки заготовок.

7.5. Приклади моделювання

Для аналізу процесів обробки заготовок необхідно мати статистичний критерій, за допомогою якого можна було б прослідкувати закономірності відображення поверхонь різання в матеріалі заготовки. Для вибору такого критерію розглянемо в перехідній (граничній) області матеріал-

середовище, рис. 7.6, довільну точку M . Стан в точці характеризується двома подіями: матеріал в точці може бути або видалений або не видалений. Кожна подія має свою ймовірність. Сума ймовірностей подій, як подій протилежних, рівна одиниці, а значення ймовірності в загальному випадку можуть залежати від положення точки в граничній області. Назвемо ймовірність першої події ймовірністю видалення матеріалу, другого – ймовірністю невидалення матеріалу, ввівши відповідні позначення: $P(M)$ и $P(\bar{M})$.

Якщо профіль обробленої поверхні стаціонарний і відносно початку координат по осі X жорстко не закріплений, то ймовірність невидалення матеріалу на рівні W (рис. 7.6) визначається границею відношення суми довжин відрізків b_i , заповнених матеріалом, до довжини перетину L , яка прямує до нескінченності,

$$P(\bar{M}) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\sum b_i}{L}. \quad (7.26)$$

Оскільки сума виступів, заповнених матеріалом при $L \rightarrow \infty$ прямує до $L\lambda M[b]$, рівняння (7.26) може бути записане у вигляді

$$P(\bar{M}) = \lambda M[b], \quad (7.27)$$

де λ – математичне сподівання числа виступів на одиницю довжини перетину; $M[b]$ - математичне сподівання ширини виступу шорсткості поверхні на заданому рівні формування поверхонь абразивними інструментами, точінням і фрезеруванням торцевими фрезами.

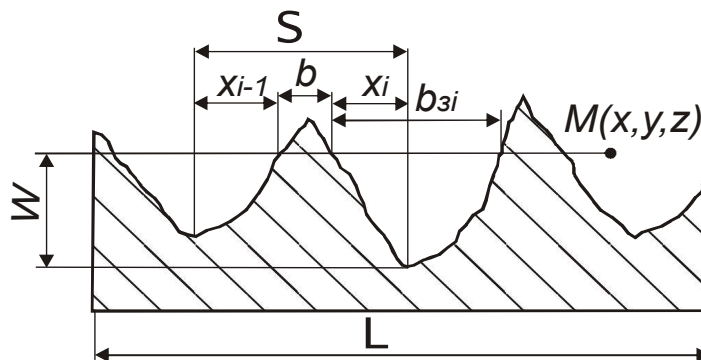


Рисунок 7.6 – Схема до розрахунку ймовірності видалення матеріалу

Розглянемо зв'язок ймовірностей видалення матеріалу з параметрами поверхонь різання, різальних кромки інструменту і заготовки, що утворюються при відносному переміщенні. Для встановлення особливостей детермінованих стохастичних моделей виконаємо аналіз процесів. Для розрахунку ймовірності невидалення матеріалу за залежністю (7.27) необхідно визначити λ і $M[b]$.

Для точіння

$$\lambda = 1/s_o ,$$

де s_o – поздовжня подача різця на один оберт заготовки.

Для торцевого фрезерування

$$\lambda = 1/s_z ,$$

де s_z – подача на один зуб фрези.

Для шліфування λ дорівнює середньому числу зерен, що проходять через одиницю перетину.

Ширину одиничного виступу обчислюємо, коли формоутворювальні елементи мають однакову геометрію і заглиблюються на однакову глибину

$$b = \begin{cases} s - x_{i-1} - x_i & \text{при } x_{i-1} + x_i < s \\ 0 & \text{при } x_{i-1} + x_i \geq s \end{cases}, \quad (7.28)$$

де s – відстань між двома сусідніми западинами поверхонь різання.

Оскільки сума відстаней x_{i-1} та x_i дорівнює ширині перетину поверхні різання b_3 на даному рівні, рівняння (7.28) може бути записано у вигляді:

$$b = \begin{cases} s - b_3 & \text{при } b_3 < s \\ 0 & \text{при } b_3 \geq s \end{cases}. \quad (7.29)$$

Для токарної обробки всі змінні, що входять до рівняння (7.29) можна вважати детермінованими величинами і тому в межах шару шорсткості поверхні

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{s_o} b = 1 - \frac{w}{s_o} (\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi_1), \quad (7.30)$$

де w – відстань до рівня від западини поверхні різання; φ і φ_1 – відповідно головний і допоміжний кути в плані.

Для процесу торцевого фрезерування відстань між двома сусідніми поверхнями різання є величиною випадковою у зв'язку з наявністю биття зубів фрези. За даними виконаних досліджень відстань від центру обертання фрези до вершин різальних елементів розподілена за нормальним законом з параметрами середнього радіусу r_ϕ і середньоквадратичним відхиленням σ . З теорії ймовірностей відомо, що якщо випадкова величина Y є функцією $\varphi(x)$ випадкової величини X , то математичне очікування Y обчислюється за залежністю

$$M[Y] = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) f(x) dx, \quad (7.31)$$

де $f(x)$ - щільність ймовірності розподілу випадкової величини X .

Для фрезерування залежність (7.27) для розрахунку математичного сподівання розміру виступу шорсткості набуває вигляду

$$M[b] = \int_{b_3}^{\infty} (s_z - b_3) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (7.32)$$

де \bar{s}_z - середня відстань між поверхнями різання.

При виведенні залежності (7.32) друге рівняння системи (7.29) враховане в межах інтегрування.

Теоретично й експериментально доведено, що для процесів шліфування відстань між поверхнями різання розподілена за показниковим законом

$$f(s) = \lambda e^{-\lambda s}.$$

При цьому залежність (7.31) набуде вигляду

$$M[b] = \int_{b_3}^{\infty} (s - b_3) \lambda e^{-\lambda s} ds = \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda b_3}.$$

Відповідно, залежності для розрахунку ймовірності невидалення матеріалу для процесів фрезерування і шліфування запишуться

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{\bar{s}_z \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{b_3}^{\infty} (s_z - b_3) e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (7.33)$$

$$P(\bar{M}) = e^{-\lambda b_3}. \quad (7.34)$$

У табл. 7.3 наводиться зіставлення розрахункових значень ймовірності невидалення матеріалу для трьох варіантів: 1) відстані між поверхнями різання постійні (точіння), рівняння (7.30); 2) відстані розподілені за законом Гауса (фрезерування), рівняння (7.33); 3) відстані розподілені за показниковим законом (шліфування), рівняння (7.34).

Таблиця 7.3 – Вплив закону розподілу відстані між поверхнями різання на ймовірність невидалення матеріалу

Рівень w , мм	Варіанти закону розподілу		
	1	2	3
0,01	0,80	0,80	0,82
0,02	0,60	0,60	0,67
0,03	0,40	0,42	0,55
0,04	0,20	0,25	0,45
0,05	0,00	0,12	0,38
0,06	0,00	0,04	0,30
0,07	0,00	0,02	0,25
0,08	0,00	0,01	0,20
0,09	0,00	0,00	0,17
0,10	0,00	0,00	0,12
0,11	0,00	0,00	0,10
0,12	0,00	0,00	0,09

У розрахунках прийнято, що кут при вершинах формоутворювальних елементів дорівнює 96 градусів, число поверхонь різання на мм довжини перетину $\lambda=10$. З аналізу приведених даних виходить, що закон розподілу відстаней між поверхнями різання істотно впливає на ймовірність невидалення матеріалу на всіх рівнях. Найбільше значення відповідає показниковому закону, найменше – при постійності відстаней s . Із зміною закону змінюється і величина шару шорсткості поверхні. Для токарної обробки вона дорівнює 0,05 мм ($P(\bar{M})=0$), для фрезерування – 0,1 мм, для шліфування – 0,16 мм. Зниження шорсткості поверхні при шліфуванні досягається за рахунок значного збільшення числа поверхонь різання.

Залежності (7.33), (7.34) отримані з умови, що всі поверхні різання розташовані на одному рівні і мають

однакову геометрію. На практиці цього досягти неможливо. Процес обробки різанням супроводжується вібраціями, що виникають у технологічній системі. Для процесу фрезерування характерне не тільки осьове, але й торцеве биття зубів фрези, для процесу шліфування – те що абразивні зерна інструменту мають різну геометрію і розташовуються на різних рівнях, кожна вершина має свою глибину різання.

При розташуванні поверхонь різання на різних рівнях їх ширина при розрахунку математичного сподівання $M[b]$ повинна прийматися випадковою. Залежність для розрахунку $M[b]$ при цьому набуде вигляду

$$M[b] = \int_{b_3, 0}^{\infty} \int_0^{\infty} (s - b_3) f(s) f(b_3) db_3 ds, \quad (7.35)$$

де $f(b_3)$ - щільність ймовірності розподілу розмірів поверхонь різання на даному рівні.

Оскільки випадкові величини s і b_3 незалежні, внутрішній інтеграл розбивається на різницю двох інтегралів, перший з яких дорівнює s , другий, – математичному сподіванню b_3 . Рівняння (7.35) набуде вигляду

$$M[b] = \int_{M[b_3]}^{\infty} (s - M[b_3]) f(s) ds,$$

де $M[b_3]$ - математичне сподівання розміру поверхні різання.

Ймовірність невидалення матеріалу для процесу шліфування відповідно визначається

$$P(\bar{M}) = e^{-\lambda M[b_3]}.$$

Таким чином, для обчислення ймовірності невидалення матеріалу на будь-якому рівні досить розрахувати математичне сподівання числа зерен, що проходять через перетин і математичне сподівання ширини профілю поверхні різання (профілю абразивного зерна).

На рис. 7.7 наводиться зіставлення розрахункових і експериментальних значень ймовірності видалення матеріалу для трьох варіантів: а) при моделюванні вершини зерна конусом з розташуванням вершин на одному рівні (крива 1);

б) при моделюванні вершин параболоїдом обертання

Експериментальні дані були отримані накладенням профілів вершин зерен на досліджувану ділянку. Положення кожної вершини уздовж числової осі вибиралося з дотриманням показникового закону розподілу.

Зіставлення показує, що розрахункова й експериментальна ймовірність видалення матеріалу повністю відповідають одна одній. Точки, що визначають експериментальні значення, поєдналися з теоретичними кривими для всіх розглянутих варіантів, що підтверджує адекватність запропонованих залежностей.

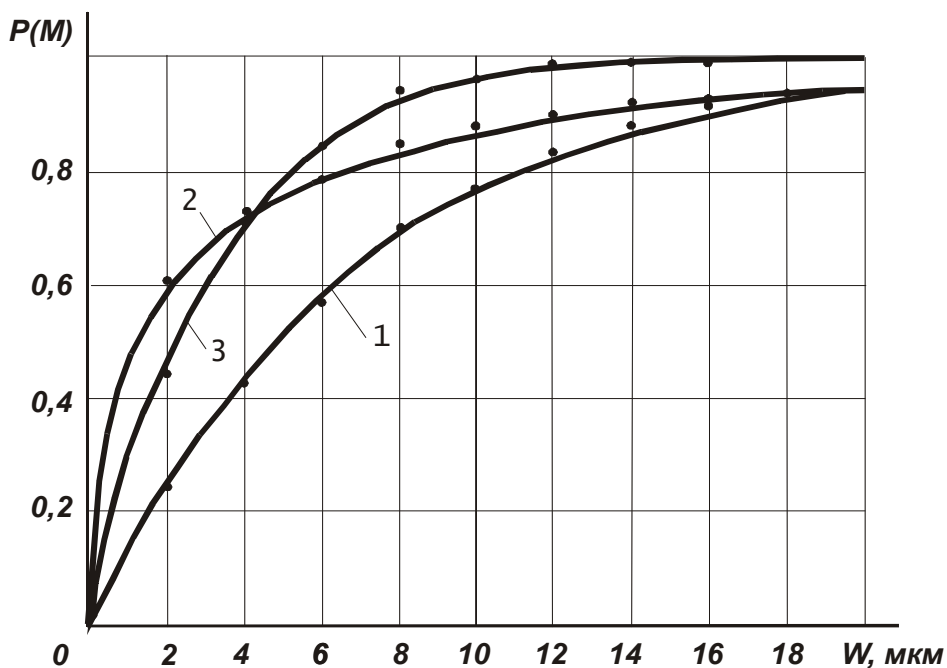


Рисунок 7.7 – Зміна ймовірності видалення матеріалу за глибиною шару шорсткості при моделюванні вершин зерен: 1- конусом $\lambda=50$; 2- параболоїдом обертання, $\lambda=50$; 3- параболоїдом з розташуванням вершин зерен на трьох рівнях, $\lambda=100$ розташуванням на одному рівні (крива 2); в) при моделюванні параболоїдом і розташуванням вершин на трьох рівнях (крива 3). Для перших двох варіантів прийнято, що $\lambda=50$, для третього – $\lambda=100$.

Наведений приклад дозволяє також зробити висновок, що моделі детермінованих і стохастичних систем можуть істотно відрізнятися, рівняння (7.30), (7.33) і (7.34). На вигляд моделі значний вплив роблять закони розподілу випадкових параметрів.

Питання для самоконтролю знань

1. У якій послідовності виконується математичне моделювання структури системи?
2. З якою метою проводять декомпозицію ТС?
3. Що аналізують для кожної з підсистем при виконанні декомпозиції?
4. Як можна виконати лінеаризацію математичної моделі?
5. Що таке просторовий стан?
6. Запишіть систему рівнянь простору станів для безперервної системи.
7. Запишіть систему рівнянь простору станів для дискретної системи.
8. Чим відрізняються моделі стохастичних процесів від моделей детермінованих процесів?
9. Наведіть приклади стохастичних систем.

8. ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

8.1. Постановка задачі оптимального управління ТС

Серед чисельних проблем, виникнення яких зумовлене наукою, що бурхливо розвивається, і технікою, мабуть, найбільш важливою є проблема вдосконалення управління на всіх етапах матеріального виробництва. В рамках цієї проблеми ставиться завдання оптимального керування ТС. Щоб досягти максимальної ефективності при експлуатації ТС необхідно вибрати такі значення вхідних змінних і такі закони зміни дій, що управляють, щоб забезпечити задані вихідні змінні при максимальній продуктивності, мінімальній собівартості і дотриманні низки інших вимог і умов. Наприклад, можна з Києва до Одеси доїхати автомобілем, вмикаючи тільки другу або третю передачі. Цілком зрозуміло, що таке керування автомобілем буде далеко нераціональним, оскільки призведе до великих витрат часу і витрати експлуатаційних матеріалів. Навіть якщо ви намагаєтеся підібрати найбільш раціональні параметри управління, стверджувати, що вони найкращі для даних конкретних умов, немає ніяких підстав. Так, щоб досягти високої якості керування будь-якою ТС, далеко недостатньо особистого досвіду, інтуїції і здібностей керівників і виконавців. Для цього необхідно проводити не тільки глибокий аналіз закономірностей роботи системи, але й уміти вибирати оптимальні умови її експлуатації.

Системний підхід дозволяє чітко сформулювати завдання оптимального керування ТС. Ставиться завдання знайти такі значення вхідних змінних X і такі закони зміни дій $U(t)$, що управляють, які б забезпечували якнайкращі значення вихідних змінних $Y(t)$.

Для постановки завдання оптимального управління виділимо з системи параметри стану об'єкту, наприклад для механічної обробки - параметри стану оброблюваної деталі. Об'єкт має початкове $Z(0)$ і кінцеве $Z(t)$ стану. Для поверхні деталі це можуть бути допуск на розмір J і шорсткість поверхні Ra (рис. 8.1).

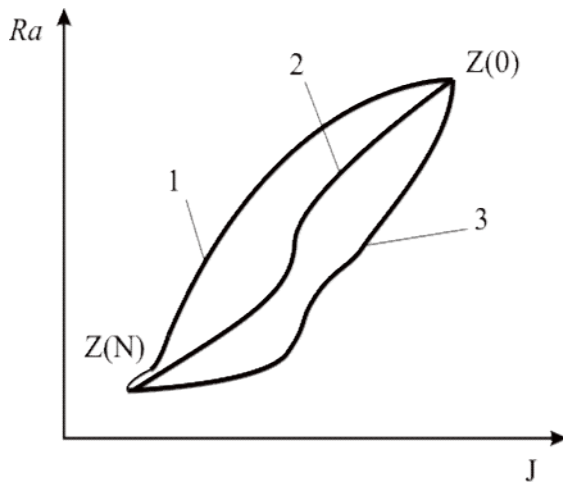


Рисунок 8.1 – Зміна параметрів стану поверхні при обробці

Початковий і кінцевий стани, як правило, не можуть довільно змінюватись. Для оброблюваної деталі початковий стан визначається параметрами заготовки, кінцеве – кресленням деталі. Поточний стан об'єкта, як правило, відрізняється від початкового і кінцевого. Зміна параметрів може бути дискретною і безперервною.

При русі автомобіля його координати у просторі змінюються безперервно. При обробці деталей, наприклад, при обробці отвору, параметри поверхні (діаметр отвору) змінюються відносно до технологічного процесу дискретно на кожній технологічній операції (рис. 8.2).

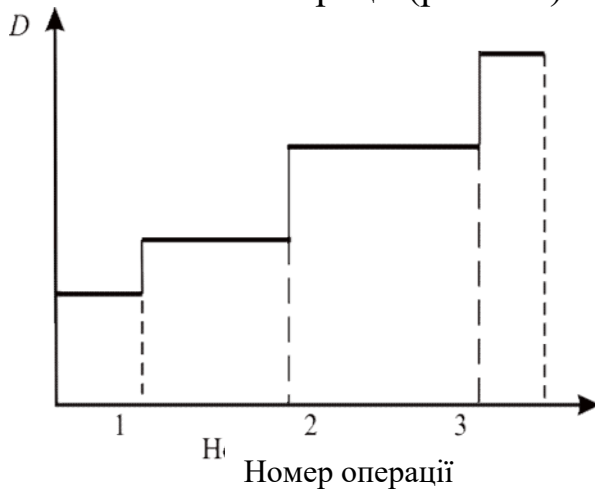


Рисунок 8.2 – Зміна діаметру отвору при виконанні трьох послідовних операцій

Після першого етапу стан об'єкта визначатиметься сукупністю параметрів $Z(1)$, після другої – $Z(2)$, після третьої – $Z(3)$ і так далі. Число N етапів процесу перетворення може бути заздалегідь обумовлене, а може підлягати визначенню при оптимізації структури. Так при проектуванні техно

логічного процесу передбачений етап структурної оптимізації, при виконанні якого ставиться задача визначення числа і виду технологічних операцій обробки заготовки. З аналізу рис. 8.2 випливає, що стан об'єкта після виконання j -го етапу визначиться його станом після закінчення $j-1$ -го етапу і управління, вибраного на j -му етапі

2 і 3 рис. 8.1. Рух по кожній з траєкторій забезпечує однаковий кінцевий результат – переводить об'єкт в кінцевий стан, але за витратними параметрами вони не аналогічні. При механічній обробці траєкторії можуть відрізнятися трудомісткістю і собівартістю виготовлення деталі. Отже, для вибору оптимальної траєкторії з числа можливих необхідно мати критерій, який називають критерієм ефективності. У машинобудуванні за такий критерій зазвичай приймають приведені витрати, трудомісткість операції, прибуток від виробництва виробу. Залежно від поставлених завдань критерій може бути різним. Розглядаються і багатокритеріальні завдання. Для дискретних систем критерій ефективності (функціонал) визначають сумою його значень на кожному з виконуваних етапів

$$J = f_1^0(Z(0), U(1)) + f_2^0(Z(1), U(2)) + \dots + f_N^0(Z(N-1), U(N)). \quad (8.3)$$

де $f_1^0(Z(0), U(1))$ - значення критерію ефективності першого етапу.

У рамках наведених залежностей задача оптимального управління формулюється таким чином: знаючи початковий $Z(0)$ і кінцевий $Z(N)$ стани об'єкта (8.1), знайти таке допустиме управління (8.2), яке надає функціоналу (8.3) максимального (мінімального) значення.

Для безперервних процесів залежності (8.1), (8.2), (8.3) матимуть вигляд

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= f_1(Z(t), U(t)) \\ \dot{z}_2(t) &= f_2(Z(t), U(t)) \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{z}_n &= f_n(Z(t), U(t)) \end{aligned} \right\};$$

$$U(t) \in U(Z(t));$$

$$J = f^0(Z(t), U(t)).$$

Задача оптимального управління безперервною ТС формулюється аналогічно раніше наведеним.

Всі методи оптимізації операцій можна розділити на методи пошуку оптимальних значень вхідних змінних і методи пошуку закону зміни дій, що управляють. Оптимальне значення вхідних змінних знаходять методом лінійного програмування, нелінійного програмування,

геометричного програмування, цілочисельного програмування, стохастичного програмування, прямими методами оптимізації і т.д. Вони достатньо детально розглянуті у публікаціях з дослідження операцій.

Оптимальне рівняння розв'язують на основі принципу максимуму Понтрягіна методом динамічного програмування, методом покоординатного спуску.

8.2. Метод динамічного програмування

Метод динамічного програмування застосовують для пошуку оптимального управління дискретними системами. У ряді випадків безперервна система зводиться до дискретної, що створює певні зручності.

Розглянемо об'єкт, у якого початковий стан заданий і який в просторі станів визначається точкою з фазовими координатами $Z(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t))$. Подальша поведінка об'єкту, якщо вибрано управління, однозначно визначається рівнянням (8.1), причому для кожного з етапів існує допустима область управління (8.2), тобто $U(t)$ належить множині, що визначається фазовою координатою Z у момент часу $(t-1)$. Критерій ефективності визначається сумою критеріїв кожного етапу, рівняння (8.3).

Суть динамічного програмування, запропонованого Р. Беллманом, реалізується таким чином. Припустимо, що у момент часу $t=j$ ми вже знаходимося в точці фазового простору $Z=Z(j)$. не ставлячи питання, як ми потрапили в цю точку з початкового стану. Будемо всіма можливими способами здійснювати завершальну частину процесу:

$$U(j+1), \dots, U(N); \quad Z(j+1), \dots, Z(N)$$

так, щоб виконувалися співвідношення (8.1) (8.2). Для кожної такої завершальної частини процесу обчислимо суму (8.3) і найбільшу зі всіх цих сум позначимо через $\omega_j(Z) = \omega_j(Z(j))$.

Таким чином, відправляючись з точки $Z=Z(j)$, ми можемо вибрати завершальну частину процесу так, щоб сума (8.3) прийняла максимальне (мінімальне) значення. Вважаючи $j=0, 1, \dots, N$, ми отримуємо $N+1$ функцій $\omega_0(Z), \omega_1(Z), \dots, \omega_N(Z)$. Ясно, що $\omega_N(Z)=0$, оскільки в сумі (41) при $j=N$ немає доданків. Також зрозуміло, що

$$\omega_{N-1}(Z) = \max_{U \in U(Z)} (f_N^0(Z(N-1), U(N))) \quad (8.4)$$

максимальне значення критерію ефективності на завершальному етапі процесу.

При $j=N-2$ рівняння (8.4) матиме вигляд

$$\omega_{N-2}(Z) = \max_{U \in U(Z)} [(f_{N-1}^0(Z(N-2), U(N-1)) + \omega_{N-1}(Z)]. \quad (8.5)$$

Для поточного значення j рівняння (8.5) запишеться

$$\omega_{j-1}(Z) = \max_{U \in U(Z)} [(f_j^0(Z, U) + \omega_j(f_j(Z, U))], j=1, 2, \dots, N. \quad (8.6)$$

Рівняння (8.6) прийнято називати рекурентним співвідношенням або рівнянням Беллмана. Аналітичний розв'язок задачі пошуку оптимального управління може бути отриманий тільки для ряду найбільш простих систем. Частіше використовуються чисельні методи. При їх застосуванні рекомендується така послідовність: 1. Складається рекурентне співвідношення. 2. Для кожного допустимого поєднання вхідних змінних шукають оптимальний варіант процесу на завершальному етапі. Цей результат запам'ятовується. Після цього переходять до попереднього етапу. 3. Для кожного набору вхідних змінних шукають оптимальний варіант як результат останніх двох етапів. На третьому, четвертому і так далі етапах процедура повторюється.

Реалізацію розглянутого алгоритму динамічного програмування розглянемо на прикладі оптимізації маршруту обробки отвору. Можливі варіанти маршрутів представлені у вигляді графа перебувань на рис. 8.3, де цифрами в квадратах позначені можливі стани заготовки в процесі обробки. Стан 1 відповідає стану заготовки до обробки, 2, 3 і 4 її станам після чорнової обробки, яка може виконуватися різними методами. Наприклад, отвір може оброблятися чорновим зенкеруванням (стан після обробки 2), чорновим розточуванням (стан 3) і обдирним шліфуванням (стан 4). Цифрами 5, 6, 7 на рис. 8.3 позначені стани об'єкта після напівчистої обробки, цифрами 8 і 9 – після чистої, цифрою 10 - стан деталі після обробки. Стрілками позначені операції, цифри над стрілками визначають вартість їх виконання. Як критерій ефективності приймемо собівартість обробки деталі, яка повинна бути мінімальною. Рекурентне

співвідношення для цього випадку буде аналогічним залежності (8.6) при заміні вимоги максимуму на вимогу мінімуму. Воно справедливе для кожного з проміжкових станів об'єкта виробництва. Роль вхідних змінних виконує вид технологічної операції.

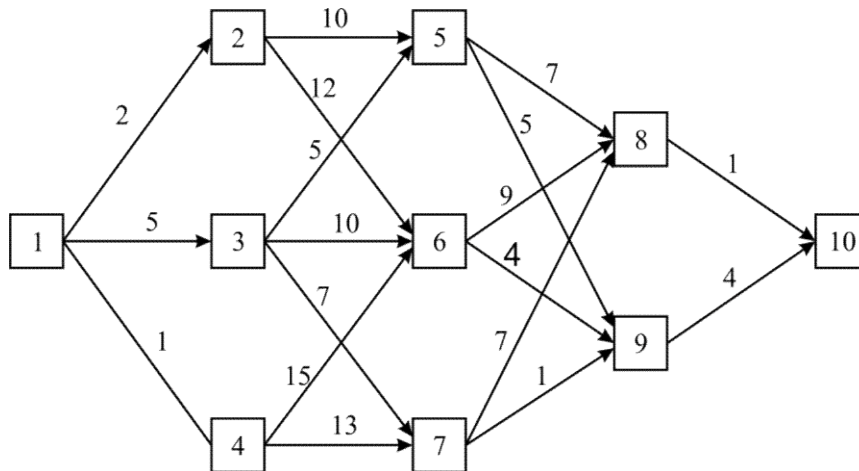


Рисунок 8.3 – Граф можливих маршрутів обробки заготовки

Відповідно до наведеного раніше алгоритму розглянемо завершальну частину процесу обробки (перший етап аналізу). 10-ий стан можна отримати з 8-го і 9-го. З 8-го пункту в 10-й є тільки один шлях, він і буде оптимальним. Значення критерію ефективності $J=1$ запам'ятовуємо. Аналогічно, з 9-го пункту в 10-й також один шлях, він і є оптимальним з $J=4$.

На другому етапі розглядаємо можливі фазові траєкторії переходу із станів 5, 6 і 7 в стан 10. З 5-го стану в 10-й можна потрапити через 8-й і 9-й стани. Розрахуємо критерії ефективності:

траєкторія 5-8-10 $J=7+1=8$;

траєкторія 5-9-10 $J=5+4=9$.

Оптимальною є траєкторія 5-8-10 із значенням критерію ефективності $J=8$, вона і запам'ятовується.

Аналогічно для 6-го і 7-го станів маємо:

траєкторія 6-8-10, $J=9+1=10$;

траєкторія 6-9-10, $J=4+4=8$, оптимальна, результат запам'ятовується;

траєкторія 7-8-10, $J=7+1=8$;

траєкторія 7-9-10, $J=1+4=5$, оптимальна, результат запам'ятовується.

Таким чином, з п'ятого стану оптимальною є траєкторія 5-8-10, з шостого – 6-9-10, з сьомого – 7-9-10.

На третьому етапі розглянемо можливі фазові траєкторії з 2-го, 3-го і 4-го станів:

траєкторія 2-5-8-10, $J=10+8=19$;

траєкторія 2-6-9-10, $J=12+9=21$.

Траєкторія 2-5-8-10 оптимальна, результат запам'ятовується.

Оптимальність траєкторії 5-8-10 доведена на попередньому етапі.

Для 3-го і 4-го станів:

траєкторія 3-5-8-10, $J=5+8=13$;

траєкторія 3-6-9-10, $J=10+9=19$;

траєкторія 3-7-9-10, $J=5+5=10$, оптимальна, результат запам'ятовується;

траєкторія 4-6-9-10, $J=15+9=24$;

траєкторія 4-7-9-10, $J=13+5=18$, оптимальна, результат запам'ятовується.

Таким чином оптимальними траєкторіями є: із стану 2 – 2-5-8-10, із стану 3 – 3-7-9-10, із стану 4 – 4-7-9-10.

На четвертому етапі розглянемо можливі фазові траєкторії з 1-го стану:

траєкторія 1-2-5-8-10, $J=19+2=21$;

траєкторія 1-3-7-9-10, $J=10+5=15$, оптимальна;

траєкторія 1-4-7-9-10, $J=18+1=19$.

Таким чином, оптимальним маршрутом обробки заготовки є маршрут, визначений фазовою траєкторією 1-3-7-9-10.

Порівняно з методом простого перебору можливих варіантів метод динамічного програмування забезпечує зниження об'єму обчислень в десятки разів.

8.3. Метод лінійного програмування, оптимізація вхідних змінних

Суть методу лінійного програмування полягає в тому, що на підставі відомих закономірностей процесу, з урахуванням технічних обмежень, складається математична модель процесу у вигляді системи нерівностей. При обробці матеріалів різанням, наприклад, враховуються обмеження, зумовлені можливостями верстата, різального інструменту,

Функція оптимізації відповідно до поставленого завдання має вигляд

$$f^o = x_2 + 2x_1. \quad (8.10)$$

У системі координат x_1, x_2 кожна пряма відповідає нерівності при знаку рівності і розділяє площину на дві напівплощини: напівплощина допустимих і неприпустимих значень змінних (рис. 8.4). Так, для прямої x_1 (перша нерівність системи (8.9), зліва розташована область допустимих, справа - неприпустимих значень змінної x_1 . Точки, що належать прямій, включаються до області допустимих значень. Сукупність прямих утворюють багатогранник можливих рішень - багатогранник ABCDE.

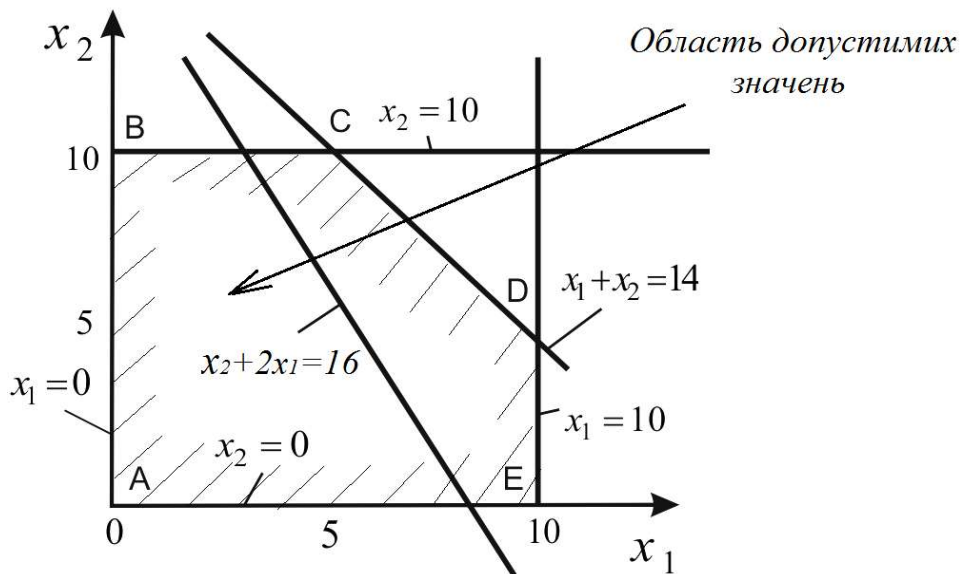


Рисунок 8.4 - Геометрична інтерпретація задачі лінійного програмування

Для визначення оптимальних значень змінних надамо критерію оптимізації деякого значення, наприклад $f^o=16$. Підставимо це значення в рівняння (8.10): $16 = x_2 + 2x_1$ і побудуємо пряму, що відповідає отриманому рівнянню, на рис. 8.4. Збільшуватимемо значення критерію ефективності, пряма, що відповідає функції (8.10) переміщатиметься паралельно самій собі і останній раз торкнеться багатокутника можливих рішень в точці D. Ця точка і визначатиме оптимальний розв'язок: $x_1=10; x_2=4$.

Можна показати, що градієнт функції оптимізації (8.8)

$$\nabla(\sum_{i=1}^n C_i x_i) = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T$$

постійний, а отже розв'язок задачі лінійного програмування завжди лежить на межі, і не просто на межі, а в одній з вершин многогранника можливих розв'язків системи нерівностей (8.7). Направлений перебір вершин і складає суть методів лінійного програмування.

Питання для самоконтролю знань

1. У чому полягає завдання оптимального проектування ТС?
2. Що таке фазовий простір, фазові координати і фазова траєкторія?
3. У чому суть методу динамічного програмування?
4. У чому перевага методу динамічного програмування порівняно з методом повного перебору?
5. Назвіть приклади використання методу динамічного програмування.
6. У чому суть методу лінійного програмування?
7. Що таке область допустимих значень?
8. Назвіть приклади використання методу лінійного програмування.

9. СИСТЕМНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

9.1. Методологія створення ТС і роль прогнозування

У процесі створення ТС виконують такі роботи: обґрунтування необхідності створення нової ТС; науково-технічні дослідження; розробка конструкторського проекту; виготовлення, випробування та доведення дослідних зразків. Необхідність створення сучасної машини як ТС виникає із загальних умов розвитку нової техніки стосовно до конкретного випадку.

Враховуючи різноманіття об'єктів за ступенем їх новизни, можна відокремити два основних напрямки синтезу: 1) кількісний, за якого враховується термін, що пройшов з того чи іншого моменту появи або реалізації нових виробів (наприклад, термін з моменту появи нової техніки, реалізованої ідеї або термін з початку промислового виробництва нової продукції); 2) якісний, при якому технічна новинка (пристрій), залежно від його рівня, поділяється на декілька ступенів, починаючи від створення принципово нової конструкції і закінчуючи зміною її зовнішнього вигляду, а нова технологія (спосіб) призначена для виготовлення принципово нової продукції або підвищення ефективності виробництва.

Кожна впроваджена в експлуатацію нова ТС повинна перевищувати за своїми техніко-економічними показниками (ТЕП) кращі світові стандарти і зразки, які раніше використовувались.

Процес створення нової ТС або її окремого функціонального вузла складається з чотирьох етапів (рис. 9.1): 1) науковий (інженерне прогнозування); 2) конструкторський (проекткування); 3) технологічний (підготовка виробництва); 4) організаційний (освоєння виробництва).

Якщо автоматизувати виконання зазначених етапів за допомогою ЕОМ, то кожному етапу буде відповідати своя автоматизована система (на рис. 9.1 це показано в дужках), а саме: АСНД - автоматизована система наукових досліджень;

САПР - система автоматизованого проектування; АСТПВ – автоматизована система технологічної підготовки виробництва; ГАВ - гнучке автоматизоване виробництво.

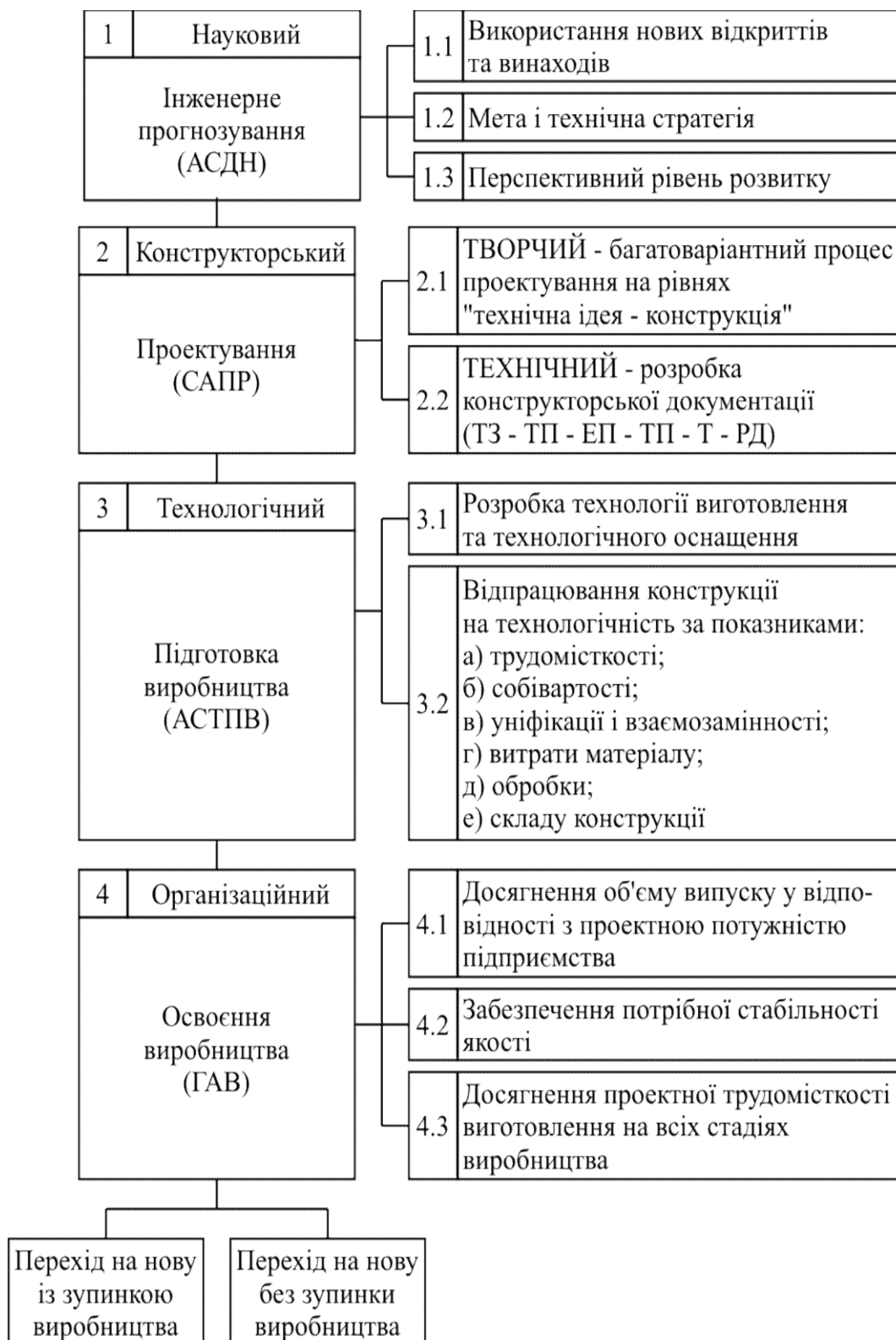


Рисунок 9.1 – Етапи створення нової ТС

При використанні дискретної системи перетворення інформації для виготовлення ТС (машин, верстатів з ЧПК, верстатних комплексів, тощо) об'єднують процеси автоматизованого проектування, автоматизованого програмування і автоматизованого виробництва, що значно скорочує терміни від ідеї до готової продукції.

Науковий етап пов'язаний з інженерним прогнозуванням, яке обґрунтовує необхідність створення нової ТС. Основу інженерного прогнозування складають три напрямки, які визначають: а) значимість нових відкриттів і винаходів; б) мету і технічну стратегію; в) перспективний рівень розвитку конструкцій ТС (а, б - на 20-30 років, в - на 5-10 років).

При інженерному прогнозуванні використовують теоретичні й експериментальні засоби аналізу і синтезу. Прогнозування - це не передбачення, а наукове теоретичне обґрунтування того, що повинно здійснитись. Прогнозування - частина науково-дослідної роботи з підбору вихідних даних для розробки технічного завдання на проектування, яке містить: функціональне призначення, основні технічні й економічні параметри, можливі компоновочні схеми, нові матеріали і види заготовок, нові технологічні процеси, верстати, технологічне оснащення та інше обладнання, нові форми управління виробництвом, потребу і очікуваний план виробництва машин, рішення про необхідність будівництва нового або реконструкції заводу, що уже працює.

Успіх у створенні нових ТС і термін їх життєвого циклу здебільшого залежить від того, наскільки правильно перед проектуванням виконане прогнозування. Слід пам'ятати, що конструктор, який орієнтується на аналог, в тому числі і зарубіжний, який відповідає навіть вищим світовим досягненням, автоматично спонукає свою майбутню ТС на відставання. Тому необхідно йти не у фарватері зарубіжних фірм, а обирати нові шляхи прискореного розвитку ТС, побудованих на нових принципах.

У питаннях прогнозування і створення нових ТС, котрих ще не було у світовій практиці, доцільно використовувати фреймову модель (рис. 9.2). Згідно з цією моделлю повинен послідовно розглядатися розгалужений, у

вигляді дерева альтернатив, ланцюг пошуку на декількох рівнях: функціональна модель об'єкта (функція Φ), альтернативні варіанти моделей принципів дій (фізичних ФПД або технологічних ТП), що реалізують розглядувану функцію; альтернативні варіанти моделей технічних рішень (ТР), що реалізують розглянуті принципи дій.

Існує два принципові шляхи побудови прогнозу, котрі використовуються паралельно: 1) перший йде від наявної бази у майбутнє (дослідницьке або наукове прогнозування); 2) другий передбачає рух від мети, яка повинна бути досягнута у майбутньому, до теперішнього (нормативне прогнозування).

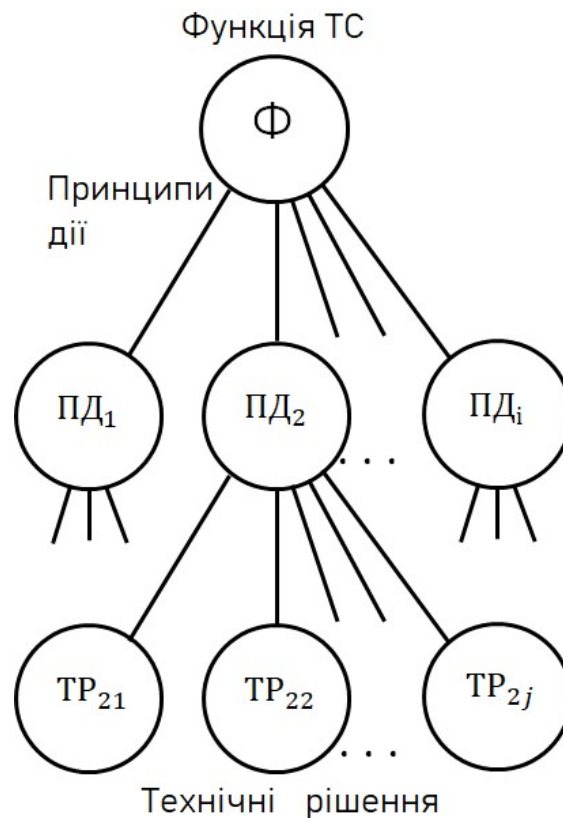


Рисунок 9.2 – Фреймова модель прогнозування і створення нової технічної системи

Розв'язання багатоваріантних задач створення нових ТС на всіх етапах (рис. 9.3), починаючи від постановки загальної задачі і закінчуючи розробкою методу вирішення, стає нераціональним і навіть неможливим без використання ЕОМ (табл. 9.1), на всіх етапах створення (див. рис. 9.1).

Таблиця 9.1 – Використання ЕОМ на різних етапах створення ТС

Етап створення	Вид роботи	Можливості використання ЕОМ
I науковий	Визначення потреб та основної функції	Застосування ЕОМ бажане, але можливе лише в окремих випадках
II конструкторський	Розробка проекту	ЕОМ грає допоміжну роль – комп'ютерне проектування
	Побудова моделі	Використовуються спеціальні пакети прикладних програм
	Автоматизація обчислень Вивчення властивостей моделі	Застосування ЕОМ бажане; використовуються чисельні методи оптимізації
III технологічний	Доробка (доведення, внесення правок) проекту	Застосування ЕОМ бажане; Використовуються методи оптимізації
	Передача проекту у виробництво	Застосування ЕОМ бажане; ЕОМ будує графіки, накопичує та готує документацію
IV організаційний	Освоєння, запуск виробництва	Застосування ЕОМ бажане; керування виробництвом; розробка планів та прогнозів.

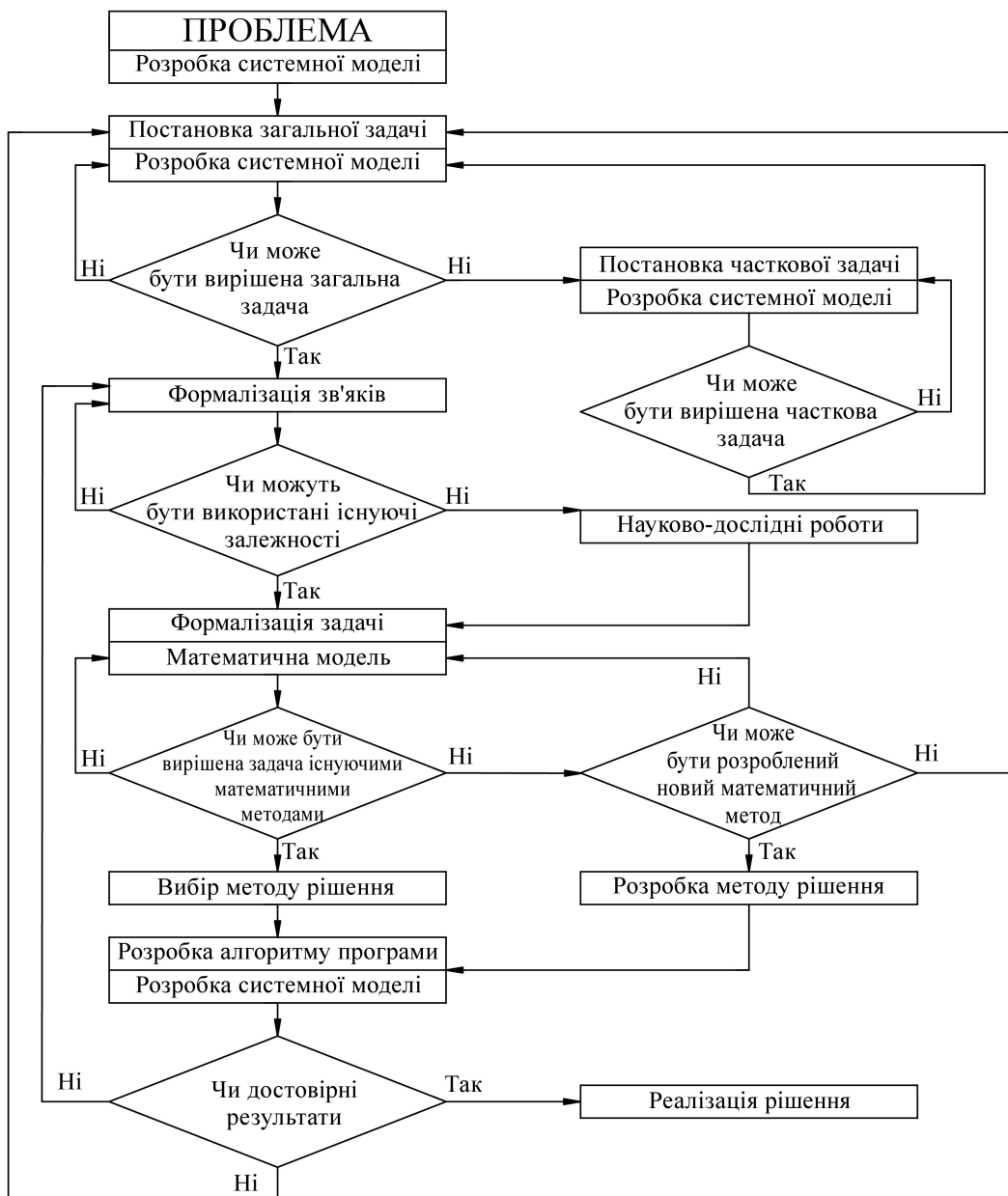


Рисунок 9.3 – Алгоритм розв’язання багатоваріантних задач створення нових ТС

9.2. Основні поняття про процес проектування

Необхідність створення техніки за короткий термін на рівні кращих світових зразків висуває особливі вимоги до другого (конструкторського) етапу, котрий поділяється на творчий і технічний підетапи. Процес творчого проектування ТС має багатоваріантний характер, є складним і послідовним рішенням багаторівневих, багатоциклічних, багатокритеріальних і багато екстремальних задач синтезу, аналізу і вимірювання, починаючи з вибору технічних ідей

(технологічний принцип, спосіб формоутворення, принцип затиску і т.д.) і закінчуючи створенням конструкції з оптимальними параметрами.

Технічне проектування ТС – це процес створення необхідної для виготовлення і експлуатації ТС технічної документації (наочне відображення конструкції машини в цілому і її деталей - ескізи, моделі, макети, креслення із зазначенням необхідних розмірів, посадок, ступенів точності та інших технічних умов; інструкції, які визначають умови випробовувань і доводки машини; технічні паспорти покупних виробів, які містять основні відомості про їх техніко-економічні параметри і вказівки щодо експлуатації).

