Міністерство освіти та науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

До друку дозволяю

Перший проректор

професор C. Я. Ходирев

**ВСТУП ДО ТЕОРІЇ СИСТЕМ**

Конспект лекцій

Укладач: Полярус О. В.

Відповідальний за випуск: Богатов О. І.

Харків – 2019

**ВСТУП**

**Метою** вивчення дисципліни є формування системних знань студентів, необхідних для розв’язання складних спеціалізованих задач у сфері метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, що передбачає використання системних методів дослідження і проектування складових вимірювальних інформаційних систем.

Очікувані результати навчання з дисципліни:

здатність студентів до абстрактного мислення, аналізу, синтезу та застосування системних знань в практичних ситуаціях з спеціальності.

По завершенні вивчення дисципліни студенти повинні:

**знати:**

* основні закономірності великих систем;
* методи системного аналізу;
* основи теорії моделювання систем;
* основні положення теорії систем "загибелі та розмноження";

**вміти:**

* правильно вибирати методи аналізу конкретної системи;
* проводити аналіз функціонування систем контролю і управління;
* здійснювати проектування складових інформаційно-вимірювальних систем і систем контролю та управління;

проводити розрахунки показників якості системи

Лекція №1.

**ВСТУП. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ**

Вступ

Розвиток людства характеризується зростанням масштабності його діяльності, яка окрім позитивних наслідків має і негативні. Людство одержує все нові знання і разом з тим не в силах ефективно ці знання використати. Це свідчить про те, що знання людини не можуть мати вузький характер, а повинні охоплювати різні сторони навколишнього світу, мати системний характер. Формування системного характеру знань є головним завданням системного аналізу.

Системний аналіз, основи якого були закладені ще в стародавньому світі, все ж є молодою наукою. Її визначальні терміни ще недостатньо формалізовані. Системний аналіз (СА) застосовується в будь-якій предметній області, включаючи в себе як **часткові,** так и **загальні** методи і процедури досягнення.

* 1. Коротка історична довідка про розвиток теорії систем

Слово «система» (організм, союз, устрій, ціле тощо) виникало в стародавній Греції біля 2000 років тому. Стародавні вчені (Аристотель, Демокріт, Платон та ін.) розглядали складні тіла, процеси як складені з різних систем, наприклад, атомів. Розвиток астрономії (Коперник, Галілей, Ньютон та ін.) дозволило перейти до геліоцентричної системи світу, до категорій типу «речовина і властивості», «ціле і частина», «субстанція і атрибути», «схожість і відмінність». Далі розвиток теорії систем здійснюється під впливом різних філософських думок, теорії про структуру свідомості і можливості передбачення( Бекон, Гегель, Ламберт, Кант, Фіхте та ін.). В результаті такого розвитку СА виходить на позиції методологічної науки.

Природодослідники 19-20 століть ( Богданов, Берталанфі, Вінер, Ешбі, Цвіккі та ін.) не тільки актуалізували ролі модельного мислення і моделей в природознавстві, але й сформували основні системостворюючі принципи, принципи системності наукового знання, «з'єднали» теорію відкритих систем, філософські принципи і досягнення природознавства.

Сучасні досягнення теорії систем, систематичного аналізу обумовлені досягненнями як класичних областей науки (математика, фізика, хімія, біологія, історія тощо), так і некласичних областей (синергетика, інформатика, когнітологія, теорія нелінійної динаміки і динамічного хаосу, теорія катастроф, нейроматематика, нейроінформатика тощо). Особливо підкреслимо вплив техніки і технології на розвиток СА і на її прикладну частину - системотехніку, на методологію проектування складних технічних систем. Цей вплив є зворотнім: розвиток техніки і технології, збагачують СА новими методами, моделями.

У міру розвитку суспільства виникає необхідність всебічного вирішення практичних завдань спеціалістами широкого профілю, які здатні узагальнити проблему і вирішити з урахуванням різних аспектів. У даний час існує три системних поняття: «теорія систем», «системний аналіз» і «системний підхід». Теорія систем досліджує загальні властивості, які мають будь-які складні системі незалежно від її природи.