Процес розробки конструкторської документації є поступовим уточненням проекту і наближенням до розробки робочої документації, за якою виготовляють вироби в одиничному, серійному або масовому виробництві. Багатостадійність процесу проектування вказує на складність задачі і високі вимоги до якості рішень, що приймаються, тому що помилки призводять до необхідності усунення їх у ході виробництва, що зумовлює невиправдані додаткові витрати часу і засобів.

Рівень конструкторської діяльності можна оцінити ступенем новизни розробки. Найвищим I рівнем є творче конструювання (оригінальне), коли розробляються конструкції на підставі нових принципів роботи машин; наступним II рівнем - конструктивне удосконалення, коли створюються машини, принцип роботи яких відомий, але конструктор досягає нових якісних характеристик. До III рівня можна віднести розробку відомих за принципом роботи машин, пристосованих до певних умов експлуатації. До IV рівня відносять створення ряду (гами) машин певного призначення, які відрізняються лише деякими параметрами. Найменш творчий вклад вноситься на V рівні конструювання деталей або складальних одиниць з метою погодження їх з умовами конкретного виробництва і стандартами. Починаючи свою роботу з останнього V рівня конструкторської діяльності, набуваючи досвіду і навиків, можна досягнути значного успіху, - творчого рішення серйозних конструкторських задач, тобто навчитися бути конструктором.

Іноді свідомо, а інколи і несвідомо процес проектування і пошуку рішень продовжується у вільний від роботи час, і навіть під час сну. Відомий письменницький закон "ні дня без рядка" стосовно конструкторської діяльності буде звучати так: "ні дня без роботи над створеною конструкцією" – роботи у будь-якому розумінні: біля креслярської дошки, за комп'ютером, над книгою, довідником, тощо. І подібно до того, як не кожен написаний рядок залишається у творі, так не кожен розроблений варіант конструкції деталі, вузла, машини виявляється кінцевим.

9.3. Стадії та етапи технічного проектування ТС

Після проведення прогнозування (див. п.9.1) переходять до розробки конструкторської документації на виробу, яка для усіх галузей промисловості передбачає: технічне завдання (ТЗ), технічну пропозицію (ТП), ескізний проект (ЕП), технічний проект (ТП-Т), розробку робочої документації (РД) або робочий проект (РП).

Процес розробки конструкторської документації є поступовим уточненням проекту і наближенням до розробки робочої документації, за якою виготовляють вироби в одиничному, серійному і масовому виробництві.

Технічне завдання (ТЗ) включає призначення, технічні характеристики і показники якості, а також техніко-економічні вимоги, які висувають до розроблюваної конструкції машини. Бажано, щоб в ТЗ була вказана виробнича база, обсяг потрібної і планованої продукції, термін її виготовлення, можливі шляхи модернізації і т.і. ТЗ після погодження і затвердження є підставою для виконання проектних розробок.

Технічна пропозиція (ТП) містить технічне і економічне обґрунтування доцільності проектування машини згідно з ТЗ, можливі варіанти його реалізації, а також порівняння розроблюваної конструкції з аналогічними, перевірку патентоспроможності і т.і.

Ескізний проект (ЕП) містить принципові конструктивні рішення, які дають загальне уявлення про будову і принцип роботи машини, а також дані, які визначають її призначення, основні параметри і загальний вигляд. ЕП після погодження і затвердження служить

підставою для подальшої розробки проекту.

Технічний проект (ТП-Т) містить кінцеві технічні рішення, які дають повне уявлення про будову розроблюваної машини, і необхідні вихідні дані для підготовки робочої документації. ТП-Т після погодження і затвердження служить підставою для розробки робочої документації.

Робочу документацію (РД) використовують для одиничного, серійного і масового виробництва машин. У процесі розробки РД найбільш повно враховують технологічні й організаційні фактори виробництва. Ця стадія розробки найбільш довготривала і потребує найбільших витрат часу і засобів. РД розробляють послідовно для виготовлення і випробування дослідного зразка (партії), установчої серії, серійного та масового виробництва.

Інженерні розрахунки у процесі конструювання, як і весь процес проектування машин, носять багатоваріантний характер, що створює сприятливі передумови для вибору оптимального рішення. З цих позицій розглядають стадії розробки технічної документації (рис. 9.4, а), які передбачають виконання робіт по ТЗ, ТП, ЕП, ТП-П, РД. На рис. 9.4, б дана схема розробки конструкторської документації, котра відбиває багатоваріантний характер процесу, а також шлях вибору оптимального рішення. Перед розробкою ТЗ на проектування, як зазначалося, вводять процес прогнозування конструкції, в результаті чого можуть мати місце декілька варіантів прогнозів (P_1, P_2, \dots, P_i). Цим прогнозам відповідає деяке число варіантів ТЗ (TZ_1, TZ_2, \dots, TZ_j). Після співставлення розроблених прогнозів з цими ТЗ знаходять оптимальне рішення щодо прогнозуванню (ОП), на підставі якого потім розробляють кінцеві варіанти ТЗ.

Розробленим варіантам ТЗ відповідають декілька варіантів попередніх ТП (TP_1, TP_2, \dots, TP_K). Зіставляючи ці ТП з варіантами ТЗ, встановлюють оптимальне ТЗ (ОТЗ). За аналогією можуть бути встановлені оптимальні: технічна пропозиція (ОТП), ескізний проект (ОЕП), технічний проект (ОТП-Т). Оптимальні варіанти визначають на підставі зіставлення оцінок за двома стадіями розробки; зворотні зв'язки між стадіями проектування вказують на можливість уточнення прийнятих раніше рішень.

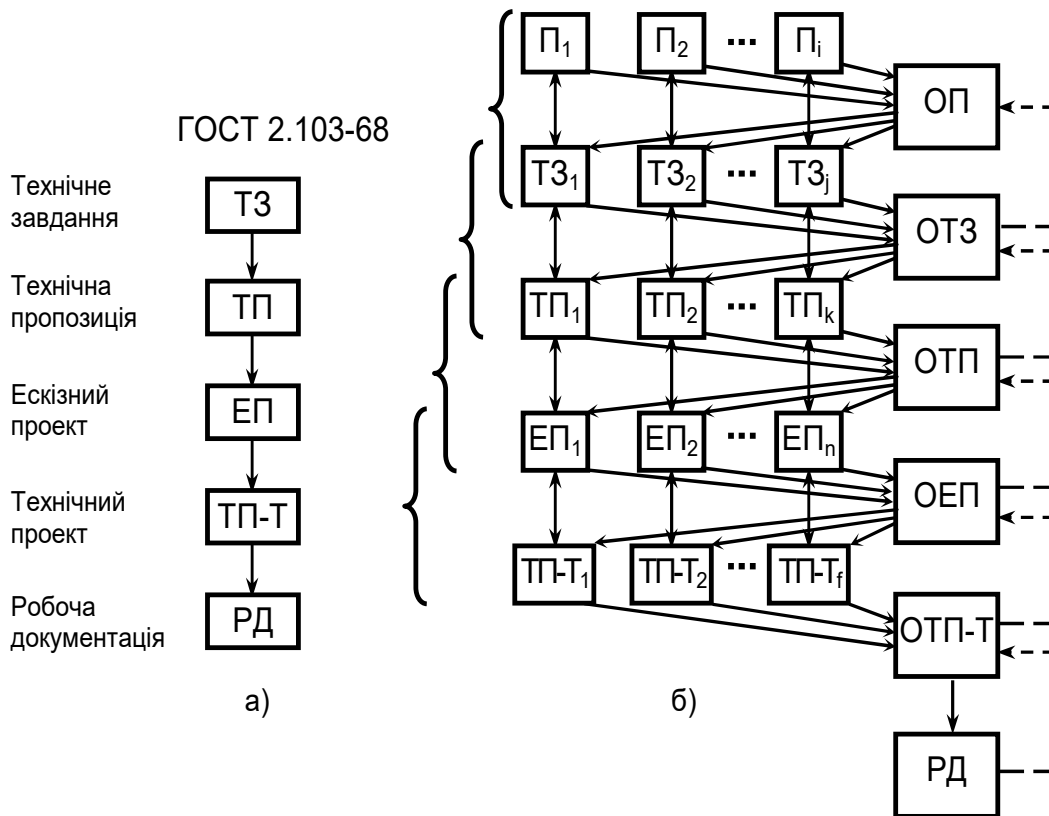


Рисунок 9.4 – Стадії розробки конструкторської документації

9.4. Розробка технічного завдання на основі суспільної потреби у створенні ТС

Як було зазначено вище, розробку ТЗ і увесь процес проектування слід розглядати як процес техніко-економічний на основі суспільної потреби у створенні нової ТС, яка повинна відповідати сучасному рівню розвитку техніки, меті і задачам проектування. Тому при розробці ТЗ має йтися про виконання при проектуванні техніко-економічних вимог (ТЕВ), які враховують розвиток потреб суспільства, науково-технічного прогресу і існуючої матеріально-технічної бази.

ТЕВ – це сукупність обмежень на технічні і економічні показники, структуру і склад техніки, отримані як результат найбільш раціонального врахування потреб суспільства в техніці і найкращих способах їх задоволення.

Систематизація методів, які використовуються для рішення техніко-економічних задач на ранніх стадіях проектування, дозволяє зобразити схему удосконалення методики й організації розробки ТЗ (рис. 9.5).

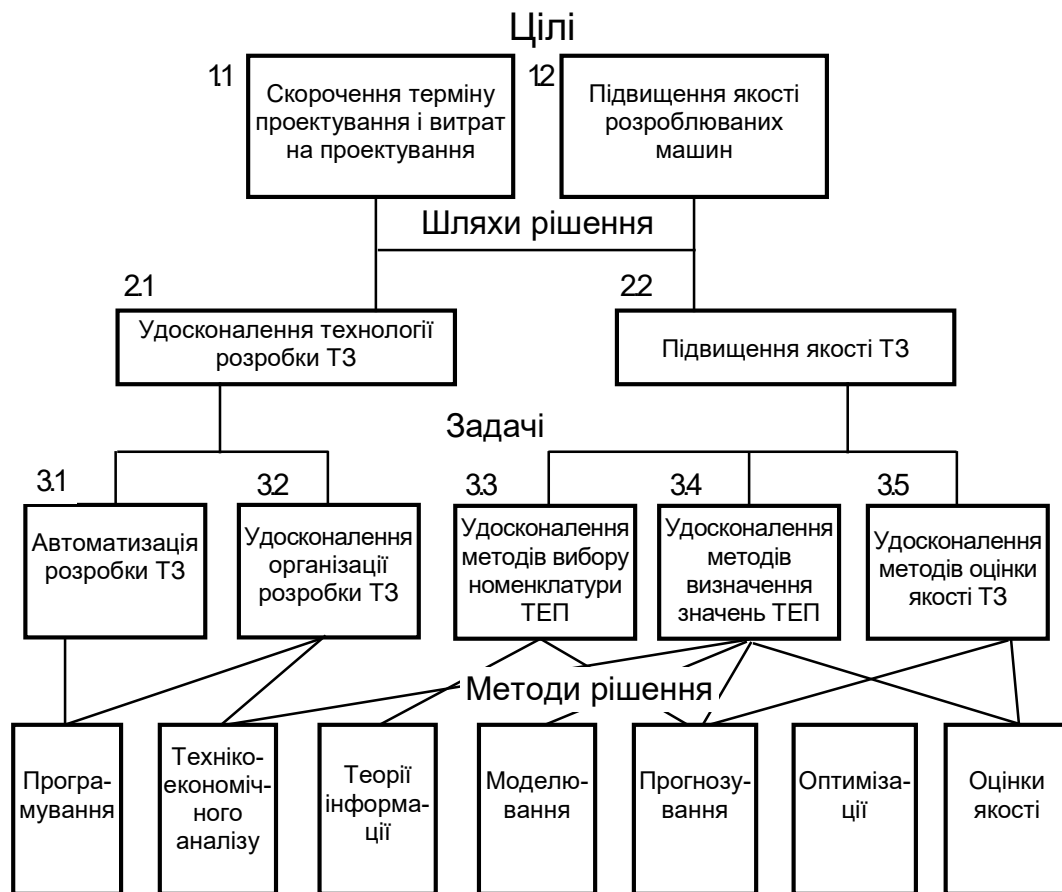


Рисунок 9.5 – Схема удосконалення методики і організації розробки технічного завдання (ТЗ) на проектування

Класифікація функцій ТЗ представлена на рис. 9.6, а характеристики видів ТЗ у табл. 9.2.

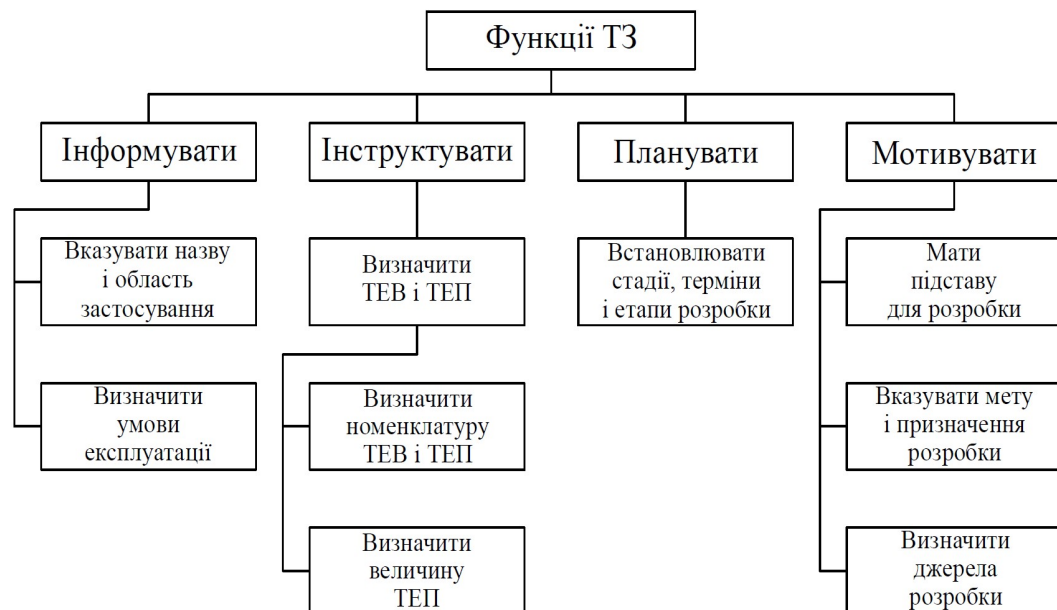


Рисунок 9.6 – Класифікація функцій технічного завдання (ТЗ)

Таблиця 9.2 – Характеристика видів ТЗ

Види ТЗ	Рівень зміни техніко-економічних показників (ТЕП) і ефективність ТС	Характер зміни показників стану ТС
На новий клас ТС	Система завищених ТЕП, значний приріст ТЕП і ефективності ТС	Зміна принципу дії
На новий вид ТС	Розширена система ТЕП, середній приріст значення (ТЕП) і ефективності ТС	Зміна конструкторсько-технологічних рішень
На нову ТС параметричного ряду	Диференційована система ТЕП, малий приріст значення ТЕП і ефективності ТС	Зміна значень ТЕП

Зазначені функції дозволяють сформулювати вимоги, яким повинна відповідати раціональна методика розробки ТЕВ і ТЕП при підготовці і розробці ТЗ в цілому (табл. 9.3).

Таблиця 9.3 – Вимоги до методики розробки ТЕВ і ТЕП

1. Вимоги до змісту (внутрішні вимоги)	2. Вимоги до використання (зовнішні вимоги)
1.1. ПОВНОТА – охоплення необхідної номенклатури	2.1. ЗРУЧНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ – нетрудомісткість, простота використання, можливість автоматизації за допомогою ЕОМ
1.2. ПРОГРЕСИВНІСТЬ – забезпечення розробки найбільш ефективної техніки	2.2. ОБГРУНТОВАНІСТЬ – методика повинна бути обгрунтованою, переконливою
1.3. БЕЗПОМИЛКОВІСТЬ – забезпечення раціональної величини ТЕП між собою із критеріями оцінки якості	2.3. ОБ'ЄКТИВНІСТЬ – незалежність від суб'єктивної думки зацікавлених осіб
1.4. ЧУТЛИВІСТЬ – забезпечення врахування впливу ТЕВ на критерії оцінки якості	2.4. УНІВЕРСАЛЬНІСТЬ – можливість застосування до інших об'єктів техніки

На підставі аналізу виявлених функцій ТЗ і вимог до методики ТЕВ і ТЕП процес підготовки і розробки ТЗ можна уявити у вигляді послідовності логічно пов'язаних робіт (рис. 9.7), з чого виходить, що удосконалення ТС носить міжгалузевий характер.

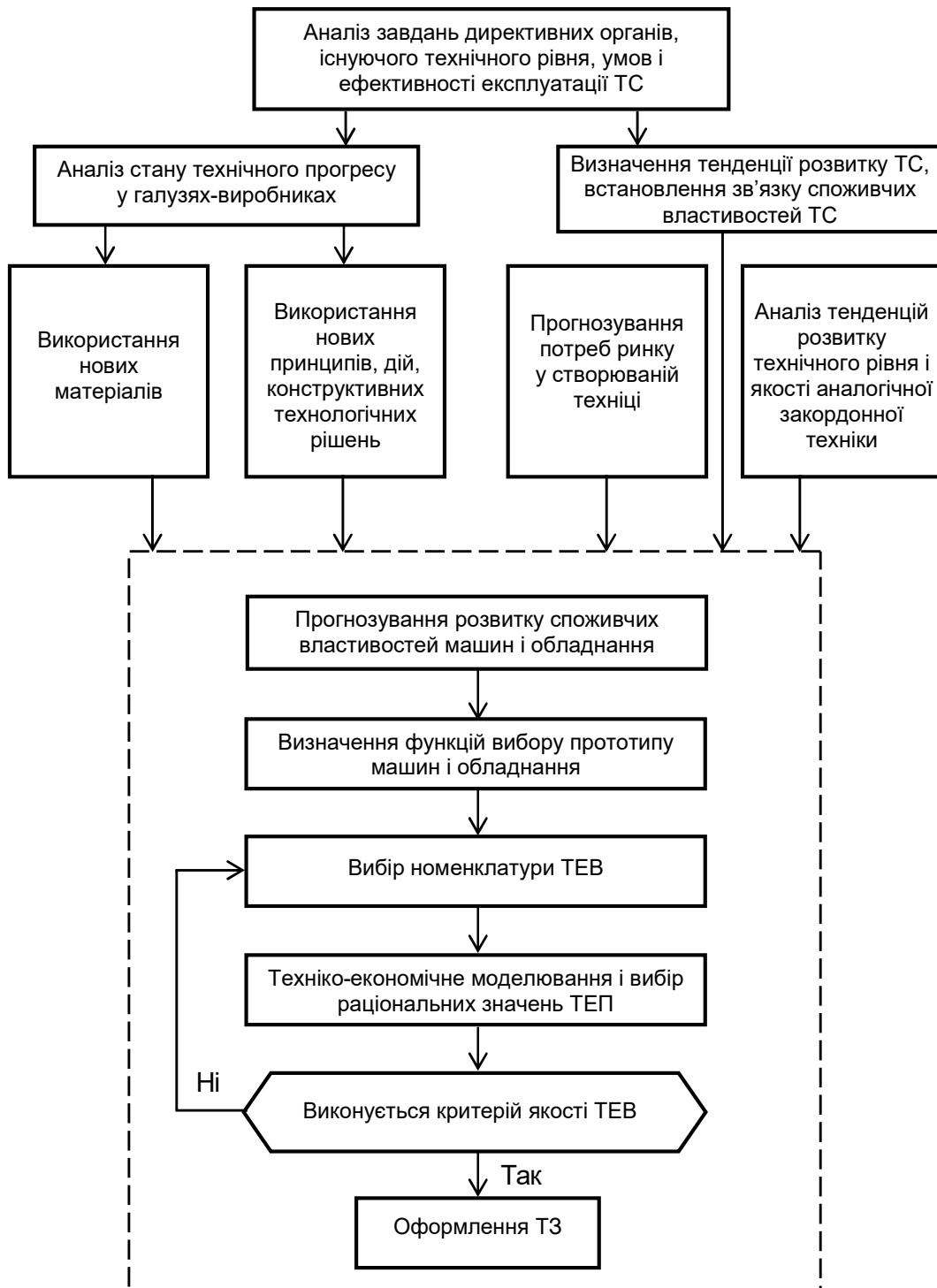


Рисунок 9.7 – Алгоритм процесу підготовки і розробки технічного завдання (ТЗ)

У створенні нової техніки беруть участь дві сторони - виробник і споживач (замовник). Інтереси двох сторін при розробці ТЗ повинні враховуватися у певному співвідношенні. Створювачі нової техніки повинні керуватися інтересами народного господарства в цілому, а також зміцненням позицій держави на зовнішньому ринку. Керівну роль у визначенні показників майбутньої ТС грає споживач. При цьому треба

враховувати, що для більшості машин сумарні витрати на експлуатацію за весь термін роботи в декілька разів перебивають витрати на їх виготовлення. Отже, треба пам'ятати, що, зекономивши копійку (знизивши собівартість виробництва машини), можна втратити гривні (підвищивши експлуатаційні витрати).

9.5. Загальнотехнічні основи конструювання ТС

Процес конструювання безперервно удосконалюється у напрямку розробки нових методів роботи конструктора, розширення повторного використання конструкторської документації, покращення умов інформованості, застосування технічних засобів ЕОМ. Повторне використання наявної конструкторської документації сприяє економії засобів на проектування, а також на підготовку виробництва, бо якщо виріб вже використовувався, то й технологічна сторона питання вирішена. Ефективним є також часткове використання готової документації або повне використання розробки як частини нового проекту.

Слід пам'ятати, що в процесі конструювання необхідно: суворо дотримуватись вимог ЄСКД; дотримуватись патентної чистоти конструкції, пам'ятаючи, що використання закордонних запатентованих конструкцій допустимо лише на законних підставах; широко використовувати стандартні, нормалізовані й уніфіковані у певній галузі (на певному підприємстві) деталі; прямувати до обмеження номенклатури матеріалів, намагаючись застосувати лише ті, котрі не є дефіцитними в певній галузі; пам'ятати, що як і у всякій життєвій ситуації, не завжди перше рішення є найкращим; найкраще рішення знаходять іноді завдяки (або в результаті) послідовної розробки ряду варіантів. Корисно кілька варіантів забракувати на папері, ніж один у натурі.

При створенні нових ТС необхідно враховувати такі технічні вимоги:

1. Систему типізації машин.
2. Автоматизацію керування.
3. Зниження маси.
4. Технологічність.
5. Надійність.
6. Художньо-естетичне оформлення.

7. Небезпечність роботи. 8. Конкурентоздатність. 9. Характер діяльності оператора у керуванні машиною. 10. Систему людина-машина. 11. Розподіл функцій керування в сучасних машинах. 12. Надійність людини-оператора. 13. Системний підхід до конструювання.

Конструкторські документації (КД) ескізного, технічного і робочого проектів істотні і відрізняються. Склад КД на стадії ескізного проекту: 1) загальний вид машини (ескізний); 2) кінематична схема; 3) загальні види основних вузлів; 4) пояснювальна записка з наступними розділами: а) технічна характеристика машини (призначення, габарити, маси, потужність, продуктивність, режим роботи і т.і.); б) опис конструкції машини із зазначенням її особливостей; в) розрахунок ТЕП роботи машини в порівнянні з найбільш високими показниками на даний час; 5) розрахунки (кінематичні, динамічні, на міцність та інші).

Склад КД на стадії технічного проекту: 1) креслення загального вигляду машини; 2) креслення загальних видів вузлів машини; кінематичні, електричні, гідравлічні та інші схеми; перелік комплектуючих виробів; перелік спеціального інструменту і запасних частин; 3) пояснювальна записка з наступними розділами: а) призначення та сфера використання розробленої машини; б) огляд наявних зразків машин конкретного призначення вітчизняного і закордонного виробництва і порівняльна оцінка їх конструктивних особливостей і експлуатаційних показників; в) короткий опис конструктивних особливостей нової машини; г) рішення питань техніки безпеки і виробничої санітарії; д) рішення питань технологічності з точки зору виробничих умов заводу-виробника; е) розрахунки масштабу виробництва нових машин і ефекту від впровадження їх у народному господарстві; 4) розрахункова записка, яка містить детальні розрахунки: кінематичні, динамічні, на міцність та інші.

Склад КД на стадії робочого проекту: 1) креслення загальних видів; 2) креслення вузлів та деталей; 3) специфікація деталей; 4) кінематична, електрична, гідравлічна, пневматична схеми, циклограми та інше; 5) пояснювальна записка з технічною характеристикою і перевірочними розрахунками вузлів і деталей; 6) проект технічних умов на виготовлення, приймання, упаковку і

транспортування (у разі необхідності включаючи креслення тари, розміщення і закріплення на залізничному рухомому потязі); 7) відомості про оригінальні та нормалізовані деталі і вузли, покупні деталі та вироби, застосування посадочних розмірів, різей, модулів тощо; 8) технічний паспорт і інструкція з експлуатації, догляду та монтажу (з пояснювальними схемами і кресленнями) з картою змащування, складеною згідно з відповідною інструкцією; 9) відомі погодження комплектуючих виробів; 10) проект програми випробувань. У загальній документації робочого проекту креслення деталей складають приблизно 60-80 % від загального об'єму КД.

9.6. Проектні критерії. Поняття про функцію мети і проектні обмеження

Проектована ТС повинна відповідати вимогам експлуатації тому, що вони визначають ефективність її використання, а також відповідають і вимогам виробництва. Ці вимоги неоднозначні. Кожній категорії цих вимог може містити окремі види вимог, які складаються з комплексів конкретних вимог до проєктованих окремих моделей ТС.

На рівні методологічних розробок можна розглядати і аналізувати тільки окремі види вимог стосовно певного класу машин. Вимоги експлуатації, як і вимоги виробництва, в більшості випадків неоднозначні і можуть бути представлені кількома варіантами.

Аналогічна ситуація має місце при розгляді кожного варіанту вимог, тому що йому може відповідати деяка множина варіантів конструкції машини, з котрих обирають оптимальний. Між окремими видами вимог експлуатації і виробництва є взаємозв'язки, що може бути представлено у вигляді системної моделі (рис. 9.8).

Вимоги експлуатації можуть мати деяку кількість варіантів ($E_{v1}, E_{v2}, \dots, E_{vj}$), котрі, наприклад, відрізняються за рівнем автоматизації керування машиною. Вимоги виробництва можуть також мати деяку кількість варіантів ($V_{v1}, V_{v2}, \dots, V_{vj}$), котрі відрізняються за рівнем поточності виробництва, який визначається залежно від обсягу випуску машини.

Кожному варіанту вимог експлуатації може відповідати деяка кількість варіантів конструкції ($M_{E11}, M_{E12}, \dots, M_{E1k}; M_{E21}, M_{E22}, \dots, M_{E2p}; \dots; M_{En1}, M_{En2}, \dots, M_{Enq}$) і кожному варіанту вимог виробництва може відповідати деяка кількість варіантів конструкції ($M_{B11}, M_{B12}, \dots, M_{B1i}; M_{B21}, M_{B22}, \dots, M_{B2p}; \dots; M_{Bj1}, M_{Bj2}, \dots, M_{Bjs}$).

У варіантах конструкції машини M_E , крім вимог експлуатації, в деякій мірі враховані і вимоги виробництва, а у варіантах конструкції M_B вимоги виробництва враховані найбільш повно. Повнота вимог залежить від стадії розробки проекту.

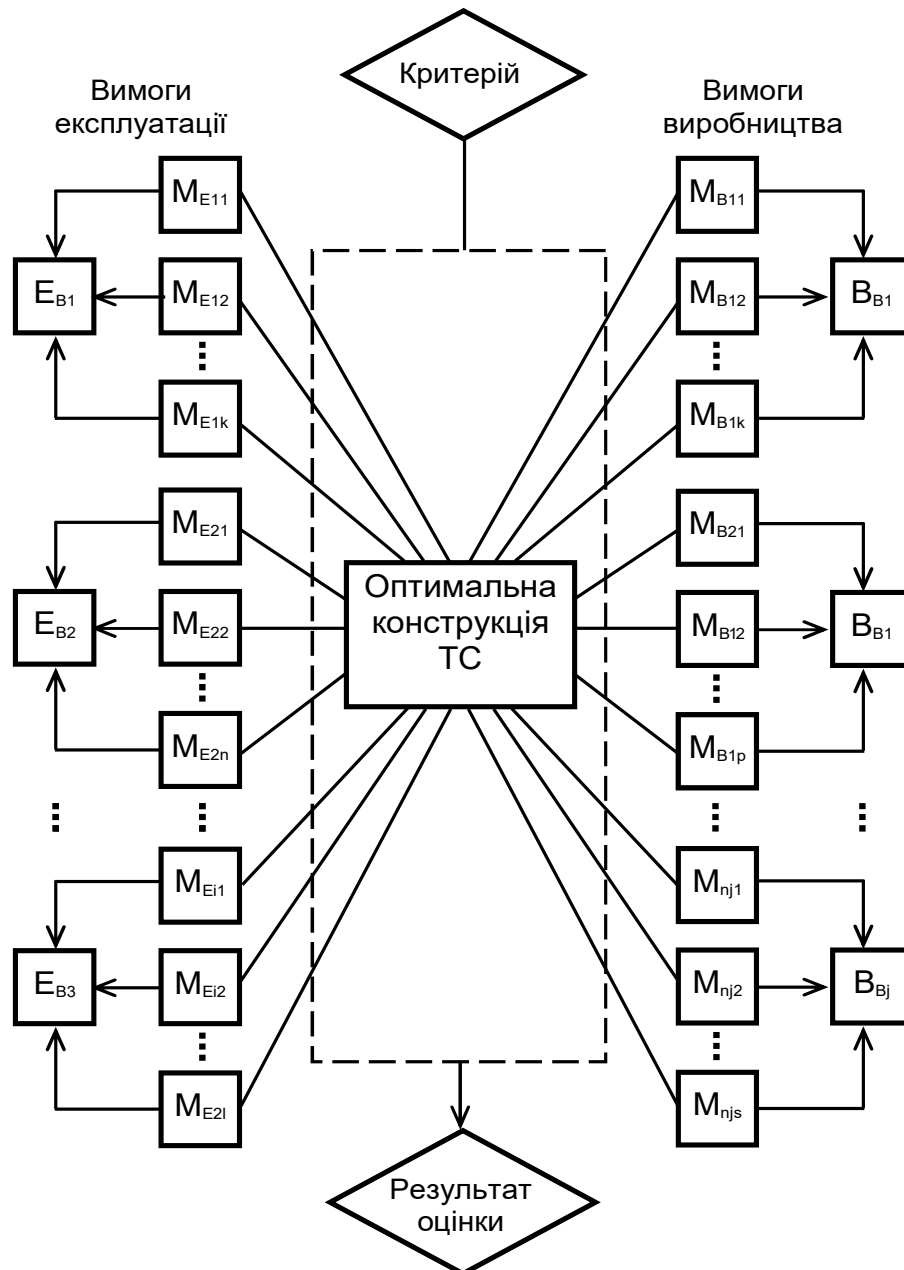


Рисунок 9.8 – Системна модель конструювання машино-технічної системи залежно від експлуатаційних E_B і виробничих B_B вимог

Таким чином, є дві групи варіантів конструкції машин, котрі слід оцінювати за допомогою заданого або прийнятого народногосподарського критерію і на цій підставі розробляти оптимальний варіант машини, яка підлягає реалізації.

Кожну властивість об'єкта проектування ТС можна визначити трьома чисельними характеристиками:

1) абсолютним значенням одиничного показника якості K_i , визначеним метрологічним методом;

2) відносним показником якості $K_i^k = \frac{K_i}{[K_i]}$ ($[K_i]$ -

нормативний показник якості, що характеризує ступінь задоволення споживачів у даному об'єкті);

3) ваговий коефіцієнт α_i , який визначає важливість даної властивості серед інших властивостей при умові, що

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (n - \text{кількість одиничних показників}).$$

У формалізованому вигляді задача оптимального проектування у загальній постановці полягає у визначенні незалежних змінних (незалежних конструктивних параметрів) X_1, X_2, \dots, X_n , з яких критерій оптимальності - функція мети проектованого об'єкту $\Phi = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, яка є нелінійною функцією змінних, має мінімально (або максимально) можливе значення при умові, що змінні X_1, X_2, \dots, X_n приймають лише позитивні значення, тобто $X_j > 0; j=1, 2, \dots, n$, і виконуються обмеження, які задані у формі нерівностей для деяких, у загальному випадку нелінійних, функцій цих змінних (функцій обмежень або проектних обмежень) $R_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m, m \leq n \text{ і } m \geq n)$.

9.7. Поняття про оптимальне проектування ТС

Складний процес оптимального проектування ТС на прикладі верстата можна представити у вигляді послідовного розв'язку багатоваріантних (багаторівневих, багатоциклічних, багатокритеріальних,) задач синтезу, аналізу і вимірювань (рис. 9.9). При створенні нових ТС (об'єктів проектування) доводиться вирішувати в основному складні задачі синтезу, коли при заданому виході невідомими є стан і параметри, які визначають структуру об'єкту.

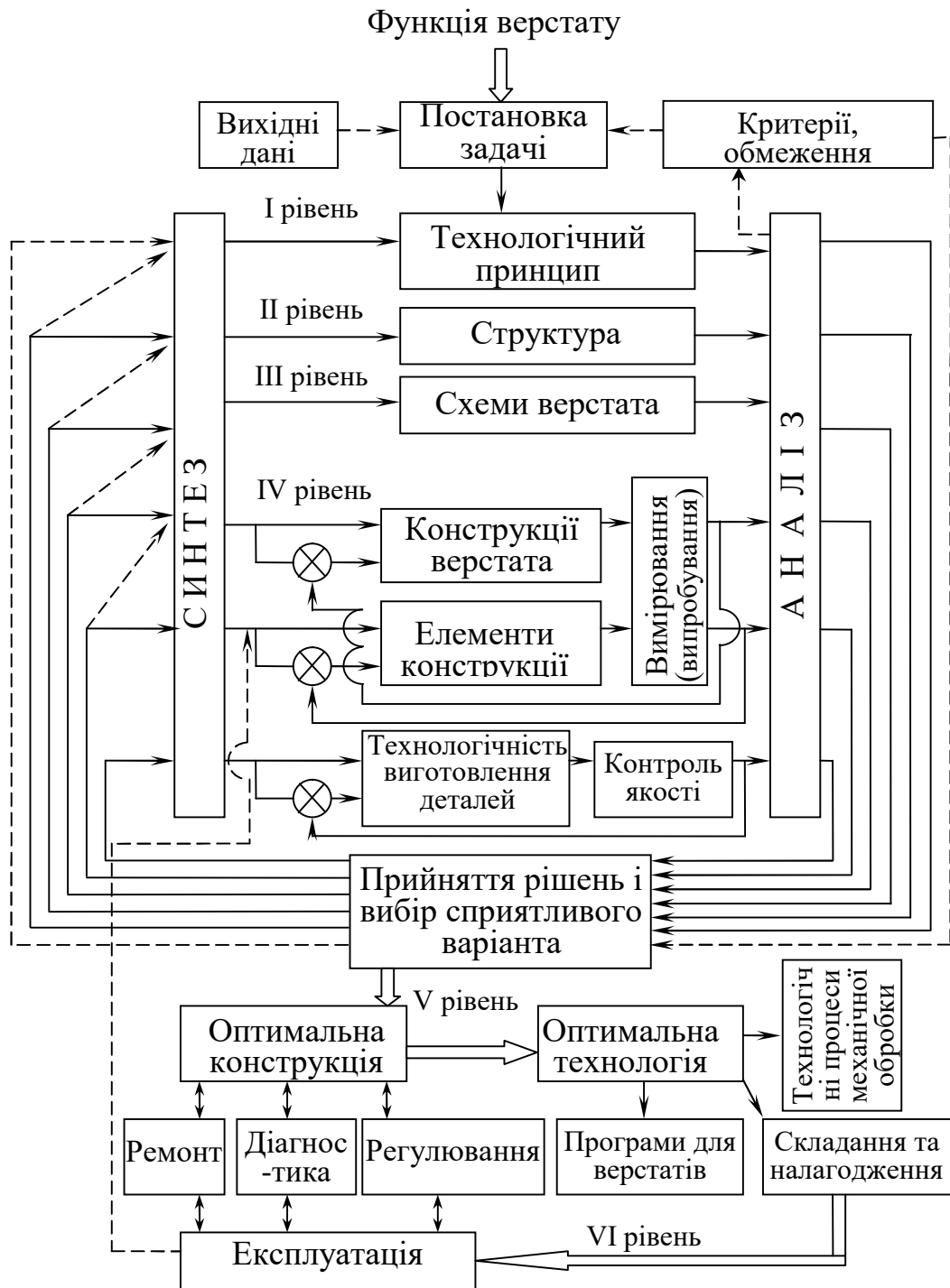


Рисунок 9.9 – Структура оптимального проектування ТС на прикладі металорізального верстата

Більшість задач синтезу може бути представлена у вигляді ієрархічної схеми, яка має як мінімум три рівні складності: вищий, середній і нижчий. Ієрархічну систему задач синтезу при системному підході до проектування необхідно розглядати як послідовність рішення задач вищого рівня до нижчого (наскрізна схема проектування). При цьому

спочатку здійснюється пошук принципів дії (ПД), потім при заданому ПД здійснюється пошук технічного рішення (ТР) і, в кінці, при заданому ТР виконується оптимізація даного ТР.

Існує два підходи до розв'язання задач, пов'язаних з пошуком і створенням нових ТС. Якщо є аналог (або прототип), то процес створення розпочинається з аналізу (рис. 9.10, а), якщо аналог (або прототип) відсутній, то процес створення починається з синтезу (рис. 9.10, б). Найчастіше при узагальненому зображенні процесу (рис. 9.10, в) переважає перший підхід, однак існують рішення, які супроводжуються відкриттями і винаходами вищих рівнів, які пов'язані з вирішенням початкової задачі синтезу, що звичайно супроводжуються народженням нового покоління ТС. Блоки аналізу і синтезу (рис. 9.10, в) об'єднані таким чином, що створюють безперервний ітеративний процес.

Існує три основних напрямки вибору найбільш ефективних рішень при виконанні задач синтезу: 1) традиційний (повний перебір варіантів, дискретний синтез); 2) сучасний (неповний перебір); 3) перспективний (неповний перебір на нових принципах).

При традиційному підході здійснюється звичайно повний перебір варіантів у процесі рішення задачі синтезу. При цьому повному переборі підлягає кількість елементів (варіантів)

$$N = R_p^j = p^j,$$

Де, згідно з комбінаторикою, R_p^j - кількість розміщень з перестановками з p елементів

по j (p - кількість дискретних значень, але для усіх змінних X_i ; j - загальне число змінних X_i , оскільки $i=1, j$).

У реальних задачах $j > 2$. Наприклад (навіть проф. Воїнов Б.С.), якщо взяти число ознак ТС $j = 17$, а кількість варіантів (альтернатив) кожного елемента $p=10$, то буде $N=10^{17}$ варіантів сполучень. Якщо ЕОМ аналізує один варіант за 1 секунду, то час повного перебору буде 10^{17} с, або 10^9 років (це життя нашої галактики). Тому для рішення багатоваріантних задач у процесі проектування складних ТС (наприклад, літаків, ГВС, багатоцільових верстатів тощо) повний перебір цілком не підходить.

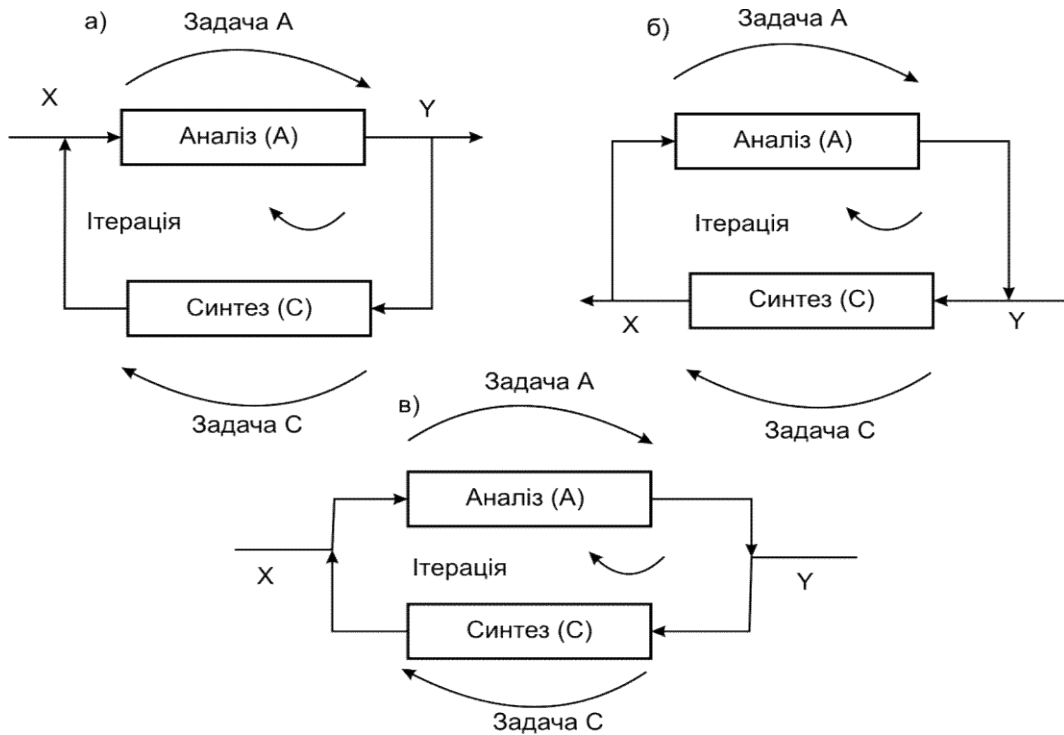


Рисунок 9.10 – ТС як об'єкт проектування і типи задач, які розв'язуються при проектуванні

У межах традиційного напрямку використовується метод дискретного синтезу, що близький за своєю суттю до методу "проб і помилок". Він має елементи неповного перебору, оскільки проектувальник обмежується, на свій погляд, істотно скороченою кількістю варіантів, які розглядає за виділений час.

Сучасний напрямок рішення задач - це неповний перебір варіантів проекрованої ТС, побудований як на використанні ЕОМ, так і на використанні людино-машинних або евристичних підходів. Евристичні методи побудовані на творчих здібностях людини, а людино-машинні об'єднують творчі здібності проектувальника з унікальними за швидкістю здібностями ЕОМ. З математичної точки зору неповний перебір з ЕОМ тотожний пошуку локального або глобального екстремуму функцій багатьох змінних і дає істотний вииграш при строгій формалізації задач синтезу складних ТС.

До перспективного напрямку відноситься неповний перебір варіантів за допомогою ЕОМ на нових принципах, об'єднаних під назвою штучного інтелекту.

Вибір того чи іншого методу дослідження, а тим більш сукупності методів залежить в основному від ступеня складності проектованої ТС, яка визначається кількістю заданих властивостей функціонування і їх частковими показниками якості з усієї множини, а також їх взаємозв'язком. Різні ТС можуть бути умовно розділені на три основних класи залежно від кількості властивостей функціонування (див. розділ 1).

Питання для самоконтролю знань

1. Назвіть етапи створення нової ТС.
2. Яка роль відводиться прогнозуванню при створенні нової ТС?
3. У чому суть фреймової моделі?
4. Яка роль ЕОМ при створенні нових ТС на різних етапах?
5. Чим відрізняється процес творчого проектування від технічного проектування і що треба виконувати раніше?
6. Назвіть стадії розробки конструкторської документації на виріб.
7. Чому процес проектування і розробки конструкторської документації багатоваріантний?
8. Що таке техніко-економічні вимоги (ТЕВ)?
9. Що таке техніко-економічні показники (ТЕП)?
10. Що входить до складу конструкторської документації на стадії ескізного, технічного і робочого проектів?
11. Які основні напрямки вибору найбільш ефективних рішень при розв'язанні задач синтезу ТС?

10. МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

10.1. Постановка задачі інженерної творчості

Перед майбутнім інженером завжди виникають завдання і питання, які пов'язані з пошуком (винаходом) нових, більш ефективних конструкторсько-технологічних рішень і насамперед таких, які переважають світовий рівень. Такі завдання виникають при розробці нових машин, приладів, технологічного устаткування і технологій, при виконанні планових робіт з реконструкції та модернізації.

Рішення проблеми інтенсивного розвитку економіки висунуло велику кількість додаткових інженерних задач, пов'язаних з економією трудових ресурсів, сировини, матеріалів, енергії, а також з підвищенням продуктивності, якості і технічного рівня виробів, скорочення ручної малокваліфікованої і монотонної праці, тощо. Це вимагає обов'язкового оволодіння інтенсивною технологією інженерного творення на підставі використання сучасних методів інженерної творчості, спеціально підготовленої інформації і обчислювальної техніки, нових наукових напрямків і підходів, до яких, зокрема, відноситься генетико-морфологічний підхід до еволюції розвитку і синтезу нових ТС за аналогією з біологічними системами.

У першій половині ХХ сторіччя продуктивність праці у промисловості зросла в 10 разів, а в конструюванні - тільки на 20%. Тому очевидно, що при створенні нових ТС в кінці ХХ століття і на початку ХХІ століття широковживаний і відомий метод "проб і помилок" стає все менш надійним, непродуктивним методом мислення і пошуку нових рішень. Він вступив у протиріччя з науково-технічною революцією. Тому зараз потрібні нові методологічні підходи і наукова організація розумової праці.

Сьогодні в інженерній практиці розроблено більше 100 методів активізації творчості, які можна умовно розділити на 2 групи:

1. Евристичні методи інженерної творчості, за допомогою яких вирішують задачі створення нових ТС без використання ЕОМ замість традиційного методу "проб і помилок".

2. Комп'ютерні методи пошукового конструювання, що базуються на використанні ЕОМ.

Можлива й інша класифікація методів, згідно з якою, їх можна розділити на 5 груп:

1. Системні (комбінаторні або гібридні), які спрямовані на послідовний перебір усіх можливих варіантів рішення і побудовані на аналізі структури й особливостей ТС (об'єкту).

2. Асоціативні (психологічна активізація творчості), які передбачають активізацію генерування ідей шляхом психологічного подолання інерції мислення і становлять безсистемний пошук рішення задач.

3. Програмні (алгоритмічні), які забезпечують більш або менш цілеспрямований рух до вирішення задачі шляхом виявлення технічних і фізичних протиріч у відомих ТС (об'єктах) і їх наступне подолання.

4. Комбіновані як сполучення методів перших трьох груп.

5. Спеціалізовані.

Перші дві групи належать до евристичних методів, третя група відноситься, з одного боку, до евристичних, якщо не використовується ЕОМ (наприклад, АРВЗ - алгоритм розв'язання винахідницьких задач), а з другого - до комп'ютерних (наприклад, УЕМ - узагальнений евристичний метод).

Сьогодення символізує епоху ЕОМ, які можна умовно розподілити на 5 поколінь за принципом дії: 1. Імітація творчих процесів. 2. Фреймові моделі мислення (схемні). 3. Модель людських міркувань (людська логіка). 4. Діалоговий режим (людина-машина). 5. Користування ЕОМ непідготовленим програмістом (людина доручає машині усі проблеми моделювання) - докорінна інтелектуалізація ЕОМ.

Протиріччя, які виявляються у процесі рішення технічних задач, можна умовно розділити на три типи: адміністративні, технічні і фізичні.

Адміністративними називають протиріччя, котрі присутні початково у самому факті винахідницької або іншої технічної задачі (треба щось зробити, але невідомо як).

Технічні - це протиріччя, які виникають між частинами або параметрами ТС при спробі їх змінити: якщо

відомими способами покращати одну частину (параметр), то неприпустимо погіршується інша частина (параметр).

Фізичними називають протиріччя, які передбачають пред'явлення до однієї і тієї ж частини взаємопротилежних вимог (при фізичних протиріччях виникає парадокс).

Вивчення проблемної ситуації - це виявлення технічних протиріч.

В інженерно-конструкторській діяльності, згідно з фреймовою моделлю, послідовно вирішуються задачі трьох типів: I - вибір та пошук найбільш ефективного фізичного принципу дії (ФПД); II - вибір та пошук найбільш раціонального технічного рішення (ТР) при певному (заданому) фізичному принципі дії; III - визначення оптимальних параметрів заданого технічного рішення.

Задачі I і II типів не мають точних математичних рішень і потребують застосування евристичних методів, методів пошукового конструювання, які складають послідовність поступів, процедур та прийомів переробки великого обсягу інформації і не завжди дають найкращі рішення. Тільки для задач III типу (а в останній час і II типу) використовують математичні методи оптимізації, які дають точне рішення, і застосовують ЕОМ з великим ефектом. Інженер (конструктор або технолог) повинен бути не стільки спеціалістом (фахівцем), який перебирає відомі варіанти, скільки дослідником і винахідником нових рішень, творцем і втілювачем нових ідей.

Процес оптимального проектування ТС, як і прогнозування, є багатоваріантним, багаторівневим (табл. 10.1), багатоциклічним, багатокритеріальним, багатоекстремальним в багатозв'язаній області. ТС буде оптимальною, якщо для її реалізації вибрана оптимальна (або, принаймні, раціональна) технічна ідея. Будь-яка технічна задача має множину (дерево) конкретних рішень (вершин) (рис. 10.1).