Системний аналіз - це прикладна наукова дисципліна, яка розробляє методи розв'язання проблем, що виникають у складних системах. Вона є методологічною дисципліною, основними результатами якої є розробка і класифікація методів аналізу систем та вирішення проблем.

Системний підхід - це поняття, яке полягає у тому, що для вирішення будь-якої проблеми треба підходити системно, тобто розглядати в цілому систему, в якій виникла дана проблема з урахуванням цілей то функцій системи, її структури, усіх внутрішніх і зовнішніх зв'язків.

* 1. Предмет і методи теорії систем і системного аналізу

Системність- це загальна властивість об'єктивно існуючої єдності світу, його структурованості і взаємозв'язку. Системність як загальна властивість світу виявляється:

* в системності матеріального світу;
* в системі пізнавальної діяльності;
* в системі практичної діяльності.

Єдність світу полягає в єдності всіх форм існування матерії і в таких проявах як ,наприклад, простір-час.

Структурованість світу полягає в його дискретності та впорядкованості. Матеріальний світ складається з величезної кількості дискретних частин, які розрізнюються на різних рівнях (рівень елементарних часток, молекул, організмів, популяцій суспільства, планети, галактики тощо). З дискретними формами матерії нерозривно зв'язані неперервні форми: електричні, магнітні, гравітаційні поля, поля ядерних та слабких взаємодій. Структурованість властива не тільки матеріальним об'єктам, але і іншим сторонам матеріального світу, наприклад, формам руху матерії: механічної, теплової, хімічної, біологічної.

Взаємозв'язок об'єктів матеріального світу проявляються в тому, що всі об'єкти матеріального світу взаємозв’язані між собою.

Системність пізнання полягає в тому, що наші знання про світ являють собою взаємопов'язану систему відомостей, уявлено та моделей навколишнього світу. Головними ознаками системи знань є їх структурованість, цілісність, взаємозв'язок.

Системність практичної діяльності полягає у тому, що ця діяльність, як і сам світ та його пізнання, завжди має системний характер. Ознаками системності діяльності є підпорядкованість діяльності певній цілі (цілеспрямованість) та алгоритмічність, під якою треба розуміти будь-яку діяльність, що складається з окремих кроків, які виконуються у певній послідовності і відповідають певним правилам.



Рис. 1.1. Сторони системності і їх взаємозв'язок.

Об'єктом теорії систем є системи навколишнього світу.

Предмет науки - це ті сторони, зв'язки, відношення об'єкта, які вивчаються наукою. Предметом теорії систем та систематичного аналізу є вивчення великих систем навколишнього світу на основі системного підходу, вивчення внутрішніх і зовнішніх, найбільш загальних характеристик системи, розробка методів аналізу систем.

1.3. Загальне визначення системи

Існує понад 30 визначень системи. Найбільш відомими є наступні.

Система - це множина елементів, що знаходяться у певних співвідношеннях і зв'язках один з одним, взаємодіють між собою, утворюють певну цілісність, як ціле взаємодіють із навколишнім середовищем.

Система - це сукупність елементів, яка має нові властивості, що відсутні у кожного елементу.

Система - це сукупність засобів вирішення проблеми.

Розрізняють матеріальні і абстрактні системи. Матеріальні системи можуть бути штучними (створені людиною), природними або змішаними. Абстрактні системи - це системи, що створені нашим мисленням, продукти розумової діяльності.

1.4. Властивості систем

Виділяємо чотири основні властивості системи:

1. система перш за все є сукупністю елементів, при певних умовах елементи можуть розглядатись як системи;
2. між елементами існують суттєві зв'язки чи властивості, які за силою зв'язку перевищують зв'язки між елементами системи та елементами, які не входять у систему;
3. системі властива певна організація, що виявляється у зменшенні ентропії системи в порівняні з ентропією сукупності елементів, які складають систему. Поняття ентропії визначає ступінь неорганізованості, хаосу;
4. існування інтеграційних властивостей, які властиві системі в цілому і не властиві жодному елементу системи.