Пошук ідей - найбільш високий рівень творчої діяльності людини і поки що неформалізований, пов'язаний в основному з інтуїцією людини. Необхідно сміливо шукати нові ідеї, фантазувати, тому що вірогідність здійснення сміливих ідей більша, ніж обережних (табл. 10.2).

Таблиця 10.1 – Аналогії багаторівневого проектування ТС

Рівень проектування			Аналогії	
№	Назва	Зміст	Земна	Космічна
1	Ідея (І)	Принцип дії, метод, спосіб	Неосяжний океан	Всесвіт
2	Структура (Ст)	Морфологія, склад блоків, комплектів, вузлів, деталей	Архіпелаг	Галактика
3	Схема (Сх)	Структура + зв'язки (функціональний)	Острів	Сузір'я
4	Конструкція (К)	Конкретна реалізація схеми	Гірська місцевість	Зірка
5	Параметри конструкції (Пк)	Складальні одиниці, механізми, деталі	Найвища гора	Планета
6	Параметри деталі (Пд)	Розміри, форма, маса, об'єм і т.і.	Висота до вершини гори	Супутник

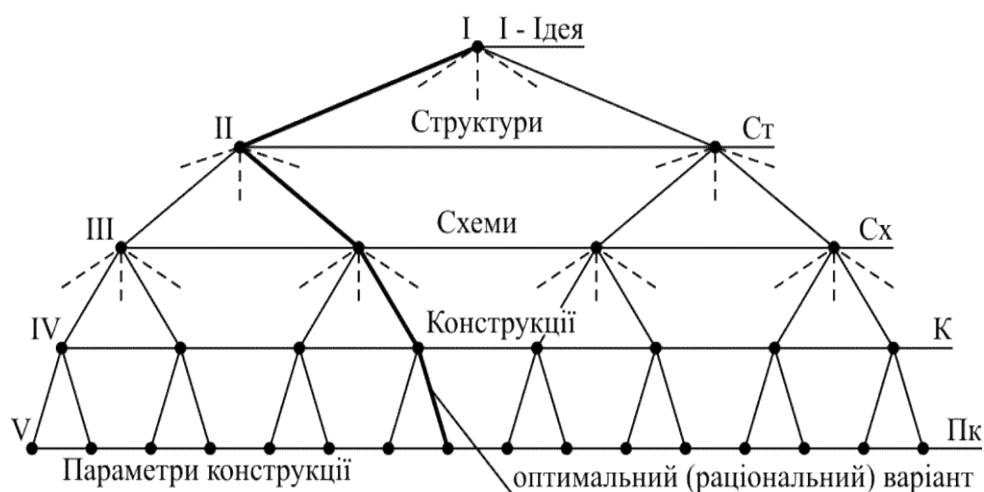


Рисунок 10.1 – Дерево рішень при створенні ТС від ідеї до конструкції

Таблиця 10.2 – Доля фантастичних ідей

Автор	Загальна кількість ідей	Збулось		Підтвердилось		Виявилось помилковим	
		факт	%	факт	%	факт	%
Ж.Верн	108	64	59	34	32	10	9
Г.Уелс	86	57	66	20	23	9	11
Беляев	50	21	42	26	52	3	6
Сума	244	142	58	80	33	22	9

10.2. Системні підходи до технічної творчості

З позицій системотехніки в науковому пізнанні і технічній творчості можна виділити декілька компонентів, які доповнюють один одного:

1) емпірико-інтуїтивний, найбільш стародавний, заснований на спостереженнях (експериментах);

2) дедуктивно аксіоматичний, прийнятий Евклідом в його "Началах";

3) конструктивний, узагальнений Сократом, який іде від приватного до загального й уникає догматизму;

4) асоціативний, переважно характерний для Максвелла і Ейнштейна, заснований на вловлюванні подібності між дуже віддаленими фактами й об'єднанні розрізнених елементів за допомогою нової, більш глибокої, точки зору.

Конкретний акт пізнання неможливий без усіх цих (а можливо і інших) компонентів, а процес пізнання завжди спрямований одночасно від частин до цілого і від цілого до частин.

При дослідженні будь-якої проблеми можна виділити декілька головних підпроблем (рис. 10.2):

1 - виділення проблеми: врахувати все, що необхідно і відкинути те, що не потрібно;

2 - опис: виразити на єдиній мові різні за фізичною природою явища і фактори;

3 - встановлення критеріїв: визначити, що означає "добре" і "погано" для порівняння альтернатив;

4 - ідеалізація: ввести раціональну ідеалізацію проблеми, спростити її до допустимої межі;

5 - декомпозиція: знайти спосіб роз'єднання цілого на частини без втрати властивостей цілого;

6 - композиція: знайти спосіб об'єднання частин у ціле без втрати властивостей частин;

7 - рішення: знайти вирішення проблеми.

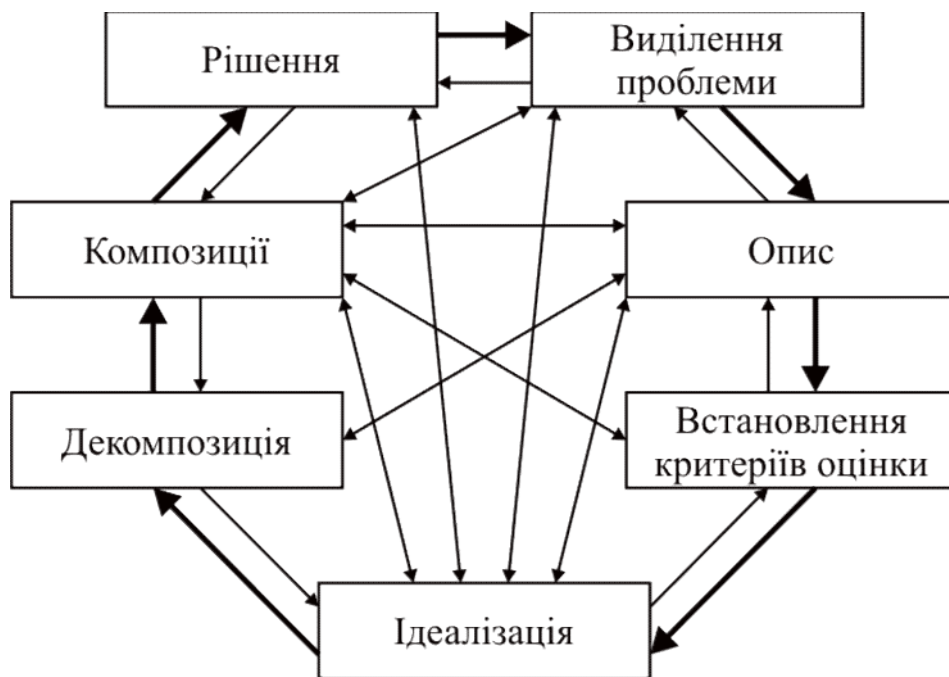


Рисунок 10.2 – Схема системного підходу при вирішенні проблеми

Послідовний або послідовно-циклічний (ітераційний) метод характерний для аксіоматичних теорій. За цим методом працює обчислювальна машина, якщо її забезпечити відповідною програмою або програмою для складання робочої програми.

Людський розум працює інакше, а системний аналіз засновано на людському мисленні. Принаймні здогадку, нову ідею відносно розв'язання проблеми послідовний ("машинний") метод народити не зможе.

10.3. Системні методи створення ТС

До системних відносяться методи: морфологічного аналізу (США, Ф. Цвіккі, 1942 р.); “матриць відкриття” (Франція, А. Моль, 1955 р.); організуючих понять (Німеччина, Ф. Ханзен, 1953 р.); ступінчастого підходу до розв’язання задач (США, А. Фрейзен, 1969 р.); функціонального винахідництва (Великобританія, К. Джоус, 1970 р.); десяткових матриць пошуку (СРСР, Р. Повілейко, 1972 р.); системно-логічний підхід до розв’язання винахідницьких задач (СРСР, В. Шубін, 1972 р.); семикратного пошуку (СРСР, Г. Буш, 1964 р.) та інші.

10.3.1. Морфологічний аналіз і синтез технічних рішень

Найбільш поширений метод морфологічного аналізу, який спрямований на послідовний перебір усіх можливих варіантів рішення.

Мета методу - системно досліджувати усі можливі варіанти рішення задач, які впливають із закономірностей будови (морфології) об’єкта що удосконалюється (ТС), і тим самим врахувати, крім відомих, незвичайні варіанти, котрі при простому переборі могли бути знехтувані. Ідея методу - відійти в зону, далеку від того, що лежить на видноті. Суть методу полягає в тому, що в удосконалюваній ТС виділяють декілька характерних для неї структурних, морфологічних ознак, за кожною з котрих складають максимально повний перелік різних конкретних варіантів (альтернатив) технічного вираження використання цих ознак. Таким чином, кожна ознака може характеризувати якийсь конструктивний вузол (елемент структури) ТС, якусь функцію (або зв’язок між елементами), якийсь режим роботи (або стану) ТС, якусь форму взаємодії вузлів (елементів), тобто параметри характеристики ТС, від котрих залежить вирішення проблеми і досягнення основної мети.

Ознаки з їх альтернативами розташовують у вигляді таблиці, яка називається морфологічною моделлю (скринькою, матрицею, картою або таблицею), що дозволяє краще уявити пошукове поле. Матриці можуть бути записані у буквеному або цифровому вигляді по рядках або по колонках:

$$\begin{array}{c} \leftarrow \text{альтернативи} \end{array} \begin{array}{c} \text{ознаки} \rightarrow \\ \left. \begin{array}{c} P_1^1, P_1^2, \dots, P_1^k \\ P_2^1, P_2^2, \dots, P_2^k \\ \dots \\ P_n^1, P_n^2, \dots, P_n^k \end{array} \right\} \text{ або } \begin{array}{c} \leftarrow \text{ознаки} \\ \left. \begin{array}{c} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1k} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2k} \\ \dots \\ a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nk} \end{array} \right\} \text{ або } \begin{array}{c} \leftarrow \text{альтернативи} \\ \left. \begin{array}{c} 1.1, 2.1, \dots, k.1 \\ 1.2, 2.2, \dots, k.2 \\ \dots \\ 1.n, 2.n, \dots, k.n \end{array} \right\} \end{array}$$

де P_1^1, P_n^1 або a_{11}, a_{n1} або 1.1, 1.n – відповідно, перша та n-на альтернатива першої ознаки;

P_1^k, P_n^k або a_{1k}, a_{nk} або k.1, k.n - відповідно, перша та n-на альтернатива k-ої ознаки.

Перевага методу - його багатоваріантність. Оскільки метод заснований на використанні морфології об'єктів, він дозволяє організувати простір (обшир) змін об'єкта (морфологічний ящик) і систематично його аналізувати. При цьому, на відміну від простого перебору, виключається пропущення якихось варіантів, що дозволяє подолати інерцію мислення фахівців, знайти оригінальні рішення при повному переборі всієї множині (цього поля).

До недоліків методу належить те, що поряд з реально можливими комбінаціями варіантів характеристик (або ознак) морфологічна матриця має велику кількість несумісних варіантів. Поки що не розроблено апарату вибору допустимих рішень з великої кількості можливих варіантів. На теперішній час для вирішення цієї задачі мають місце спроби використання ЕОМ. Коли буде знайдено справді практичний і універсальний метод оцінки ефективності застосування того чи іншого варіанта, можна буде, виходячи тільки з теоретичних міркувань, обирати оптимальну комбінацію елементів для кожної проектованої ТС. Таким чином, процес винахідництва, по суті, був би замінений безпосередньо аналізом альтернативних варіантів.

Найчастіше виявляється, що робочі характеристики ТС, в основу побудови якої покладена невідома раніше комбінація елементів (ознак), більшою чи меншою мірою є невизначеними, що залежить від ступеня відходу від теперішнього рівня розвитку техніки.

Найбільш доцільна сфера використання методу - рішення конструкторських і технологічних задач загального плану (проектування машин, їх вузлів, механізмів,

технологічного оснащення, інструментів, пошук технологічних принципів, компоновок, схем, способів формоутворення, тощо). Метод можна використовувати при прогнозуванні розвитку ТС, при визначенні можливості патентування в тому чи іншому абстрактному вигляді комбінацій основних параметрів з метою "заблокувати" можливі майбутні винаходи.

Є п'ять послідовних етапів морфологічного аналізу: 1) точне формулювання задачі (проблеми), яка відображає основну вимогу до об'єкта; 2) поділ об'єкта на функціональні елементи (ознаки) зі складанням списку усіх морфологічних ознак і вимог до них, тобто усіх важливих характеристик об'єкту; 3) розгляд усіх елементів (ознак) і вибір для кожного повного набору різних варіантів реалізації, тобто складання усіх можливих варіантів незалежно за кожною характеристикою і побудова морфологічної моделі (таблиці, ящики, матриці); 4) аналіз функціональної цінності отриманих рішень, які впливають з матриці, тобто синтез варіантів об'єкта; 5) вибір найбільше раціональних варіантів конкретних рішень, тобто вибір кращих сполучень згідно заданого критерію. Розглянемо особливості виконання кожного етапу.

Етап 1. Формулювання задачі

Часто початкове формулювання задачі не містить прямої вказівки про потребу вести конструкторський пошук її компоновання. Пряме розуміння задачі буває прихованим за багатослівністю її викладення або за невдало обраною термінологією. Метод потребує точного формулювання. Проте цю вимогу нелегко виконати.

При аналізі початкового формулювання задачі з'ясовують, що повинно бути удосконалено, доопрацьовано і т. п. - спосіб або пристрій. Далі необхідно вилучити спеціальну термінологію, змінити назви елементів об'єкта термінами, які відбивають їх функціональне призначення. Потім слід розглянути вимоги, які пред'являються до результату рішення задачі, виділити з них головну (головні) і пов'язати її з тими елементами об'єкта, котрі повинні забезпечити його виконання. В кінці виконують уточнення формулювання задачі.

Етап 2. Поділ об'єкта на морфологічні ознаки

Точне формулювання задачі дозволяє виділити коло характеристик об'єкта (структурних елементів, зв'язків і їх ознак), від котрих в основному залежить виконання заданих вимог. В загальному випадку для конструкцій як морфологічні ознаки можуть бути обрані: а) функціонально важливі елементи (деталі, вузли, прилади і т.і.); б) взаємний зв'язок між елементами; в) взаємне розташування елементів.

Необхідність відокремлення функціонально важливих елементів викликана вимогою не створювати в морфологічній моделі великого обсягу неістотної інформації, яка перешкоджає вибору корисної. Наприклад, при виконанні варіантів конструкцій обертового різця можна варіювати такими морфологічними ознаками: різальна частина (вид, виконання і розташування осей), опори (виконання, розташування), привод ріжучої частини. При пошуку варіантів конструктивних схем варіюють елементами структури і зв'язками між ними. При пошуку варіантів методів обробки (способів формоутворення) варіюють трьома основними ознаками: елемент, що обробляється, - заготовка (мета впливу на заготовку, вид і кількість, рухи, стан), елемент, яким обробляють, - різальний інструмент (фізичний стан, тип, кількість ріжучих кромки, рухи), взаємодія між елементами - заготовкою та інструментом (фізико-хімічний ефект процесу перетворення, вид енергії ефекту, характер підводу і розподілу енергії, характер дії в часі, фізичний стан робочого середовища).

Етап 3. Складання морфологічної моделі (таблиці, матриці, скриньки)

Основна вимога до цього етапу - недопустимість критичної оцінки по відношенню до сформульованих варіантів характеристик об'єкта. Таку критичну оцінку здійснюють на наступному етапі стосовно до одного або декількох варіантів у цілому. При цьому не враховують взаємозв'язки між різними варіантами інших характеристик. Щоб підвищити вірогідність внесених в морфологічну матрицю нових, оригінальних варіантів об'єкта, необхідно використовувати інформацію, яка відноситься не тільки до цього об'єкта або класу об'єктів. Ефективним є

функціональний підхід, який дозволяє використовувати інформацію з інших галузей техніки. При цьому слід керуватися таким. Спочатку складають загальний перелік варіантів розглядуваної характеристики. Потім групують їх за принципом близьких властивостей. З кожної групи варіантів видокремлюють найбільш важливі. Скорочений перелік включають у морфологічну таблицю. Ця процедура скорочує неістотну інформацію.

При формулюванні варіантів розглядають такі ознаки: геометрична форма, матеріал, розташування і особливості конструктивного виконання (рис. 10.3), характер взаємодій тощо. Залежно від постановки задачі склад ознак змінюється. У деяких випадках ознаки матеріалу вилучають. Морфологічні моделі частіше виконують у вигляді таблиць (табл. 10.3).

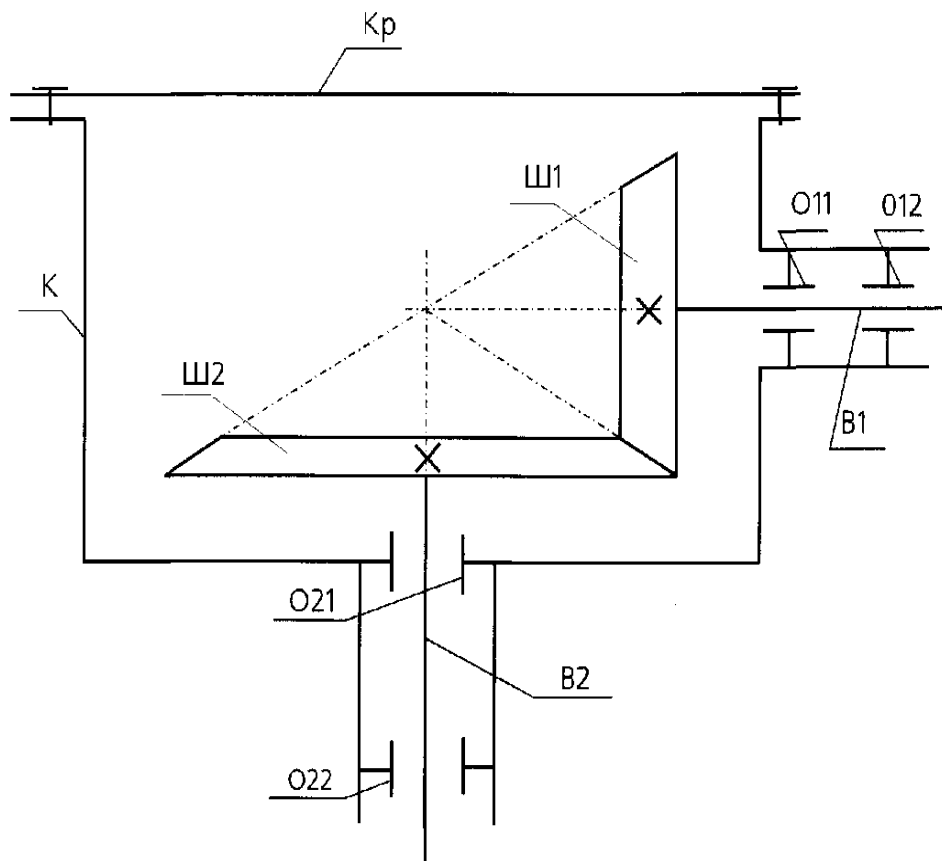


Рисунок 10.3 – Схема конічного редуктора: B1, B2 – вал, відповідно вхідний і вихідний; O11, O12, O21, O22 – опори відповідно вхідного (1) і вихідного (2) валів; Ш1, Ш2 – шестерні, відповідно ведуча і ведена; К – корпус; Кр – кришка

Таблиця 10.3 – Морфологічна модель-таблиця схем кінчного редуктора (рис. 10.3)

Розташування						Виконання	
Вхід			Вихід			Нерухома	
1-вал В1	2-опори 011-012	3-шестерня Ш1	4-вал В2	5-опори О21-О22	6-шестерня Ш2	7-корпус К	8-кришка
1.1.Праворуч	2.1.Дві зовні	3.1.Праворуч	4.1.Внизу	5.1.Дві всередині	6.1.Зверху	7.1.Цільний литий	8.1.Вертикальна
1.2.Ліворуч	2.2.Дві всередині	3.2.Ліворуч	4.2.Зверху	5.2.Дві зовні	6.2.Знизу	7.2.Складений	8.2.Горизонтальна
1.3.Праворуч	2.3.Одна зовні, друга всередині	3.3.Праворуч і ліворуч	4.3.Збоку	5.3.Одна всередині, друга зовні	6.3.Збоку	7.3.Зварний	8.3.Нахилена

Морфологічна модель-матриця, згідно з табл. 10.3, може виглядати таким чином у згорнутому вигляді

$$M_{cx} = M_p \wedge M_n,$$

де M_{cx} - матриця схем кінчного редуктора; M_p - матриця розташування елементів; M_n - матриця виконання нерухомої частини редуктора.

У розгорнутому вигляді

$$M_{cx} = \left| \begin{array}{cccccc} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 & 6.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 & 5.3 & 6.3 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 7.1 & 8.1 \\ 7.2 & 8.2 \\ 7.3 & 8.3 \end{array} \right|.$$

Етап 4. Синтез варіантів об'єкта

При синтезі варіантів об'єкта їх кількість може обчислюватись астрономічними числами, тому що кожна з "n" характеристик володіє певним числом K_i різних варіантів (альтернатив). Сукупність варіантів морфологічної моделі дає можливість визначити повну кількість рішень:

$$N = \prod_{i=1}^n K_i.$$

Якщо кожна з " n " характеристик має однакову кількість альтернатив ($K_1=K_2=\dots=K=const$), тоді повна кількість рішень

$$N = K^n.$$

Приклад: За табл. 10.3 синтез схем конічного редуктору дає $N=3^8=6561$ комбінацію, тому що для кожної з восьми характеристик ($n=8$) число альтернатив $K=3$.

З урахуванням великої кількості варіантів безсистемний їх перебір несприятливий. При виконанні четвертого етапу слід керуватися переліком технічних вимог, які є в технічному завданні і відкоректовані з урахуванням уточнення формулювання задачі.

Оскільки доводиться оперувати декількома характеристиками з великою кількістю варіантів (10 і більше), однозначних правил вибору немає, частіше - це інтуїтивний вибір. Кожен варіант рішення - це сукупність (сполучення) одиничних варіантів усіх характеристик. Синтез варіанту рішення здійснюють, починаючи з вибору варіантів основних елементів і більш суттєвих ознак. Технічні вимоги окремо або у поєднанні одна з одною повинні задовольнятися підмножиною синтезованих варіантів в цілому. Кількість варіантів обмежують виходячи з можливості проробки їх в обмежений (сприятливий) час.

Кожен варіант синтезованого об'єкту можна записати у вигляді морфологічної формули, з ланцюгом по одній альтернативі кожної ознаки для розташування елементів (6 ознак) і нерухомої частини (2 ознаки), наприклад,

$$X_1 = |1.1 - 2.1 - 3.1 - 4.1 - 5.1 - 6.1| \wedge |7.1 - 8.1|$$

$$X_2 = |1.1 - 2.2 - 3.3 - 4.1 - 5.1 - 6.2| \wedge |7.2 - 8.3|$$

$$X_3 = |1.1 - 2.2 - 3.1 - 4.1 - 5.1 - 6.2| \wedge |7.2 - 8.3|.$$

Етап 5. Вибір раціональних (кращих) варіантів.

На цьому етапі вибирають не більше 2-3-х варіантів кращих рішень для детальної конструктивної проробки.

Можна рекомендувати такий порядок вибору кращих рішень: 1) здійснити ранжування вимог за їх значимістю; 2) здійснити ранжування варіантів рішення з урахуванням

числа задовільнюваних вимог і їх значимості; 3) використати експертні оцінки або інший метод неформальних процедур.

Одним з ефективних суб'єктивних методів якісної оцінки варіантів є метод розставлення пріоритету, який служить для багатокритеріального, якісного аналізу на підставі експертизи варіантів побудови об'єктів (цей метод звучить як метод попарних порівнянь).

Метод передбачає попарне порівняння об'єктів за принципом "краще" (\succ) або "більше" ($>$), "погано" (\prec) або "менше" ($<$), "однаково" (\sim) або "порівну" ($=$) і спеціальний алгоритм обробки здобутих даних.

Розглянемо приклад використання методу розташування пріоритету для оцінки якості трьох синтезованих варіантів ($m=3$): X_1 , X_2 , X_3 .

Складаємо систему порівнянь варіантів

$$\begin{array}{l} X_1 = X_2 \mid X_2 < X_3 \\ X_1 > X_3 \end{array}$$

Загальна кількість парних порівнянь при m варіантах:

$$M = m(m-1)/2$$

У цьому випадку $M = 3(3-1)/2 = 3$

Побудуємо повний граф "турніра" варіантів (рис. 10.4), де ребра між X_i і X_j варіантами відображають умови:

$$\begin{array}{l} i \succ j \mid i > j \rightarrow \text{від кращого до гіршого} \\ i \sim j \mid i = j \rightleftharpoons \text{в обидва боки} \\ i \prec j \mid i < j \leftarrow \text{до гіршого від кращого} \end{array}$$

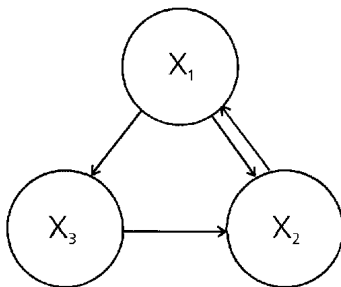


Рисунок 10.4 – Повний граф "турніра" трьох синтезованих варіантів

За системою порівнянь варіантів (або за графом) будуємо матрицю суміжності якісних і кількісних відношень. Для цього обираємо систему кількісних відношень a_{ij} при умовах:

$$i > j \quad a_{ij} = 2; \quad 1,5; \quad 1$$

$$i = j \quad a_{ij} = 1; \quad 1; \quad 0$$

$$i < j \quad a_{ij} = 0; \quad 0,5; \quad -1$$

Прийmemo в нашому випадку таку систему кількісних відношень:

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & a_i > a_j \\ -1 & a_i = a_j \\ 0 & a_i < a_j \end{cases}$$

	j	x ₁	x ₂	x ₃
i				
x ₁		=	=	>
x ₂		=	=	<
x ₃		<	>	=

Складаємо квадратну матрицю якісних відношень

Введемо в якісну матрицю суміжності кількісні співвідношення і виконуємо операції з подвійною ітерацією (табл. 10.4).

Таблиця 10.4 – Матриця суміжності P_i^B(1), P_i(2), P_i^B(2)

i, j	X ₁	X ₂	X ₃	Σa _{ij}	P _i ^B (1)	P _i (2)	P _i ^B (2)	місце
1	2	3	4	5	6	7	8	9
X ₁	1	1	2	4	4/9=0,444	12	0,48	I
X ₂	1	1	0	2	2/9=0,222	6	0,24	III
X ₃	0	2	1	3	3/9=0,334	7	0,28	II
		m ² =3 ² =		9	1	25	1	

Результат у колонці 5 є сумою рядків 2-4, у колонці 6 - їх відносна величина за першою ітерацією (першому наближенню). За другою ітерацією визначаємо абсолютний пріоритет варіантів один перед іншим із записом у колонці 7 за залежностями:

$$P_1(2) = a_{11} \sum_1^j a_{1j} + a_{12} \sum_1^j a_{2j} + a_{13} \sum_1^j a_{3j} = 1 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 = 12,$$

$$P_2(2) = a_{21} \sum_1^j a_{1j} + a_{22} \sum_1^j a_{2j} + a_{23} \sum_1^j a_{3j} = 1 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 3 = 6,$$

$$P_3(2) = a_{31} \sum_1^j a_{1j} + a_{32} \sum_1^j a_{2j} + a_{33} \sum_1^j a_{3j} = 0 \cdot 4 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 3 = 7.$$

Відносний (нормований) пріоритет записуємо в наступну колонку 8:

$$P_i^B(2) = \frac{P_i(2)}{\sum_{i=1}^3 P_i(2)}.$$

Наприклад, P₁^B(2) = 12/25 = 0,48 і т.д.

Сума значень чисел у колонках 6 і 8 дорівнює 1, тобто

$$\sum_{i=1}^3 P_i^B(1) = \sum_{i=1}^3 P_i^B(2) = 1.$$

Таким чином, з трьох варіантів місця розподілились так (колонка 9): кращий X_1 (I місце), потім X_3 (II місце) і поганий X_2 (III місце), тобто $X_1 > X_3 > X_2$.

Ефективність використання методу морфологічного аналізу і синтезу розглянемо на прикладі синтезу технологічних принципів і схем сферично-чистої обробки отворів з пошуком нових принципів, наприклад, сферичного прошивання і дорнування.

Приклад. Розробити схеми високопродуктивної обробки отворів у корпусній деталі, з високою точністю і низькою шорсткістю оброблюваної поверхні, вибрати кращу і запропонувати конструкцію верстатного оснащення для її реалізації.

Технологічний процес зручно розділити на три функціональні елементи ТС (рис. 10.5): середовище, що обробляється (заготовка); середовище, що обробляє (інструмент); взаємодія середовищ (робочий процес). Розглянемо всі елементи

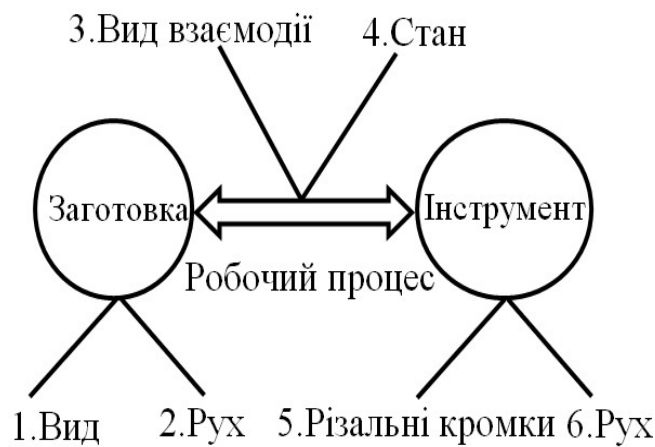


Рисунок 10.5 – Узагальнена модель процесу формоутворення і їх основні ознаки технологічного процесу з ознаками: заготовка (1 - вид; 2 - рух); робочий процес (3 - вид взаємодії, 4 - стан); інструмент (5 - тип, кількість ріжучих кромок; 6 - рух).

Виберемо для кожної ознаки альтернативи (варіанти їх реалізації) (табл. 10.5).

Розроблена основна морфологічна таблиця (табл. 10.5) містить істотні морфологічні ознаки (елементи та їх відношення) технологічного процесу, комбінації котрих створюють множину методів обробки внутрішніх і зовнішніх циліндричних, фасонних поверхонь різанням і поверхнево-пластичним деформуванням, а також деяких методів обсяжної обробки.

Таблиця 10.5 – Основна морфологічна таблиця схем обробки отворів у корпусній деталі

Заготовка		Робочий процес		Різальний інструмент	
1.Вид	2.Рух	3.Вид взаємодії	4.Стан	5.Кількість різальних кромок	6.Рух
1.1.Кругла	2.1.Поступовий	3.1.Точкова	4.1.Твердий	5.1.Обмежене	6.1.Поступовий
1.2.Кругла з фасонним отвором	2.2.Простий обертальний	3.2.Лінійна	4.2.Пластичний	5.2.Необмежене	6.2.Простий обертальний
1.3.Корпусна з циліндричним отвором	2.3.Поступовий і обертальний	3.3.Поверхнева	4.3.Текучий	5.3.Нема	6.3.Складний обертальний
1.4.Корпусна з фасонним отвором	2.4.Нема	3.4.Обсяжна	4.4.Газоподібний		6.4.Поступовий і обертальний
	2.5.Вібраційне	3.5.Комбінована	4.5.Змішаний		6.5.Поступовий і складний обертальний
					6.6.Нема

Критеріями оцінки якості окремих варіантів можуть бути собівартість, продуктивність, точність, витрата металу, або узагальнений критерій. Наприклад, для фінішної обробки різанням циліндричних отворів у корпусних деталях, де розміри дозволяють виконувати обробку як методом копіювання, так і методом обкатки контуру, з табл. 10.5 можна вибрати раціональний варіант за узагальненим критерієм.

З урахуванням мінімальної собівартості, мінімальної витрати енергії, максимальної продуктивності, максимальної точності, якості поверхні та зносостійкості інструменту при обробці наскрізного отвору в корпусній заготовці вибрані 5 основних варіантів комбінації (X_1 - X_5) у вигляді морфологічних формул, реалізація яких наведена у табл. 10.6 (підкреслені альтернативи, які відрізняються від першого варіанта):

$$X_1 \Rightarrow |1.4 - 2.5| - |3.2 - 4.1| - |5.1 - 6.4|$$

$$X_2 \Rightarrow |1.4 - 2.5| - |3.2 - 4.1| - |5.1 - \underline{6.1}|$$

$$X_3 \Rightarrow |1.4 - 2.5| - |\underline{3.1} - 4.1| - |5.1 - \underline{6.5}|$$

$$X_4 \Rightarrow |1.4 - 2.5| - |3.2 - 4.1| - |\underline{5.2} - \underline{6.5}|$$

$$X_5 \Rightarrow |1.4 - 2.5| - |\underline{3.1} - 4.1| - |5.1 - 6.4|.$$

До відомих конструкцій металорізальних верстатів можуть бути віднесені технологічні принципи, які реалізують варіанти: 1 (свердлильно-розточний верстат); 2 (протяжний верстат); 4 (шліфувальний верстат); 5 (розточний верстат).

Варіант 3 дає поєднання альтернатив для нетрадиційного і перспективного методу, який реалізує можливості одночасної комбінованої обробки різанням з поверхнево-пластичним деформуванням, а альтернативний йому варіант 6 реалізує метод поверхневого деформування і обсяжного дорнування (сполучення 1.4 - 2.5 - 3.3 - 4.1 - 5.3 - 6.5 по табл. 10.5).

Вибраний найкращий альтернативний метод (варіанти 3 і 6) реалізуються за допомогою таких рухів інструменту при нерухомій заготовці (рис. 10.6): обертання навколо осі z отвору з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_e$ обертання навколо власної осі $\bar{\omega}_z$, яка лежить в одній площині з віссю отвору і перетинає її під кутом θ , з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_z$, рух вздовж осі отвору з подачею S_z і осьовою силою F_n .

Для пошуку конструктивних реалізацій методу сферичного прошивання і дорнування отворів при різних відносних рухах заготовки і інструменту (рух тільки інструменту, тільки заготовки, інструменту і заготовки) будемо додаткову морфологічну матрицю кінематичних схем різання M_p з двома ознаками - рухи заготовки і інструменту (табл. 10.6, 10.7):

$$M_p = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 \\ 1.2 & 2.2 \\ 1.3 & 2.3 \\ 1.4 & 2.4 \\ 1.5 & 2.5 \\ 1.6 & 2.6 \end{vmatrix}.$$

Для отримання варіанта необхідно кожний елемент одного ряду матриці поєднувати з кожним елементом

другого ряду, що дає $N=6^2=36$ комбінацій, з яких на рис. 10.7 наведено один приклад конструктивної реалізації - пристрою для чистової обробки шляхом різання і поверхнево-пластичного деформування на універсальних, спеціалізованих верстатах, багатоцільових і верстатах з ЧПК.

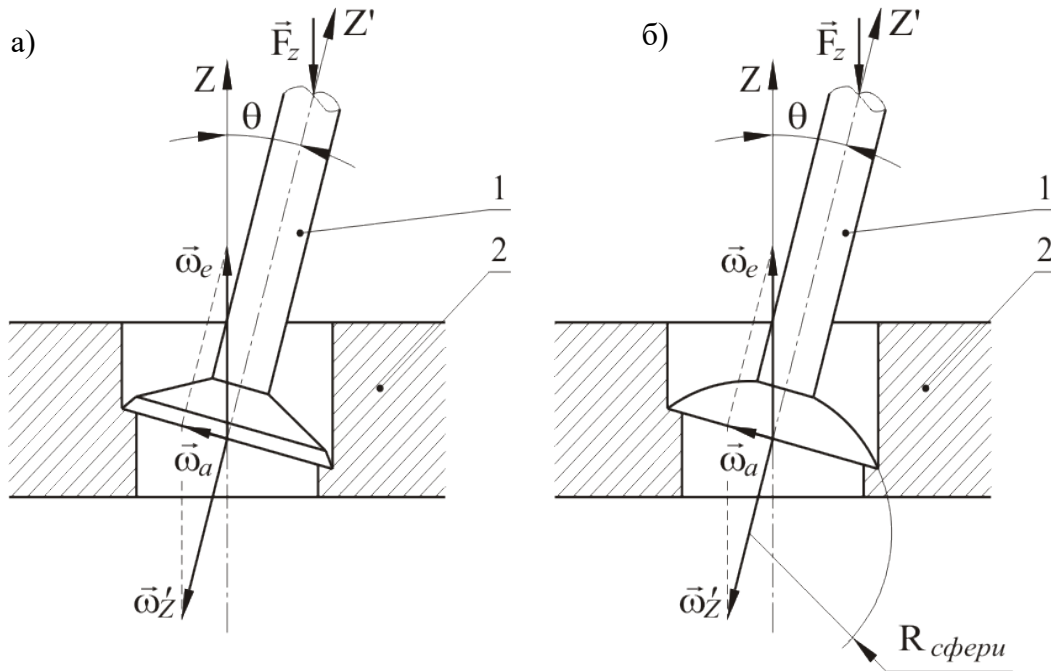


Рисунок 10.6 – Приклади реалізації сферичного прошивання і дорнування отворів у вигляді кінематичних схем різання і пластичного деформування при: а – прошиванні; б – одночасному дорнуванні та прошиванні; 1 – інструмент із затилуванням конічним або по сфері $R_{сфери}$; 2 – заготовка

Таблиця 10.6 – Варіанти технологічних принципів обробки наскрізного отвору у корпусній деталі

№ варіанта	Позначення	Елементи методу обробки	Схема обробки
1	2	3	4
I	а ₁ зенкування, райбе- руван- ня		

Продовження таблиці 10.6.

1	2	3	4
II	а ₂ прошивання, протягування		
III	а ₃ сферичне, прошивання		
IV	а ₄ планетарне, шліфування		
V	а ₅ розточування		

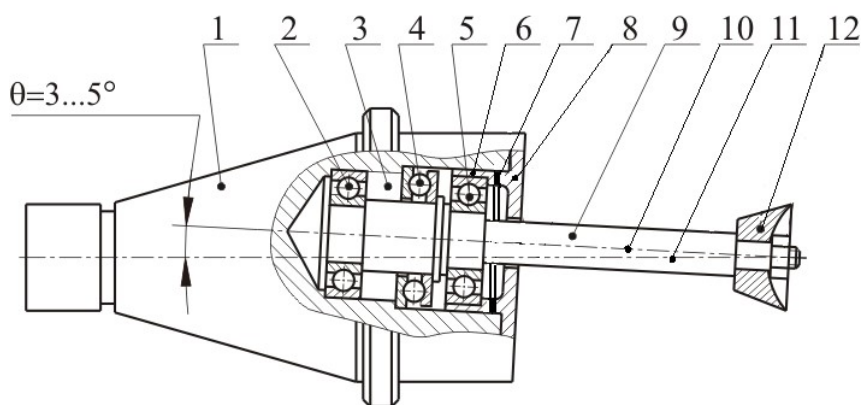


Рисунок 10.7 – Пристрій для сферичного прошивання і дорнування циліндричних і фасонних отворів: 1 - корпус (оправка з конічним хвостовиком); 2, 5-радіальні шарико-підшипники; 3 - отвір оправки 1; 4 - упорний шарикопідшипник; 6 - втулка; 7 - компенсаційна пластина для натягу підшипників; 8 - кришка; 9 - інструментальний шпиндель; 10 - вісь інструментального шпинделю; 11 - вісь яка співпадає з віссю отвору, що оброблюється (шпинделю верстата); 12 - інструмент сферичного прошивання і дорнування отворів

Таблиця 10.7 – Рухи заготовки й інструменту при реалізації методу

Заготовка		Інструмент	
1. Рух	Схема	2. Рух	Схема
1.1. Просте обертання		2.1. Просте обертання	
1.2. Просте обертання і переміщення		2.2. Просте обертання і переміщення	
1.3. Складне обертання		2.3. Складне обертання	
1.4. Складне обертання і переміщення		2.4. Складне обертання і переміщення	
1.5. Переміщення		2.5. Переміщення	
1.6. Нерухома		2.6. Нерухомий	

Примітка: а - вісь інструменту; б - вісь заготовки; індекс "з" відповідає рухові заготовки, а "і" індекс інструменту.

10.4. Асоціативні методи створення ТС

До них відносяться методи: контрольних запитань (Великобританія, Т. Ейлор, 1969 р., США, Д. Попа, 1945 р.); відомостей характерних ознак (США, Р. Кроуфорд, 1954 р.); конференцій ідей (Німеччина, В. Гільде та ін., 1970 р.); фокальних об'єктів (США, Ч. Вайтинг, 1958 р.); гірлянд раптовостей і асоціацій (СРСР, Г. Буш, 1972 р.); мозкового штурму (США, А. Осборн, 1957 р.); синектики (США, В. Гордон, 1944 р.) та інші.

Суть цих методів зводиться до такого: якщо на ТС або об'єкт, що вдосконалюється, перенести ознаки інших, випадково обраних об'єктів, то число неочікуваних варіантів різко зростає. Таким чином для генерування нових ідей, служать асоціації, метафори, аналогії і випадково обрані поняття.

Асоціація - зв'язок, який виникає за певних умов між двома або більше психічними утвореннями (відчуттями, рухаючими актами, ідеями, тощо).

Метафора - перенесення властивостей одного предмета (явища) на другий на підставі загальної для обох ознаки.

Між двома зовсім різними поняттями (словами) можна навести логічний зв'язок, асоціативний перехід в 4-5 етапів (кроків). Візьмемо два різних поняття - "сонце" і "патрон". Здійснимо асоціативний перехід: "сонце" - "земля", "земля" - "родовище", "родовище" - "магніт", "магніт" - "патрон".

Другий приклад: "ягода" - "шпindel", асоціативний перехід: "ягода" - "ділянка", "ділянка" - "цех", "цех" - "верстат", "верстат" - "шпindel".

Для виникнення асоціацій і генерування ідей можна використовувати різного виду метафори: бінарні метафори-аналогії ("метал дзвонить"); метафори-катахрези, які містять протиріччя ("коловий квадрат"); метафори-загадки ("що сокирою не перерубаєш?").

Серед аналогій розрізняють: пряма - порівняння з аналогічним об'єктом з другої області техніки; емпатія - вживання в образ об'єкта, що вдосконалюється, неначе маленька людина в ньому (почуття, що виникають, відчуття); символічна - об'єкт в узагальненому, абстрактному вигляді (шліфувальний круг - точкова шорсткість, храповик - надійна перервність, затискний механізм - натягнута пружина); фантастична - вводиться фантастична істота, що виконує те, що вимагається умовами задачі ("шапка-невидимка" —> неруйнівні види контролю, "чоботи-швидкоходи" -> космічні ракети, "силові потоки" - затискні механізми).

Розглянемо деякі з асоціативних методів.

10.4.1. Метод фокальних об'єктів

Цей метод потребує мінімальної інформаційної підготовки і дозволяє більше використовувати знання в різних галузях. Він спрямований на послаблення психологічної інерції шляхом використання асоціацій і метафор у характеристиці об'єкта. Ця ідея лягла в основу методу, коли переносяться раптово обрані об'єкти на той, що удосконалюється, котрий лежить ніби у фокусі переносу.

Застосування методу включає такі етапи: 1) вибір фокального об'єкта, який удосконалюється; 2) вибір 3-4 об'єктів навмання (із словника, каталогу, технічного журналу, художньої книги, тощо); 3) складання переліку (списку) ознак раптових (випадкових) об'єктів; 4) генерування ідей (сполучень) шляхом приєднання до фокального об'єкта ознак раптових об'єктів; 5) розвиток придбаних сполучень шляхом вільних асоціацій; 6) оцінка придбаних ідей і відбір корисних рішень з притягненням експертів.

Сфера застосування методу - рішення технічних задач з покращення відомих ТС в умовах мінімальних вихідних даних і відсутності чітко сформульованих вихідних вимог до рішення, постановка оригінальної конструкторської задачі, тренування фантазії (придумати фантастичне), створення товарів широкого вжитку (розширення асортименту) тощо.

Приклад. Запропонувати або удосконалити затискний патрон, котрий повинен забезпечити у гнучкому токарному

модулі затиск заготовок у всьому робочому діапазоні (табл. 10.8).

На етапі 4 розвиваємо ознаки випадкових об'єктів, переносимо їх на затискний патрон. Наприклад, затискний патрон - широкоекранний, затискний патрон - багатосерійний, затискний патрон - колесний, затискний патрон - сипучий тощо.

Таблиця 10.8 – Початкові етапи методу фокальних об'єктів

Етап 1	Етап 2	Етап 3
Фокальний об'єкт	Випадкові об'єкти	Ознаки раптових об'єктів
Затискний патрон	Кіно	Широкоекранне, звукове, кольорове, обсяжне, багатосерійне
	Автомобіль	Легковий, вантажний, колісний, гусеничний, спортивний
	Пісок	Сипучий, морський, річковий, пляжний, цукровий

На етапі 5 розвиваємо отримані сполучення шляхом вільних асоціацій. Наприклад, широкоекранний багатосерійний затискний патрон - це широкодіапазонний затискний патрон, у якого затискні кулачки змінного об'єму ($V_{ze} = var$ від $V_{ze} = max$ для d_{min} до $V_{ze} = min$ для d_{max}) виконані у вигляді набору кулачків, що входять один в другий з можливістю їх розсування і подальшою фіксацією їх положення (рис. 10.8, а). Другим варіантом вільних асоціацій є, наприклад, колісний затискний патрон, у якого корпус виконаний у формі автомобільного колеса постійного об'єму ($V_{ze} = const$), заповненого рухомим середовищем (сипучим або текучим) з подальшим затвердінням усього середовища (рис. 10.8, б). Далі відбираємо одну з розглянутих ідей для детальної конструкторської проробки.

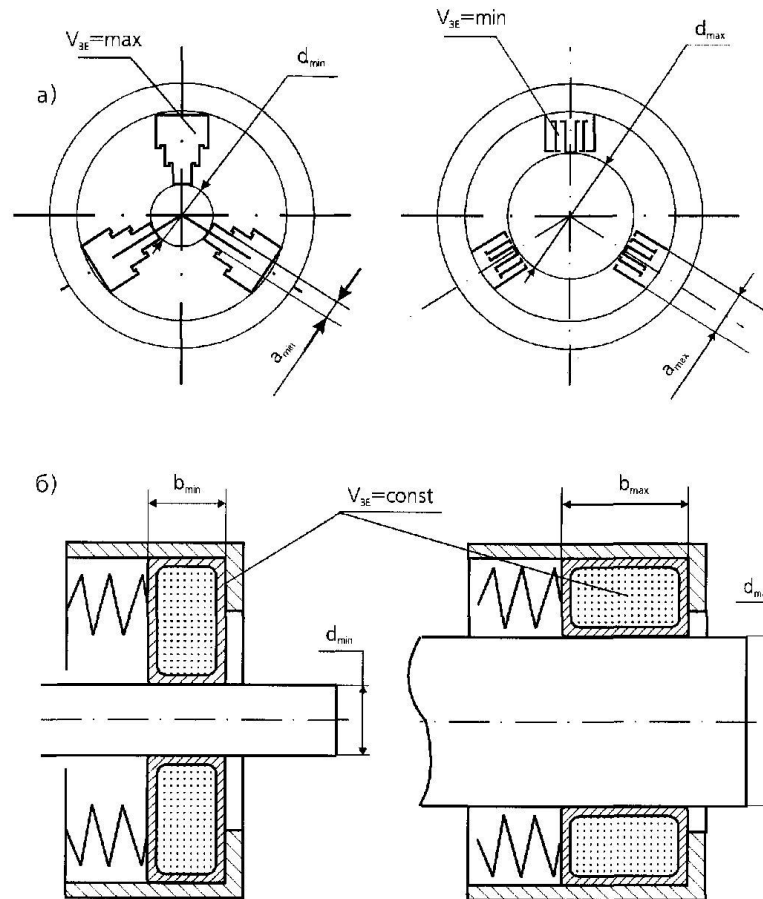


Рисунок 10.8 – Принципові схеми широкодіапазонних затискних патронів: а) - з розсуваними кулачками ($V_{ze} = var$); б) - з рухомих середовищем ($V_{ze} = const$)

10.4.2. Метод гірлянд раптовостей і асоціацій

Подальший розвитком методу фокальних об'єктів є метод гірлянд раптовостей і асоціацій. Під час вирішення винахідницьких задач виникає проблемна ситуація - прірва між відомим і невідомим, відсутність підстави, на якій ставляться надійні опори для побудови "мосту" між ними.

Така ситуація виникає при пошуку рішення більшості конструкторсько-винахідницьких задач. При цьому важко застосовувати традиційні логічні прийоми, робити дедуктивні висновки. В таких випадках найбільш результативний спосіб побудови "моста" - "підвішування" його на гірляндах асоціацій і метафор.

Надбання оригінальних і ефективних результатів звичайно пов'язане з переносом знань в нову сферу, інтерпретацією нових ідей за допомогою обхідних (асоціативних) слів. Евристична цінність асоціацій і метафор

підвищується їх емоціональним підфарбуванням.