Основними ознаками системи є:

1. цілісність означає, що система - це об'єднання частин, яке по відношенню до навколишнього оточення виступає як одне ціле;
2. якісна визначеність означає, що система - це така сукупність елементів, яка має свої якісні, характерні тільки для даної системи і відсутні в інших системах ознаки;
3. відмежованість системи від середовища означає, що всяка система має свої межі, що відділяють її від навколишнього середовища;
4. гетерогенність системи і структурованість. Гетерогенність означає, що система складається з різних частин. Структурованість означає, що система є певним сином організованою сукупністю, має певну структуру.
5. взаємодія частин системи між собою означає, що в системі частини взаємодіють між собою і тільки у деякій взаємодії вони утворюють певну систему;
6. взаємодія з навколишнім середовищем означає, що система як єдине ціле взаємодіє з іншими системами. Відкрита система - це система, яка активно обмінюється з навколишнім середовищем речовиною, енергією та інформацією. У закритій системі такий обмін обмежений або відсутній;
7. під поняттям інтегрованості розуміють, що в системі властивості окремих елементів об'єднуються і виступають разом у новій якості;
8. емерджентність - це поява нових якостей, не властивих елементам, що складають систему. Емерджентність (emergent - несподіване виникнення) визначає, що властивості системи не зводяться до властивостей елементів, з яких вона складається;
9. наявність цілей, цілеспрямованість одна з головних ознак системи. Штучні системи завжди мають суб'єктивні цілі, а природні системи- об'єктивні цілі, тобто стан ідеального майбутнього, до якого прагне система.

1.5. Система і проблема

Системний аналіз являє собою методологію вирішення проблеми, тобто сукупність методів та алгоритмів вирішення проблеми, що ґрунтуються на концепції системи і системному підході.

Проблема - це складне теоретичне або практичне завдання, що вимагає свого вирішення, але наявних в даній системі засобів вирішення недостатньо. Проблема виникає не одразу. Спочатку вона виступає як неусвідомлене незадоволення станом речей, а в науці це незадовільне пояснення явищ, одержання неоднозначних, незрозумілих результатів. Сформована проблема виникає тоді, коли повністю усвідомлена ситуація, але відсутні засоби для її вирішення.

Важливим етапом вирішення проблеми є формування цілей діяльності. Якщо ми вірно сформулювали цілі, то це вже значний крок у вирішенні проблеми. Одні цілі можуть приводити до вирішення проблеми, інші - до її загострення. Оскільки немає прямого шляху вирішення проблеми, то потрібно детально вивчити дане питання. Практичне розв'язання проблеми суттєво залежить від системи, в рамках якої проблема розв'язується. Інколи розширення системи приводить до розв'язання проблеми чи значного зниження труднощів розв'язання.

Лекція №2

**КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ**

Як вже було показано існують матеріальні та ідеальні (абстрактні) системи. Далі будемо розглядати тільки класифікацію матеріальних систем.

2.1. Класифікація систем за походженням

Системи за походженням розділяються на:

* штучні;
* природні;
* змішані;

У визначення системи не входить поняття цілі, але серед ознак системи важливою ознакою є цілеспрямованість . Для штучних систем конкретна ціль зрозуміла, а для природних – її важко сформулювати. Тому розрізняють дві цілі. Суб’єктивна ціль формується певним суб’єктом, який створив систему. Для природних систем розглядають об’єктивні цілі.

Змішані системи – це системи природного походження, які перетворені людиною для задоволення потреб, бо в системах, що створені людиною у значній мірі використовуються елементи природних систем, наприклад, заповідник, штучний супутник Землі, тощо. Для змішаних систем існують об’єктивна і суб’єктивна цілі.