Метод включає послідовне виконання ряду кроків - операцій обробки інформації: 1. Визначення синонімів (I гірлянда синонімів). 2. Свавільний вибір об'єктів зі слів, взятих навмання (II гірлянда випадкових об'єктів). 3. Складання комбінацій з елементів гірлянди синонімів і гірлянди випадкових об'єктів (III гірлянда). 4. Складання зведеного в таблицю переліку ознак випадкових об'єктів з перерахуванням як основних, так і другорядних незначних ознак. 5. Генерування ідей шляхом почергового приєднання до технічного об'єкта і його синонімів ознак випадково обраних об'єктів (IV гірлянда). 6. Генерування гірлянди вільних асоціацій (V гірлянда) почергово з ознак випадкових об'єктів. 7. Генерування нових ідей (VI гірлянда) шляхом приєднання до елементів I гірлянди синонімів технічного об'єкту почергово елементів V гірлянди вільних асоціацій. 8. Оцінка і вибір раціональних варіантів ідей. 9. Вибір найкращого варіанта з раціональних.

Приклад. Запропонувати нові оригінальні та корисні подавальні цанги або патрони для подавання прутка з метою підвищення їх довговічності.

I гірлянда синонімів для слів: подавальна цанга - подавальний патрон - штовхач.

II гірлянда випадкових об'єктів: тертка - сороконіжка - лижі - квітка.

III гірлянда - подавальна цанга у вигляді тертки, подавальна цанга як сороконіжка, штовхач у вигляді лиж, подавальна цанга у вигляді квітки і т.д.

Складемо перелік ознак випадкових об'єктів (табл. 10.9).

Спробуємо генерувати ідеї і гірлянди асоціацій: подавальна цанга, йоржиста, як терка; подавальна цанга багатопелюсткова і т.і. Однією з реалізацій цих сполучень може бути довговічна багатопелюсткова цанга (рис. 10.9, а), яка має корпус 2, згвинчений з трубою подавання 1. В середині корпусу міститься втулка 3 і багатопелюсткова штампована "терка" 4, яка взаємодіє з прутком 5. Для такої цанги за рахунок ефекту закусування сила подачі більша ніж сила набору (заправки). Багатопелюсткові подаючі цанги 2 можуть

Таблиця 10.9 – Перелік і ознаки випадкових об'єктів

Найменування випадкового об'єкта	Ознаки
Тертка	Жорстка, колюча, циліндрична, плоска, тонкостінна, листовая, штампована...
Сороконіжка	Живуча, довга, багатоніжка, гнучка, тонконога, ділима...
Лижі	Плоскі, вузькі, дерев'яні, гладкі, прошарені, пластикові...
Квітка	Дзвоноподібна, багатопелюсткова, парасольчата, саморозчиняюча, з шипами, симетрична, волосиста закручена...

бути уніфікованим елементом для подачі і підтримки прутка різної довжини у двох (спереду і ззаду подаючої труби) або трьох (також посередині подаючої труби) місцях, що істотно підвищує надійність і довговічність механізму подачі прутка. Ефективність застосування багатопелюсткових цанг зі штампованою пружною частиною полягає у значній економії металу.

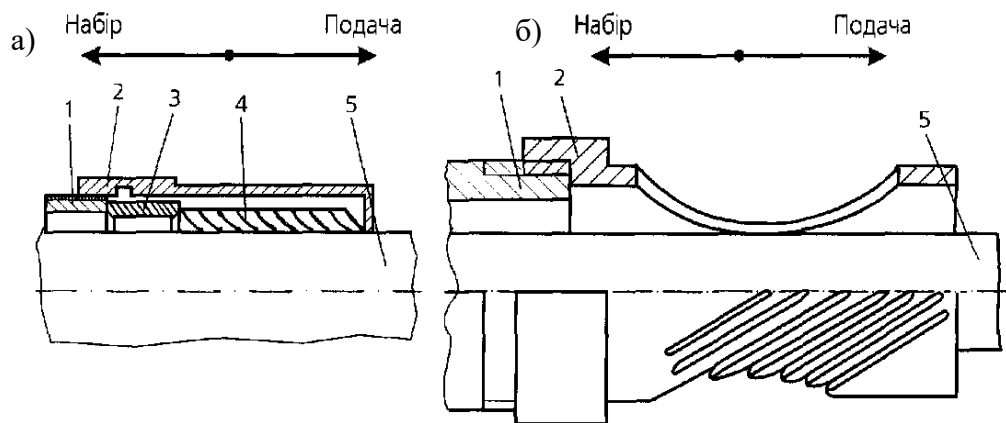


Рисунок 10.9 – Довговічні багатопелюсткова (а) і скручена (б) подавальні цанги

Другою реалізацією сполучень (асоціацій) є скручена подавальна цанга (рис. 10.9, б). У подавальних цангах зі скрученими пелюстками для забезпечення сили затиску

прутка використовується потенційна енергія попередньо зігнутих і закручених пелюсток. Пелюстки до скручування створюються наскрізними розрізами на зубофрезерному верстаті. Перевагою таких цанг є їх багаторазове відновлення шляхом додаткового скручування.

При створенні довговічних подаючих цанг, що працюють у великому діапазоні діаметрів прутків, які подаються, що особливо важливо для пруткових автоматів з ЧПК в гнучких виробничих системах (ГВС), необхідно прикласти зусилля для забезпечення силової характеристики з двома ділянками - крутою для попереднього натягу і пологою при роботі.

Оскільки сьогодні особлива увага приділяється економії металу, слід вести роботу у напрямку маловідходної технології їх виготовлення, наприклад, з листового матеріалу шляхом холодного витискування (рис. 10.10). Запропонована подавальна цанга по асоціації "квітка, що закривається" складається з гільзи з пелюстками 5, які стискають пруток 6. Бурт гільзи 3 розташований в кільцевій виточці труби подачі 1. Гільза виконана з прорізами, які створюють додаткові пружні пелюстки 4. Між трубою подачі 1 і гільзою 3 встановлено підтримуюче кільце 2 з направляючим заходним конусом. Шарнірне з'єднання гільзи 3 і труби подавання 1 завдяки виточці у трубі і бурта у гільзі, забезпечує вільне деформування всієї гільзи під час заправки прутка. Цим досягається ефективне використання усього металу гільзи для створення необхідних сил зчеплення з прутком, діаметр котрого може змінюватись в певних межах.

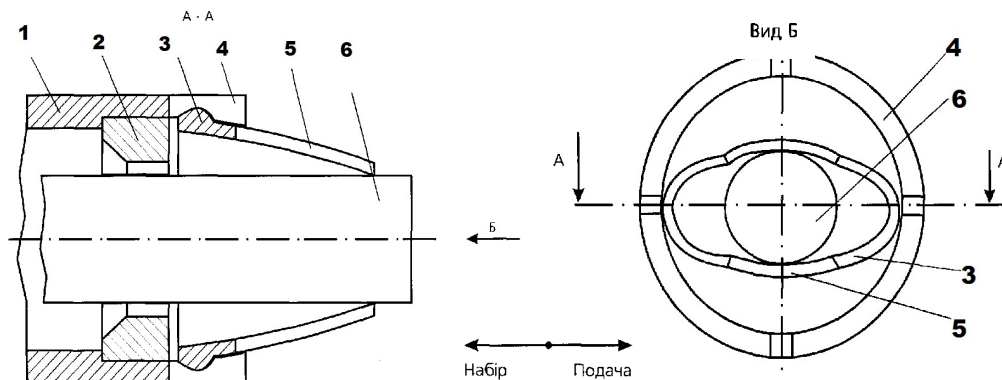


Рисунок 10.10 – Подавальна цанга, яка отримана методом холодного витискування

10.5. Алгоритмічні методи створення ТС

Ці методи відносяться до програмних методів рішення задач пошуку нових технічних рішень. Основними серед них є алгоритм розв'язання винахідницьких задач (АРВЗ), вепольний аналіз, узагальнений евристичний метод (УЕМ).

10.5.1. Алгоритм розв'язання винахідницьких задач (АРВЗ)

Цей метод, автором якого є Альтшулер Г.С., має багато модифікацій залежно від року їх появи (АРВЗ-59, 61, 64, 65, 68, 71, 77, 80, 88) і продовжує свій розвиток у вигляді теорії рішення винахідницьких задач (ТРВЗ) (у російській аббревіатурі ТРИЗ).

Під алгоритмом розв'язання винахідницьких задач розуміють комплекс послідовно виконаних дій (кроків, етапів), спрямованих на вирішення винахідницької задачі (не суто в математичному, а в більш широкому розумінні).

Розглянемо як приклад АРВЗ-71, який має 6 стадій, що виконуються у певному порядку (рис. 10.11): 1. Вибір задачі - 6 кроків. 2. Уточнення умов задачі - 5 кроків. 3. Аналітична - 8 кроків. 4. Попередня оцінка знайдених ідей - 5 кроків. 5. Оперативна - 9 кроків. 6. Синтетична - 4 кроки.

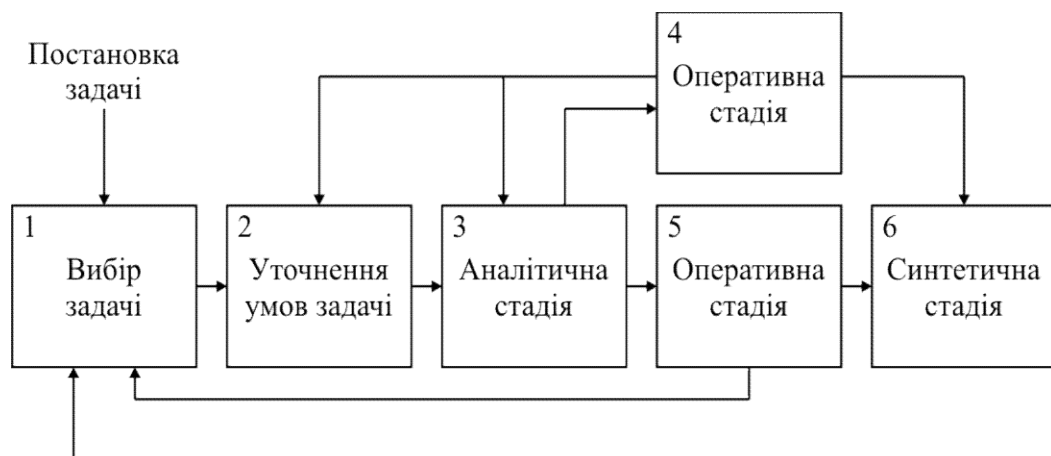


Рисунок 10.11 – Стадії пошуку нових технічних рішень згідно з АРВЗ

Кожна стадія має ряд послідовних кроків, виконання котрих регламентовано конкретними питаннями і

рекомендаціями (підкроками). Це дозволяє доцільно сполучати логіку й інтуїцію у процесі розв'язання задачі. Алгоритм включає також конкретні кроки з усунення психологічних бар'єрів, має розвинутий інформаційний апарат - дані про типові прийоми подолання технічних протиріч.

Стратегія методу зображена на рис. 10.12. Спочатку викладаються умови початкової задачі (ЗВ), потім формулюється зворотня задача з її технічними протиріччями у порівнянні з ідеальним кінцевим результатом (ІКР) і поступово іде наближення в області технічних протиріч з використанням з одного боку фонду фізичних ефектів, а з іншого - прийомів подолання технічних протиріч.

Альтшулер Г.С. після аналізу близько 40 тисяч винаходів (де було знайдено близько 1200 технічних протиріч) запропонував 40 прийомів подолання технічних протиріч.

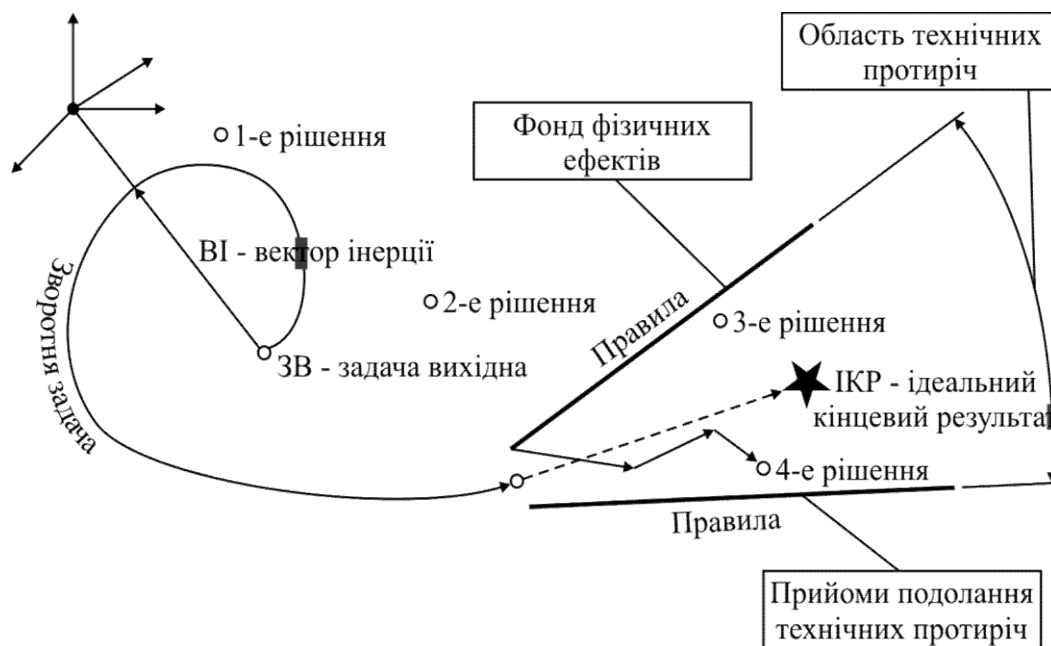


Рисунок 10.12 – Стратегія розв'язання технічних протиріч за допомогою АРВЗ

10.5.2. Прийоми усунення технічних протиріч

На оперативній стадії АРВЗ або навіть окремо можна використовувати запропоновану Альтшулером Г.С. таблицю усунення технічних протиріч, фрагмент якої наведено в

табл. 10.10, де в клітинках проставлені номери прийомів усунення протиріч.

Для того, щоб користуватися табл. 10.10, пропонується 40 прийомів усунення технічних протиріч.

Наведемо приклад використання таблиці усунення технічних протиріч.

Необхідно створити муфту для з'єднання валів, які є неспіввісні, наприклад на 4...12 мм, при цьому пружні зміщення кінців валів не повинні збільшуватись при збільшенні неспіввісності. Таким чином, у цьому випадку виникає технічне протиріччя між неспіввісністю і пружною силою, що виникає в системі внаслідок неспіввісності. Користуючись повною табл. 10.10, для протиріччя типу 18-10 (готовність до дії - сила) доцільно використати прийоми NN 26,10,16. Використаємо прийом N 16, так званий принцип часткового або надлишкового рішення.

Таблиця 10.10 – Таблиця усунення технічних протиріч

Що необхідно змінити (збільшити, покращити) за умовами задачі		Що неприпустимо погіршується, якщо використовувати відомі способи						
		Вага рухомого об'єкта	Вага нерухомого об'єкта		Швидкість	Сила		Продуктивність
		1	2		9	10		39
1	Вага рухомого об'єкту			...	2, 8 15, 38	8, 10 18, 37		35, 3 24, 37
2	Вага нерухомого об'єкту			...		8, 10 19, 35		1, 28 15, 35
9	Швидкість	8, 28 13, 38		...		13, 28 15, 19		
10	Сила	8, 1 37, 18	18, 13 1, 28					3, 28 35, 37
...
18	Готовність до дії					26, 10,16		

Для передачі обертів між валами, що зміщені, наприклад, на 50...400 мм, використовуються редуктори, які забезпечують рівномірність обертання. У нашому випадку необхідно створити редуктор, котрий би виконував функції з'єднувальної муфти і з'єднував при цьому кінці валів з неспіввісністю $\alpha = 4...12$ мм. Конструкція такої муфти (рис. 10.13) виконана у вигляді корпуса 4, котрий закріплений, наприклад, на нерухомій стійці, у підшипниках якої встановлений ведучий або ведений вал. Корпус 4 регулюється у радіальному напрямку (не показано). В центральному отворі корпуса встановлено підшипник (їх може бути два або більше), наприклад, голчастий, в якому зцентрована по більшому діаметру обойма 3, осьове переміщення якої обмежується фланцем 5. З обоймою 3 в постійному зачепленні перебувають однакові шестерні 2 і 6, встановлені на кінцях валів 1 і 7, які зміщені в радіальному напрямку. Зуб'я шестерень діжкоподібні для забезпечення компенсації кутового уміщення валів. При передачі обертання, наприклад, від шестерні 2 на шестерню 6 обойма 3 також обертається, але оскільки числа зуб'їв шестерень однакові, то і частота обертання валів буде однаковою.

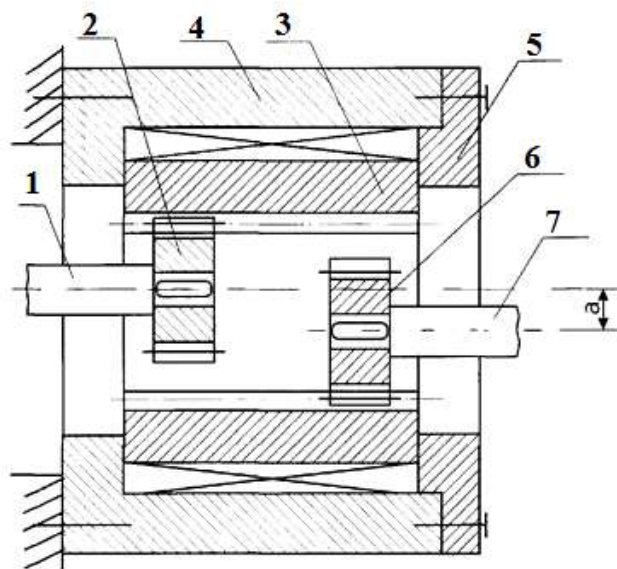


Рисунок 10.13 – Синтезована муфта у вигляді планетарної передачі

10.5.3. Узагальнений евристичний метод (УЕМ)

Під евристичним методом розуміють послідовність вказівок або процедур обробки інформації, яка використовується з метою пошуку раціональних і нових конструктивних рішень. Процедури обробки інформації, які виконуються людиною і які запрограмовані на ЕОМ, називаються евристиками або еврісами.

Накопичений практичний досвід використання ЕОМ для розв'язання задач пошуку нових технічних рішень (ТР) дозволяє зробити два висновки:

1. Багато евристичних методів для безмашинного використання стали більш ефективними після їх часткового програмування і використання ЕОМ.

2. З'явилися машинні методи пошукового конструювання, котрі без ЕОМ застосовувати недоцільно або практично неможливо, як недоцільно використовувати без ЕОМ більшість чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь або систем рівнянь. До цих методів належить УЕМ (автор О.І. Половинкін).

УЕМ - це опис процесу (рис. 10.14), розбитого на 7 етапів, які суттєво відрізняються цільовим призначенням; кожен етап складається з декількох процедур підготовки й обробки інформації, а також з 8 інформаційних фондів (масивів).

Інформаційна база включає такі фонди: М1 - фонд фізико-технічних ефектів; М2 - інформаційний фонд ТР класу технічних об'єктів, що розробляються і які представлені у вигляді морфологічних таблиць з постійними колонками, кількість котрих може збільшуватись; М2А - фонд ТР на рівні кращих світових зразків; М3 - список (перелік) вимог, які висуваються до ТС; М4 - інформаційний фонд матеріалів і конструктивних елементів, які є перспективними для створення нових ТС; М5 - інформаційний фонд технологічних процесів, котрі можна використовувати у виготовленні ТС певного класу; М6 - фонд евристичних прийомів (табл. 10.11); М7 - інформаційний фонд ТР провідного класу ТС; М8 - методи оцінки і вибору кращих варіантів ТР.

Фонди М1, М6, М8 - універсальні, інші фонди - спеціалізовані і залежать від класу ТС.

Евристичні прийоми - вказівки на те, як перетворити наявне або аналогічне ТР або в якому напрямку шукати, щоб отримати шукане рішення.

Переважає більшість евристичних прийомів складається ніби з двох частин "що і як?": перша - опис простору змінних і відповідає на запитання "що змінити?" у розглядуваному ТР; друга - опис способу, яким можна змінити змінні і відповідає на запитання "як змінити?".

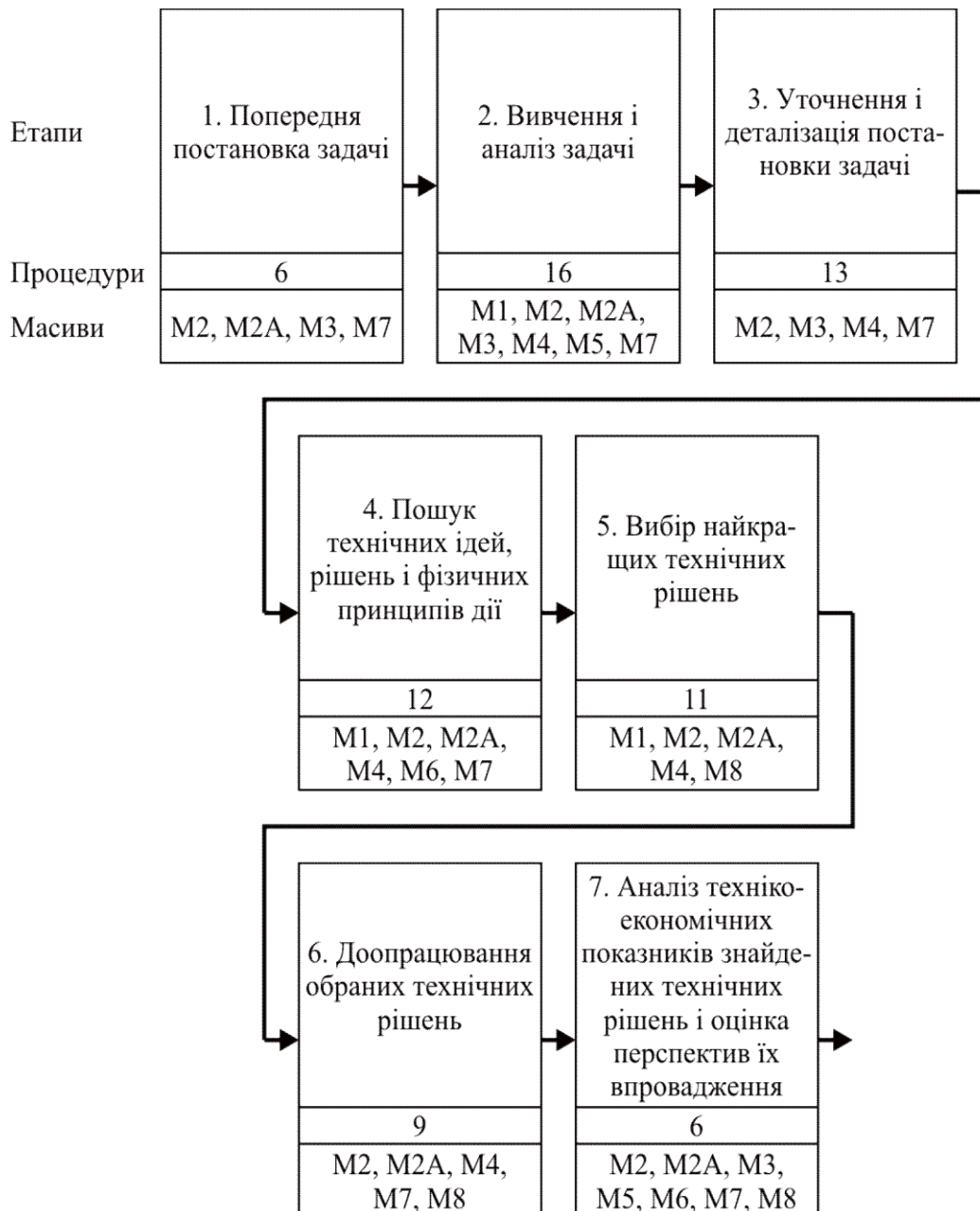


Рисунок 10.14 – Послідовність пошуку нових технічних рішень за допомогою узагальненого евристичного методу

Таблиця 10.11 – Коротка характеристика міжгалузевого фонду евристичних прийомів

№ групи	Найменування групи	Кількість	
		Прийомів	Пошукових процедур
1	Кількісні зміни	15	30
2	Перетворення форми об'єктів	15	40
3	Перетворення у просторі	22	50
4	Перетворення у часі	13	32
5	Перетворення руху	18	43
6	Перетворення матеріалу	19	55
7	Перетворення виключенням	16	30
8	Перетворення додаванням	15	43
9	Перетворення заміною	24	64
10	Диференціація	22	45
11	Інтеграція	16	30
12	Використання профілактичних заходів	17	32
13	Використання резервів	14	33
14	Перетворення за аналогією	11	30
15	Комбінування і комплексний синтез	21	43
	Всього	258	600

10.6. Спеціалізовані методи створення ТС

Прикладом таких методів є створений в НТУУ “КПІ” (Ю.М. Кузнецов, 1977 р.) диференціально-морфологічний метод синтезу затискних патронів. Суть методу полягає в тому, що для вирішення протиріч на стадії пошуку структур (або морфології) затискних патронів (ЗП) використовують евристичні прийоми повного, неповного і комбінованого

розчленування затискного елемента (ЗЕ), що дає різні основні і додаткові ефекти, а при повному однонаправленому розчленуванні синтезовані структури відповідають новим принципам затиску або забезпечують нові якості. Згідно з основним ефектом розчленування, на стадії структурного синтезу обирають декілька переважних структур за напівформалізованим власним критерієм якості, який відбиває основні вимоги до синтезованого патрону, а далі проводять морфологічний аналіз схем, використовуючи прийоми: перестановки, сполучення, встановлення послідовності роботи і функції затискних елементів (ЗЕ) і передавально-підсилюючих ланок (ППЛ), введення різних зв'язків, вибору їх місця.

Різні структури і схеми затискних патронів (ЗП) можна отримати запропонованим методом у поєднанні з методами комбінаторики.

Прийоми розчленування ЗЕ (рис. 10.15) відносяться до евристичних і використовуються не тільки при синтезі структур і схем, але і при пошуку принципу затиску.

Суть прийомів розчленування розглянемо на прикладі синтезу затискних патронів з клинковою ППЛ, до яких належать цангові патрони. При повному розчленуванні клинового ЗЕ цангового патрону (рис. 10.16) згідно з теорією графів, тільки в площині $X-Y$ (рис. 10.16, а, б) при створенні дерева повного графа (рис. 10.16, в) кількість варіантів неізоморфних дерев на 7 вершинах (рис. 10.16, г) становить $Сп=11$. Цю ж кількість варіантів $Сп$ можна отримати за допомогою методів комбінаторики, використовуючи принцип сполучення з $n=4$ по $r=2,3,4$:

$$Сп(n,r) = P(n,r)/r! = n!/(r!(n-r)),$$

де $P(n,r)$ -число перестановок з n по r ; n - загальна кількість розчленувань у площині $X-Y$, які проходять через центр O затискного елемента з чотирьох сторін ($n=4$); r - число повних, можливих розчленувань по осях у площині $X-Y$, які проходять через центр O затискного елемента ($r=2,3,4$).

Таким чином, використовуючи правило суми, отримаємо (табл. 10.12):

$$Сп = Сп(4,2) + Сп(4,3) + Сп(4,4) = 6 + 4 + 1 = 11.$$

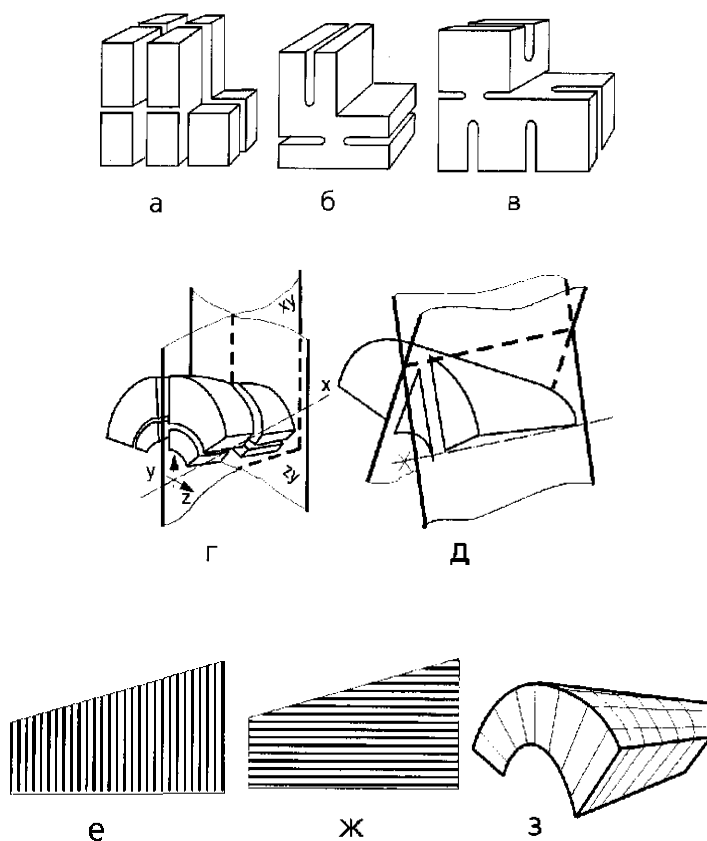


Рисунок 10.15 – Варіанти розчленування (диференціації функцій) затискних елементів: а, г – повне повздовжнє і поперечне; б, в – неповне повздовжнє і поперечне; б, в – неповне повздовжнє і поперечне; д – повне гранне; е - повне багатогранне (багатошарове) поперечне; ж – повне багатократне (багатошарове) поздовжнє; з – повне багатократне (багатошарове) поздовжнє і поперечне з утворенням сипучого або плинного середовища

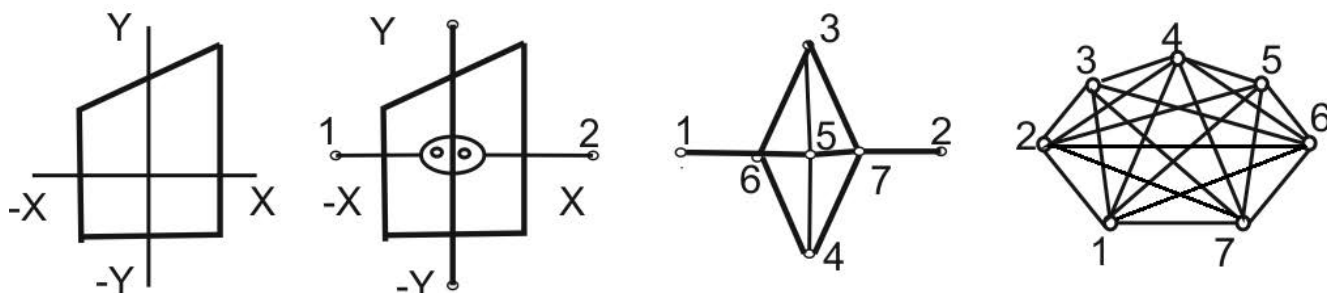




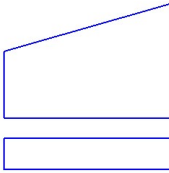

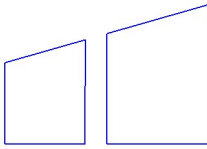

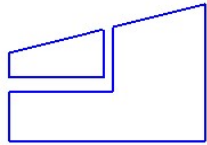

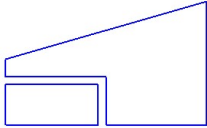

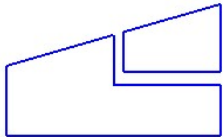
Рисунок 10.16 – Послідовність створення дерева повного графу структури затискного патрона з клиновою передавально-підсилювальною ланкою у повздовжній площині X-Y

Для неповного розчленування по осях X і Y кількість неізоморфних варіантів буде більшою ($S_{п}=15$), тому що загальне

число сполучень з $p=4$ по $l=1,2,3,4$ буде (табл. 10.13):

$$C_{np} = C_{np}(4,1) + C_{np}(4,2) + C_{np}(4,3) + C_{np}(4,4) = 4 + 6 + 4 + 1 = 15.$$

Таблиця 10.12 – Варіанти повного розчленування затискного елемента (ЗЕ) з клинового передавально-підсилювальною ланкою (ППЛ) у площині X-Y (фрагмент)

№	Напрямок повного розчленування	Літерні (цифрові) коди розчленування	Ознаки і структура ЗЕ
1	0	XOYO (0)	
2	-X  -X	-XX (102)	
3	 Y -Y	YY (304)	
4	 Y -X	-XY (103)	
5	 -Y -X	-X-Y (104)	
6	 X Y	XY (203)	

Загальна кількість структур при комбінованому розчленуванні тільки основного ЗЕ буде $C_p + C_{np} = 11 + 15 = 26$. Коди розчленування можуть бути літерні і цифрові. Багато структур (коди 103, 104, 203, 10304 та інші), які отримані за допомогою викладеного методу, є новими на рівні винаходів.

Таблиця 10.13 – Оригінальний варіант зображень неповного розчленування ЗЕ з клиновою передавально-підсилювальною ланкою (ППЛ) у площині X-Y, що були запропоновані в дисертації проф. Кузнецовим Ю.М. в 1983 р.

№ п/п	Напрямок неповного розчленування	Літерні (цифрові) коди розчл.	Ознаки і структура ЗЕ
1	●	ХОУО	
2	-X — 0	-ХО(1)	
3	0 — X	ХО(2)	
4	y 0	УО(3)	
5	-y 0	-УО(4)	
6	-X — 0 — X -X-O-X	-ХОХ(12)	
7	y 0 -y	УО-У(34)	
8	-X — y 0	-ХОУ(13)	

Ефекти різних розчленувань наведені в табл. 10.14. З аналізу розчленувань ЗЕ встановлено, що нові принципи затиску й істотне поліпшення показників якості ЗП досягається тільки повним однонаправковим розчленуванням.

Наприклад, повне розчленування уздовж осі патрона (X-X) дає ефект осьової точності (рис. 10.17, а, б), повне перпендикулярно до осі патрону з розсуненням - високої жорсткості (рис. 10.17, в), кутове - самоналагоджувальні на

розмір (рис. 10.17, г), по гранях - широкодіапазонності за рахунок мультиплікації переміщення, багатошарове - чутливості, сипучості тощо.

Таблиця 10.14 – Деякі ефекти затиску при різному повному розчленуванні ЗЕ

№ п/п	Схема розчленування	Вид розчленування	Одержаний ефект	
			Основний	Додатковий
1		поздовжнє	Осьова точність	Радіальна точність
2		поперечне	Жорсткість	Компенсація нерівностей деталі
3		кутове (нахилене)	Самонастроювання на розмір	Осьова точність
4		трикутник (тангенційне)	Мультиплікація ходу (широкодіапазонність по розміру)	Чутливість, компактність розміру
5		поздовжнє-поперечне	Рівномірність затиску	Осьова і радіальна точність
6		зіркою	Утворення кількості точок затиску	Компактність

Неповне розчленування дає ефект вирівнювання епюр контактних тисків, компенсації технологічних похибок виготовлення елементів патрону або похибок форми деталей (заготовок), а також зменшення нерівномірності характеристик тиску. Найвищу радіальну точність затиску забезпечує відсутність наскрізного розчленування у поперечній площині колового контуру затискного елемента (ЗЕ).

Поздовжнє розчленування ЗЕ розподіляє його на основний і проміжковий, а поперечне - на основний і додатковий. Для перебору різних варіантів структур затискного патрона і вибору кращого доцільно прийняти систему пріоритету власних показників за п'ятибальною шкалою. Кожному виду повного однонапрямового розчленування надано свій бал згідно з ефектом дії на власний показник (табл. 10.15).

Якщо неповне розчленування однонапрямокве, то умовно приймаємо половину бала, а при сполученні двох або більше розчленувань приймають середнє арифметичне значення балів окремих розчленувань.

Таблиця 10.15 – Бальна оцінка показників повного однонапрямового розчленування ЗЕ

№ п/п	Показник якості		Бали				
	Найменування	Символ	5	4	3	2	1
1	Сила затиску	Кс		/	*	—	▲
2	Жорсткість затиску	Кж		*	—	▲	/
3	Точність затиску	радіальна Ктр		—	*	▲	/
4		осьова Кто	—		/	▲	*
5	Міцність	Кпр	/	*		—	▲
6	Швидкодія	Кб	/	▲	*		—
7	Довговічність	Кд	▲	/		*	—
8	Широкодіапазонність	Кш	▲	/		*	—
9	Металомісткість	Км	*	/	▲	—	
10	Технологічність	Кт	*	—	/		▲

Примітка: Позначення розчленувань ЗЕ: * - немає; | - поперечне; — - поздовжнє; / - кутове; ▲ - трикутне в поперечній площині

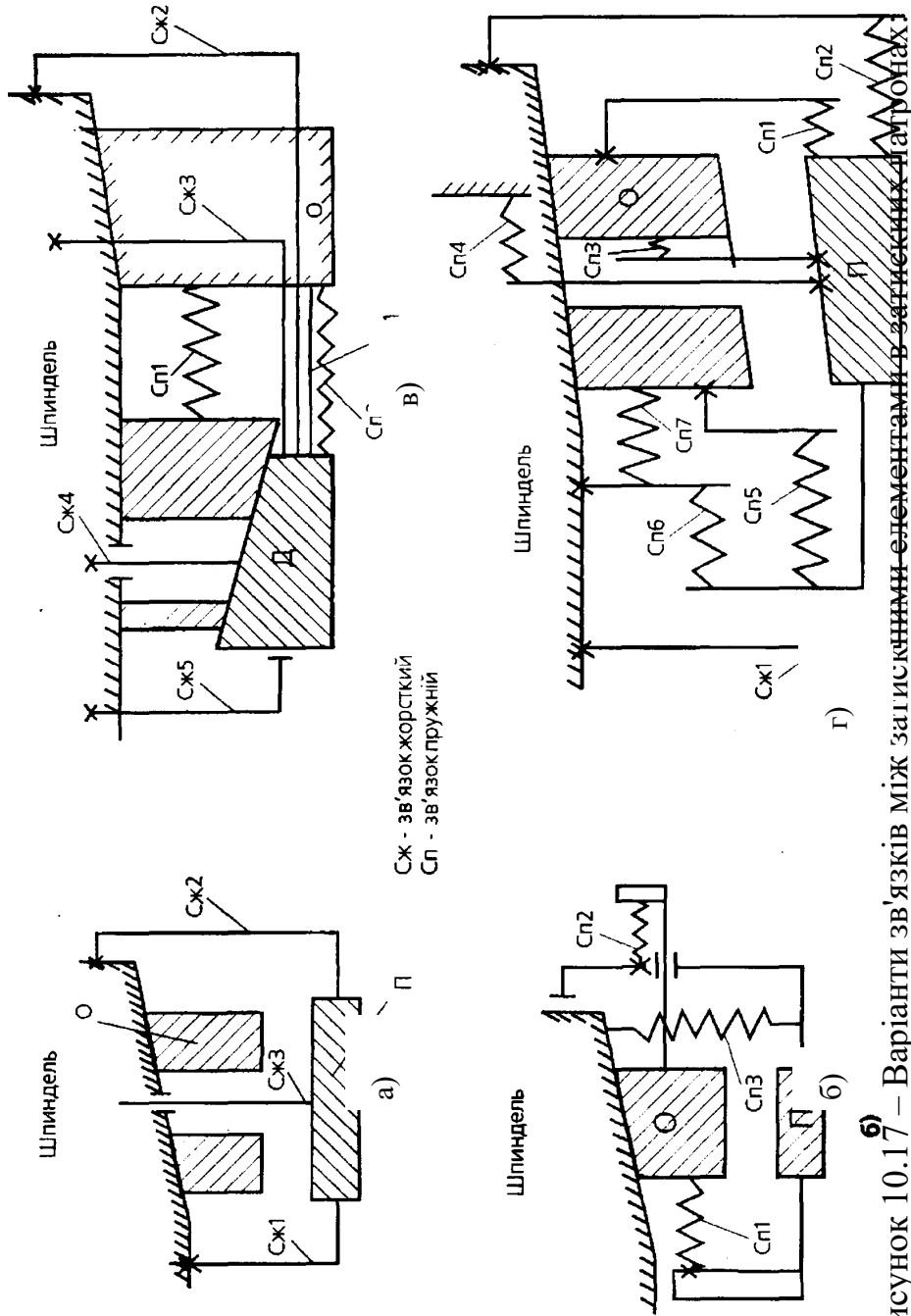
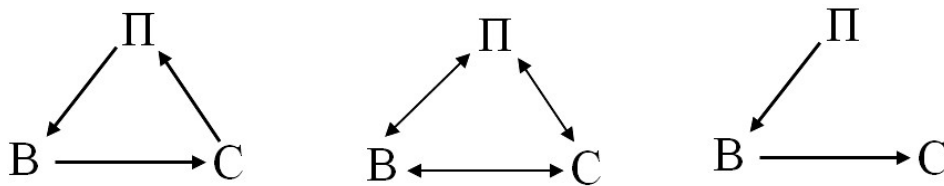


Рисунок 10.17 – Варіанти зв'язків між записаними елементами в записаних ділянках

а, б – високоточних; в – з подвійним затиском; г – самоналагоджувючих, Сж – зв'язок жорсткий, Сп – зв'язок пружний

10.7. Вепольний аналіз

ТС зручно описувати через моделі з двох речовин (виробу та інструменту), що взаємодіють, і поля. Така модель називається веполь. У загальному вигляді веполь - система з трьох компонентів: В (речовина), П (поле), С (середовище), при цьому стан будь-якого компонента є функцією від стану інших компонентів. Речовина (В) в одному веполі може бути середовищем (С) стосовно іншої речовини (В). Приклади структурних формул веполів:



Під поняттям поле (П) розуміють не тільки відомі поля з фізики (електромагнітне, гравітаційне, силове, слабка взаємодія), але й будь-яку енергію (теплову, механічну, звукову, запахіву та іншу).

Оскільки компоненти веполя і його структура визначаються найбільш узагальненими, абстрактними поняттями і показниками, то за їх допомогою можна однаково записувати структури багатьох аналогічних у принципі, але технічно різних ТС.

При взаємодії речовин згідно із законами побудови ТС через неї повинні проходити енергопотоки (поля), і при цьому забезпечувати її функціонування.

Перехід від функціонування до енергії досягнути найпростіше, оскільки у самому формулюванні функції містяться підказки про тип енергопотoku чи його частини.

Проходячи через елементи ТС, енергія зазнає перетворень, причому можна виділити чотири типи енергетичних перетворень:

1) випромінювання енергії, наприклад, розширення стиснутого повітря при використанні пневмоприводу у механізмі подачі;

2) поглинання енергії, наприклад, деформація ланок, контактного зближення тіл, стиснення повітря у затискному механізмі;

3) перетворення потоку енергії за програмою, при цьому енергія не змінюється, а змінюється тільки її

просторово-часова організація: величина енергії та параметри, що її характеризують, напрямок енергопотoku та т.п. (передача тиску у струмені рідини, газу, механічна передача зусиль та переміщень);

4) перетворення енергії за видом, наприклад, перетворення електричної енергії у механічну, зміна електричної енергії у магнітну (закон електромагнітної індукції) та багато інших фізичних явищ.

Якщо всі природні явища та ефекти в енергетичному аспекті зводяться до чотирьох типів, то можна частини ТС, які виконують ті чи інші енергетичні перетворення, подати у вигляді типових і енергетичних "кубиків" - елементарних структурних ланок (ЕСЛ), з яких можна набирати систему, враховуючи вимоги до просторово-часової організації та закони фізики.

У вепольних перетвореннях використовують позначення: V_m, V_n, P_m, P_n - якісно різні елементи речовини та поля; V', V'', P', P'' - видозмінені елементи речовини та поля, які вирізняються за кількісними характеристиками, формою, внутрішнім станом, напрямком;

$\Delta V, \Delta P$ - частина ("порція", "квант") речовини, поля;

$V(t), P(t)$ - елементи, організовані в часі;

$V(x), P(x)$ - елементи, організовані в просторі;

\rightarrow - направлена дія;

\leftrightarrow - взаємодія;

$--->$, \rightarrow - відсутні, необхідна (бажана) дія, взаємодія;

$-/\rightarrow$ - дії, які відрізняються за ступенем (силою),

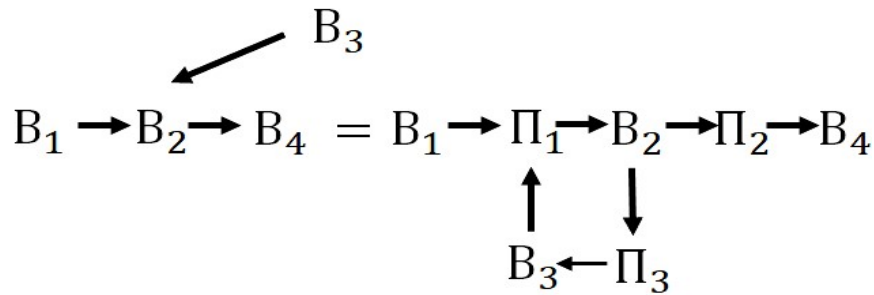
наприклад, дія $-/-/\rightarrow$ сильніша від дії $-/\rightarrow$;

$\sim \sim$ V, P - погані речовина, поле $\sim \sim$ $\rightarrow, \leftrightarrow$ - погані дії, взаємодії	}	елементи та зв'язки між ними, які є джерелом небажаного ефекту;
--	---	---

\Longrightarrow - перехід від одного стану до іншого ("було" - "стало");

$= \Rightarrow$ - бажаний перехід від одного стану до іншого.

Оскільки поле є формою взаємодії речовин, то взаємодія речовин можлива лише через поле. У цьому розумінні абсолютно еквівалентні, наприклад, такі записи структури системи "труба затискання (V_1) - затискна цанга (V_2) - шпindelь (V_3) - пруток (V_4)" (рис. 10.18, а):



Хоча більш правильним є правий запис структури, можливий і лівий, скорочений запис. Він допустимий у тому випадку, коли відбиття форми взаємодії між речовинами несуттєве, що особливо характерне для механічних передач без перетворення одного виду енергії в інший (коли характерне контактування тіл, їх переміщення та з'єднання).

Еквівалентні також записи типу B_1 , B_2 та $B_1 - B_2$. Перший запис, звичайно, зручніший, якщо речовини утворюють суміш, але для механічних твердотілих систем слід надавати перевагу другому запису.

Загальні положення вепольного аналізу для побудови структури такі:

- а) для зміни B шляхом дії на нього слід використовувати P ;
- б) для перетворення P треба використовувати B ;
- в) у разі наявності P завжди мається на увазі наявність B , яка є джерелом цього P .

Відповідно до чотирьох типів енергетичних перетворень зображуються чотири типи енергетичних "кубиків" - елементарних структурних ланок (ЕСЛ):

ЕСЛ - 1. Речовина - "джерело" поля ("випромінювання" поля);

$$\text{ЕСЛ - 1} \equiv B \rightarrow P;$$

ЕСЛ - 2. Речовина-перетворювач поля за програмою;

$$\text{ЕСЛ - 2} \equiv P \rightarrow B \rightarrow P;$$

ЕСЛ - 3. Речовина-перетворювач поля за видом;

$$\text{ЕСЛ - 3} \equiv P_1 \rightarrow B \rightarrow P_2;$$

ЕСЛ - 4. Речовина-"приймач" поля ("сприйняття", "поглинання" поля);

$$\text{ЕСЛ - 4} \equiv P \rightarrow B.$$

Типових структурних задач стільки, скільки й структурних ланок, тобто чотири, а власне:

1-ша задача - побудова структурної ланки, яка забезпечує "випромінювання" поля речовиною

$$\text{ЕСЛ-1} \equiv B \implies P;$$

2-га задача - побудова структурної ланки, яка забезпечує перетворення поля за програмою (в тому числі зміну інтенсивності поля до його компенсації або ліквідації):

$$\text{ЕСЛ-2} \equiv \text{П} \implies \text{П};$$

3-тя задача - побудова структурної ланки, яка забезпечує перетворення поля за програмою (в тому числі кількості видів полів на виході):

ЕСЛ-3 $\equiv \text{П}_1 \implies \text{П}_2$ - перетворення зі зміною поля на виході;

$\leftarrow \text{П}_2$ - перетворення зі зміною кількості

$$\text{ЕСЛ-3} \equiv \rightarrow \text{П}_1 \implies \rightarrow \text{П}_3 \text{ полів на виході};$$

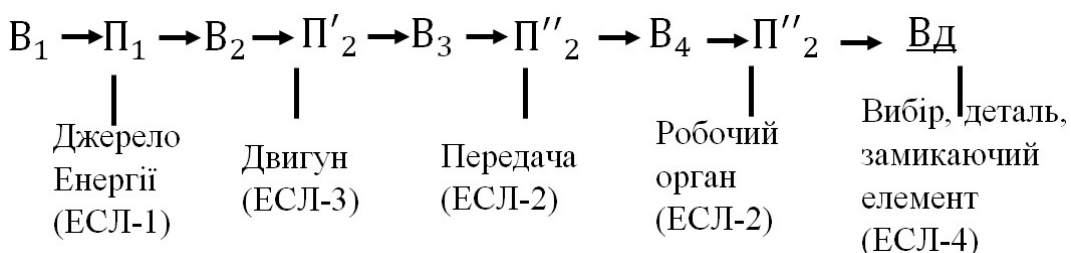
4-та задача - побудова структурної ланки, яка забезпечує "сприйняття" поля речовиною

$$\text{ЕСЛ-4} = \text{П} \implies \text{В}.$$

Існує чітке співвідношення між ЕСЛ та функціонально-енергетичними ланками ТС, до яких, наприклад, для затискних механізмів належать: джерело енергії (Е), двигун (Дв), робочий орган (інструмент), виріб та замикаючий елемент. Останній поглинає енергопотік та може відповідати виробу, інструменту чи середовищу. Джерело енергії відповідає ланці ЕСЛ-1, двигун - ЕСЛ-3. Передача частіше всього ЕСЛ-2, рідше - ЕСЛ-3. Робочий орган та виріб залежно від призначення системи (підсистеми) можуть відбиватися усіма чотирма типами ланок. А замикаючий елемент (найчастіше це заготовка, пруток або затискуваний інструмент) відповідає ланці ЕСЛ-4.