Оскільки поділ системи на природні, штучні і змішані є досить загальним, то необхідно ввести наступний рівень класифікації (рис. 2.1)

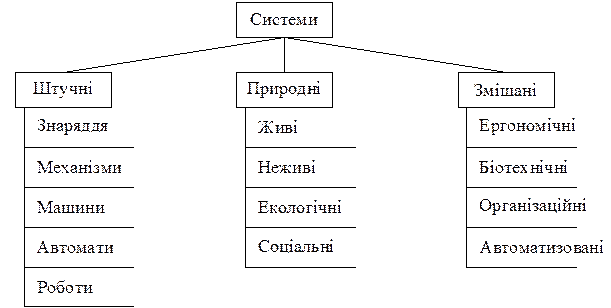


Рис. 2.1 Класифікація систем за походженням

Екологічні системи були введені в класифікацію враховуючи їх великий вплив на життя та діяльність людини

2. Класифікація систем за характером зв’язків з навколишнім середовищем

Залежно від інтенсивності взаємодії з навколишнім середовищем системи поділяють на:

* відкриті;
* закриті (замкнуті, ізольовані).

Для закритої системи виконується закон збільшення ентропії. Поняття ентропії має загальний характер і визначає напрямок розвитку складних систем: у замкнутій системі ентропія повинна тільки збільшуватися . Ентропія - це міра безладу невпорядкованості систем. Всі процеси у замкнутих системах відбуваються так, що невпорядкованість, дифузність, хаотичність системи тільки збільшується. Наприклад, тепло завжди передається від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і розподіл температури у системи вирівнюється; декілька розподілених газів у одному об’ємі після усунення межі завжди переміщуються, рідина випаровується тощо.

Ентропія максимальна у системах, де більше хаосу, безпорядку. Відповідно до закону збільшення ентропії відбувається старіння живих організмів, руйнування будівель, руйнування гір і вирівнювання земної поверхні, остигання Сонця і загибель зоряних систем.

У системі, в якій ентропія має найбільшу величину, припиняються всякі направлені процеси обміну речовиною, енергією, інформацією. Збільшення ентропії веде до стихійного хаосу. Відповідно до цього, наприклад, замкнутий всесвіт чекає «теплова смерть», всякі замкнуті системи рано чи пізно гинуть.

У відкритих системах внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем відбуваються процеси, які приводять до зменшення ентропії, до зростання упорядкованості системи. Інтенсивність взаємодії систем може змінюватись в широких межах: від слабкої, майже непомітної до дуже сильної.

Відкриті системи - це системи, які в процесі своєї діяльності обмінюються з середовищем матерією, енергією, інформацією.

Закриті системи – це системи, в яких процеси обміну з навколишнім середовищем відсутні. Ці системи підпорядковані другому закону термодинаміки, тобто закону збільшення ентропії.

2.3. Класифікація систем за складністю

Складність може бути :

* структурною;
* функціональною.

Структурна складність полягає у наявності великої кількості елементів і їх взаємозв’язку. Функціональна складність виражається в наявності багатьох взаємозв’язків і взаємозалежностей. Ці зв’язки можуть бути внутрішніми (між елементами системи ) і зовнішніми (між системою та мегасистемою)

2.4. Класифікація систем за принципами поведінки

Принципи поведінки систем схематично представлені на рис. 2.2

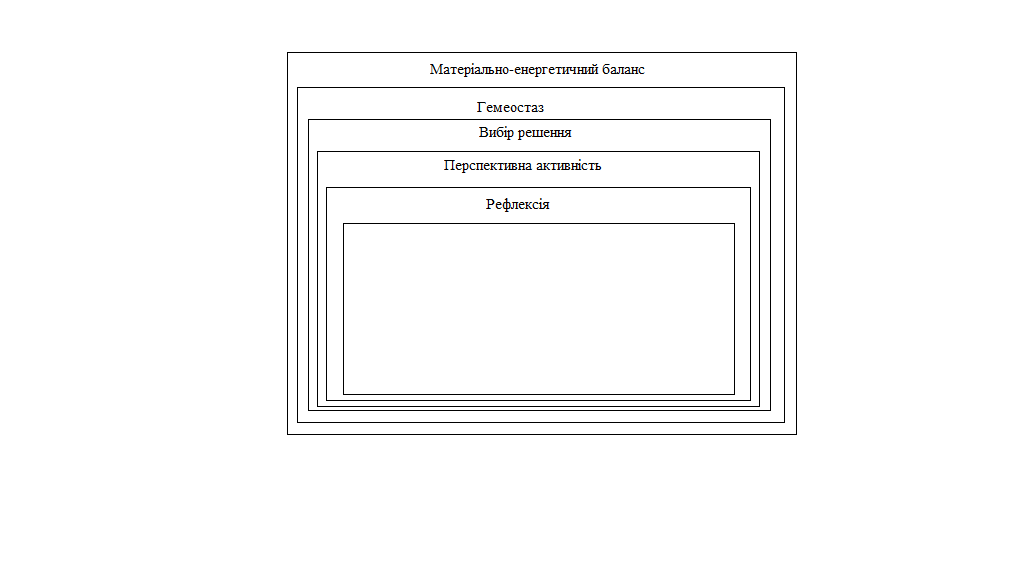


Рис. 2.2 Принципи поведінки системи

Принцип матеріально-енергетичного балансу досить простий, а саме: поведінка системи зумовлена тільки законами фізики, законами збереження енергії, маси, рівнянням неперервностей тощо. Дії цих законів підлягають усі системи матеріального світу, що показано на рис.2 прямокутником, який охоплює всі системи.

Принцип гомеостазу. Гомеостаз у перекладі з грецької мови означає незмінність стану. У науці гомеостазом називають таку поведінку динамічної системи (системи, що обмінюються з середовищем матерією та енергією), при якій зберігається постійний її склад та властивості внутрішнього середовища, стійкість головних функцій системи. Термін гомеостаз означає, що поведінка системи спрямована на підтримання стабільності свого складу та функціональних властивостей, здатність системи повертатися в стан рівноваги. Цей принцип характерний для поведінки станом живої природи і виконання його забезпечується для більшості штучних систем та у деяких системах неживої природи, які знаходяться в стані динамічної рівноваги.

Принцип вибору рішення. Поведінка систем обмежується не тільки підтриманням рівноваги у системі, але система має можливість вибирати одну із декількох альтернатив своєї роботи, чи поведінки. Це такі системи, як, наприклад, різні автоматичні прилади, що в залежності від умов приймають один з можливих станів, тобто, це автоматизовані лінії запрограмовані на вибір дій з певної множини можливих варіантів.

Принцип перспективної діяльності виділяє системи, що здатні організувати свою поведінку з урахуванням минулого досвіду на основі припущення, що майбутній розвиток суттєво не відрізнятиметься від минулого. Такі системи повинні мати достатній обсяг пом’яті і здатність прогнозувати хід подій на певний проміжок часу в майбутньому на основі інтерполяції та приймати рішення залежить від результатів такого прогнозування.

Принцип рефлексії полягає у тому, що система організує свою поведінку з урахуванням не тільки минулого досвіду, але й можливої дії іншої системи, з якою вона взаємодіє, тобто це поведінка систем, які наділені інтелектом, можливістю передбачити дії інших систем.

2.5. Класифікація систем за ступенем організованості

Ця класифікація в певній мірі відображає рівень наших знань про систему.

До добре організованих систем ми відносимо ті системи, поведінка яких жорстко детермінована, у системі встановлені чіткі взаємозв’язки між складовими частинами, що забезпечують дію систем в цілому, наприклад, телевізор, автомобіль тощо. Поняття добре організованої системи використовують також для відображення ступеня наших знань про систему. Ті системи, про внутрішню будову яких знають досить добре, відносять до добре організованих, а якщо не знають добре - до погано організованих систем.