Тому з ЕСЛ можна "набирати" енерголанцюги, які забезпечують енергетичну повноту та "проводимість" ТС. При цьому окремі ланки стикуються між собою за полями. Згідно з принципом системотехніки, можна стикувати підсистеми ("чорні ящики", "кубики") по входах та виходах. Енерголанцюги будуються за відповідними правилами.

У загальному випадку повний енерголанцюг щодо системи затискного механізму може мати такий вигляд:



де Вд - виріб (деталь, пруток, труба).

Такі енерголанцюги у складі систем типу машина або верстат чи підсистем типу механізм трапляються не завжди, оскільки частіше всі рухи виконуються від одного електродвигуна. Але можна виділити підсистему та розглядати її як систему, або вимкнути джерело енергії, або суміщати його з двигуном.

Якщо в системі чи підсистемі відсутнє джерело енергії, вони вважаються енергетично несаможивними. Енергія при цьому подається на вхід енерголанцюга у вигляді поля від інших систем, підсистем або зовнішнього середовища. Можливе усунення передачі, якщо енергія від двигуна або джерела енергії передається, наприклад, відразу робочому органу (короткий кінематичний ланцюг). Гранично енерголанцюги можуть складатися всього з двох її елементів - робочого органу (наприклад, затискного елемента) та виробу (наприклад, деталі, прутка, штучної заготовки, інструменту). Такі енерголанцюги називаються мінімальними:

$V \rightarrow \underline{Vd}$ - змінюваний ланцюг; $\underline{Vd} \rightarrow V$ - вимірювальний ланцюг.

Мінімальні енерголанцюги завжди кращі від інших, оскільки в них, як правило, можна забезпечити мінімум енергетичних втрат.

Наприклад, синтезуючи багатофункціональні механізми, необхідно намагатись скорочувати енерголанцюги за рахунок об'єднання функцій. Розглянемо елементарні приклади затискних механізмів (ЗМ) та їх перетворення, записані у вигляді спрощених структурних формул веполів та вепольних перетворень.

Приклад 1. Важільно-кулачковий патрон (рис. 10.18, б) на високих частотах обертання губить силу затискання через відцентрові сили P_v , які діють на незрівноважені кулачки, що потребує додаткових витрат енергії за рахунок збільшення сили затискання S на величину ΔS , яка компенсує вплив відцентрової сили P_v . Перетворимо веполь, вводячи додаткові вантажі V_3 на важелях V_2 :

$$\begin{array}{c} \diagup P' \diagdown \\ V_2 - V_1 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c} \diagup P' \diagdown \\ V_2 - V_1 - V_3 \end{array} \begin{array}{c} \diagup P'' \diagdown \\ \end{array}$$

У результаті з'являється поле Π'' з іншого боку від кулачків B_1 , яке зрівноважує поле Π' (рис. 10.18, в).

Приклад 2. Гідравлічний привід затиску, який складається з циліндра B_1 та поршня B_2 , за рахунок тиску рідини P_3 (поле Π_1) створює осьову силу затиску $S = P_3 \cdot F$ (F - площа поршня) (рис. 10.18, г), але при витоках потрібне підживлення магістралі (додатковий приріст поля $\Delta\Pi_1$) через можливий спад тиску на величину Δp . Перетворимо веполь, змінюючи енергію тиску рідини (поле Π_1) на потенційну енергію стиснутої пружин (Π_2) (рис. 10.18, д), що виключає зайві втрати енергії через втрати, тобто $\Pi_1 - \Pi_2 = \Delta\Pi_1$:

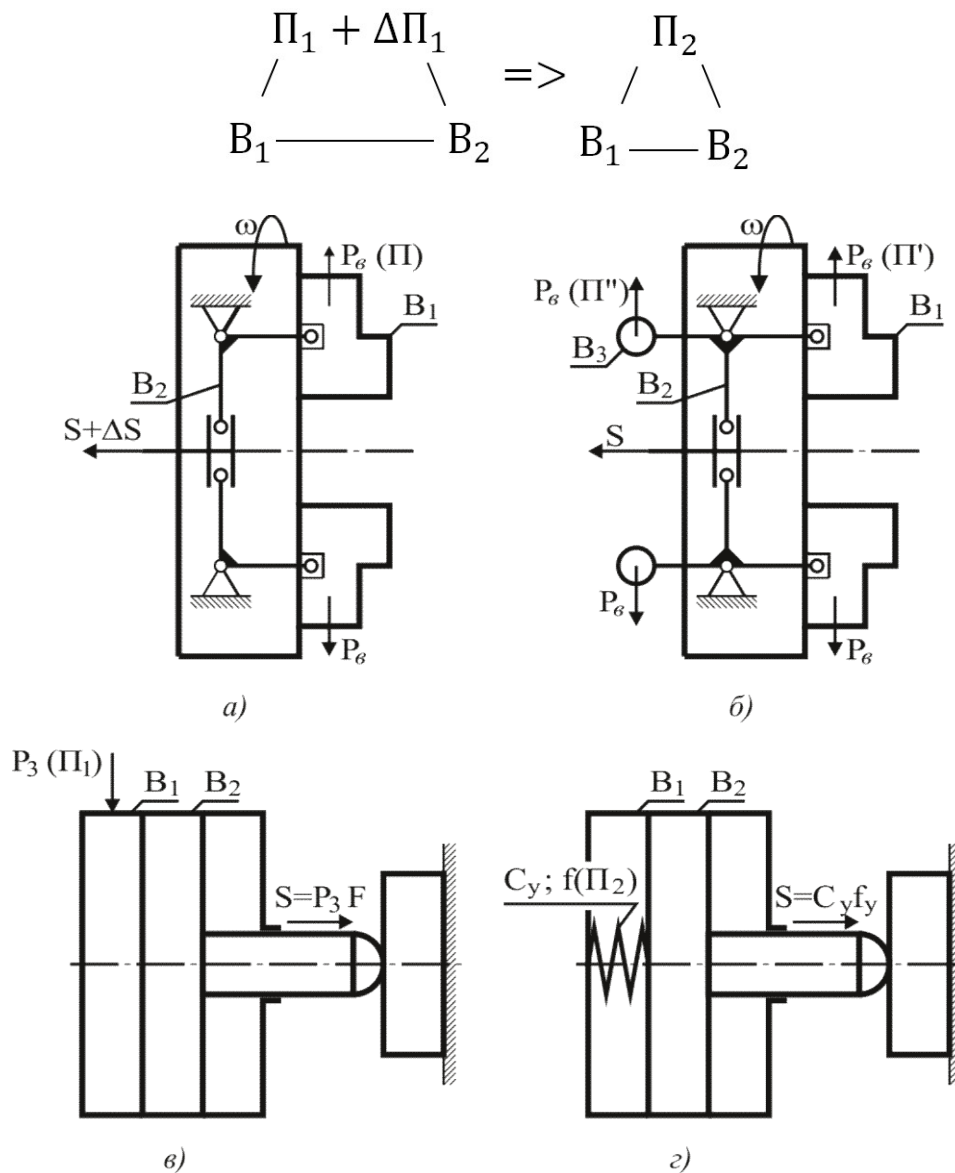


Рисунок 10.18 – Приклади використання вепольного аналізу з позначенням елементів веполь кожного із затискних механізмів

10.8. Функціонально-вартісний аналіз (ФВА)

Багаточисельна статистика різних країн показала, що ФВА дозволяє на 1 грошову одиницю витрат отримати до 20 одиниць економії.

Основна суть ФВА полягає у такому:

- застосування системного підходу при виявленні по можливості усіх зайвих витрат (трудомісткість, витрати матеріалів, енергії, тощо) у наявних або проєктованих виробках;

- систематичне застосування методів інженерного творення при пошуку нових технологічних рішень зі зниженими витратами;

- чітка організація робіт, яка йде від керівництва підприємством і спрямована на проведення ФВА і реалізацію його пропозицій.

ФВА - метод раціоналізації і винахідництва, побудований на вивченні функцій ТС з метою зниження їх вартості і витрат (до 5...20%), переважно без зміни основних принципів (деталь або вузол легше удосконалити, ніж верстат в цілому).

ФВА проводять постійно діючі групи чисельністю 3...6 осіб, серед котрих обов'язково повинні бути конструктори, технологи й економісти.

ФВА застосовує діалектичний підхід до розвитку ТС, згідно з яким, основні принципи організації виробничих процесів не залишаються незмінними і повинні бути розглянуті з нових точок зору. Вироби, які виконують однакові функції і мають одне і те ж призначення, часто виявляються носіями різних за величиною виробничих і експлуатаційних витрат. Це пояснюється не тільки організаційно-технічним рівнем підприємства і ступенем підготовки до освоєння, але і різним рівнем якості проєктування, в тому числі техніко-економічного відпрацювання рішень.

Теоретичні джерела ФВА різних ТС наведені на рис. 10.19. Початок ФВА - засіб усунення "лишків". Сучасний ФВА - наукова, функціонально і системно орієнтована методологія комплексної творчої раціоналізації діяльності.

Область застосування ФВА: проєктування нових виробів і технологій; модернізація освоєних у виробництві

виробів; реконструкція підприємств; зниження витрат основного і допоміжного виробництва; зниження витрат сировини, матеріалів, палива та енергії; зниження трудомісткості та економія людських ресурсів.

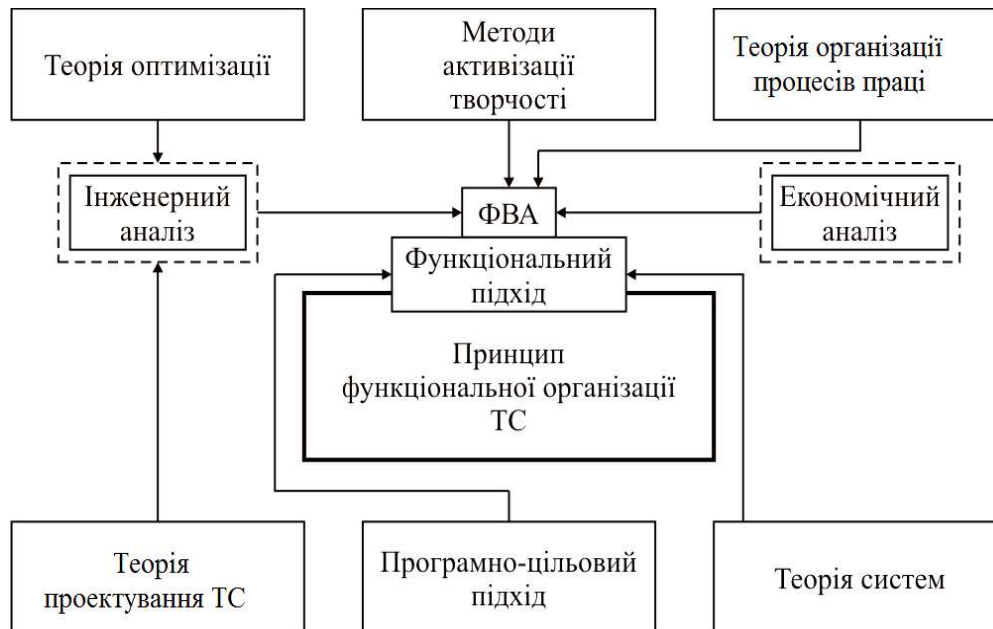


Рисунок 10.19 – Теоретичні джерела функціонально-вартісного аналізу (ФВА)

Існують три форми застосування ФВА: 1) творча - проектування нової ТС; 2) корегуюча - удосконалення раніше випущеної ТС; 3) інверсна (як варіант корегуючої). Залежно від форми пропонуються етапи проведення ФВА.

Для кожного етапу проведення ФВА характерні такі види робіт:

1. Підготовчий етап. 1.1. Вибір ТС і визначення мети (цілей) ФВА. 1.2. Підбір і затвердження складу дослідницької групи. 1.3. Навчання спеціалістів групи ФВА. 1.4. Складання, погодження і затвердження технічного завдання (ТЗ) на проведення ФВА.

2. Інформаційно-аналітичний етап. 2.1. Збір та вивчення інформації з проектно-конструкторських рішень ТС, наявних витрат, умов роботи і недоліків ТО. 2.2. Побудова конструктивної функціональної структури ТС. 2.3. Визначення переліку основних показників і вимог до ТС, критеріїв розвитку ТС. 2.4. Аналіз і класифікація функцій елементів ТС. 2.5. Визначення і порівняння вартостей функцій. 2.6. Виявлення функціональних зон найбільшого

зосередження витрат в ТС. 2.7. Постановка задач пошуку найбільш раціональних і оптимальних конструкторсько-технологічних рішень.

3. Пошуково-дослідницький етап. 3.1. Пошук покращених технічних рішень. 3.2. Математичне модулювання покращених технічних рішень. 3.3. Пошук оптимальних параметрів покращених технічних рішень. 3.4. Експериментальне дослідження нових технічних рішень. 3.5. Вибір найкращих варіантів технічних рішень. 3.6. Оформлення результатів у вигляді технічної пропозиції або/і ескізного проекту, їх погодження зацікавленими підрозділами і затвердження.

4. Розробка і впровадження результатів ФВА. 4.1. Складання і оформлення проектно-технологічної документації і рекомендації щодо реалізації результатів ФВА з уточненням розрахунків ефективності. 4.2. Погодження пропозицій по п.4.1 із зацікавленими підрозділами, службами і їх затвердження. 4.3. Організація роботи з реалізації пропозицій. 4.4. Матеріальне і моральне заохочування учасників розробки і впровадження рекомендацій ФВА. Оформлення звіту про виконання роботи з пропозиціями щодо покращення проведення ФВА.

Методи і прийоми, які застосовуються при проведенні ФВА, включають: 1. Поелементна обробка конструктивних рішень. 2. Систематизований аналіз функцій (за допомогою системи логічних тестів). 3. Мозковий штурм. 4. Морфологічний аналіз. 5. Алгоритм вирішення винахідницьких задач (АРВЗ).

Для якісної і вартісної оцінки варіантів використовують методи: 1. Розстановки пріоритетів. 2. Розрахунку собівартості виробів за питомими показниками. 3. Елемента-коефіцієнтів. 4. Експертних оцінок. 5. Структурної аналогії. 6. Оцінки собівартості за допомогою математико-статистичного апарату.

Згідно з ФВА, у собівартості будь-якого виробу, крім мінімальних витрат, абсолютно необхідних для виконання виробом заданих функцій, завжди є зайві витрати, зумовлені переважно недосконалістю конструкцій, для визначення яких необхідно, перш за все, чітко сформулювати функції виробу, які поділяються на чотири групи: головні, основні, допоміжні, непотрібні.

Головні функції (Φ_0) мають головні елементи (або первинні, вихідні), до яких відносять робочі органи та інші елементи, котрі безпосередньо взаємодіють з предметом обробки та іншими об'єктами довкілля. При цьому: 1) функція головних елементів за правилами співпадає з функцією ТС або у визначеній мірі залежить від функції ТС; 2) об'єкти довкілля для головних елементів, як правило, співпадають з об'єктами, на котрі спрямована дія ТС. В табл. 10.16 наведений приклад розподілу на елементи шарикопідшипника, як ТС, з вказівкою на можливості об'єктів довкілля і головних елементів.

Таблиця 10.16 – Аналіз функцій шарикопідшипника.
Функція кулькового підшипника: зменшити момент обертання втулки навколо осі

Елемент	Функція		
	Позначення	Назва	Позначення
E_0	Кульки (тіла кочення)	Φ_0	Знижує момент обертання втулки (V_1) навколо вісі (V_2)
E_1	Зовнішнє кільце	Φ_1	Забезпечує кочення кульок (V_1) по шарикам (E_0)
E_2	Внутрішнє кільце	Φ_2	Забезпечує кочення кульок (E_0) вздовж осі валу (V_2)
E_3	Сепаратор	Φ_3	Забезпечує рівно віддалення кульок (E_0) один від одного
E_4	Захисне кільце	Φ_4	Охороняє зону кочення (кульки E_0 , доріжки кілець E_1 , E_2) від засмічування

Основні функції (Φ_1 - Φ_3 , табл. 10.16) відносяться до елементів, котрі безпосередньо забезпечують роботу головних елементів; при виключенні будь-якої основної

функції головна функція в принципі не може бути

Допоміжні функції (Φ_4 , табл. 10.16) відносяться до елементів, котрі роблять реалізацію головної або основної функції більш ефективною, більш привабливою для споживача тощо, при виключенні вузької допоміжної функції працездатність ТС зберігається, але погіршуються деякі показники якості.

Зайві функції відносяться до елементів, котрі не відіграють істотної (або жодної) ролі в забезпеченні працездатності ТС і підвищенні її якості; таким чином, при виключенні зайвої функції і відповідних елементів показники якості не погіршуються, а деякі можуть бути покращені.

Вартість функції розуміють як будь-які витрати, пов'язані з реалізацією функцій. Існують два способи оцінки вартості функцій. Перший - метод прямого розрахунку витрат на підставі вартості матеріалів, операцій технологічного процесу тощо. Незважаючи на високу точність цього методу, часто не вдається (у зв'язку з труднощами отримання інформації) розрахунковим шляхом визначити вартість функцій для того, що вивчається, і аналогічних. У зв'язку з цим, частіше використовують менш трудомісткий і більш універсальний – метод експертних порівнянь вартостей функцій різних виробів. При використанні цього методу для кожної функції заповнюють форму, в якій за кожним показником і для кожного варіанта реалізації функції встановлюють відносну шкалу порядку, тобто кращому варіанту присвоюють вартість 1, гіршому - вартість, яка дорівнює кількості порівнюваних варіантів.

Роботу з оцінки вартостей окремих функцій оформлюють у вигляді зведеної таблиці вартостей функцій. Слід відмітити, що функція може мати декілька показників оцінки. Оцінка функцій і встановлення вартісних орієнтирів у вигляді мінімально можливої і максимально допустимої вартості функцій робить процес зниження витрат цілеспрямованим.

Після розробки покращених проектно-конструкторських рішень при виборі найкращого корисно скласти позитивно-негативні оцінки і звести в таблицю.

Необхідно, щоб впровадження пропозицій ФВА здійснювалося у межах загального плану підвищення ефективності виробництва, а заходом ФВА приділялась

особлива увага завдяки їх новизні і підвищеній складності за великої кількості нових оригінальних рішень.

Один з можливих шляхів прискорення практичної реалізації ФВА є створення спеціальних груп (груп реалізації, комплексних бригад тощо), які складаються з конструкторів, технологів, дослідників, робітників цехів, котрі здійснюють більш оперативне доведення знайдених рішень до практичної реалізації. У цьому зв'язку доцільно учасників впровадження заохочувати до роботи з ФВА на всіх етапах.

Приклад. Методом творчої форми ФВА виконати синтез високоточного, швидкодіючого, компактного цангового затискного механізму (ЦЗМ) для токарного автомату.

Необхідною умовою для розв'язку задачі є збереження усіх функціональних особливостей ЦЗМ і токарного автомату в цілому, тобто ЦЗМ повинен задовільняти в процесі експлуатації усі необхідні вимоги.

Разом з тим, виникає питання, як з мінімальними витратами засобів (коштів) синтезувати механізм, що задовольняє поставленим вимогам по точності і швидкості. Таким чином, виникає задача пошуку нового принципу затиску з врахуванням ряду факторів і обмежень конструктивно-технологічного й економічного характеру.

Сформулюємо функції ЦЗМ, орієнтуючись на основні вимоги. Серед них головною функцією є забезпечення сили затиску - необхідна умова (щоб прутки не проковзували, не поверталися від сил і моментів різання). Інші функції зведемо в табл. 10.17, розбивши на основні, допоміжні і враховувані (частка допоміжних). Для оцінки якості ЦЗМ використовуємо комплексний безрозмірний показник K , котрий можна уявити на рівні вибору принципу затиску таким набором показників: необхідна сила тиску (високий ККД) $K_c = K_0$; точність $K_m = K_1$; швидкодія $K_{шд} = K_2$; металомісткість $K_m = K_3$; жорсткість $K_{жс} = K_4$.

Таким чином, комплексний показник якості (аддитивний критерій) має вигляд

$$K = \alpha_0 K_0 + \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 + \alpha_3 K_3 + \alpha_4 K_4,$$

де $\alpha_0 - \alpha_4$ – вагові коефіцієнти.

Таблиця 10.17 – Функції ЦЗМ токарного автомату

Основні	Допоміжні	Враховувані
Жорсткість Точність (осьова і радіальна) Швидкодія Металоміст- кість Компактність	Технологічність виго- товлення і складання Розташування на верстаті Захищеність Ремонтоздатність Зручність обслуговування Безпечність роботи Довговічність Безшумність роботи Міцність	Високий К.К.Д. Компенсація похибок заготовки Компенсація неточності виготовлення деталей механізму самопідналагодження Широкодіапазонність Багатопозиційність Вписуваність В наявний верстат

Для визначення значимості кожного показника можна використати статистичний метод експертних оцінок та інші. Приклад визначення значимості показників у комплексному критерії К наведено у табл. 10.18.

Таблиця 10.18 – Визначення значимості показників $K_0 - K_4$

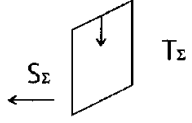
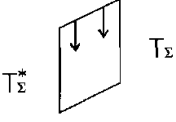
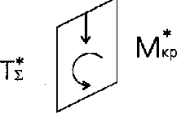
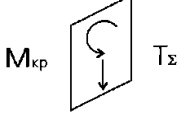
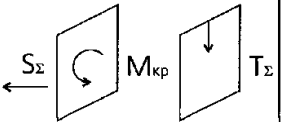
Ваговий Коефіцієнт Показника якості j	Оцінка експерта				Математи- чне сподівання $M(\alpha_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n$	Прий- нятий усередне- ний ваговий коефіцієн- т
	пер- шого	дру- гого	тре- тього	четвер- того		
1	2	3	4	5	6	7
α_0	0,3	0,4	0,	0,3	0,325	0,32
α_1	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1625	0,16
α_2	0,1.5	0,2	0,1	0,2	0,1625	0,16
α_3	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1125	0,12
α_4	0,25	0,2	0,3	0,2	0,2375	0,24

Примітка: $\sum_{j=0}^4 a_j = 1.$

Доцільно формалізувати задачу вибору принципу затиску за способом передавання енергії від джерела до об'єкта затиску у вигляді силових (енергетичних) потоків, що може бути проілюстровано на п'яти варіантах цангового затискного механізму (ЦЗМ) (табл. 10.19).

У традиційних і нетрадиційних схемах ЦЗМ остання ланка силового потоку (в патроні) є сполученням сил або сил і моментів, наприклад, осьова сила S_{Σ} - радіальна сила T_{Σ} , нормальна до поверхні затиску (схема 1, табл. 10.19). Нові нетрадиційні принципи затиску повинні обиратися, виходячи з реалізації різних сполучень (схеми 2-5, табл. 10.19 та інші).

Таблиця 10.19 – Силові потоки (фрагмент) в цангових затискних механізмах (ЦЗМ)

Схема	Вхід	Вихід	Індексація
	S_{Σ}	T_{Σ}	X_1
	T_{Σ}^*	T_{Σ}	X_2
	T_{Σ}^*	$M_{кр}^*$	X_3
	$M_{кр}$	T_{Σ}	X_4
	S_{Σ}	$T_{\Sigma}, M_{кр}^*$	X_5

З метою підвищення правдивості експертних оцінок при порівнянні розглядуваних варіантів може бути

використаний, наприклад, метод розстановки пріоритетів (парних порівнянь), запропонований В.А.Блюмбергом і В.Ф.Глуценко на підставі "задачі про лідера". З п'яти схем силового потоку (табл. 10.19) при збереженні усіх функціональних можливостей ЦЗМ і при врахуванні підвищення швидкодії оберемо найкращу.

Для цього визначимо пріоритет схеми силових потоків, використовуючи матричну форму запису (див. п.п 10.3.1). Спочатку попарно порівняємо схеми за комплексним показником K . Якщо з розглядуваної пари схема має більш важливе значення, то дається оцінка $X_i > X_j$, за однакової значимості $X_i = X_j$, а у випадку пріоритету другої схеми - $X_i < X_j$. Попередня оцінка уточнюється, корегується по кожному знаку ">", "=" або "<". При цьому поправка за знак ">", "<" складає 0,1, а за знак "=" - 0,05.

На другому етапі складається квадратна матриця суміжності (табл. 10.20). Спочатку проставляються одиниці у клітинках, розташованих на перехресті рядків і колонок, які відповідають одним і тим же індексам схем. Далі заповнюється рядок X_i . В ньому записуються скореговані оцінки, отримані в результаті порівняння наведених схем за обраним критерієм з урахуванням їх значимості. Наприклад, при зрівнянні першої і другої схем (табл. 10.19) в результаті експертної оцінки встановлено, що відношення їх оцінок складає відповідно 0,9 і 1,1. На підставі цього у другу колонку першого рядку матриці оцінок записуємо 0,9. Аналогічно заповнюють усю матрицю.

У результаті експертної оцінки визначено, що найбільш сприятливою з точки зору швидкодії є схема розташування вхідного і вихідного силових потоків в одній площині. Реалізувати таку схему можливо в конструкції однієї деталі - цанги 1 шляхом розташування у паралельних площинах пружних пелюсток і робочих поверхонь затискних губок (рис. 10.20). Причому робоча поверхня губок повинна бути виконана фасонною з постійним кутом підйому твірної, наприклад за спіраллю Архімеда. Патрон з такою цангою працює за принципом обгонної муфти.

Вхідним силовим параметром у ньому є крутий момент $M_{кр}$, а вихідним - радіальна сила затиску заготовки

T_{Σ} . Теоретичний аналіз роботи такого патрона показує, що швидкодія зростає у 10-18 разів. Крім підвищення швидкодії, що призводить до зменшення часу допоміжних рухів, а отже, до підвищення продуктивності, при синтезованій конструкції цангового патрону істотно спрощується привід затиску, зменшується металомісткість верстата. Всі ці показники помітно впливають на собівартість ЦЗМ і верстату в цілому. Крім цього, синтезований ЦЗМ має високу осьову точність, зменшену в 7 разів металомісткість, а функціональні витрати на виготовлення основних деталей (не враховуючи придбання стандартних комплектуючих) зросли на 25%.

Таблиця 10.20 – Квадратна матриця суміжності

Інд. схеми	Матриця оцінок					Сума	Коефіцієнт пріоритету	Місце (пріоритет) схеми
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5			
X_1	1	0,9	1,1	0,7	0,9	4,65	$4,65/25=0,186$	4
X_2	1,1	1	0,7	0,5	0,9	4,25	$4,25/25=0,170$	5
X_3	0,9	1,2	1	0,7	0,9	4,8	$4,8/25=0,192$	3
X_4	1,2	1,5	1,2	1	1,3	6,3	$6,3/25=0,252$	1
X_5	1,1	1,1	1,1	0,7	1	5,0	$5,0/25=0,200$	2

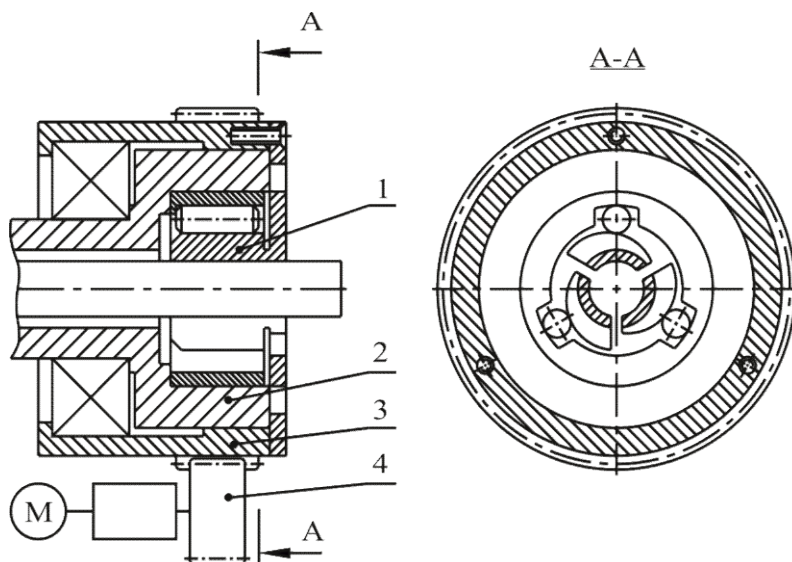


Рисунок 10.20 – Затискний патрон обгонного типу:
 1 – цанга; 2 – шпindelь; 3 – зубчасте колесо, з'єднане з цангою 1; 4 – зубчасте колесо, з'єднане з приводом гальмування; 5 – ролики

Питання для самоконтролю знань

1. Які групи методів активізації творчості існують?
2. Які бувають протиріччя? Наведіть приклади.
3. Назвіть основні етапи розв'язання творчих задач методом морфологічного аналізу.
4. У чому суть методу розставлення пріоритету (парних порівнянь)?
5. Назвіть основні етапи методу фокальних об'єктів.
6. Чим відрізняється метод гірлянд раптовостей і асоціацій від методу фокальних об'єктів.
7. Які стадії алгоритму розв'язання винахідницьких задач (АРВЗ)?
8. У чому стратегія АРВЗ?
9. Скільки прийомів усунення технічних протиріч існує? Назвіть 3-5 прийомів і приклади їх використання.
10. У чому суть узагальненого евристичного методу (УЕВ)?
11. У чому суть диференціально-морфологічного методу синтезу затискних патронів?
12. Які ефекти дають різні розчленування затискного елемента патрона? Наведіть приклади.
13. Що таке веполь?
14. Наведіть приклади використання вепольного аналізу при розв'язанні творчих задач.
15. У чому суть функціонально-вартісного аналізу і які бувають форми його реалізації?

11. ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ТС

11.1. Закономірності розвитку і еволюції класу ТС

На сьогодні набуває розвитку теорія генетичного й еволюційного синтезу ТС, життя якої можна уявити у вигляді еволюційної S-подібної кривої (рис. 11.1), яка запозичена з біології, оскільки в цьому відношенні життя ТС можна порівняти з живим організмом. Ця крива показує, як змінюються в часі головні показники ТС, наприклад, потужність, робочий тиск, маса, продуктивність, швидкість, точність, тощо.

На ділянці 1, яка називається "дитинством", ТС розвивається повільно (початковий розвиток). Потім ТС швидко вдосконалюється, настає пора "зрілості" ТС (ділянка 2). На ділянці 3 темпи розвитку зменшуються, ТС вибирає свої можливості, настає "стиглість", а далі "старість" ТС. Далі система А може бути деградована (пунктирна крива 4 і донизу) або на тривалий час утримує досягнуті показники (ділянка 4), або змінюється принципово іншою системою Б.

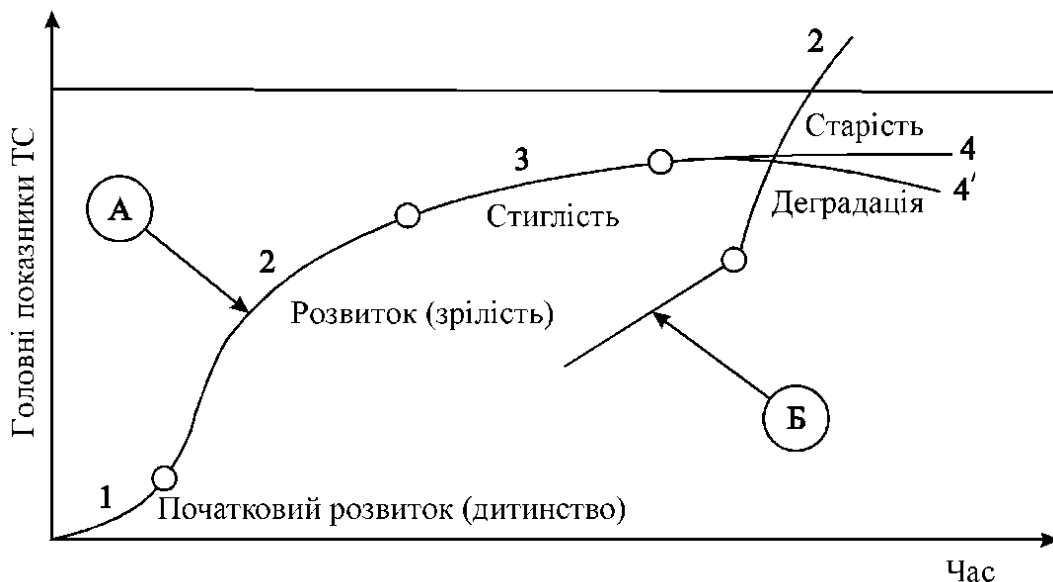


Рисунок 11.1 – Криві розвитку ТС: А – повна крива розвитку старої ТС; Б – початок розвитку нової ТС

"Дитинство" відповідає народженню основних ідей та реалізації їх у працездатному зразку нової ТС. На цьому

етапі з'являється багато винаходів високого рівня, але економічний ефект від їх використання незначний або має негативне значення. В міру вдосконалення ТС завдяки винаходам низького рівня її показники швидко покращуються і вона широко застосовується. Цей період відповідає переходу від "дитинства" до "розвитку". Кількість винаходів на цьому етапі різко зростає. Розвиваючись, ТС поступово вичерпує можливості покращення, але бажання продовжити "життя" народжує винаходи, рівень яких найбільш низький. Проте економічний ефект від застосування таких винаходів найбільший завдяки масовому використанню ТС. Деградація ТС або зменшення основних показників викликає зміна середовища надсистеми, в котрій функціонує система.

Таким чином, технічний рівень виробів і ТС з часом підвищується завдяки впровадженню винаходів. Технічний рівень - це сукупність технічних властивостей - параметрів, які визначають сукупну цінність виробу.

Розглянемо на прикладі тільки один параметр – швидкість різання при обробці сталевих заготовок (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 – Теплостійкість і допустима швидкість різання інструментальних матеріалів

Матеріал	Теплостійкість, К	Допустима швидкість при різанні сталі 45, м/хв.
Вуглецева сталь	473 – 523	10 – 15
Легована сталь	623 – 673	15 – 30
Швидкорізальна сталь	873 – 823	40 – 60
Тверді сплави:		
Група ВК	1173 – 1200	120 – 200
Групи ТК и ТТК	1273 – 1300	150 – 250
Безвольфраміві	1073 – 1100	100 – 300
З покриттям	1273 – 1373	200 – 300
Кераміка	1473 – 1500	400 – 600

Вся історія машинобудівного виробництва, перш за все, пов'язана з розвитком і удосконаленням металорізальних

інструментів і, зокрема, поліпшення інструментальних матеріалів, з яких виготовляється робоча частина інструменту.

На початку ХХ століття основними інструментальними матеріалами були вуглецеві та леговані інструментальні сталі, а швидкості різання при обробці, наприклад, сталі 45 складала 10...30 м/хв. З появою швидкорізальних сталей швидкості різання підвищилися до 40...60 м/хв. У другій половині ХХ століття основними інструментальними матеріалами стали тверді сплави, мінералокераміка і надтверді матеріали. Швидкості різання підвищилися до 120...300 м/хв. Поліпшення властивостей інструментальних матеріалів за цей період дозволило в сотні разів підвищити швидкості різання і, відповідно, підвищити продуктивність машинобудівного виробництва.

На рис. 11.2 показано сімейство еволюційних кривих, які відображають, крім того, різний технічний рівень в різних галузях від досліджень до виробництва.

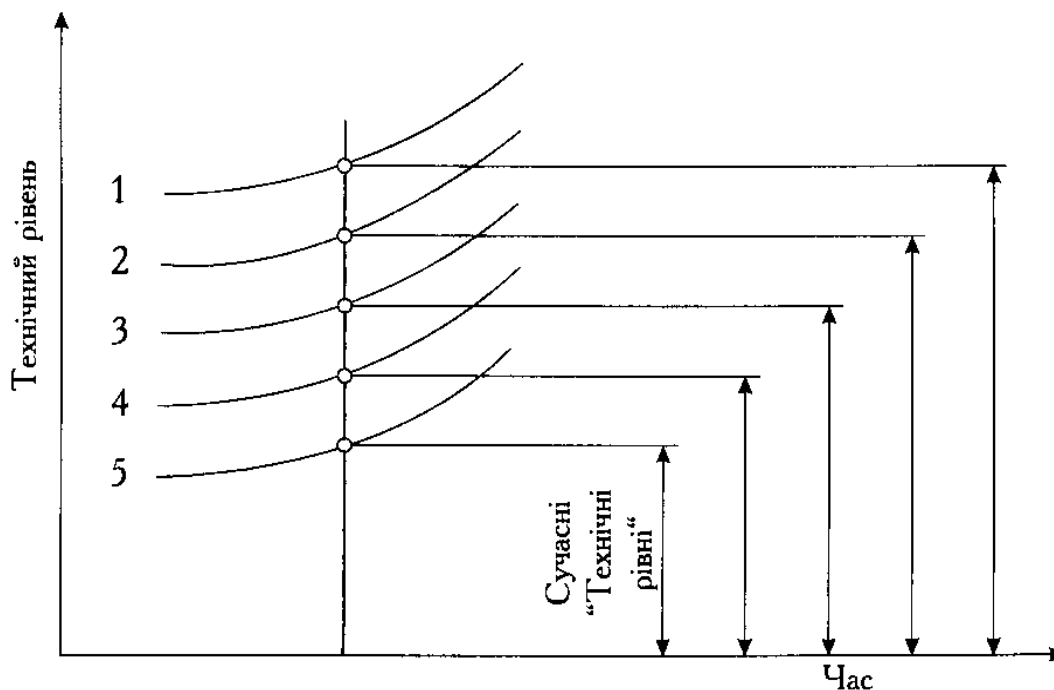


Рисунок 11.2 – Еволюційні криві для деяких галузей діяльності і відповідні “технічні рівні”: 1 – винаходи і відкриття; 2 – дослідження; 3 – розробки; 4 – виробництво; 5 – експлуатація

З розвитком техніки підвищується технічний рівень машин, змінюються виконувані ними функції та

удосконалюється принцип їх конструювання. З точки зору морального зношування машина, як ТС, має певні "цикли життя" у сферах перевиробництва та експлуатації (рис. 11.3), що має вплив на її рентабельність (досягнутий прибуток). З появою нової конкурентноздатної машини збут (крива 1, рис. 11.3, а) швидко зростає, досягає максимуму і в міру насичення споживчого ринку починає скорочуватись. Аналогічно змінюється прибуток (крива 2, рис. 11.3, б) підприємства - виробника. Максимум кривих збуту і прибутку, як правило, не збігаються за часом внаслідок інерції виробництва.

У сфері експлуатації (рис. 11.3, б) типовий "цикл життя" машини визначається різницею між прибутком (крива 2), який створюється у споживача, й експлуатаційними витратами (крива 1). Як видно з графіка (рис. 11.3, б), з часом ця різниця втрачається (знижується) і з критичного моменту $T_{кр}$ експлуатація машини стає збитковою завдяки фізичному спрацюванню.

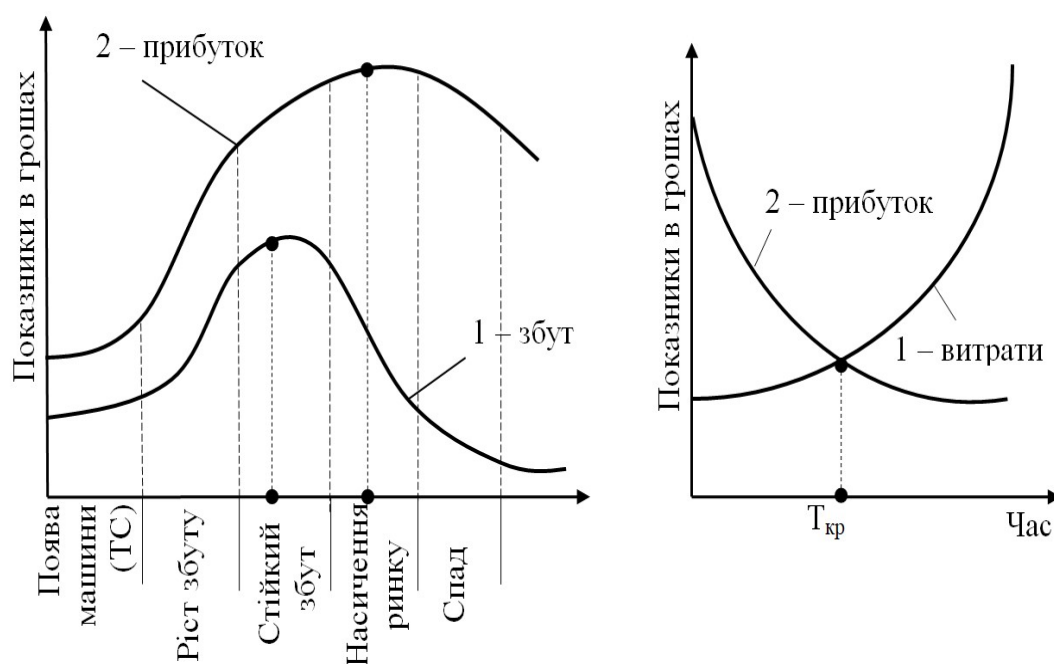


Рисунок 11.3 – "Цикл життя" машини (ТС) у сферах виробництва (а) і експлуатації (б)

Г.С. Альтшулер пропонує описувати розвиток ТС законами, які він умовно поділив на три групи: "статики" (початок життя), "кінематики" (розвиток) і "динаміки" (головні тенденції розвитку в теперішній час).

Закони статики: 1) повнота частин - наявність і мінімальна працездатність основних частин ТС; 2) "енергетична провідність" - наскрізний прохід енергії всіма частинами ТС; 3) походження "ритміки" частин - частоти коливань, періодичності роботи усіх частин.

Закони кінематики: 1) підвищення ступеня ідеальності - витрати на виготовлення та функціонування ТС прямують до нуля, хоча працездатність її не зменшується; 2) нерівномірність розвитку частин (що складніша ТС, то нерівномірнішим є її розвиток); 3) перехід в надсистему - вичерпавши можливості розвитку, система включається в надсистему як одна з частин.

Закони динаміки: 1) перехід з макрорівня на мікрорівень; 2) підвищення ступені вепольності (від російського слова веполь – "вещество" + "поле") - зростання кількості елементів і зв'язків між ними.

Головна рушійна сила розвитку ТС - протиріччя між щораз більшими потребами суспільства і можливостями теперішніх ТС. Діалектика розвитку ТС полягає в тому, що в новому об'єкті поєднуються нові та відомі технічні рішення. Так, на початку розвитку металорізальні верстати мали рухи від загального приводу - локомотива за допомогою трансмісійних валів (складність керування, низька продуктивність, висока небезпека). Потім з'явилися верстати з індивідуальним приводом від електродвигуна через зубчасті передачі. Тенденція розвитку сучасних верстатів - постачання кожного вузла власним приводом у вигляді, наприклад, крокового електродвигуна, високомоментного двигуна, тощо.

Нерівномірність розвитку частин верстата як ТС виявляється, зокрема, у виникненні регульованих електродвигунів різних типів і збереженні звичайних зубчастих передач, у швидкому прогресі систем керування та повільному розвитку власне приводів.

Подальший розвиток ТС вимагав подолання протиріч між високою продуктивністю процесу різання і великими витратами часу холостих рухів і допоміжних операцій. Приводи не забезпечували необхідної точності позиціонування універсальних верстатів під час роботи в автоматичному режимі. При цьому в системах керування для досягнення високої точності використовувались дискретні сигнали, а у

приводах аналогові сигнали не дозволяли одержати достатню точність. Ці протиріччя привели до появи нового класу високоточних приводів, які керуються від пристроїв ЧПК (числового програмного керування). Прикладом може бути привід, який включає кроковий електродвигун, гідравлічний підсилювач, гідродвигун та безлюфтову кулькову гвинтову пару. Такий привід добре пристосований до дискретних систем керування і має принципово вищу точність.

11.2. Основні принципи і методи прогнозування

Актуальність розробки прогнозів, у тому числі і прогнозів розвитку ТС, зростає з кожним роком. Об'єктами прогнозу є соціальні, науково-технічні, економічні й інші види ТС. Під прогнозом мають на увазі науково обґрунтовану думку про можливість використання і розвитку об'єктів і систем в майбутньому, про альтернативні шляхи досягнення їх необхідних властивостей. Для того, щоб обґрунтувати такі думки, необхідні знання історичних закономірностей розвитку об'єкта і тих чинників, які визначають ці закономірності.

Схема процесу прогнозування з етапами і зв'язками між ними наведена на рис. 11.4. Вихідним положенням при прогнозуванні є мета прогнозування. Залежно від неї приймають і об'єкт прогнозування (зв'язок 1). Період упередження і точність прогнозування встановлюють залежно від мети й об'єкта прогнозування (зв'язки 2 і 3): що більший період упередження, то менша точність прогнозування; у разі необхідності підвищити точність прогнозування зменшується період упередження (взаємозв'язок 4). Залежно від періоду упередження встановлюють необхідний обсяг і зміст вихідних даних про об'єкт прогнозування. Що більший період упередження, то повнішими повинні бути вихідні дані (взаємозв'язок 5).

Обраний метод обробки вихідних даних залежить від потрібної точності прогнозування: що вища точність прогнозування, то точнішим повинен бути метод обробки вихідних даних. З підвищенням точності прогнозування обсяг і зміст вихідних даних повинні бути більш повними (взаємозв'язок 7).

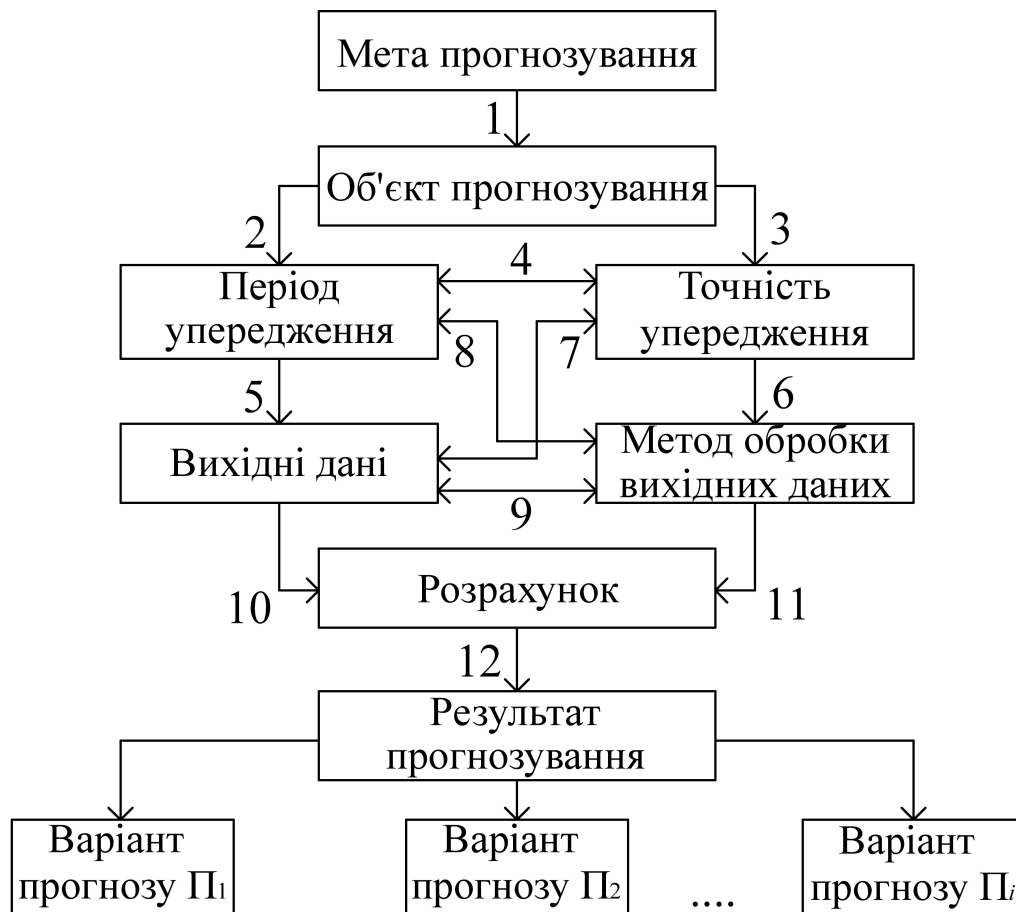


Рисунок 11.4 – Схема процесу прогнозування

Що більший період упередження, то точнішим повинен бути метод обробки вихідних даних (взаємозв'язок 8). Наявність обсягу і змісту вихідних даних визначає вибір методу їх обробки: що повніші вихідні дані, то точнішим може бути метод їх обробки. В той же час певний метод потребує відповідного обсягу вихідних даних (взаємозв'язок 9).

Визначивши обсяг і зміст вихідних даних про прогнозування об'єкта і прийнявши відповідний метод обробки вихідних даних, можна виконати необхідні розрахунки (зв'язок 10 і 11). Виконані розрахунки повинні дати можливість отримати потрібний результат прогнозування (зв'язок 12), на підставі якого можуть бути розроблені припустимі варіанти прогнозу. Не виключено, що отриманий результат прогнозування не буде повністю відповідати поставленій меті. В цьому випадку необхідно уточнити окремі етапи прогнозування, використовуючи зворотні зв'язки.

Розглянута схема процесу прогнозування може виявитися для деяких класів задач проектування несприятливою. У цьому випадку прогнозування слід проводити в такій послідовності: 1) розробка загальної схеми прогнозування; 2) встановлення комплексу прогнозованих параметрів; 3) визначення потрібної точності прогнозування; 4) встановлення величини періоду упередження.

Процес прогнозування, виходячи з вимог щодо точності, може бути розподілений на такі три частини: 1) детерміновану, яка піддається точному розрахунку; 2) вірогідну, яка дозволяє встановити допустиму закономірність протікання процесу; 3) "чисто" раптову, котра не піддається розрахунку. Співвідношення між частинами залежить від рівня наукового пізнання розглядуваного процесу і може змінюватись з часом. Науково-технічний прогрес сприяє підвищенню впливу детермінованої частини і зниженню впливу інших частин. Тому підвищення значимості детермінованої частини і точності вірогідної частини сприяє підвищенню загальної точності прогнозування.

11.3. Статистичні методи прогнозування

З відомих методів статистичного прогнозування можна виділити екстраполяційний, регресійний та інтерполяційний методи.

При використанні першого методу Р. Ленц виділяє шість основних етапів:

вибір параметрів, які підлягають прогнозуванню; збір необхідних даних; представлення даних у графічній формі; екстраполяція; інтерпретація прогнозу; аналіз можливості використання прогнозу у процесах ухвалення рішень.

Для моделювання S – подібною кривою, що визначає закономірності розвитку класу систем, пропонується використовувати криву Перла, яка симетрична щодо точки перегину

$$y = \frac{L}{1 + ae^{-bt}},$$

де y – параметр, який аналізується; L – верхня межа значень параметра; a – безрозмірна постійна; b – постійна на

одиницю часу; t – час.

Хронологічну послідовність зміни параметрів ТС можна описувати простішими залежностями лінійного, статичного, логарифмічного видів.

Методи науково-технічного прогнозування, які базуються на екстраполяції, можна розділити на п'ять груп: пряма екстраполяція, адаптивні моделі екстраполяції, кореляційний метод, метод огинаючих кривих і параметричних моделей.

Суть прямої екстраполяції полягає в аналітичному описі розвитку того або іншого параметра прогнозованого об'єкту функцією $y = f(t)$ і обчисленні його в заданий проміжок часу в майбутньому. У реальній ситуації в перебігу певного часу закономірності зміни прогнозованого параметра можуть змінитися, що в найбільш простому варіанті приведе до зміни коефіцієнтів математичній моделі. У цих випадках необхідно використовувати математичний апарат, який дозволяє автоматично розпізнавати зміни в моделях, на цьому заснований адаптивний метод.

Формальна постановка завдання прогнозування на основі кореляційного методу запропонована Дж. Мартіно. Вона полягає у використанні прийомів екстраполяції і рівнянь регресій.

При аналізі статистичних даних досить часто виникає проблема оцінки стохастичних зв'язків підсистем і елементів. Власне регресійний аналіз дозволяє виявити ступінь залежності одного діапазону даних від значень одного або декількох інших діапазонів даних. На практиці найчастіше використовуються методи лінійної, нелінійної, парної і множинної регресій, які достатньо детально розглянуті в методичній і довідковій літературі.

Інтерполяційні методи прогнозування використовуються тоді, коли залежності зміни параметрів задані в табличному вигляді. Ставиться завдання знайти значення параметра, якого немає в таблиці. Розроблено багато методів інтерполяції. Найбільш простим з них є метод лінійної інтерполяції:

$$g(x') = g(x_0) + \frac{x' - x_0}{x_1 - x_0} g(x_1),$$

де $g(x_0)$ и $g(x_1)$ - табличні значення функції $g(x)$, а x' знаходиться в проміжку між x_0 і x_1 .

Якщо $g(x)$ не є лінійною функцією від x , то, замінивши її монотонною функцією, можна виконати нелінійну інтерполяцію.

Розглянемо практичне застосування екстраполяції на прикладі прогнозування розвитку параметрів металорізальних верстатів при використанні кореляційного методу. Дані для прогнозу узяті на підставі аналізу параметрів багатошпindelних токарних автоматів (БТА), які випускалися з 1950 по 2000 роки.

Точність прогнозу при використанні лінійної моделі в тимчасовому інтервалі 3...5 років за швидкістю різання v (функція y) (рис. 11.5) складає 80%. Прогноз на 2020 рік показує, що швидкість різання досягне 700 м/хв, що не відповідає реальним тенденціям розвитку БТА. Це свідчить про те, що лінійна модель не може для даного прикладу використовуватися для прогнозу на інтервалі часу 10...15 років. Для цього необхідно використовувати моделі вищих порядків.

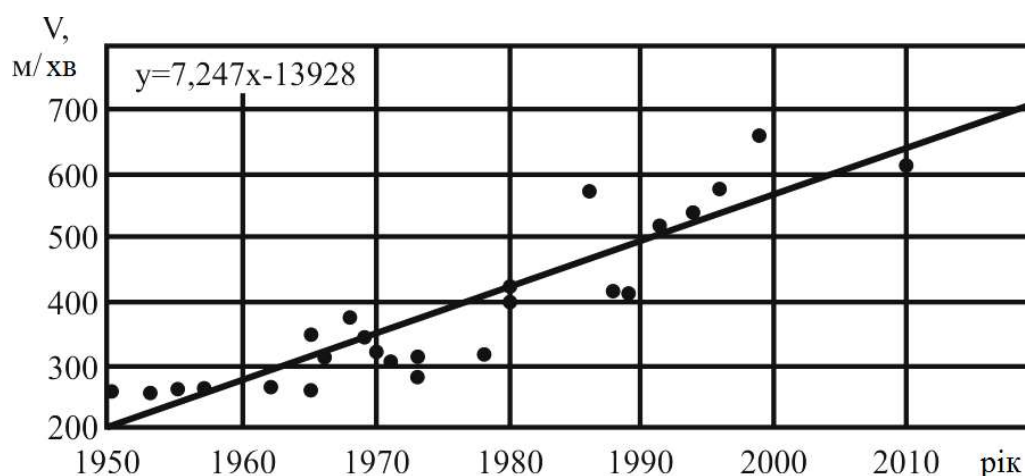


Рисунок 11.5 – Прогноз швидкості різання восьмишпindelних токарних автоматів лінійною моделлю

11.4. Експертні методи прогнозування

Експертні методи є найбільш поширеними методами науково-технічного прогнозування. Вони дозволяють давати оцінки, коли відсутні статистичні дані або їх недостатньо для отримання достовірних оцінок, а також тоді коли статистичні

методи не дозволяють врахувати все різноманіття чинників, що впливають на оцінюваний параметр і не забезпечують необхідної точності.

Експертні методи прогнозування пов'язані зі збором і систематизацією різного роду даних для експертних оцінок. Експертиза виконується або одним, або групою експертів. Для проведення експертизи необхідно підбирати компонентних експертів, які добре знайомі з предметом експертизи, мають достатню освіту, здатні виносити обґрунтовані рішення. При індивідуальній експертизі можуть застосовуватися такі її різновиди: інтерв'ю, аналітичний метод, метод написання сценарію, метод дерева цілей, морфологічний аналіз, метод розстановки пріоритетів, попарного порівняння варіантів та інші.

Метод інтерв'ю дозволяє обійтися без безпосереднього контакту замовника з експертом за схемою «питання – відповідь». Для цього повинна бути розроблена кваліфікованим фахівцем програма постановки питань перед експертом. Аналітичний метод дозволяє провести логічний аналіз якої-небудь прогнозованої ситуації і представити її у вигляді аналітичної записки. Він допускає самостійну роботу експерта над аналізом тенденцій, оцінкою станів і перспектив розвитку прогнозованого об'єкта або його параметра.

Метод написання сценарію базується на вивченні логіки розвитку процесу (об'єкта) при різних ситуаціях. Основне призначення сценарію – визначення генерального напрямку розвитку прогнозованого об'єкта, а також формулювання критеріїв для оцінки верхніх значень дерева цілей. Сценарій – відображає послідовність детального розв'язку задачі, виявлення можливих ускладнень, пошук серйозних недоліків для того, щоб успішно завершити роботи з прогнозування.

Метод дерева цілей використовують при аналізі об'єктів і процесів, у яких можна виділити декілька структурних і ієрархічних рівнів. «Дерево цілей» є напрямом послідовного, все більшого виділення дробових компонентів на нижчих рівнях. Кожен етап на кожному рівні розділяється на два або більше компонентів наступного рівня.

При формуванні дерева цілей необхідно дотримуватися трьох умов: 1) напрямки, які виходять з однієї вершини, повинні утворювати замкнуту (повну) множину; 2) напрямки, які виходять з однієї вершини, повинні бути такими, що взаємно виключаються, для того, щоб не було частого об'єднання об'єктів, представлених двома різними напрямками, які виходять з однієї вершини; 3) «дерево цілей», вживане при нормативному прогнозуванні можна представляти сукупністю цілей і підцілей.

Найбільш часто використовуваний метод колективної експертизи (метод «Дельфа») був розроблений корпорацією «РЕНД». Вся процедура методу зводиться до проведення комплексу операцій, які формують групову думку по колу обумовлених завдань. Групі експертів (від 20 до 60 чоловік) дають завдання підготувати анонімний прогноз в якій-небудь обумовленій області. Експертизу за методом Дельфа найчастіше проводять у чотири тури. У першому турі експертам повідомляється мета експертизи, розробляється завдання, повідомляється на якій основі проводиться експертиза. Завдання даються кожному експертові персонально у вигляді анкети, яка іноді може супроводжуватися запискою пояснення. Отримана інформація спрямовується до аналітичної групи, яка забезпечує проведення експертизи, обробку проміжкових і кінцевих результатів. Аналітична група виділяє експертів, які висловили «крайні» точки зору, тобто дали найвищі і нижчі оцінки альтернативам (вище і нижче за яких розташовано 25% чисельних значень оцінок).

У другому турі експертам показують результати усередненої оцінки експертної комісії і обґрунтування експертів, які висловили крайні точки зору. При цьому не повідомляється, хто ці обґрунтування виніс. Після отримання додаткової інформації експерти, як правило, корегують свої оцінки. Третій і четвертий тури не відрізняються від другого.

Результати аналізу за методом Дельфі включають такі положення: розглянутий перелік пропозицій формується на основі аналізу фахівців, які включають тільки ті пропозиції, які, на їх думку, є найбільш важливими; зумовлюють час, в перебігу якого діють ці пропозиції; можливість виникнення пропозицій у заданий період часу; наслідки пропозицій у

період їх реалізації; оцінюється важливість таких наслідків; перераховуються і оцінюються альтернативні дії, які могли б усунути ті явища, які є найбільш несприятливими і зменшують можливість реалізації пропозицій; аналізуються причини появи украй протилежних думок на будь-якому етапі процесу.

Метод послідовного експертного опису – припускає послідовне розширення числа експертів, які беруть участь в експертизі. Експерт, який включається до складу комісії, на четвертому турі процедури подає обгрунтовану оцінку і знайомиться з обгрутованими оцінками експертів, які працювали раніше. Його обгрунтування з дотриманням принципу анонімності доводиться до відома експертів, які були задіяні раніше. Кожен з них повинен або підтвердити свою колишню оцінку або внести до неї корективи. Процедура повторюється поки оцінки експертів не стабілізуються. Розглянута процедура має ряд переваг: відсутність тиску на експерта усередненою оцінкою комісії; експерти мають більше інформації у зв'язку з розглядом всіх аргументацій оцінок експертів, які беруть участь в експертизі. Недоліками методу є його велика трудомісткість і необхідність залучення до експертизи великої кількості фахівців, що мають знання в даному питанні.

Низка інших методів, які використовуються при експертному прогнозуванні, детально розглянуті в довідковій і методичній літературі.

11.5. Методи моделювання при прогнозуванні ТС

При прогнозуванні розвитку ТС широко застосовуються різноманітні методи моделювання, на підставі яких розробляються моделі прогнозу. Модель прогнозу є залежністю або сукупністю залежностей, які дають опис закономірностей ходу процесу в майбутньому. Результатом реалізації моделі є прогноз, який подається у вигляді таблиць, графіків, монограм.

У математичному моделюванні прогнозування розвитку ТС намітилися два основні підходи: прогноз розвитку на основі емпіричних даних, що представляються у вигляді поліноміальних моделей; прогноз розвитку на основі

розв'язку певного деякого диференціального рівняння (диференціальна модель).

Поліноміальна модель застосовується, якщо залежності вихідних змінних від часу представляються звичайними рівняннями алгебри. Для їх визначення використовують експериментальні дані, обробляючи їх, наприклад, методом найменших квадратів. (див. п.6.3).

Як диференціальна модель найчастіше приймають залежності вигляду

$$y' = a_1(t)y + a_2(t)y^2, \quad (11.1)$$

де коефіцієнти a_1 і a_2 при вихідній змінній залежать від часу t .

Якою б не була функція $y(t)$, майже завжди можна вибрати функцію $a_1(t)$, за якої $y(t)$ буде результатом розв'язку звичайного диференціального рівняння

$$y' = a_1(t)y. \quad (11.2)$$

У рівнянні (11.2) слід допустити $a_1(t) = y'(t)_y / y(t)$ (за умови $y(t) \neq 0$). Крім того, пропонується функція

$$y = L \left(a + e^{be^{-\beta t}} \right)^{-1}, \quad (11.3)$$

де L , a , b , β - числа, пов'язані з розв'язком рівняння (11.2) при

$$a_1(t) = \frac{b\beta e^{-\beta t} - \beta t}{a + e^{be^{-\beta t}}}.$$

Функцію (11.3) слід розглядати як результат розв'язку рівняння (11.2) за заданих параметрах коефіцієнта. Основна мета такого підходу – моделювання трьох етапів розвитку системи: початкової стадії, стадії інтенсивного планового розвитку і стадії згасання.

Вельми перспективним, на думку фахівців з системотехніки, є також прогнозування на основі нейронних мереж. Завдання експерта полягає у перерахуванні чинників, які впливають на прогнозований параметр і підібрати достатнє число ознак, які характеризували б поведінку системи у минулому. Нейронна мережа сама зорієнтується на

задану сукупність параметрів, зменшивши до мінімуму сумарну помилку прогнозування. Крім того, аналіз мережі дозволяє знаходити приховані зв'язки між вхідними і вихідними змінними, що буває часто неможливо при використанні традиційних методів.

Нейронна мережа – це сукупність елементів – штучних нейронів, пов'язаних між собою синоптичними зв'язками (рис. 11.6). Мережа обробляє вхідну інформацію і у процесі зміни свого статусу формує сукупність вихідних сигналів.

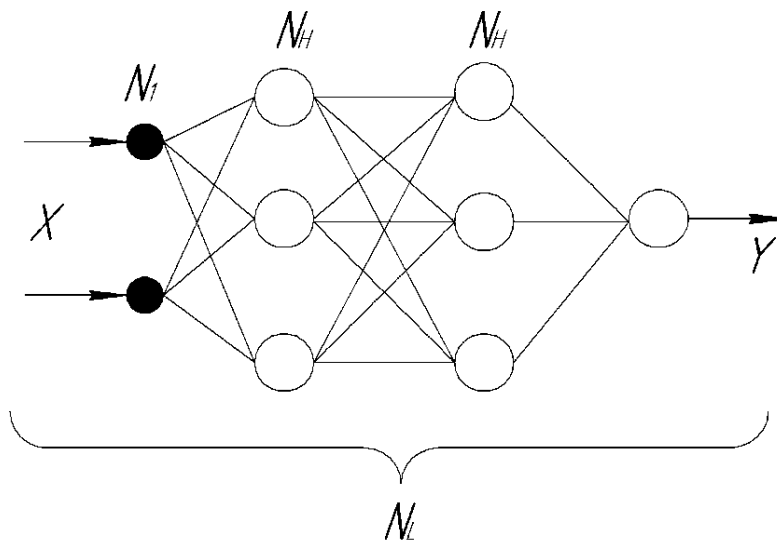


Рисунок 11.6 – Приклад структури нейронної мережі: N_i – число нейронів у вхідному шарі; N_H – число нейронів у кожному прихованому шарі; N_o – число вихідних нейронів; N_L – певна кількість у мережі; X – вектор вхідних сигналів мережі; Y – вектор вихідних сигналів

Вирішення завдань за допомогою нейронної мережі передбачає: 1. Формування компонентів вхідного вектора X . 2. Вибір вихідного вектора Y так, щоб його компоненти дозволяли дати повний опис поставленого завдання. 3. Проведення призначень на вихідну сукупність (підбір параметрів мережі, що забезпечують розв'язок задачі найкоротшим шляхом). 4. Подача на вхід мережі умов завдання і найновіших даних про структуру вектора X . Вихідний вектор Y дасть формалізований розв'язок задачі.

Ще одним підходом у вирішенні завдань прогнозування є використання диференціально-

поліноміальних моделей розвитку систем. S -подібна крива (див. рис.1.1) моделюється частково-безперервними функціями.

Стверджується, що функція $y(t)$ є функцією класу S на ділянці t_1-t_2 тоді і тільки тоді, якщо $y(t)$ є розв'язком задачі Коші $y'' = f(t)$ при $y(t_1) = y_0$ і $y'(t_1) = y'_0$, де $y_0 \geq 0$ $y'_0 > 0$, а $f(t)$ - зростаюча безперервна функція, яка може бути, наприклад, представлена поліномом

$$f(t) = a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0.$$

11.6. Прогнозування на основі аналізу інформаційних даних

Інформація про ТС може носити словесну, буквено-цифрову, графічну форми. Вона підрозділяється на дві групи: описову (словесну і візуальну) і документальну. Подається інформація у вигляді інформаційних кадастрів. Опис функціонування ТС припускає забезпечення: повноту кадастру; необхідного рівня достовірності; регулярності поповнення (інформаційний кадастр повинен бути актуальним). Крім того, інформація повинна бути функціонально направленою на вирішення поставлених завдань при прогнозуванні.

Обробка даних в інформаційних системах визначається діями, пов'язаними з їх підготовкою, модифікацією і переробкою. Інженерне прогнозування, як правило починається з призначення мінімального об'єму інформації (кількість джерел інформації) V_{\min} і глибини ретроспективи (часу) τ_{\min} , необхідних для достовірного прогнозування.

При оцінці параметрів ТС застосовують три класичні значення значущості і відповідно три значення достовірності:

$$\begin{aligned}d &= 5\%, (\varepsilon=0,05), g=95\%; \\d &= 1\%, (\varepsilon=0,01), g=99\%; \\d &= 0,1\%, (\varepsilon=0,001), g=99,99\%.\end{aligned}$$

Проте для завдань прогнозування це дуже жорсткі вимоги. Тому в інженерному прогнозуванні

використовуються інші значення рівня значущості і достовірності:

$$d = 15\%, (\varepsilon = 0,15), g = 85\%;$$

$$d = 20\%, (\varepsilon = 0,2), g = 80\%;$$

$$d = 50\%, (\varepsilon = 0,5), g = 50\%.$$

Основною оцінкою у прогнозуванні, як правило, є точність (див.рис.11.4). При аналізі варіантів прогнозування доцільно розглядати на кожному тимчасовому інтервалі отримання оцінок з точністю 50%, 80%, 85%, 95%, 99%. За відсутності достовірної вхідної інформації допускається точність 50%.

Мінімальний об'єм інформації може бути розрахований на основі закону великих чисел П.Л. Чебишева

$$V_{\min} = k / \varepsilon^2.$$

При прогнозуванні зазвичай приймають $k = 4b\varepsilon$. Цифра 4 відповідає мінімальному числу точок на площині, які необхідні для побудови графіка (кривої), що ілюструє зміну параметрів як функції часу. Параметр b відповідає числу елементів міжнародної патентної класифікації. Таким чином, мінімальний об'єм інформації визначається

$$V_{\min} = 4b / \varepsilon.$$

Так, при $b=5$ і значенні параметра точності 99% $V_{\min} = 2000$, а за точності 50% відповідно - $V_{\min} = 40$.

При проведенні прогнозних досліджень часто необхідно досягти точності прогнозування на рівні 80...90%. Для цього об'єм інформації повинен бути не меншим 200.

Короткострокове прогнозування забезпечується в основному інформацією про досягнення конструкторських розробок, середньострокове – про патенти, довгострокове – інформацією різного вигляду (статті, реферати, патенти, дисертації, наукові відкриття), особливо довгострокове – інформацією всіх видів, включаючи дані експертів і винаходів.

З відомих методів інформаційного прогнозування сьогодні найширше застосовуються методи: якісного перетворення патентної інформації; якісно-кількісного аналізу динаміки видачі патентів; науково-технічного

прогнозування на основі патентної інформації; прогнозування розвитку техніки на основі оцінки інженерно-технічної значущості винаходів; оцінки рівня науково-технічних розробок і тенденцій їх розвитку.

Метод якісного перетворення патентної інформації був запропонований В.Д. Васильєвим. В основі методу лежить можливість на базі детального аналізу форми текстів опису і малюнків патентів зарубіжних фірм створити прогноз рівня розробок даної фірми.

Метод якісно-кількісного аналізу динаміки видачі патентів запропонований Б.Н. Тардовим. На його основі визначаються тенденції розвитку науково-технічного прогресу. Цей метод базується на законі прискореного розвитку техніки і є процедурою екстраполяції тенденцій, які виявлені при аналізі динаміки патентування.

Метод науково-технічного прогнозування на основі патентної інформації розроблений В.А. Обуховим. В основі методу лежить ідея оцінки патентів за n - бальною системою з подальшим зведенням оцінок до двох критеріїв, які характеризують цінність і перспективність винаходів. При цьому визначаються два показники: технічна значущість винаходів T (коефіцієнт повноти) і показник рентабельності R . В результаті аналізу патентів і призначених коефіцієнтів інженерно-технічної значущості ми можемо визначити: яка інженерно-технічна значущість одного патенту; з'ясувати перспективу впровадження у промисловість і цінність цього патенту за кордоном; привести патенти до вигляду, який дозволяє їх порівнювати; застосувати ЕОМ для масової обробки патентів.

Метод прогнозування розвитку техніки на основі оцінки інженерно-технічної значущості винаходів запропонований В.Г. Гмошинським. Він включає три етапи: висновок за оцінкою окремого патенту за новизною; виділення конкурентних груп патентних рішень і визначення перспективності кожної з цих груп; висновок за оцінкою рівня патентів в суміжних галузях техніки.

Метод оцінки рівня науково-технічних розробок і тенденцій їх розвитку запропонований І.Ю. Зборовським. Він базується на вивченні патентів з виділенням їх якісних характеристик. Для характеристик особливо важливо

з'ясувати, наприклад, технічний рівень винаходів, широту проблеми, цілісність винаходу, його ефективність.

Питання для самоконтролю знань

1. Яку форму має крива еволюційного розвитку ТС і чому?
2. Які методи прогнозування ТС існують?
3. Які методи прогнозування відносяться до статистичних?
4. У чому суть експертних методів прогнозування?
5. У чому суть прогнозування за допомогою нейронних мереж?
6. Чим забезпечуються короткострокові, середньострокові і довгострокові прогнози?

12. СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ ЩОДО СТВОРЕННЯ І ПЕРЕДБАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

12.1. Генетичний підхід – ключ до створення нових ТС

В останній період спостерігається тенденція до утворення нових наукових напрямків на основі структурно-системних досліджень, які набувають статусу «міждисциплінарних» і до яких відноситься генетика, що вивчає закони спадковості і структурної мінливості в природних і антропогенних системах, що розвиваються у часі.

Основний принцип генетики – «від простого до складного». Тому в основу створення складних систем закладено уявлення про елементарність, вчення про властивість елементарних структур, які виконують роль теоретичної основи для узагальнення і синтезу знань в сучасних фундаментальних науках. В цьому випадку методичною основою виступає принцип існування обмеженої кількості елементарних (породжуючих) структур, що підтверджується дослідженнями в різних областях, наприклад: всі живі організми утворені з 24-х хімічних елементів; вся кольорова гама утворена з 7-ми кольорів; всі музикальні твори написані з 7-ми нот; всі числа складаються з 10-ти цифр; всі джерела електромагнітного поля містять 6 геометричних класів поверхонь. Всі алфавіти мають обмежену кількість букв (літер), тощо.

На сучасному етапі еволюції техніки спостерігаються стійкі тенденції зростання складності проблем, що постають перед спеціалістами в різних галузях технічної діяльності, що обумовлено процесами конвергенції наук і технологій, широким поширенням цифрових технологій, різким збільшенням обсягів інформації, міждисциплінарним рівнем складних ТС зі штучним інтелектом. У зв'язку з цим зросли вимоги до якості підготовки фахівця як до суб'єкта професійної діяльності, здатного генерувати власні ідеї, креативно вирішувати складні завдання міждисциплінарного рівня, використовувати системні компетенції, здійснювати своє професійне зростання, проявляти адаптивні навички професійної мобільності. У результаті виростили вимоги до

рівня і якості підготовки фахівців у системі вищої технічної освіти.

На зміну предметно-орієнтованої і неперервної парадигм навчання прийшла адаптивна парадигма, що знайшла своє вираження в поняттях системної, когнітивної, екологічної, інформаційної, гуманітарної і професійної компетентностей, які визначають готовність фахівця до здійснення своєї професійної діяльності. Реалізація компетентнісного підходу вимагає упровадження нових методів організації навчального середовища, яке здатне забезпечити формування компетентностей майбутніх фахівців, необхідних для розв'язання інноваційних задач і проектів міждисциплінарного рівня. До інноваційних методів організації навчального середовища, які забезпечують гармонійне поєднання професійних, системних, інформаційних, гуманітарних і екологічних складових освітнього процесу відносяться знання з генетики і кібернетики.

Одним з вагомих наукових результатів, отриманих за останні роки в галузі генетичної і структурної електромеханіки, стало теоретичне й експериментальне підтвердження приналежності електромагнітних систем до категорії генетично організованих систем. Теоретичні основи генетичної еволюції електромагнітних систем вперше розроблено на кафедрі електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського проф. Шинкаренко В.Ф. Відкриття генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля, створило умови для постановки принципово нових системних задач, серед яких чільне місце посідають задачі передбачення, яке здійснюється на основі розшифрування й аналізу генетичних програм структуроутворення довільних функціональних класів електромеханічних систем.

Системні задачі з визначення та розшифрування генетичних програм належать до категорії міждисциплінарних задач, а їх розв'язання можливе лише за умови наявності концептуальних моделей знань високого рівня узагальнення. Тому розвиток досліджень у цьому напрямку відкриває можливість постановки і розв'язання принципово нових міждисциплінарних задач, в тому числі задач структурного передбачення і інноваційного синтезу складних ТС з компонентами різної генетичної природи.

Аналіз детермінованих взаємозв'язків елементно-інформаційного базису періодичної структури ГК з принципами збереження симетрії, генетичної інформації і структурною еволюцією електромеханічних систем (ЕМ-систем), кардинально змінили традиційні уявлення стосовно принципів структурної організації і джерел структуроутворення складних систем антропогенного походження.

За результатами генетичного аналізу і постановки еволюційних експериментів встановлено, що структурна різноманітність електромагнітних об'єктів - нащадків і їх властивості розпізнаються і упорядковуються через генетичні коди елементного базису періодичних породжувальних систем. Це дозволило визначити фундаментальні принципи, які встановлюють спільну генетичну природу і системні ізоморфізми довільних генетично організованих систем як фізичного, так і антропогенного походження (рис.12.1).

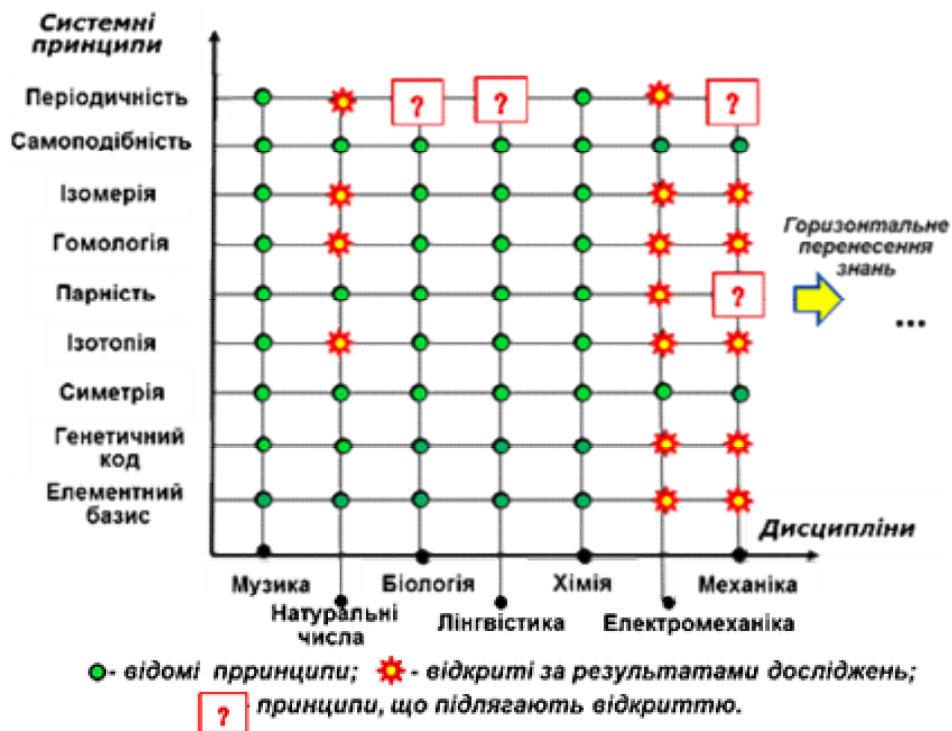


Рисунок 12.1 – Системні ізоморфізми в генетично організованих системах

Відкриття принципу збереження генетичної інформації первинних елементів дозволили поширити

генетичні механізми структуроутворення на більш складні рівні структурної організації електромеханічних перетворювачів енергії, включаючи класи гібридних і суміщених ТС. У системах такого рівня первинні електромагнітні структури виконують роль системотвірного генетичного ядра, інваріантного до рівня складності структури, яка може суміщуватися з компонентами іншої генетичної природи (механічними, гідравлічними, електронними, біологічними та ін.).

Наявність зазначеної закономірності покладено в основу розробки теорії видоутворення і першої у світі геносистематики об'єктів електромеханіки, яка містить інформацію як стосовно відомих Видів і Родів електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ), так і генетично допустимих структурних Видів, ще відсутніх на цей час еволюції техніки. Лише за останні роки на основі використання положень теорії генетичної еволюції і аналізу системності структури ГК знайшли наукове обґрунтування і практичне використання:

- генетичні принципи структурно-інформаційної еволюції технічних систем;
- універсальний принцип кодування генетичної інформації і структуру універсальних генетичних кодів електромеханічних об'єктів;
- інваріантні принципи побудови геносистематики;
- макро- і мікрогенетичні програми структуроутворення;
- природу і взаємозв'язок макро- і мікроріволюції;
- явище ізотопії електромагнітних структур;
- феномен «генетичної пам'яті» об'єктів електромеханіки і його практичне використання;
- явище структурної і просторової ізомерії;
- природу виникнення структурних паралелізмів в технічній еволюції об'єктів;
- генетичні програми електромеханічних об'єктів - близнюків і двійників та їх роль в технічній еволюції ЕМПЕ;
- технологія генетичного передбачення на рівні функціональних класів, генетичних програм і видової різноманітності ЕМПЕ.
- методологія генетичного синтезу об'єктів за заданою функцією з гарантованим інноваційним ефектом;

- принципи побудови і структуру генетичних банків інновацій і генетичних баз знань;
- принципи структуроутворення і генетичні програми гібридних і суміщених технічних об'єктів;
- методологія організації і проведення еволюційних експериментів.

Генетичне передбачення визначає нову міждисциплінарну галузь знань, предметом дослідження якої є елементно-інформаційний базис періодичних породжувальних систем, з наступним визначенням на їх основі генетичних програм, які містять закодовану інформацію стосовно генетично допустимих видів структурнащадків, в тому числі і невідомих на даний момент технічної еволюції досліджуваного класу об'єктів (рис.12.2).

Як відомо, проблема передбачення належить до ключових задач наукового знання і визначає одну з найважливіших функцій науки. Особливого значення задачі передбачення набувають у технічних науках, від рівня досягнень яких великою мірою залежать сучасне і майбутнє суспільства.

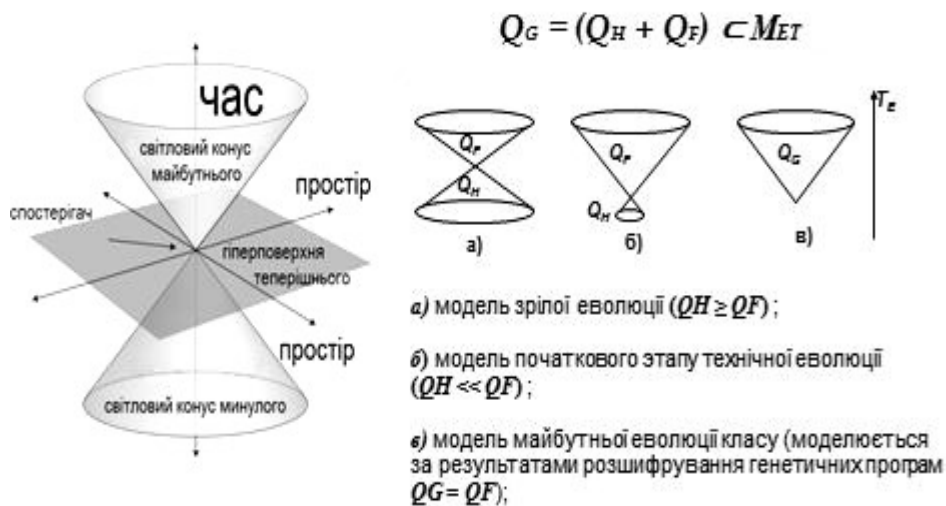


Рисунок 12.2. – Три сценарії генетичної еволюції техніки в чотирьохвимірному світловому конусі простору – часу

Наявність стійких методів розв'язання задач наукового передбачення з можливістю оперування інформацією структур, ще невідомих на цей момент часу – ключ до створення генетичних банків інновацій і конкурентоспроможних зразків техніки, які визначають

стратегію інноваційного розвитку технічних галузей і сучасних наукоємних технологій.

У системах антропогенного походження технологія передбачення має подвійну генетичну природу. З одного боку, здатність до передбачення генетично запрограмована в кожній людині у формі інстинкту пізнання, який реалізується через когнітивні механізми її мислення, з іншого боку, через генетично допустиму структурну різноманітність об'єктів, які Природа закодувала у структурі генетичних програм відповідної генетично організованої системи. Поєднання когнітивного потенціалу людини з високоупорядкованим інформаційним і прогностичним елементним базисом генетичних програм структуроутворення, визначає основну ідею і емерджентну природу методології генетичного передбачення (рис.12.3).



Рисунок 12.3 – Емерджентний ефект передбачення у концепції взаємодії двох генетично організованих систем

Виходячи з принципу системності, довільний електромагнітний об'єкт, як структурний представник, наділений ефектом «генетичної пам'яті», тобто виступає носієм генетичної інформації стосовно своєї приналежності до свого виду, роду і породжувальної системи, через які розпізнається таксономічна структура і генетичні програми досліджуваного функціонального класу об'єктів.

Пізнання природи виникнення і механізмів функціонування пам'яті було і залишається одним з фундаментальних завдань науки. Наявність пам'яті ще

недавно вважалось однією із специфічних властивостей, яка відрізняє живу природу від неживої. Але стрімкий розвиток структурно-системних і геномних досліджень, інформаційних і нанотехнологій та матеріалознавства відкрили широку різноманітність форм і рівнів організації пам'яті. Сьогодні наука оперує поняттями комп'ютерної пам'яті штучного інтелекту, кристалічної і голографічної пам'яті, пам'яті форми металу і пам'яті атомів, магнітної і радіаційної пам'яті та ін.

Розроблені методи генетичного аналізу й ідентифікації генетичної інформації дозволяють визначити як генетичне походження (минуле) окремого об'єкта, так і генетичну програму розвитку його класу (майбутнє), яка гарантовано містить в собі прогностичну інформацію стосовно множини генетично допустимих варіантів структур, ще відсутніх на даному етапі технічної еволюції. Генетичне передбачення – новітня наукоємна технологія, аналогії якої використовує сама природа. Для її ефективної реалізації в освіті, окрім знань з фахових технічних дисциплін, необхідні міждисциплінарні знання з загальної теорії систем і теорії еволюції, математичних методів симетрії і топології, інформаційної генетики, когнітології і теорії класифікації. Технологія генетичного передбачення пройшла ґрунтовну перевірку часом в еволюції людини – найбільш складної і досконалої генетично організованої системи в живій природі.

Сучасний рівень методологічного забезпечення дозволяє здійснювати постановку задач передбачення, генетичного синтезу і створення генетичних банків інновацій для довільних функціональних класів технічних об'єктів, за наявності інформації лише одиничного структурного представника класу.

За результатами досліджень з розшифрування геному ЕМПЕ в КПІ ім. Ігоря Сікорського започатковано проект створення Національного генетичного банку інновацій зі структурної електромеханіки і механіки. Це інноваційний проект міждисциплінарного рівня, який не має аналогів у технічних науках, оскільки здійснюється на основі новітніх наукових відкриттів і результатів розшифрування генетичних програм технічних об'єктів. У генетичних банках інновацій концентрується систематизована інформація щодо структурного потенціалу як відомих, так і потенційно

можливих електромагнітних, електромеханічних і механічних об'єктів. Така інформація, доповнена штучним інтелектом і буде визначати стратегію керованої еволюції інноваційного розвитку техніки і технологій суспільства в недалекому майбутньому. Практична реалізація програми геномних досліджень дозволила відкрити нові функціональні класи об'єктів, що дозволяє суттєво зекономити часові й матеріальні ресурси, які традиційно витрачаються на пошук нових оригінальних ідей, інноваційних проектів та технологій (рис.12.4).

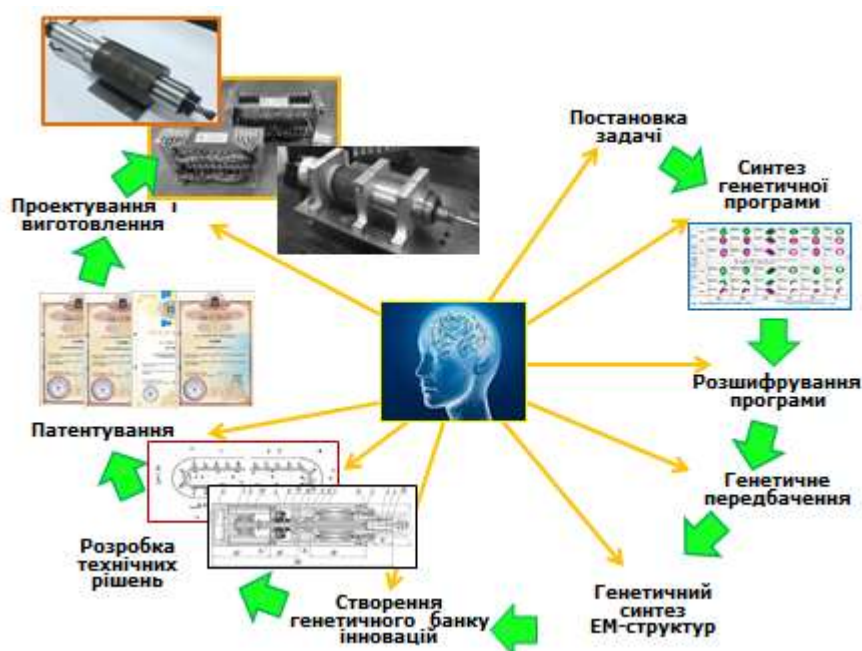


Рисунок 12.4 – Перші в світі технічні об'єкти, синтезовані за результатами розшифрування їх генетичних програм

Особливість системно-когнітивної технології навчання полягає в тому, що подання теоретичного матеріалу і тематика пошукових досліджень мають проблемно-системну постановку, а кінцевий результат значною мірою визначається творчими можливостями студента. Тому кожен студент обирає власну траєкторію розв'язання поставленої задачі, використовуючи високо упорядкований системний базис інтелектуальних підказок (періодичну генетичну класифікацію породжувальних структур), технологію генетичного передбачення і алгоритми спрямованого генетичного синтезу, з обов'язковою активізацією і використанням механізмів когнітивного

мислення: просторової уяви, системного мислення, асоціативної пам'яті і професійної інтуїції. Результати розв'язання завдань в системній постановці, завжди містять ознаки наукової новизни й інтенсифікують когнітивні механізми мислення, які студент генерує у вигляді оригінальних технічних рішень, які можуть бути новими не тільки для самого студента, але і для його наставника – викладача.

Наявність спільних системних принципів структуроутворення і розвитку електромагнітних, механічних, музичних, хімічних, біологічних, математичних (геометрія, теорія чисел), лінгвістичних та інших генетично організованих систем, відкрило можливість постановки системних досліджень міждисциплінарного рівня, коли одну проблемну задачу досліджують, наприклад, студенти електромеханічного, механічного і біологічного профілю. Тож до активів такого навчання слід віднести не тільки новизну постановки проблеми, засвоєння новітніх системних методів досліджень та інноваційну цінність їх кінцевих результатів, а й той важливий психологічний аспект, коли студент вперше усвідомлює, що він є особистість і починає вірити у свої творчі можливості

З використанням генетичних програм вперше розроблено наукові основи структурного передбачення, генетично синтезовано і цілеспрямовано введено в технічну еволюцію нові різновиди електромеханічних дезінтеграторів, суміщених ЕМ-систем вітрогенераторів, систем типу «мотор – колесо», «мотор-шпindel», гібридних ЕМ-систем для маніпулятора сталевих труб, генераторів для перспективних хвильових електростанцій та ін. На основі системності та упорядкованості інформації в генетичних програмах вперше створено генетичні банки інновацій, розроблено методологію визначення інноваційного потенціалу на рівні довільних класів ЕМ-систем, що дозволило реалізувати технологію групового патентування конкурентоспроможних технічних рішень на рівні їх гомологічних рядів. Створені за результатами досліджень ЕМ-об'єкти фактично стали першими у світі ТС, які були синтезовані за їх генетичними програмами.

Знання спадкової інформації (генетичного коду) і рівня генетичної складності ЕМ-об'єкта, за умови наявності

породжувальної періодичної системи первинних джерел магнітного поля, відкривають можливість розпізнавання і розшифровки генетичних програм різних рівнів організації (табл. 12.1), що відкриває можливість їх практичного використання в системних та прикладних задачах структурної електромеханіки.

Таблиця 12.1 - Класифікація рівнів подання знань у генетичних програмах ЕМ-систем

Рівень структурної організації	Структурний носій генетичної інформації	Інформаційний носій (програма)	Принцип (закон) збереження
Генетичний	Електрон	Електричний заряд	Принцип збереження електричного заряду
Хромосомний	Породжувальна періодична система первинних джерел електромагнітного поля	Періодична система універсальних генетичних кодів	Інтегральний періодичний закон
Об'єктний	Активні елементи (обмотки) ЕМ-об'єкта	Структурна формула	Принцип збереження генетичної інформації
Видовий	Геном виду	Генетична програма виду	Закон стійкості видових форм
Груповий	Геном гомологічного ряду	Генетична програма гомологічного ряду	Закон гомологічних рядів
Родовий	Геном роду	Генетична програма роду	Принцип дисиметризації П. Кюрі
Функціональний	Видова різноманітність функціонального класу	Генетична макропрограма функціонального класу	Закон гомологічних рядів Закон стійкості видових форм
Системний	Класи ЕМ-об'єктів, що еволюціонують	Геносистематика ЕМ-систем Генетичні банки і бази знань	Закони електромагнетизму Принципи спадковості Закони еволюції

Кожному структурному рівню генетичної організації ЕМ-систем ставиться у відповідність конкретна генетична програма, основу якої становить відповідний принцип збереження, або структурний закон. Архітектура інформаційних зв'язків у методології розпізнавання генетичних програм різних рівнів узагальнення, які представлено в табл. 1, в загальному випадку, вимагає

наявності трьох обов'язкових складових: «Об'єкт дослідження» ↔ «Дослідник» ↔ «Породжувальна періодична система» (рис. 12.5).

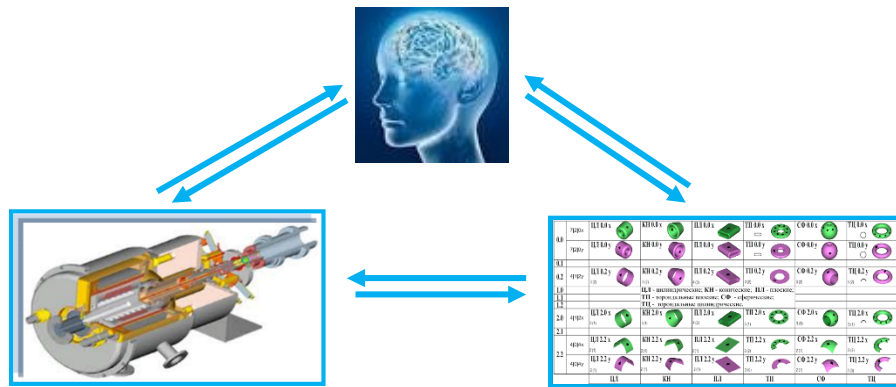


Рисунок 12.5 – Архітектура інформаційних зв'язків в системі «об'єкт – дослідник – породжувальна періодична система».

Системні інформаційні зв'язки між породжувальною системою (генетичною програмою) і довільним об'єктом, який є одним із структурних представників такої програми, визначається дослідником через логічну послідовність методів генетичного аналізу і синтезу (рис. 12.6).

Задачу відтворення генетичних програм, за умови наявності інформації структурного представника, можна узагальнити наступною послідовністю логічно взаємопов'язаних основних етапів: генетичного аналізу ЕМ-об'єкта (системи); синтезу генетичних програм; розшифровки і налізу генетичних програм відповідних рівнів; постановки еволюційних експериментів (за необхідністю). У межах кожного етапу здійснюється розв'язання відповідних локальних задач (рис.12.6). З використанням зазначеної послідовності процедур генетичного аналізу і синтезу, відтворюється вся структура і супідрядність взаємопов'язаних генетичних програм наступних рівнів: об'єктного, популяційного, видового, родового (геометричного класу); гомологічного ряду (електромагнітно і топологічно споріднених об'єктів); та функціонального класу. В такому середовищі студент виступає творцем (генератором ідей), експериментатором, систематиком, художником-графіком (конструктором), експертом і менеджером власних ідей і гіпотез (рис.12.7).