Під погано організованими (дифузними) системами розуміють системи, в яких взаємодія частин не детермінована однозначно, має випадковий характер. Типовим прикладом такої системи є газ, що знаходиться у певному об’ємі. Ознаки дифузної мають і добре організовані системи, наприклад, поведінка людини не завжди однозначна. До погано організованих систем належать ті системи, про які ми знаємо досить мало.

До самоорганізуючих систем відносять системи, що мають механізми регулювання. Найбільш простими з них є системи саморегулювання, зокрема механічні системи з зворотнім зв’язком.

Самонавчаючі системи – це системи, що мають здатність засвоювати і запом’ятовувати минулий досвід і змінювати свою поведінку відповідно до набутих знань.

Самовідновлювальні системи – це системи, що здатні відновлюватися повністю або частково. Живі організми та штучні регенерують певні органи, свої частини.

Самовідтворюючі системи – це системи, які можуть відтворювати подібні до себе системи, породжувати певні системи аналогічні собі. Це всі живі організми, які можуть мати потомство. Деякі штучні системи можуть створювати системи такі, як вони самі, наприклад, роботи.

2.6. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості

Принцип ресурсної забезпеченості повністю відноситься до можливостей створення та реалізації моделі системи. Модель створюють для того, щоб відтворити роботу системи, вивчити процеси в ній, її розвиток. Для того, щоб реалізувати таку модель, потрібні певні енергетичні, матеріальні та інформаційні ресурси. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості показана в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характер ресурсу | Забезпеченість | |
| Повна | Недостатня |
| Енергетичний | Звичайні | Енергокритичні |
| Матеріальний | Малі | Великі |
| Інформаційний | Прості | Складні |

З обмеженими енергетичними ресурсам ми стикаємось тоді, коли для побудови моделі системи потрібні значні витрати енергії. Прикладом таких систем є мікросвіт, системи елементарних частинок матерії.

Залежно від матеріальних ресурсів, що потрібні для створювання моделі, системи поділяють на малі та великі. Великі системи - це системи, для створення моделей яких наявних матеріальних ресурсів недостатньо або потрібні більші ресурси, ніж є в наявності, наприклад, система функціонування економіки країни, атмосфера Землі тощо.

Під час класифікації систем за ресурсом забезпеченістю можливі різні комбінації ознак.

2.7. Класифікація систем за характером цілей

За характером цілей системи прийнято класифікувати як системи, які призначені для певної цілі, так і системи, що здатні самостійно обирати ціль і прагнути до неї .

Системи, що призначені для певної цілі - це такі системи, які мають певну ціль свого існування, створені для певної цілі і функціонують завжди так, щоб виконати цю ціль, наприклад, електродвигун служить для певних цілей.

Системи що здатні обирати ціль і прагнути до неї - це системи, які самостійно обирають ціль і прагнуть до неї, наприклад, людина, трудовий колектив.

2.8. Класифікація систем за описом змінних

Дана класифікація здійснюється залежно від ступеню складності системи, наших знань про неї і від того, як ми описуємо функціонування системи. Змінними системи є вхідні величини x(t), вихідні y(t) та внутрішні параметри системи z(t).

Системи, функціонування яких повностю відоме і можна кількісно встановити значення змінних, відносять до систем з кількісним описом змінних.

Системи,  з якісним описом - це системи,  в яких вхідні  та вихідні величини описуються якісно. На 2-му рівні вони можуть бути класифіковані як системи зі змістовим описом, з формалізованим описом та із змішаним описом. Системи із змістовим описом мають тільки загальний словесний опис змінних, виконаний мовою, близькою до розмовної. Системи з формалізованим описом - це вже системи, в яких більш детально вивчені змінні, які підлягають певним формальним правилам і можуть бути описані на деякій формальній мові.

Системи зі змішаним описом зміних це системи, в яких деякі зміні приймають числові значення, які можна виміряти і  виразити число, а  інші описати тільки якісно.