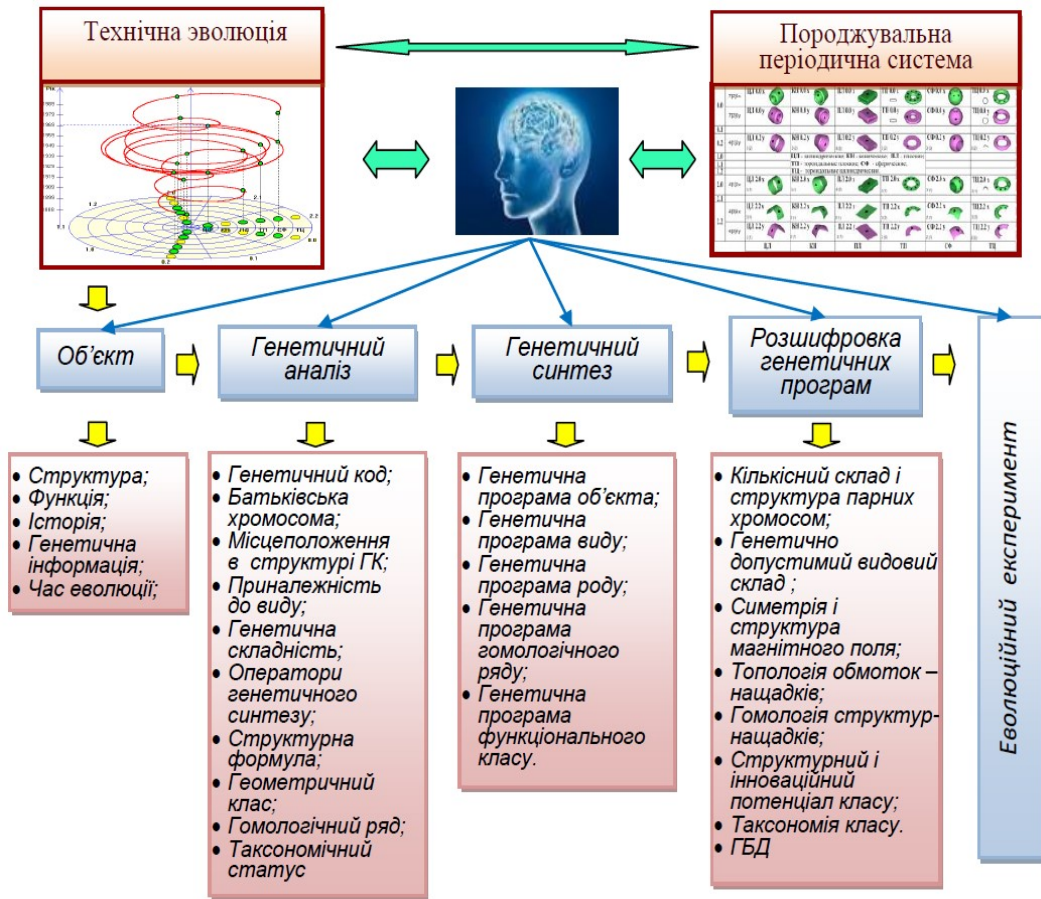


Рисунок 12.6 – Структура системної методології відтворення і розшифровки генетичних програм за наявності одиничного ЕМ-об'єкта

		Г Р У П И									
		0.0	0.1	0.2	1.0	1.1	1.2	2.0	2.1	2.2	
ПЕРШОЙ ВЕЛИКИЙ ПЕРІОД	ЦЛ	ЦЛ 0.0x 1			ЦЛ 1.0x	ЦЛ 1.1x		ЦЛ 2.0x 10	ЦЛ 2.1x	ЦЛ 2.2x	
		ЦЛ 0.0y	ЦЛ 0.1y		ЦЛ 1.1y	ЦЛ 1.2y				ЦЛ 2.2y	
	КН	КН 0.0x 1		КН 0.2y 6	КН 1.0x	КН 1.1x		КН 2.0x 4	КН 2.1x	КН 2.2x	
		КН 0.0y	КН 0.1y	КН 0.2y		КН 1.1y	КН 1.2y			КН 2.2y	
	ПЛ	ПЛ 0.0x 1			ПЛ 1.0x	ПЛ 1.1x		ПЛ 2.0x 6	ПЛ 2.1x	ПЛ 2.2x	
		ПЛ 0.0y	ПЛ 0.1y	ПЛ 0.2y 4		ПЛ 1.1y	ПЛ 1.2y			ПЛ 2.2y	
	ТП	ТП 0.0x 1			ТП 1.0x	ТП 1.1x		ТП 2.0x 4	ТП 2.1x	ТП 2.2x	
		ТП 0.0y 1	ТП 0.1y	ТП 0.2y 2		ТП 1.1y	ТП 1.2y			ТП 2.2y 1	
	СФ	СФ 0.0x 1			СФ 1.0x	СФ 1.1x		СФ 2.0x 5	СФ 2.1x	СФ 2.2x	
		СФ 0.0y	СФ 0.1y	СФ 0.2y		СФ 1.1y	СФ 1.2y			СФ 2.2y	
	ТЦ	ТЦ 0.0x			ТЦ 1.0x	ТЦ 1.1x		ТЦ 2.0x	ТЦ 2.1x	ТЦ 2.2x	
		ТЦ 0.0y	ТЦ 0.1y	ТЦ 0.2y		ТЦ 1.1y	ТЦ 1.2y			ТЦ 2.2y	

Рисунок 12.7 – Генетична карта перших в світі електромеханічних об'єктів, синтезованих і запатентованих аспірантами і студентами спеціальності за результатами аналізу їх генетичних програм

На сьогодні обсяги нової інформації інноваційного характеру, які накопичено в генетичних банках даних, потребують осмислення, узагальнення і проектно-технічної реалізації, обсяги яких значно перевищують можливості невеликої ініціативної групи викладачів, аспірантів і студентів. Наразі постає завдання створення міжнародного науково-методичного інноваційного центру, основним завданням якого є поширення наявного досвіду, ефективно використання інноваційного потенціалу, а також методичне забезпечення і підвищення кваліфікації викладацьких кадрів, здатних сприйняти новітні освітні технології й реалізувати їх в системній інженерії.

Останніми роками географія і напрями використання генетичних та еволюційних досліджень суттєво розширилися. З використанням генетичного підходу і методології морфологічного синтезу здійснюються наукові дослідження та інноваційні розробки в галузі структурної електромеханіки, в машинобудуванні (під керівництвом проф. Ю.М. Кузнєцова за напрямом створення нових поколінь компоновок верстатів та затискних механізмів), в задачах синтезу нових структур багатофазних обмоток, в концепції практичного використання оборотної внутрішньої енергії в промисловості та ін.

Вся виробнича, наукова і творча діяльність людей спрямована на задоволення потреб в суспільстві при розв'язанні різних проблем (рис.12.8). При цьому створювати треба не те, що заманеться або виходить (хоча це стане потрібним при погляді в майбутнє і генетичному передбаченні), а те, що потрібне суспільству на сьогоднішній день, залишаючи надію і створюючи оптимізм для майбутніх поколінь.

Необхідність приділення великої уваги до розвитку освіти і науки пояснюється тим, що це значно впливає на всі аспекти сучасного суспільства, підвищує науково-технічний прогрес і економічний зріст, забезпечує успіх боротьби з хворобами і розквіт культурного життя, можливості держави швидко й ефективно відгукуватись на нагальні соціальні потреби. Саме з цих уявлень стає важливою наскрізна підготовка технічної інтелектуальної еліти, яка здібна

«думати руками» і втілювати в життя за короткі терміни інновації, які зможуть вивести Україну у провідні країни Європи і світу.

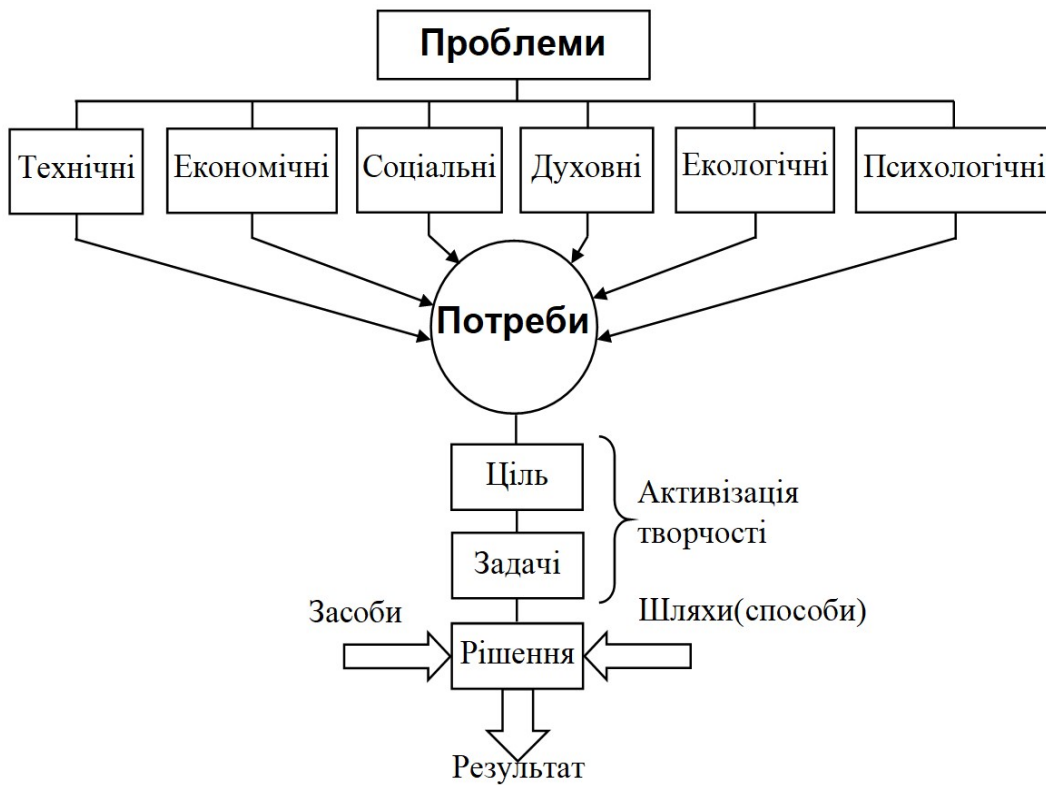


Рисунок 12.8 – Проблеми і потреби суспільства в активізації творчої діяльності

Наскрізна підготовка такої еліти – молодій генерації будівників нової України з досвіду провідних країн і, зокрема, США повинна бути спрямована на те, щоб розкрити і максимально використати потенційні здібності і можливості молодій людині, починаючи з дитячого садка в нерозривному ланцюгу отримання знань, умінь і практичних навичок: дошкільна, середня, вища освіта – виробництво – аспірантура і докторантура.

У такій складній ситуації, в якій опиналися Україна, тільки інвестування в освіту і науку зможуть не тільки зберегти, а й примножити інтелектуальний капітал держави, що дасть зростання добробуту людей України і підніме її авторитет на світовому просторі. Якщо в землю не кинути зерна і не доглядати, не отримаєш врожаю. Так повинно бути і з державним підходом до інтелекту нації.

12.2. Новий погляд на матеріальну точку як носія генетичної інформації при створенні ТС

В історії діяльності Людини важливу роль зіграла механіка – наука про закони руху тіл, що має відношення до всіх явищ природи і творінням техніки, до всіх природничих наукових дисциплін.

Механіка як наука і як перший крок на шляху полегшення фізичної праці Людини, що заснована на відкритих законах з часів Архімеда, Коперника, Галілея, Ньютона і розвинута Енштейном, Жуковським та багатьма іншими вченими, перетворилась в інженерну науку. Вона завжди була пов'язана з фізикою і математикою при проектуванні механічних та інших систем різної складності природного і природно-антропогенного походження.

Проектування завжди пов'язано з геометричними побудовами як в техніці, так і в будівництві. Створюючи нове або відтворюючи в naturі відоме, людина завжди зверталася до геометричних побудов.

У геометрії – це проведення паралелі, поділ відрізка навпіл, на число рівних або пропорційних частин, встановлення перпендикуляра, побудова кута, рівного заданому, 30° , 45° , 60° , поділ кута навпіл, проведення дотичної, виконання кола зовні або всередині багатокутника, побудова різних фігур.

У планіметрії і стереометрії йдеться вже відповідно про геометричні поверхні і тіла. Різні геометричні тіла – це предмети, від яких мислено відокремлені всі його властивості, крім просторових – об'ємних (форма і розміри).

Ці прості міркування ще за давніх часів використовувалися людиною в розумовій, практичній, виробничій та іншій діяльності і у вигляді генетичної інформації, зафіксованої на різних носіях (знаках, малюнках, книжках, статуетках, числах, тощо), переносилися із покоління в покоління з еволюційним їх розвитком.

У кам'яному віці кількість технічних систем, які склалися з одного – трьох тіл не перевищували п'яти – десяти (обробка каменю каменем в Африці 2,4 млн р. тому, кам'яна сокира в Кенії 1,65 млн р. тому, оволодіння вогнем в Африці 790 тис. р. тому, тощо).

Відкриття здається на перший погляд парадоксальним нових ефектів і явищ, об'єктивно наявних у Природі, дозволяє на багато років вперед прогнозувати і навіть передбачати розвиток науки і техніки, розв'язувати найскладніші проблеми, які стоять перед людством, серед яких енергетичні, екологічні, сировинні, та інші.

За аналогією з біологічним і електромагнітним генами в основу механічного гена на генетичному рівні, як нащадкової інформації, створеної Природою, можуть бути покладені елементарні частинки у вигляді безрозмірної матеріальної точки – нерухомої для статичних ТС і рухомої під дією сили і (або) моменту для динамічних ТС. На хромосомному рівні (батьківські хромосоми) матеріальна точка перетворюється в елементарне тверде тіло обмеженої кількості форм у вигляді кулі, циліндра, правильного багатогранника, призми, паралелепіпеда, труби, конуса, піраміди (рис.12.9). Об'єднання елементарних тіл утворює механічні ланки різної форми.

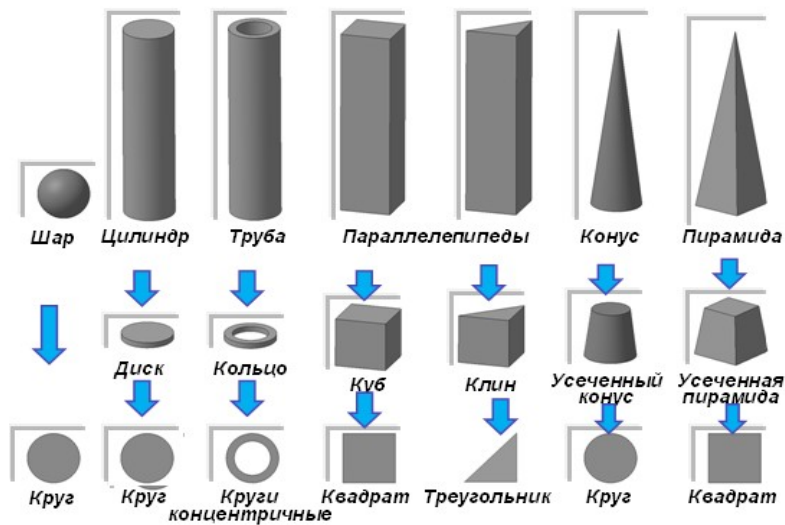


Рисунок 12.9 – Приклади елементарних твердих тіл і фігур породжуючих елементів механічної системи

Під дією зовнішніх збуджень навколишнього середовища або Людини, елементарні тверді тіла можуть приймати або змінювати свої форми (рис.12.10).

Якщо звернутися до витоків створення Людиною механічних систем, то знаряддя кам'яного віку являли собою прості форми тіл, на основі яких, з'явилися всі подальші

винаходи в механіці (рис.12.11). Саме з таких позицій можна прослідкувати розвиток техніки від минулого через сучасне до майбутнього на прикладі еволюції і синтезу верстатів, як машин, що створюють інші машини, використовуючи для цього геометричні побудови і об'єктивні закони в природі (симетрія, універсальні генетичні оператори синтезу, геометричні оператори, тощо).

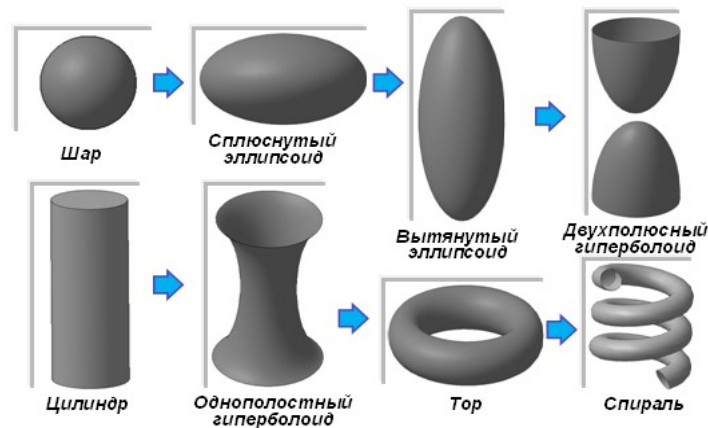


Рисунок 12.10 – Приклади зміни форми елементарних твердих тіл з виникненням хромосом-нащадків

Дерев'яна палиця, як відрізок прямої, дозволила отримати вогонь за рахунок її прямого і зворотного обертання і тертя в точці об інший предмет. Це був початок створення вертикально - свердлильного верстата, як обертаючого стержня. Розміри стержня - палиці Людина вибирала інтуїтивно, зважуючи на його міцність і стійкість. Плоска схема верстата була симетричною. Таким чином, у прообразах вертикально - свердлильного верстата спостерігається симетрія відносно вісі обертання, яка є віссю першого варіанта шпинделя. Для підвищення працездатності свердління на кінці палиці - шпинделя з'являється більш твердий матеріал, наприклад, камінь замість дерева.

Ця гіпотеза виражена у книжці Mason O.T., *The Origins of Inventions: A Study of Industry Among Primitive peoples*, Cambridge, Massachusetts, The M. I. T. Press, 1966.

Нерухому матеріальну точку с нарощуванням генетичної інформації і ускладненням структури використовують при геометричних побудовах статичних ТС (рис. 12.12).

Стрижень-батьківська хромосома
(породжувальна структура)

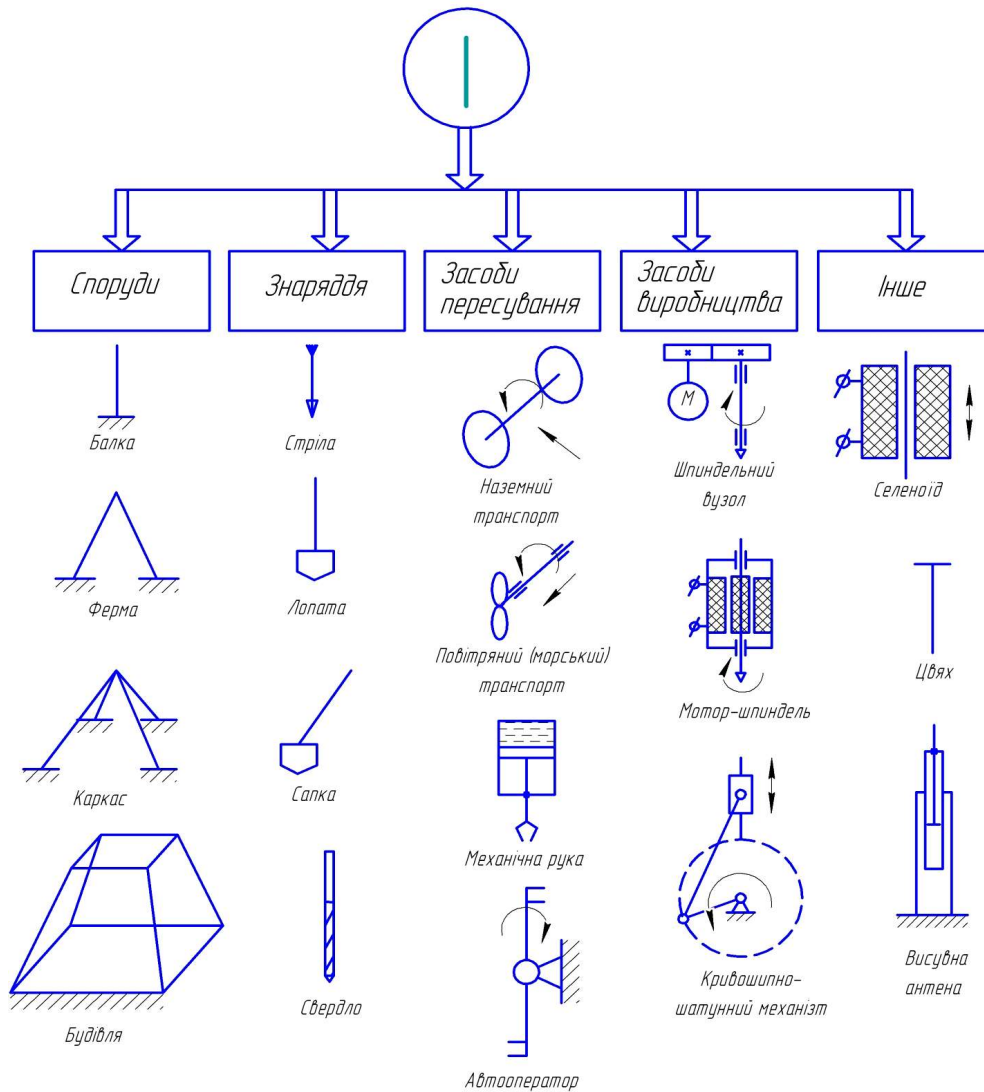


Рисунок 12.11 – Приклади використання стрижня-батьківської хромосоми в різних об’єктах

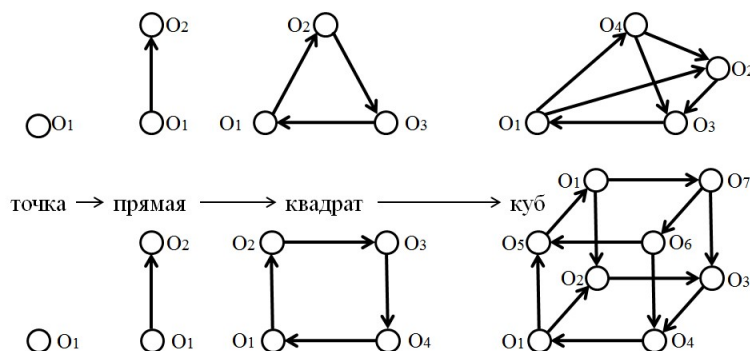


Рисунок 12.12 – Приклади переносу матеріальної точки (а) і ускладнення об’єкта з накопиченням генетичної інформації при побудові зображень, фігур і тіл в одновимірному (б), двохвимірному (в) і трьохмерному (г) просторі

Рухому матеріальну точку з нарощуванням генетичної інформації і ускладненням структури використовують як для переносу інформації від однієї точки до другої, так і для взаємодії точок. За аналогією з систематикою за Флінном, що вперше з'явилася в кібернетиці стосовно ЕОМ, а потім в теорії ТС, всі види переносу інформації матеріальними точками і їх взаємодії можна уявити чотирма класами (рис.12.13). За аналогією з електромагнітним полем, в механіці може йтися про кінетичне, силове й енергетичне поле, що може служити вихідною структурою, яка містить упорядковану сукупність механічних генів з заданою просторовою послідовністю їх розміщення (розподілу) в межах геометризованого топологічного простору (поверхні).

З використанням матеріальної точки як носія генетичної інформації запропонована Породжувальна система для затискних механізмів (табл.12.2) і новий погляд на кінематику різання (формуотворюючих рухів) (рис.12.14).

Будь-який технологічний принцип можна уявити у вигляді контактуючих і взаємодіючих між собою двох матеріальних точок – обраблюемого об'єкта O_1 (деталі) і обробляючого об'єкту O_2 (інструменту) (рис.12.14,а), кожний з яких здійснює у просторі поступальні й обертальні рухи в системі своїх координат $X_1Y_1Z_1$ і $X_2Y_2Z_2$ (рис. 12.14,б).

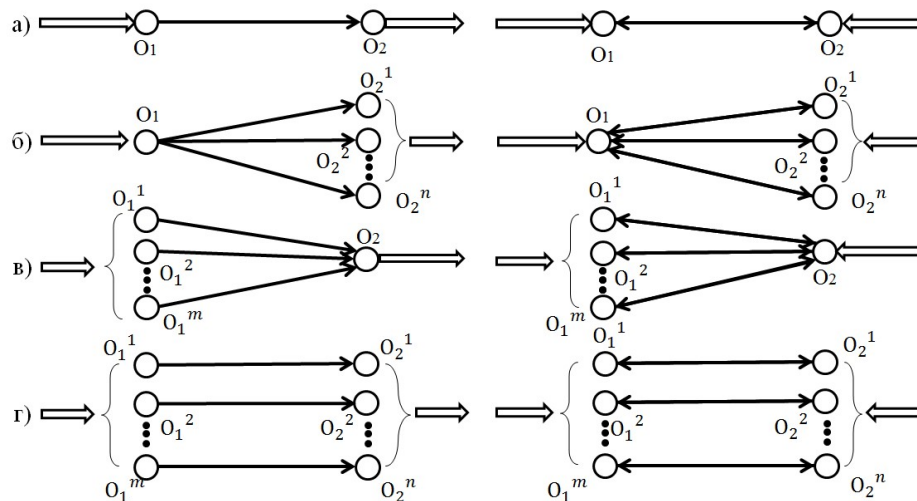


Рисунок 12.13 – Варіанти переносу інформації і взаємодії матеріальних точок згідно систематиці по Флінну: а – один вхід, один вихід; б – один вхід, кілька виходів; в – кілька входів, один вихід; г – кілька входів, кілька виходів

Згідно з рис. 12.13,б при головному обертовому русі з частотою $\omega(x_1, y_1, z_1)$ матеріальна точка O_1 може бути описана з урахуванням поступального руху подачі $S(x_1, y_1, z_1)$ і радіусу координати $R(x_1, y_1, z_1)$ – множина (12.1). Аналогічно може бути описана матеріальна точка O_2 – множина (12.2).

$$O_1 \left\{ \begin{array}{l} \omega_{x_1}, S_{x_1}, R_{x_1} \\ \omega_{y_1}, S_{y_1}, R_{y_1} \\ \omega_{z_1}, S_{z_1}, R_{z_1} \end{array} \right\} \quad (12.1)$$

$$O_2 \left\{ \begin{array}{l} \omega_{x_2}, S_{x_2}, R_{x_2} \\ \omega_{y_2}, S_{y_2}, R_{y_2} \\ \omega_{z_2}, S_{z_2}, R_{z_2} \end{array} \right\}; \quad (12.2)$$

Взаємодія цих точок O_1 і O_2 (рис.12.14,а) може бути представлена у вигляді згорнутої морфологічної моделі на хромосомному рівні:

$$M_{\text{КС}} = \left| \left\{ \begin{array}{l} \omega_{x_1}, S_{x_1}, R_{x_1} \\ \omega_{y_1}, S_{y_1}, R_{y_1} \\ \omega_{z_1}, S_{z_1}, R_{z_1} \end{array} \right\} \right| \wedge \left| \left\{ \begin{array}{l} \omega_{x_2}, S_{x_2}, R_{x_2} \\ \omega_{y_2}, S_{y_2}, R_{y_2} \\ \omega_{z_2}, S_{z_2}, R_{z_2} \end{array} \right\} \right| \quad (12.3)$$

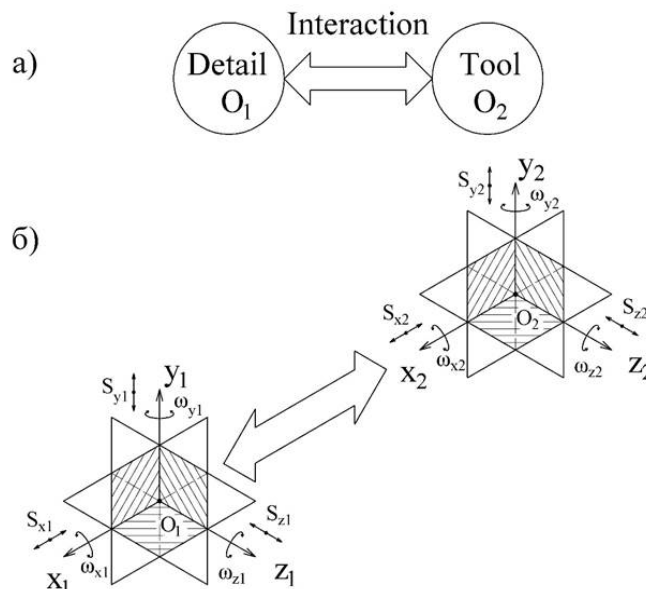


Рисунок 12.14 – Узагальнена модель взаємодії деталі і інструменту (а) та запропонована просторова кінематична схема різання у вигляді взаємодії двох матеріальних точок O_1 і O_2 в декартових системах координат (б)

Таблиця 12.2 – Узагальнена класифікація принципів затиску осесиметричних затискних механізмів, що обертаються

Від джерела енергії		Вид сили (моменту)	Напрямок	Вихід до об'єкта затиску					
				Осьова сила F_{a2}		Радіальна сила F_{r2}		Тангенціальна сила F_{t2}	
Вхід від джерела енергії	Вхідна сила F_1	Осьова сила F_{a1}		$F_{a1}-F_{a2}$	$F_{a1}-F_{a2}$	$F_{a1}-F_{r2}$	$F_{a1}-F_{r2}$	$F_{a1}-F_{t2}$	$F_{a1}-F_{t2}$
				$F_{a1}-F_{a2}$	$F_{a1}-F_{a2}$	$F_{a1}-F_{r2}$	$F_{a1}-F_{r2}$	$F_{a1}-F_{t2}$	$F_{a1}-F_{t2}$
		Радіальна сила F_{r1}		$F_{r1}-F_{a2}$	$F_{r1}-F_{a2}$	$F_{r1}-F_{r2}$	$F_{r1}-F_{r2}$	$F_{r1}-F_{t2}$	$F_{r1}-F_{t2}$
				$F_{r1}-F_{a2}$	$F_{r1}-F_{a2}$	$F_{r1}-F_{r2}$	$F_{r1}-F_{r2}$	$F_{r1}-F_{t2}$	$F_{r1}-F_{t2}$
		Тангенціальна сила F_{t1}		$F_{t1}-F_{a2}$	$F_{t1}-F_{a2}$	$F_{t1}-F_{r2}$	$F_{t1}-F_{r2}$	$F_{t1}-F_{t2}$	$F_{t1}-F_{t2}$
				$F_{t1}-F_{a2}$	$F_{t1}-F_{a2}$	$F_{t1}-F_{r2}$	$F_{t1}-F_{r2}$	$F_{t1}-F_{t2}$	$F_{t1}-F_{t2}$
	Вхідний момент M_1	Навколо осі обертання M_{a1}		$M_{a1}-F_{a2}$	$M_{a1}-F_{a2}$	$M_{a1}-F_{r2}$	$M_{a1}-F_{r2}$	$M_{a1}-F_{t2}$	$M_{a1}-F_{t2}$
				$M_{a1}-F_{a2}$	$M_{a1}-F_{a2}$	$M_{a1}-F_{r2}$	$M_{a1}-F_{r2}$	$M_{a1}-F_{t2}$	$M_{a1}-F_{t2}$
		Навколо радіуса M_{r1}		$M_{r1}-F_{a2}$	$M_{r1}-F_{a2}$	$M_{r1}-F_{r2}$	$M_{r1}-F_{r2}$	$M_{r1}-F_{t2}$	$M_{r1}-F_{t2}$
				$M_{r1}-F_{a2}$	$M_{r1}-F_{a2}$	$M_{r1}-F_{r2}$	$M_{r1}-F_{r2}$	$M_{r1}-F_{t2}$	$M_{r1}-F_{t2}$
		В площині осі обертання M_{t1}		$M_{t1}-F_{a2}$	$M_{t1}-F_{a2}$	$M_{t1}-F_{r2}$	$M_{t1}-F_{r2}$	$M_{t1}-F_{t2}$	$M_{t1}-F_{t2}$
				$M_{t1}-F_{a2}$	$M_{t1}-F_{a2}$	$M_{t1}-F_{r2}$	$M_{t1}-F_{r2}$	$M_{t1}-F_{t2}$	$M_{t1}-F_{t2}$
Принцип затиску				Торцевий		Радіальний		Тангенціальний	

За умови відсутності обертального або поступального руху і розташування точок на геометричній осі верстата як альтернатива реалізації ознаки в морфологічній моделі використовується значення 0 (нуль). З застосуванням генетико-морфологічного підходу з морфологічної моделі (12.3) на рис.12.15 представлена кінематична схема різання з цифровим кодом 401, за Грановським Г.І., котра для конкретних схем обробки записується у вигляді варіантів генетичного коду на хромосомному рівні:

$(\omega_{x1}, 0, 0) - (0, S_{x2}, 0)$ - осьове свердління обертаючої деталі (точка O_1) необертальним поступально рухаючим інструментом-свердлом (точка O_2);

$(0, 0, 0) - (\omega_{x2}, S_{x2}, 0)$ - осьове свердління не обертальної деталі (точка O_1) і поступально рухаючим співвісним інструментом (точка O_2);

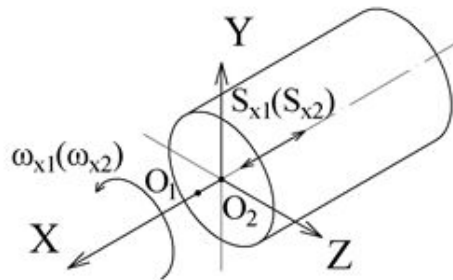


Рисунок 12.15 – Кінематична схема різання, що описується різними варіантами генетичного коду на хромосомному рівні $(0, S_{x1}, 0) - (\omega_{x2}, 0, 0)$ – осьове свердління поступально рухаючої деталі (точка O_1) обертальним співвісним інструментом (точка O_2);

$(\omega_{x1}, S_{x1}, 0) - (0, 0, 0)$ – осьове свердління обертальної і поступально рухаючої деталі (точка O_1) при нерухомому інструменті (точка O_2).

12.3. Універсальні генетичні оператори синтезу

Пошук нових затискних механізмів (ЗМ) та їх елементів як ТС різної складності структури в задачах генетичного синтезу здійснюється за допомогою універсальних генетичних операторів, які відтворюють відповідні механізми розмноження і генетичної мінливості, властиві біологічним системам. Аналіз хромосомних наборів відомих класів ЗМ, затискних патронів (ЗП) і приводів затиску (ПрЗ) свідчить про те, що в задачах генетичного синтезу структур використовується п'ять універсальних генетичних операторів синтезу: реплікації, схрещування, кросинговеру, інверсії і мутації.

Комбінаторні варіанти перших чотирьох генетичних операторів разом з операторами геометричних перетворень визначають потенційно можливі просторові комбінації (хромосомні набори) і варіанти різних мутацій силових (енергетичних) потоків і середовищ (твердих, текучих, сипучих) у структурах ЗМ, тобто встановлюють діапазон їх генетичної мінливості в межах конкретного виду системи ЗМ. Розглянемо це детально на прикладах, де носієм інформації про поступальні й обертальні переміщення і навантаження з указівкою напрямку прийнята матеріальна точка – умовний механічний ген.

Оператор реплікації моделює процедуру розмноження вихідної структури зі збереженням відповідної сукупності її генетичних ознак - просторової форми перетворювача силового потоку (ПСП). На хромосомному рівні при здійсненні процедури реплікації роль вихідної структури виконують хромосоми - реплікатори (розрізи, надрізи, канавки, пази, що створюють затискні елементи тощо), які ділять простір ПСП на окремі затискні елементи - просторові композиції хромосом-спадкоємців. Прикладом створення з використанням оператора реплікації затискних цанг з кінчною просторовою формою перетворювача WD є радіальні розрізи кінчного простору уздовж осі обертання (рис. 12.16). Простір перетворювача WD (рис.12.16,а) поділяється у повздовжньому напрямку на клинові елементи (рис.12.16,б), в тангенціальному напрямку - на сегментні елементи (рис.12.16,г), у поперечному напрямку - на секторні елементи (рис.12,в), навколо осі обертання - на надрізи (рис.12.16,д). Генетичний оператор реплікації був використаний при синтезі цангових затискних патронів диференційно-морфологічним методом, де на стадії пошуку структур і схем застосовувався евристичний прийом повного і неповного розчленування. Генетичні механізми реплікації зумовлюють виникнення структурного поліморфізму - одного з найбільш продуктивних (ефективних) чинників генетичної мінливості, який передбачає існування двох і більше форм об'єкта відповідно із заданою групою ознак.

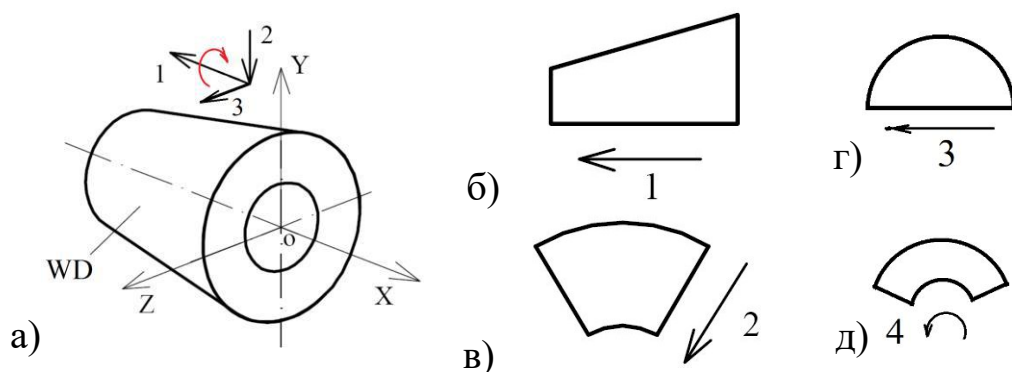


Рисунок 12.16 – Створення традиційних і нетрадиційних затискних цанг з застосуванням генетичного оператора реплікації: а) кінчний ПСП; б) площина розрізу $Y0X$; в) площина розрізу $Y0Z$; г) площина розрізу, паралельна площині $X0Z$; д) поверхня розрізу навколо осі обертання X ; 1,2,3,4 - напрямки розрізу

Стосовно до заданої кількості елементів (множників реплікації $K_R = 1, 2, 3, \dots$) в результаті реплікації затискного елемента (ЗЕ) одним з методів його поперечного розчленування утворюються 2, 3 і більше контактних взаємодій ЗЕ в поздовжньому напрямку (вздовж осі обертання) з об'єктом затиску (ОЗ). Відносна орієнтація ЗЕ у просторовій структурі силового потоку ЗМ і силового контуру в ЗП конкретизується за допомогою відповідних симетричних перетворень (паралельного переносу, повороту, зеркального відображення, зміщення та їх комбінацій).

Розглянемо на прикладі силовий потік з батьківською хромосомою $F_{a1} - F_{r2}$ і хромосомою-нащадком $F_{a1} - WD - F_{r2}$ (осьова сила F_{a1} на вході від ПрЗ – конічний перетворювач WD – радіальна сила затиску F_{r2} на виході), що створює набір першого покоління цангових ЗП подвійного затиску (рис.12.17), що приводить до підвищення жорсткості системи ЗП – ОЗ. В поперечному напрямку для того ж первинного силового потоку з батьківською хромосомою $F_{a1} - F_{r2}$ (рис. 12.18,а) збільшення множника K_{R2} приводить до підвищення піддатливості ЗЕ і розширенню можливостей затиску за широкодіапазонністю (рис. 12.18, б).

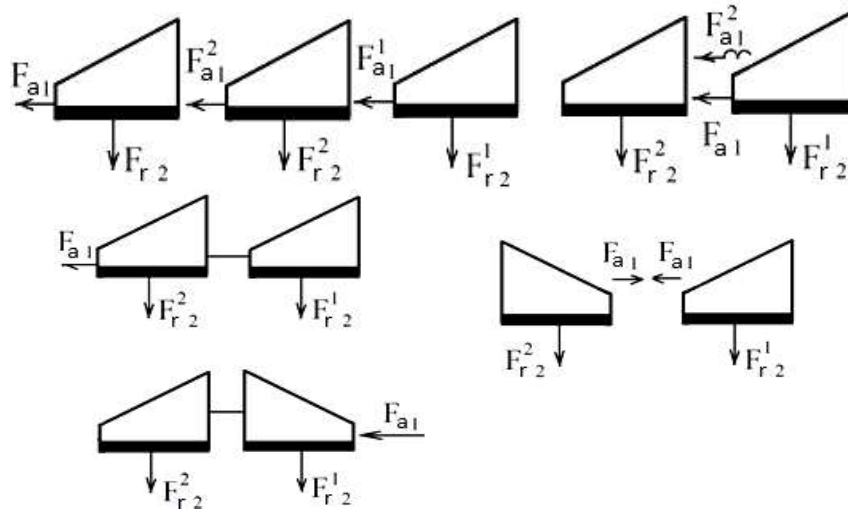


Рисунок 12.17 – Фрагмент хромосомного набору першого покоління цангових ЗП подвійного затиску, створеного за результатами реплікації в поздовжньому напрямку ($K_R = 2$) з первинним силовим потоком $F_{a1} - F_{r2}$

Оператор схрещування, як найбільш поширений і ефективний, моделює механізми структуроутворення затискних механізмів і, зокрема, цангових затискних

патронів зі змішаною генетичною інформацією. У методології структурного синтезу будемо розуміти гібрид, створений у результаті схрещування споріднених структур, що відрізняються генетичною інформацією. Роль вихідних структур при схрещуванні виконує будь-яка пара одного роду силових потоків, які відрізняються генетичною інформацією за однією (моногібридне схрещування), двома (дігібридне схрещування) або більшою кількістю (полігібридне схрещування) генетичних ознак.

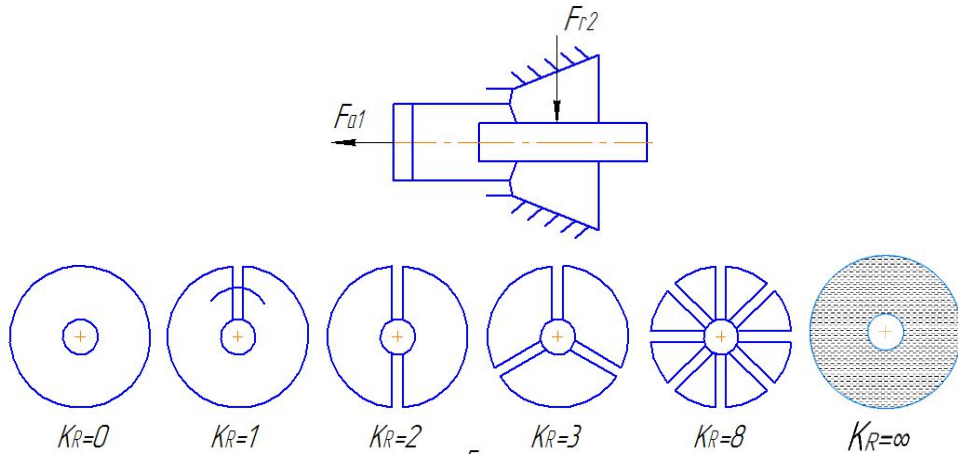


Рисунок 12.18 – Фрагмент хромосомного набору першого покоління, створеного за результатами реплікації у поперечному напрямку з різним множителем реплікацій K_R з первинним силовим потоком $F_{a1} - F_{r2}$

Наприклад, при створенні високоточних цангових патронів в осьовому напрямку (рис.12.19,а) використовується оператор схрещування просторових форм конічної G_K (рис.12.19,б) і циліндричної G_{\perp} (рис.12.19,в).

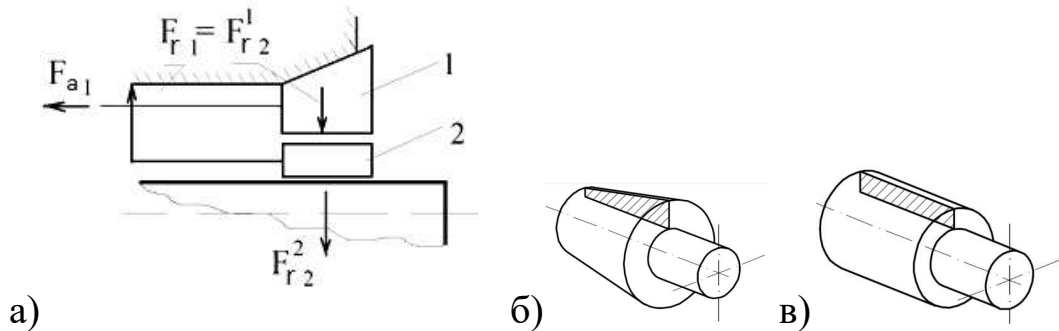


Рисунок 12.19 – Високоточний цанговий патрон (а) – результат схрещування силових потоків $F_{a1} - WD - F_{r2}^1$ (б) і $F_{r1} - SR - F_{r2}^2$ (в) : 1 – цанга тягнучого типу; 2 – нерухома циліндрична цанга

Процедура схрещування застосовується як на рівні синтезу батьківських хромосом (рис.12.20,а), так і хромосом-нащадків (рис.12.20,б).

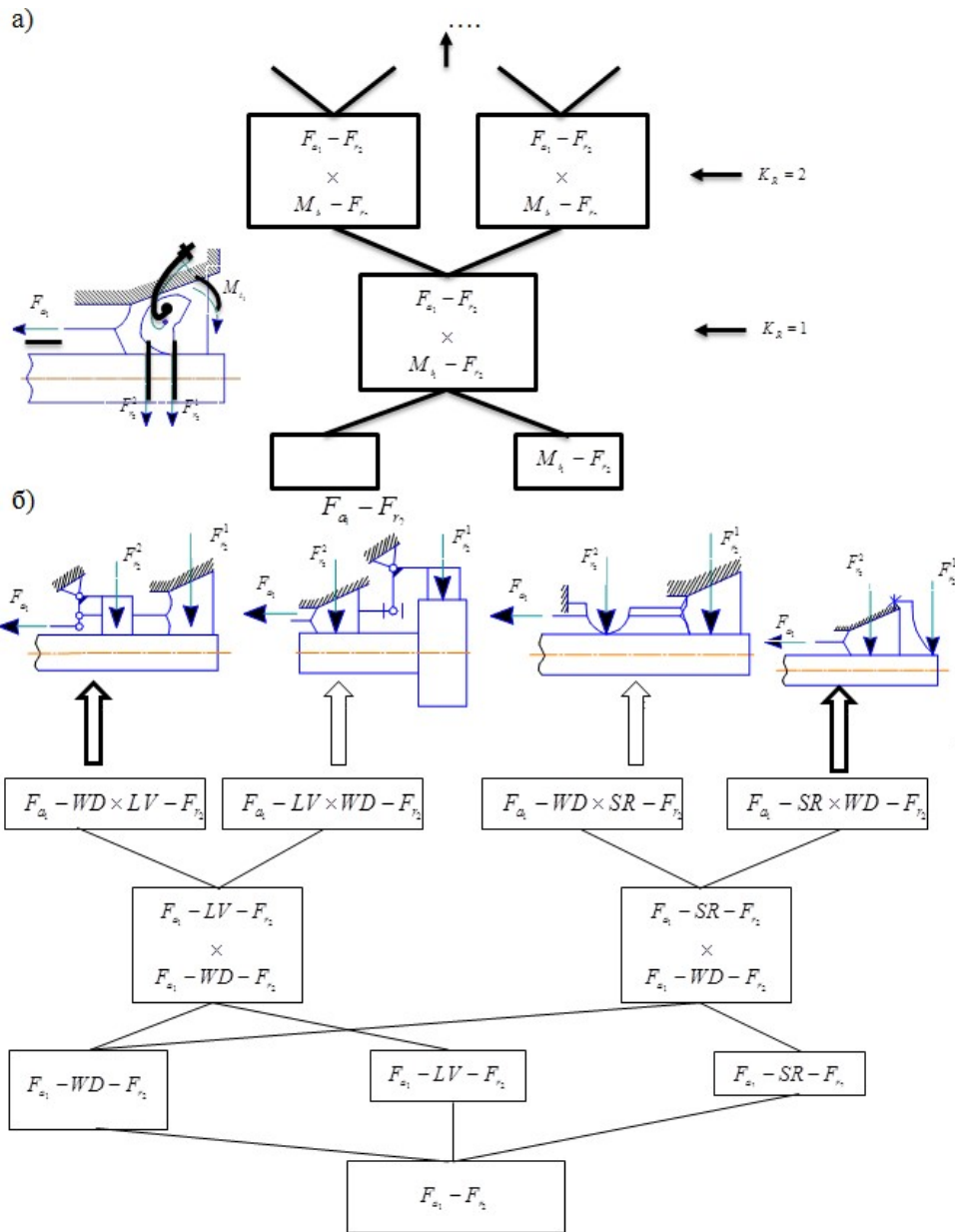


Рисунок 12.20 – Варіанти використання оператора схрещування на рівні синтезу затискних патронів з двох батьківських хромосом (а) і трьох хромосом-нащадків однієї батьківської хромосоми (б)

Оператор інверсії відтворює один з поширених механізмів генетичних мутацій в цангових ЗП. Під інверсією будемо розуміти розміщення пари елементів у просторі в зворотному (дзеркальному) порядку, наприклад, цанга тягнучого типу (генетичний код $F_{a1} - F_{r2}$), застосовується у багатошпindelних токарних автоматах (рис.12.21,а), а

натискного типу (генетичний код $F_{a1} - F_{r2}$) – в одношпindelних токарних автоматах (рис.12.21,б). Другий приклад - цангові патрони подвійного затиску, де в одному виконанні дві цанги тягнучого типу (рис.12.22,а), а в іншому - одна цанга тягнучого типу, а друга натискного типу (рис.12.22,б).

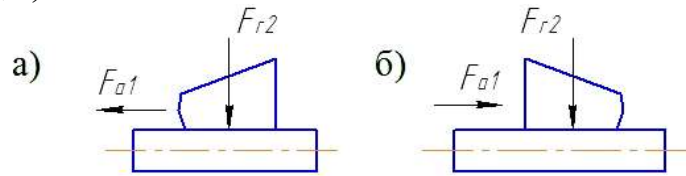


Рисунок 12.21 – Цанги патрони тягнучої (а) і натискної (б) дії

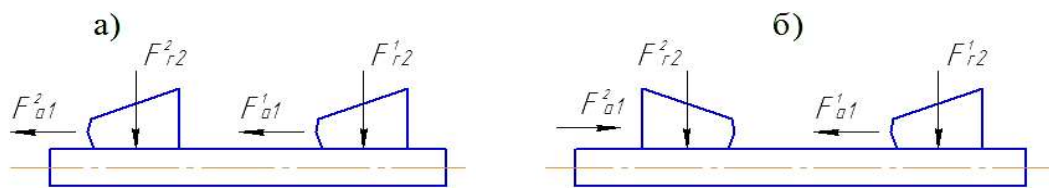
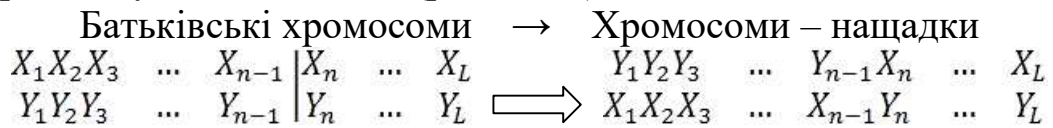


Рисунок 12.22 – Цанги в затискному патроні подвійного затиску: а) тягнучі; б) тягнуча і натискна

Оператор кросинговер моделює обмін (перетин) окремих елементів на хромосомному й об'єктному рівнях розвитку ЗМ за схемою (рис.12.23).



Прикладом застосування оператора кросинговеру може служити синтез структур і схем цангових ЗП з перехресним з'єднанням ЗЕ (рис.12.23,б) по а. с. СРСР № 1366310 та №1509190.

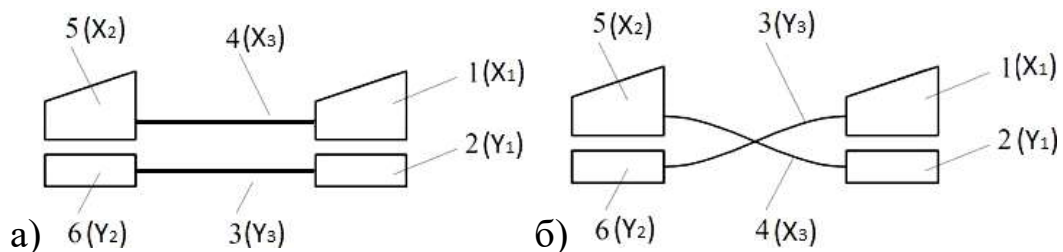
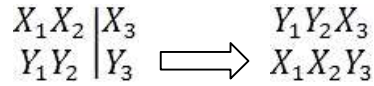


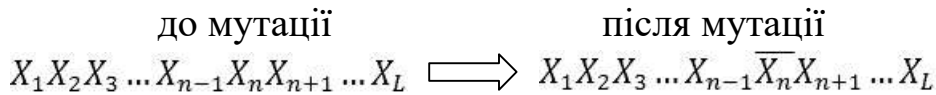
Рисунок 12.23 – Цанговий ЗП подвійного затиску відомий (а) і синтезований з перехресними пелюстками(б): 1 – основний ЗЕ; 2,6 – проміжні ЗЕ; 3 – пелюстки, з'єднуючі основний 1 і проміжний 6 ЗЕ; 4 – пелюстки, з'єднуючі проміжний 2 і додатковий 5 ЗЕ

Нехай є дві подвійні цанги з хромосомами (рис.12.23,а)
 $X = \{X_1 X_2 X_3\}$ і $Y = \{Y_1 Y_2 Y_3\}$

У цьому разі випадково визначається точка в середині хромосом, у яких обидві хромосоми поділяються на дві частини й обмінюються ними за схемою:



Оператор мутації можна розглядати як моделювання зміни в структурі ЗМ, які не враховуються генетичними операторами реплікації, схрещування і кросинговеру. В результаті мутації можуть з'явитися зовсім неочікувані структури. Цей оператор потрібен для природнього відбору і розмноження (розповсюдження) випадково вибраного поєднання у хромосомі за схемою:



Застосування генетичних операторів дозволяє простежити еволюцію розвитку будь-якої технічної системи і синтезувати нові, принципово несподівані технічні рішення на рівні винаходів і навіть відкриттів. На рис. 12.24 наведено приклад просторової мутації затискної цанги.

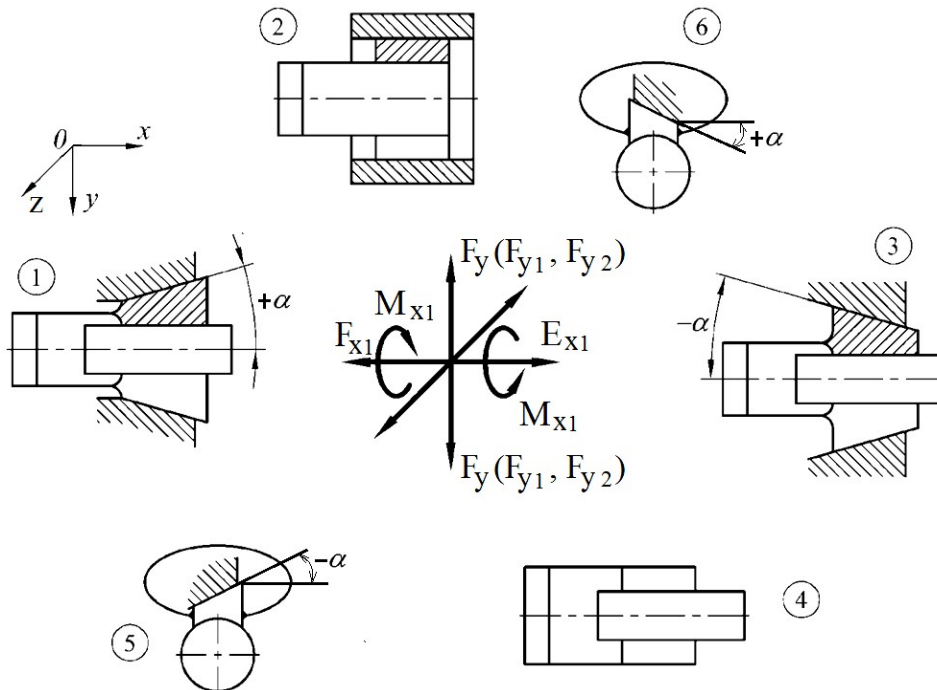


Рисунок 12.24 – Приклад просторової мутації цанги з одинарним затиском

12.4. Людське мислення і штучний інтелект на прикладі синтезу затискних цангових патронів

Процес творчого мислення Людини, як психічний процес відображення об'єктивної реальності (вищий ступінь людського пізнання), пов'язаний з великою кількістю перешкод, оскільки проблема мислення не може мати однозначного тлумачення і охоплює широкий діапазон дій лівої і правої півкуль людського мозку від альтернативно-логічного до інтуїтивно-практичного мислення в їх взаємодії або схрещуванні, що умовно можна віднести до гібридного мислення (рис.12.25).

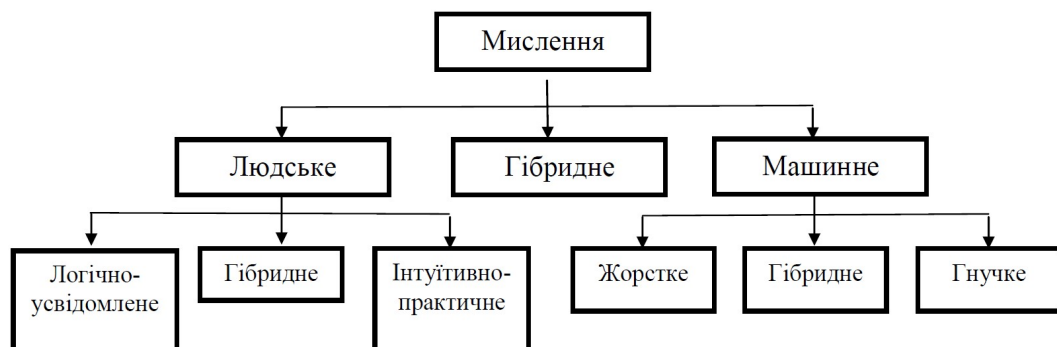


Рисунок 12.25 – Варіанти мислення у процесі науково-технічної діяльності

Стосовно затискних механізмів (ЗМ) з компактними затискними цанговими патронами (ЦП), творче мислення було спрямовано на пошук технічних рішень при створенні в кінці ХІХ століття перших одношпindelних і багатошпindelних токарних автоматів. Коло питань, що стосуються штучного інтелекту (машинного мислення, рис.12.25), безмежно широке. Тому у пропонованому посібнику воно має дискусійний характер і буде йтися про обмежену сферу творчої діяльності, яка пов'язана із затискними патронами і, зокрема, ЦП, що набули широкого застосування в токарних автоматах для затиску прутків, труб і штучних заготовок. Крім того, цанги і ЦП використовуються не тільки в різних верстатах, технологічному обладнанні і верстатно-інструментальному оснащенні, але й в побуті, медицині тощо. Багаторічний досвід автора і міждисциплінарний підхід з використанням теорії еволюції, досягнень в механіці, генетиці, кібернетиці, креатології, соціоніці і методології творчості, де поряд з асоціативними й алгоритмічними методами пошуку рішень

велику долю займає системно-морфологічний підхід, дозволив за короткий термін наблизитися до реального осмислення роботи головного мозку і, зокрема, дії його правої півкулі, відштовхуючись від ідей, які, на перший погляд, здаються химерними, а згодом отримують матеріальну реалізацію і широке впровадження в народному господарстві.

У поступовому наближенні до штучного інтелекту, як комп'ютерної системи з діями, які виконує Людина (розпізнавати і розуміти, знаходити спосіб досягнення результату та приймати рішення, вчитися) автором простежені етапи еволюційного розвитку й обґрунтовані принципи творчого мислення на прикладі пошуку затискних патронів (ЗП), як процесу творчого аналізу і синтезу з наступною реалізацією пошуку нових технічних рішень в системах штучного інтелекту. Починаючи з сьомої декади ХХ століття, коли був запропонований спеціалізований метод пошуку нових технічних рішень, названий диференціально-морфологічним методом синтезу, прослідковані етапи еволюції творчого мислення з нарощуванням елементів штучного інтелекту.

Наступним кроком до творчого мислення став новий погляд у механіці на матеріальну точку як носія генетичної інформації. Це дало можливість створити узагальнену класифікацію (породжувальну систему) різних принципів дії при затиску, виконувати цілеспрямований синтез і передбачити появу невідомих до цього часу ЗМ і ЗП при використанні 5-ти універсальних генетичних операторів синтезу: реплікації, інверсії, схрещування, кросинговера, мутації. Саме завдяки мутації еволюційно здійснений відбір для подальшого розповсюдження (рис.12.26) третього типу затискних ЦП з попередньо створених.

Одним з шляхів творчого мислення була спроба структурно-схемного синтезу і передбачення нових ЗМ з використанням морфологічного підходу і комбінаторних алгоритмів, які представляють комбінаторні обчислювання з набору спеціальних методів і прийомів, наприклад, двійкову систему наявності або відсутності елементів в системі ЗМ, що удосконалюється або спрощується (1–є, 0–немає). Починаючи з перших механізованих осесиметричних ЗМ, які широко використовуються у токарних, свердлильних,

фрезерних, шліфувальних і багатоцільових верстатах, присутні наступні елементи системи: джерело енергії (ДЕ), перетворювачі енергії (ПЕ), привод затиску (ПЗ), затискний патрон (ЗП), об'єкт затиску (ОЗ). Останній може бути штучною, прутковою, трубною чи іншою заготовкою для виготовленої деталі, наприклад, в токарних верстатах, або інструментом (свердлом, фрезою, шліфувальним кругом, тощо). У будь-якій системі ЗМ обов'язково повинні бути вхід (джерело енергії-вага 1) і вихід (об'єкт затиску-вага 1). Всі інші елементи в послідовному ланцюгу без врахування системи керування (ПЕ, ПЗ, ЗП) в принципі згідно з комбінаторикою можуть бути і не бути, коли йдеться про спрощення і скорочення ланцюгу.

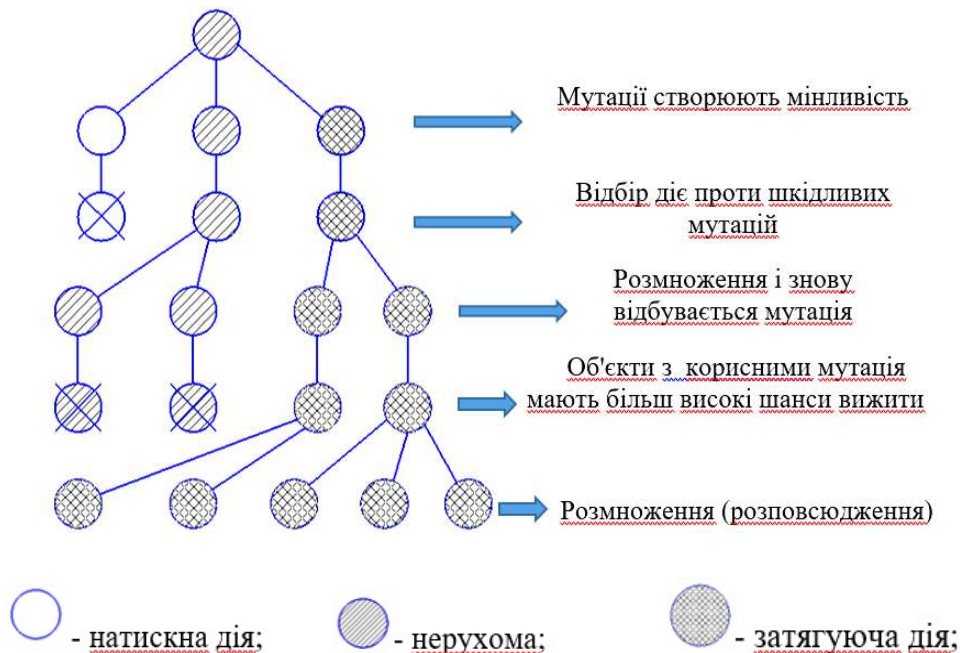


Рисунок 12.26 – Природний відбір затискних ЦП одинарного затиску для токарних автоматів внаслідок мутації з позначеннями

Згідно з теорією еволюційного і генетичного синтезу, виникає можливість 100% прогнозування і спрямованого синтезу нових ЗМ з використанням породжувальних систем з заданою цільовою функцією, що вимагає складних математичних перетворень з побудовою моделей мікро і макроеволюцій, а також написанням громіздких структурних генетичних формул. Тому був запропонований спрощений системно-морфологічний підхід (рис.12.27) з побудовою цифрової матриці з поступовим вилученням елементів системи при двійковому кодуванні.



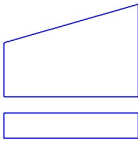

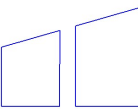

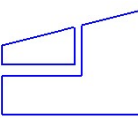

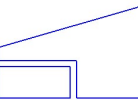

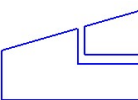

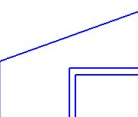

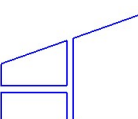
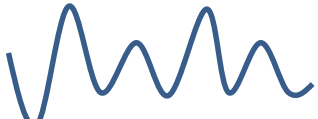
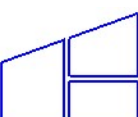

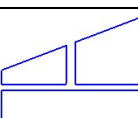
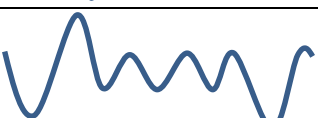
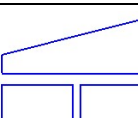
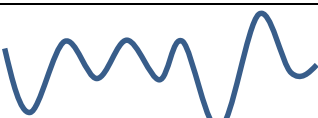
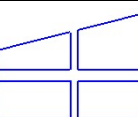

№	Структура	Геометричний символ	Двійковий код	Частотний імпульс
1		●	0 0 0 0 0	
2		—	1 0 0 0 1	
3		┆	0 1 0 1 0	
4		└	1 1 0 0 0	
5		┐	1 0 0 1 0	
6		└	0 1 0 0 1	
7		┐	0 0 0 1 1	
8		┆	1 1 0 1 0	
9		┐	0 1 0 1 1	
10		└	1 1 0 0 1	
11		┐	1 0 0 1 1	
12		+	1 1 0 1 1	

Рисунок 12.27 – Двійкові коди і хвильові частотні імпульси для повних розчленувань клинового ЗЕ в площині ХУ дії сили від приводу затиску

В еволюційному розвитку системи ЗМ можна передбачити від минулого через сучасне до майбутнього при переборі всіх варіантів лише 7 комбінаторних сполучень з такими кодами: ЗМ1-11111, ЗМ2-10111, ЗМ3-11011, ЗМ4-11101, ЗМ5-10011, ЗМ6-11001, ЗМ7-10001. До цього часу у виробництві переважно використовуються системи ЗМ1-ЗМ3, частково ЗМ4. Кожний код (рис.12.27) дає поштовх для пошуку різних варіантів його реалізації. Розширення і подальше удосконалення генетико-морфологічного підходу, запропонованого в роботах зумовлене вимогами сучасного інструментального виробництва і потребами розширення технологічних можливостей верстатного обладнання, побудованого на модульному принципі. Тому породжувальна система ЗМ була розширена за рахунок введення на виході тангенціальних сил затиску, що породжують ще 24 варіанти нових принципів. У результаті загальна кількість принципів затиску буде складати 72 варіанти.

Наступним кроком до штучного інтелекту при пошуку нових технічних рішень є використання хвильового і цифрового уявлення у вигляді частотних імпульсів і двійкового коду, що представлено на рис.12.27.

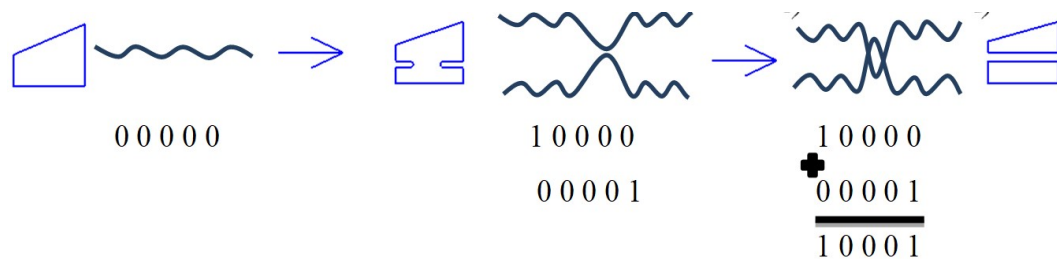


Рисунок 12.28 – Трансформація технічних рішень за допомогою хвильового уявлення через частотні імпульси і двійкового коду в площині ХУ

Процес мислення Людини-генератора ідей можна уявити, як комбінацію сполучень хвиль частотних імпульсів з сплесками подолання психологічного бар'єру і отримання відгуків у пам'яті і персональному комп'ютері у вигляді частотних імпульсів з однаковими параметрами, в рамках яких можливо виникнення резонансних явищ, що підсилюють імпульс (рис.12.28, 12.29).

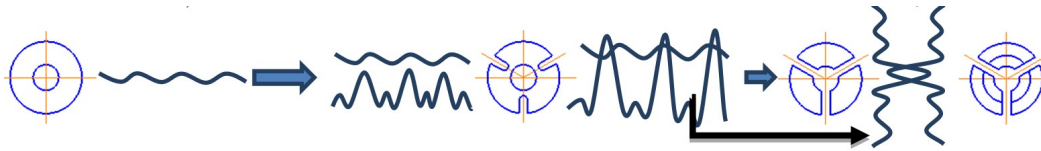


Рисунок 12.29 – Трансформація технічних рішень за допомогою хвильового уявлення через частотні імпульси і їх підсилення в площині YZ

Висновок: Аналіз етапів еволюції творчого мислення з переходом до машинного, запропоновані ідеї і підходи дозволяють стверджувати про реальність використання спрощених систем штучного інтелекту з високим рівнем креативності і подальшим їх удосконаленням. Тому роботи в цьому напрямку необхідно продовжити, взявши на озброєння гасло: «Основним творцем є Природа, а Людина-одне з неперевершених її творинь і творець за своєю подібністю».

12.5. Використання генетико-морфологічного підходу при створенні приводів затиску для шпиндельних вузлів верстатів

Приводи затиску (ПрЗ) належать до динамічних перетворювачів енергії. Відповідно до генетико-морфологічного підходу, до опису ТС структуру ПрЗ можна подати у вигляді силового потоку. Ці структури є тривимірними об'єктами з явно вираженою геометричною інформацією, що пов'язано з багатоваріантністю можливих просторових компонувань і різноманітністю форм активних частин передавального-підсилювальних ланок. Крім того, така структура відтворює просторову геометрію і топологію взаємопов'язаних силових контурів і силових потоків. Тому в найбільш загальному вигляді можна зазначити, що всі явища пов'язані з перетворенням та передачею зусиль в ПрЗ мають відповідні геометричні прообрази (геометричні моделі).

Відповідно до генетико-морфологічного підходу, для опису ПрЗ на хромосомному рівні необхідно використовувати елементарний силовий потік, враховуючи що: 1. Силових (енергетичних) потоків може бути кілька за входами і виходами. 2. Вхідні та вихідні силові потоки можуть бути однаковими та різними і складатися з обмеженої кількості їх видів та обмеженого набору варіантів

просторового розташування (координатних рухів). 3. Силкові потоки можуть бути з зовнішнім джерелом енергії переважно і внутрішнім джерелом рідше (використання відцентрових сил, магнітного поля, сил пружності, тощо). 4. З'єднання окремих силових потоків може бути послідовним, паралельним, паралельно-послідовним. 5. Між входом і виходом силового потоку ПрЗ є різні перетворювачі, але їх кількість обмежена (наприклад, до механічних перетворювачів відносяться важільні, клинові, плунжерні, спіральні, зубчасті, гвинтові, пружні). 6. Можлива комбінація перетворювачів в силових потоках ПрЗ і ЗП, а можливий один перетворювач для ЗМ, коли функції ПрЗ виконує сам ЗП. 7. Передача та перетворення (трансформація) силових потоків може відбуватися у різних середовищах (твердих, плинних, сипучих, рідинних, повітряних, електромагнітних, магнітострикційних, біологічних та інших поки нам невідомих).

Основними критеріями, що визначають структурну організацію ПрЗ в його виконавчій частині, є характеристики перетворювачів енергії, що змінюють характеристики вхідного силового потоку (зусилля) відповідно до певних законів, чим забезпечують появу та підтримку напруженого стану (силового поля) ЗМ за заданим законом функціонування механізму. Отже, концептуально ПрЗ є проміжним перетворювачем силових потоків (енергії у формі силового потоку) між джерелом і перетворювачем енергії ПЕ і ЗП (рис. 12.30, *a*). Умовно кажучи, якщо абстрактно уявити ЗМ, якого ще не існує, але який треба створити, то модель силових (енергетичних) потоків буде складатися з двох елементарних потоків: один в ПрЗ $F_0(M_0) - F_1(M_1)$, а другий в ЗП $F_1(M_1) - F_2$ без указівки координатного напрямку сил (моментів) на вході і виході. Тоді повний потік від джерела енергії E через перетворювачі ПЕ до об'єкта затиску (ОЗ) запишеться у вигляді генетичної формули ЗМ – взаємодії трьох матеріальних точок (генів O, O_1, O_2) (рис. 12.30, *b*)

$$F_0(M_0) - F_1(M_1) - F_2,$$

де на хромосомному рівні для ПрЗ генетичний код буде $F_0(M_0) - F_1(M_1)$, а для ЗП – $F_1(M_1) - F_2$.

Як для ЗП на об'єктному рівні елементарний силовий контур може бути замкнений відкритий, замкнений закритий, розімкнений і комбінований, так і в ПрЗ

елементарний силовий контур може бути із замиканням: силовим не пружним (відкритий контур, що завжди пов'язаний з джерелом і перетворювачем енергії); силовим пружним (за рахунок потенційної енергії пружного елемента, наприклад, пакету тарілчастих пружин); геометричним при відключенні від джерела енергії і натягом пружної системи механізм; фрикційним із самогальмуванням; комбінованим.

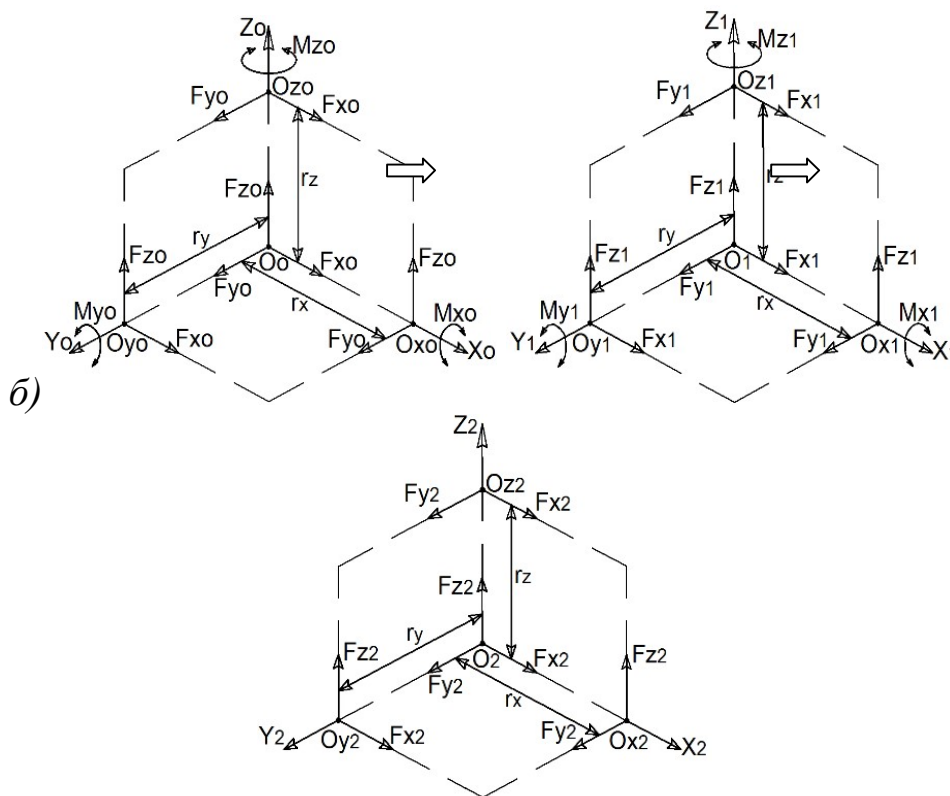
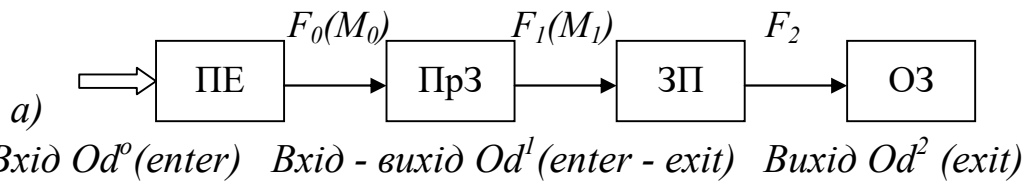


Рисунок 12.30 – Узагальнені структура (a) і модель силових (енергетичних) потоків (б) у затискному механізмі: Е – джерело енергії; ПЕ – перетворювач енергії; ПрЗ – привод затиск; ЗП – затискний патрон; ОЗ – об’єкт затиску

Силовий контур позначається цифрами 1, 0 зверху після запису генетичного коду у прямих дужках (табл. 12.3). За видом енергії силових потоків, що використовується ПрЗ можуть бути: механічні, електромагнітні, рухомих

середовищ (гідро-пневно) та їх комбінації, що визначає вид енергетичних потоків (взаємодія твердих тіл, електромагнітна взаємодія, тиск рухомих середовищ). Таким чином, в ЗМ і, зокрема в ПрЗ, можливе використання різних середовищ і полів у силових потоках з подальшими позначеннями: MSB (mechanical solid body) – механічні передачі і перетворювачі за допомогою твердих тіл; EMF (electromagnetic field) – електромагнітні поля, що діють безпосередньо або у складі (структурі) електромеханічних систем передачі і перетворення; LFM (liquid flowing medium) – рідинно-плинні та в'язкі середовища для передачі та перетворення (зміни параметрів потоку); AVM (air and vacuum medium) – газові (повітряні) середовища для передачі і перетворення, в тому числі вакуум; CMF (constant magnetic field) – магнітні поля притягання та відштовхування; TRF (thermal field) – теплові потоки, що спричиняють сили теплових деформацій речовини; CFF (centrifugal force) – відцентрові сили обертання незрівноважених мас (частин).

Таблиця 12.3 – Позначення силового контуру

<i>Затискний патрон (ЗП)</i>		<i>Привод затиску (ПрЗ)</i>	
<i>Вид контуру</i>	<i>Позначення</i>	<i>Вид замикання</i>	<i>Позначення</i>
замкнений закритий	[1]	геометричне	[1]
замкнений відкритий	1	фрикційне	1
розімкнений	0	силове непружне	0
комбінований: замкнено-розімкнений	[1],0 1,0	силове пружне	[0]
комбінований: розімкнено-замкнений	0,1 0,[1]	комбіноване: геометричне - силове непружне	[1],0 0,[1]
		комбіноване: геометричне-фрикційне	[1],1 1,[1]
		комбіноване: геометричне- силове пружне	[1],[0] [0],[1]
		комбіноване: фрикційне- силове пружне	1,[0] [0],1
		комбіноване: фрикційне- силове непружне	1,0 0,1

На цьому етапі розвитку ЗМ верстатів токарної групи найбільшого поширення набули ПрЗ механічного виконання. У виконавчій частині (ППМ) наявні ПрЗ механічного виконання мають геометричні праобрази, кількість видів яких є обмежена (рис. 12.31): важільні, клинові, плунжерні, спіральні, зубчасті, гвинтові, пружні.

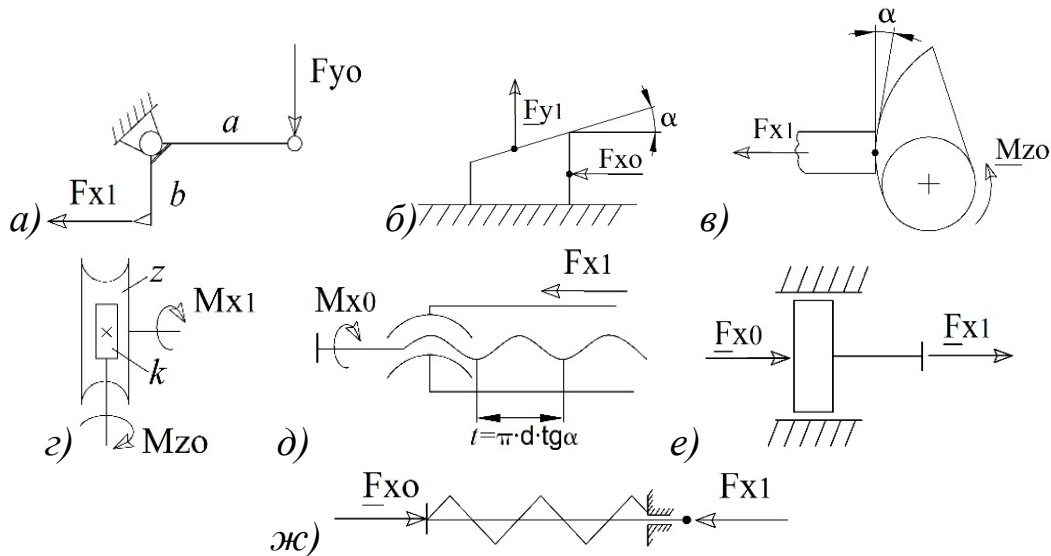


Рисунок 12.31 – Варіанти механічних перетворювачів енергії ПрЗ токарного автомата: а – важіль (LV); б – клин (WD); в – спіраль (SP); г – зубчата передача (GR); д – гвинт (SC); е – плунжер (PL); ж – пружина (SR)

Кількість перетворювачів силових потоків та їх видів (з серед перерахованих вище) може бути різною та комбінуватися. Відповідно у ПрЗ механічного виконання можуть існувати вхідні та вихідні силові потоки у вигляді сил та моментів сил. Очевидною є можливість існування ПрЗ, силові потоки яких розташовуються у тримірному просторі і мають інший набір координатних рухів. Для виявлення нових видів ПрЗ доцільно провести аналіз можливих варіантів просторового розташування та взаємної орієнтації вхідних та вихідних силових потоків.

Варіант технічної реалізації синтезованої структури електромеханічного ПрЗ представлено на рис. 12.32. ЗМ працює таким чином. Для затиску інструмента або заготовки з циліндричним хвостовиком (на рис. 12.32. не показано) включається електромагнітне реле 21, сердечник 20 втягується на величину H_1 , а через важіль 22 шестерня 24 переміщається на величину H_2 і входить у зачеплення

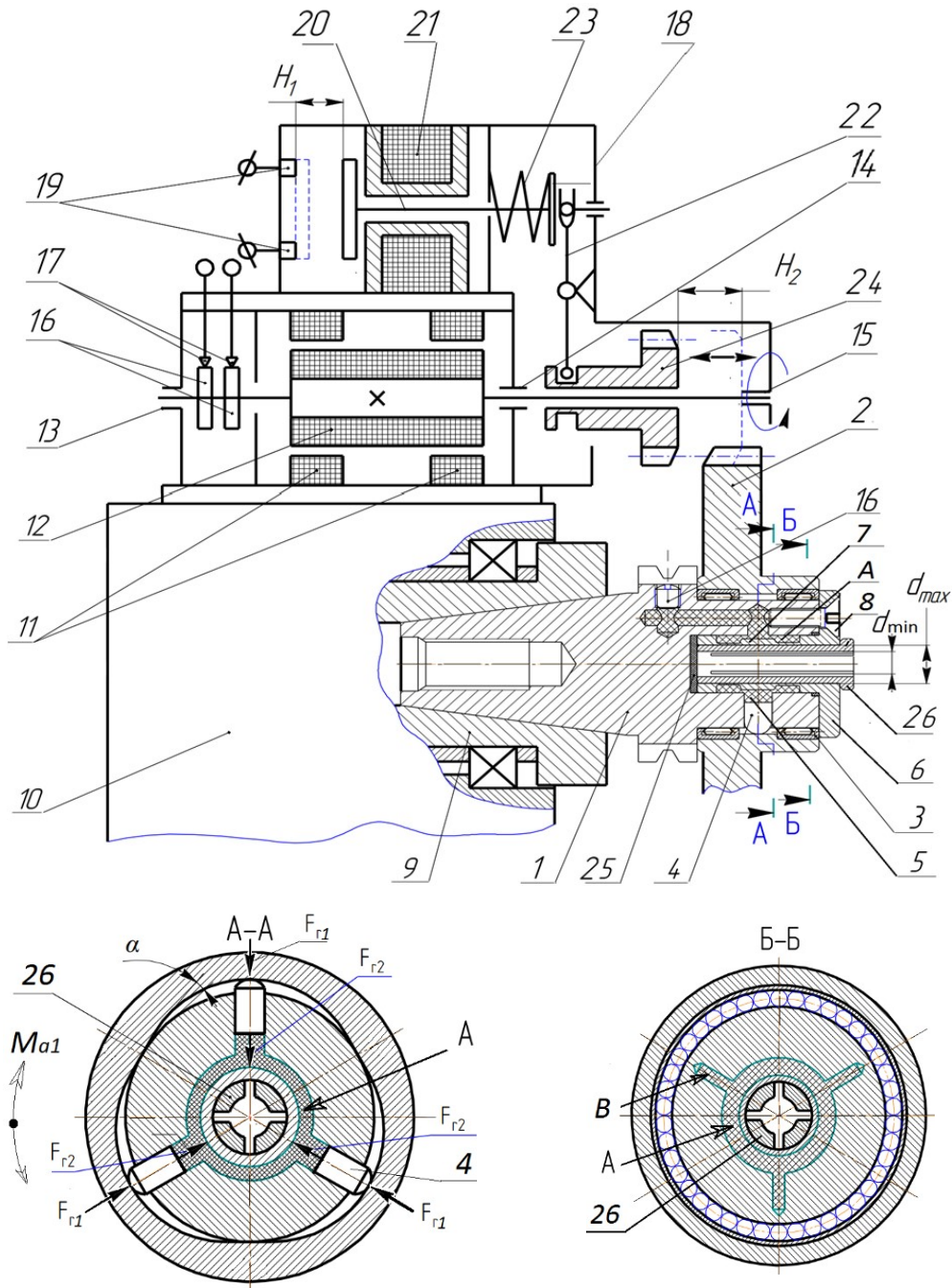


Рисунок 12.32 – Синтезований ЗМ з електромеханічним приводом

із зубчатим колесом 2. За рахунок з'єднання торця сердечника 20 з контактними болтами 19 електричний струм через штки 17 подається на колекторні пластини 16, ротор 12 повертається і передає через зубчасте зачеплення 24, 2 крутний момент M_{a1} на поворотну обойму колеса 2 з положення, зображеного на рис. 12.32, в той чи інший бік (за годинниковою стрілкою або проти) і за рахунок кута підйому

α плунжери 4 занурюються в напрямку осі патрона, створюючи тиск, який викликає радіальну силу затиску F_{r1} (рис. 12.32, переріз А-А), що стискає плинне середовище 5, наприклад, гідропластмасу.

У результаті відбувається радіальна пружна деформація оболонки 7 тонкостінної циліндричної втулки 6, яка стискає циліндричний хвостовик, наприклад, різального інструменту типу фрези з радіальною силою F_{r2} , тобто створюється силовий потік від входу до виходу $M_{a1} - F_{r1} - F_{r2}$. Розтиск виконується при зміні полюсів електричного струму на колекторні пластини 16 (ротор 12 повертається в протилежну сторону) згідно заданої програми в системі ЧПК верстата, а відключення електромеханічного приводу здійснюється при знятті струму в електромагнітному реле 21.

У ЗМ шпиндельного вузла (рис. 12.33) встановлено додаткові елементи, що забезпечують роз'єднання кінематичного зв'язку привода затиску з іншою частиною затискного механізму. Це дозволяє досягнути технічний результат – покращення динамічних характеристик ШВ та підвищення продуктивності і якості обробки.

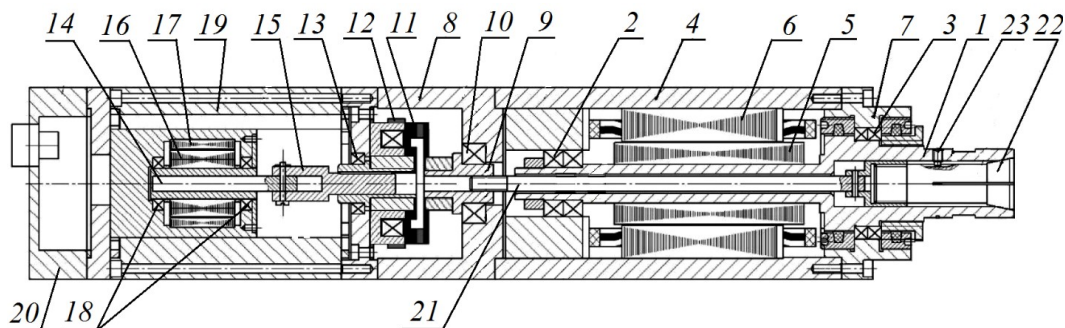


Рисунок 12.33 – Шпиндельний вузол верстата з електромеханічним затиском та можливістю роз'єднання кінематичного зв'язку в ПрЗ

ШВ містить привод головного руху, що складається з шпинделя 1 на опорах 2 і 3 у вигляді радіально-упорних шарикопідшипників, що встановлені в корпус 4. На шпинделі 1 розташований ротор 5 головного руху, а в корпусі 4 статор 6, між якими, при подачі електричного струму на обмотки статора 6, виникає електромагнітна взаємодія у вигляді крутного моменту. Передній кінець корпусу 4 закритий фланцем 7. Поза задньою опорою 2

шпинделя 1 розташовано модуль-фланець 8 з електромеханічною муфтою, в якому розміщена гайка-вал 9 півмуфти 10 на опорі 11 у вигляді радіально-упорного підшипника. Інша півмуфта 12 розташована на опорі 13, що також встановлена в корпусі 8 і має можливість силової взаємодії з валом 14 привода затиску з'єднувальну ланку 15. При цьому, вал 14 з розташованим на ньому ротором 16 розміщений на опорах 17 в додатковому корпусі 18, що виконаний у формі модуля з торцевим фланцевим кріпленням і кріпиться до модуль-фланця 8.

Інший торець додаткового корпуса 18 закритий кришкою 19 з розташованими на ній роз'ємами для підведення електричної енергії та сигналів керування. Статор 20, що разом з ротором 16 є додатковою електромеханічною системою, жорстко закріплений у додатковому корпусі 18, який жорстко з'єднаний з корпусом 4. Гайка-вал 9 по різьбі зв'язана з гвинтом 21, що базується в осьовому отворі шпинделя 1 та з'єднаний з цангою 22, яка утримується від повертання відносно шпинделя 1 гвинтом 23.

ШВ працює таким чином. При нерухомому шпинделі 1 і розтиснутій цанзі 22 в її отвір вводиться об'єкт затиску (на кресленні не показано). При подачі струму на обмотку статора 20 виникає електромагнітне поле, яке взаємодіє з обмотками ротора 16 і призводить до появи крутного моменту, що передається через вал 14, з'єднувальну ланку 15 і кінематично замкнуті півмуфти 12 та 10 до гайки-вала 9. Обертання гайки-вала 9 призводить до переміщення гвинта 21 вліво і затягування цанги 22, що забезпечує затиск об'єкта фіксації. Після завершення процесу затиску ланцюг кінематичного зв'язку вала 14 привода затиску з гайкою-валом 9 роз'єднується шляхом роз'єднання півмуфт 12 та 10. Внаслідок подачі струму на обмотки статора 6 виникає електромагнітне поле, що взаємодіє з обмотками ротора 5 і змушує шпиндель 1 обертатися з необхідною частотою. При цьому підтримка зусилля затиску відбувається за рахунок самогальмування в різьбовому з'єднанні гвинта 21 та вала-гайки 9. Керування шпиндельним вузлом з механізмом затиску здійснюється від системи числового програмного керування, а узгодження обертання шпинделя 1 і електромеханічної системи затиску відбувається за допомогою датчиків (не показані), встановлених на шпинделі

1 і гайці-валу 9. Зупинка шпинделя 1 здійснюється внаслідок припинення подачі струму до обмоток статора 6, а розтиск об'єкта затиску (не зображено) – при замиканні кінематичного зв'язку між півмуфтами 12 та 10 і зміні полюсів на обмотці статора 20, що змушує ротор 16 і гайку-вал 9 обертатися в зворотному напрямку та переміщає гвинт 21 і цангу 22 вправо. Таким чином відбувається розтиск. Саморозтиск затискної цанги 22 здійснюється за рахунок пружності її пелюсток.

Питання для самоконтролю знань

1. Що є геном в електромеханічних системах?
2. Які рівні структурної організації систем існують?
3. Які геометричні класи просторових форм існуючих джерел електромагнітного поля існують?
4. Що таке Породжувальна система?
5. Що може бути геном в механічних системах?
6. У чому суть систематики за Флінном?
7. У чому принцип осьового, радіального і тангенціального затиску?
8. Скільки і які універсальні генетичні оператори синтезу?
9. Які форми мислення існують?
10. Що таке штучний інтелект?

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Алгоритм оцінювання технічної системи	68; 69
Вепольний аналіз	187,201
Градiєнт	136
Декомпозиція систем	95;164
Безперервна модель системи	115-117
Допустима область керування	128-130
Динамічне програмування	130
Критерії технічних систем:	
- витрати матеріалу	55
- енергії	56
- габаритних розмірів	56
- безпеки	57
- ергономічності	57
- естетичний	58
- якості керування	67
- завадостійкості	68
- функціональні	45; 51
- технологічні	53
- екологічні	58
Критерій ефективності	67;68;129-131
Лінеаризація моделей	106; 107
Лінійне програмування	133; 134
Марковські:	
- процеси	62
- ланцюги	62; 64
Метод найменших квадратів	87
Методи активізації інженерної творчості:	
- системні	160;163
- асоціативні	180
- алгоритмічні	187
- комбіновані	160
- спеціалізовані	160
Методи планування експериментів:	
- активні	84
- пасивні	84
- метод останнього виміру змінних	84
- повний та дробовий факторні експерименти	88
Методи прогнозування:	
-статистичні	225
-експертні	228

Моделювання систем:	
- функціональне	74
- макетне	71
- експериментальне	72
- класифікація моделей	73; 74
- модель макрорівня	75
- моделі макрорівня	75
- моделі метарівня	75
- детерміновані моделі	76
- стохастичні моделі	76
- безперервні моделі	109
- дискретні моделі	112
Моделювання процесів поведінки системи	83
Моделювання процесів функціонування системи	76; 77
Модель системи перетворень	31
Морфологічний:	
- аналіз	165; 194
- таблиця	174
Надійність систем:	
- критерії	52; 53
- методики оцінки	61; 191
- фінальні ймовірності	64
Операнд	29; 30; 32; 41
Оптимальне проектування технічних систем	154
Прогнозування	161, 218-228
Протиріччя:	
- адміністративне	160
- технічне	161
- фізичне	161
Реккурентне співвідношення	114; 131
Властивості технічних систем:	
- алгоритм оцінки співвідношення	
- властивість	68; 69
- категорії властивостей	45
- класифікація властивостей	45; 47
- співвідношення властивостей	48
Система:	
- класифікація систем	14; 24
- визначення системи	10
- динамічна система	25
- статична система	25

-	технічна система	12;41
-	ознаки технічних систем	165
-	приклади технічних систем	12
-	ієрархія технічних систем	15
Зв'язок системи з навколишнім середовищем:		
-	вхідні змінні	18- 19;23; 19-84; 100-110
-	збурювальний вплив	23;
68		
-	вихідні змінні	18-23; 73; 80-85
-	керуючий вплив	100- 110
Система перетворень:		
-	модель системи	29; 31
-	приклади процесів	32
Системний підхід та його зміст		
126		
Технічний процес:		
-	класифікація	41; 42
-	показники процесу	38-40
-	приклади процесу	38
-	структура	37; 39
Змістовий опис роботи процесу		
95		
Формалізоване уявлення системи		
103		
Фреймова модель		
139; 140;160		
Частоти переривань при дискретному моделюванні систем		
112		
Етапи створення систем:		
-	технічне завдання	144
-	технічна пропозиція	144; 145
-	технічний проект	144; 145
-	робоча документація	143-145
-		

**ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ
ДЖЕРЕЛ**

1. Гордеев О.Ф. Методики моделювання при дослідженні та проектуванні верстатів I технологічних систем: навчальний посібник/ О.Ф. Гордеев, П.О. Захаров. – Луцьк: ЛДТУ, 2003. – 258 с.
2. Катренко А.В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: навчальний посібник / А.В. Катренко. – Львів: Новий світ, 2000. – 424 с.
3. Косіюк М.М. Основи науково-технічної творчості: навчальний посібник / М.М. Косіюк, Г.П. Черменський.– Хмельницький: Поділля. – 1998. – 451 с.
4. Косіюк М.М., Практикум з курсу "Основи науково-технічної творчості" / М.М. Косіюк, Г.П. Черменський. – Хмельницький: Поділля. – 1998. – 280 с.
5. Кузнецов Ю.М. Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю.М. Кузнецов, Р.А. Скляр; під ред. Ю.М. Кузнецова. – К.: ТОВ "ЗМОК" – ПП "Гнозіс", 2004. – 323 с.
6. Кузнецов Ю.М. Теорія технічних систем: навч. посібник / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк; під ред. Ю.М. Кузнецова. – К.: - Тернопіль, 1998. – 310 с.
7. Кузнецов Ю. М. Теорія розв'язання творчих задач / Ю. М. Кузнецов. – К. :ТОВ«ЗМОК»– «ГНОЗІС», 2003.– 294с.
8. Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем: підручник / Ю.М. Кузнецов, Ю. К. Новосьолов, І. В. Луців. – Севастополь : СевНТУ, 2011. – 246 с.
9. Кузнецов Ю.М. Патентознавство та авторське право: підручник / Ю.М. Кузнецов.– К.: Кондор, 2009.– 446 с.
10. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2016). Приводи затискних механізмів металообробних верстатів : монографія / Під заг. ред. д.т.н., проф. Ю. М. Кузнецова. Луцьк : Вежа-Друк. – 352 с.
11. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2014). Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління / під заг. ред. проф. Ю.М.Кузнецова. Луцьк: Вежа-Друк,– 428 с.
12. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем /В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2017. – 291 с.
13. Марчук В.І., Лук'янович Ю.А., Мельник С.А. Вступ до спеціальності (про інженерне мислення). Навчальний посібник. – Луцьк: Волиньполіграф, 2016. – 180с.

14. Методики моделювання при дослідженні та проектуванні верстатів і технологічних систем: навч. пос. / О.Ф. Гордєєв, П.О Захаров. – Луцьк: ЛДТУ, 2003. – 258 с.
15. Мигаль В.Д. Теорія і методи наукової творчості: навч. посібн. / В.Д. Мигаль. – Х.: ВД "ІНЖЕК", 2007. – 424 с.
16. Настасенко В.А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений: Монография. Изд.2-е, перераб. и доп.-Херсон: Айлант, 2015.-100 с.
17. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: начальний посібник / Ю.В. Петраков. –Київ: УкрНДІАТ, 2004. –383 с.
18. Севостьянов, І. В. Теорія технічних систем : підручник / Севостьянов І. В. – Вінниця: ВНТУ, 2014. - 181 с.
19. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів / А.А. Тимченко.– К.: Либідь, 2000. – 272 с.
20. Хелемендик М. М. Теорія технічних систем АПК: навч. посібник / М. М. Хелемендик, Г. І. Люлька, І. М. Хелемендик; під ред. М. М. Хелемендика. – Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2003. – 196 с.
21. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем / В.Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
22. Bolvashenkov, I., Kammermann, J., Frenkel, I., Herzog, HG. (2020). Multi-level Hierarchical Reliability Model of Technical Systems: Theory and Application. In: Ram, M., Pham, H. (eds) Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31375-3_5
23. Goel, H., J. Grievink, P. Herder and M. Weijnen, "Optimal reliability design of process systems at the conceptual stage of design," Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003., 2003, pp. 40-45, doi: 10.1109/RAMS.2003.1181900
24. Marvin Rausand, Arnljot Hoyland. (2020). System reliability theory: models, statistical methods, and applications, 3rd Edition. ISBN: 978-1-119-37352-0. 864 Pages
25. Gorshkova, O.O. (2019). Concept of research training of students in context of competence-oriented technical education. International Journal of Applied Exercise Physiology 8 (2.1) 147-159.

Навчальне видання

Кузнєцов Ю. М. Придальний Б. І.

**ТЕОРІЯ
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
в аспектах досліджень та технічної творчості
ПІДРУЧНИК**

**Theory of Technical Systems
in Aspects of Research and Technical Creativity
TEXTBOOK**

Друкується в авторській редакції

Формат 60×84 ¹/₁₆. Обсяг 16,51 ум. друк. арк., 16,21 обл.-вид. арк.
Наклад 300 пр. Зам. 22. Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. (0332) 29-90-65).
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.