2.9 Класифікація за типом операторів системи

Якщо класифікація систем за типом змінних обумовлює вхідні, вихідні і внутрішні змінні системи, то класифікація за типом операторів відображає зв’язок між цими змінними системи, тобто вона несе інформацію про те, які процеси відбуваються в системі, динаміку системи. Величини між змінними в системі завжди зв’язані певними залежностями. Ці залежності можуть бути описані певним оператором системи.

Системи, в яких внутрішні процеси зовсім невідомі і оператори явно не можуть бути записані, відносять до складу системи «чорна скриня». Для таких систем відомі тільки вхідні і вихідні величини і зовсім невідомі процеси перетворення вхідних величин у вихідні.

Системи, в яких частково відомі процеси перетворення вихідних величин у вихідні, оператори системи можуть бути записані у вигляді певних правил, відносять до систем непараметризованого классу.

Системи, для яких співвідношення між вхідними і вихідними величинами повністю відомі, можуть бути записані у явному вигляді з точністю до певних числових параметрів, відносять до параметризованого класу.

Для деяких систем параметризованого класу співвідношення між вхідними й вихідними величинами можуть бути описані в операторній формі, наприклад, у вигляді:

*y(t)=R[X(t), z(t)],*

де R-певний оператор.

Такі системи відносять до класу «білий ящик». Під цим терміном розуміють, що повністю відома внутрішня будова системи, закономірності її функціонування.

2.10. Класифікація систем за способом керування

Ця класифікація здійснюється на двох рівнях (рис. 2.3)

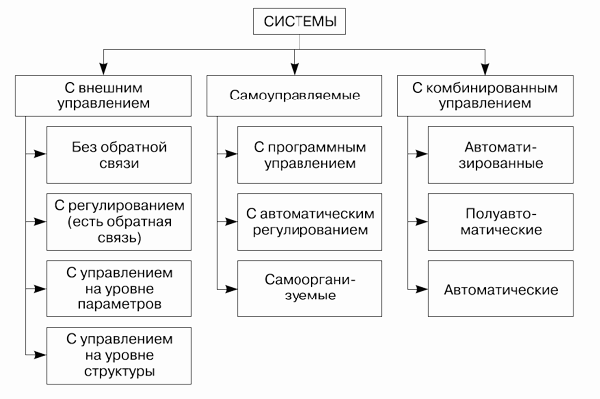


Рис. 2.3 Класифікація системи за способом керування

1-й рівень класифікації визначає, чи входить блок керування у саму систему, чи знаходиться поза нею. Самокеровані системи мають власний блок керування; у систем, керованих зовні, блок керування відсутній і існує тільки зовнішнє керування. Системи з комбінованим керуванням - це такі системи, в яких є блок керування у самій системі, за допомогою яких здійснюється керування певними параметрами, але система підлягає також зовнішньому керуванню.

2-й рівень класифікації поділяє за ознакою, як саме здійснюється керування. Для всіх систем підкласи 2-го рівня мають певні спільні ознаки.

Системи з керуванням за параметрами - це такі системи, в яких не тільки здійснюється зворотній зв’язок за вихідною величиною, а і можлива зміна параметрів самої системи. Прикладами таких систем є адаптивні автоматизовані системи керування, адаптація живих організмів до зміни умов життя, робота пілотів на різних типах літака тощо.

Найбільш складними є системи керування, що змінюють структуру самої системи. До таких систем слід віднести гнучкі автоматизовані системи сучасних виробництв, які дозволяють переходити з випуску однієї продукції на іншу, живі організми, в яких відбуваються зміни під час еволюції та природного відбору, держава та органи державного управління, в яких відбуваються організаційні зміні в процесі розвитку України.

Лекція №3

**ПРИНЦИПИ СХЕМОТЕХНІКИ**

3.1. Особливі властивості складних систем

Будемо називати системою об`єкт будь-якої природи (або сукупність об`єктів, що взаємодіють між собою), що має виражені системні властивості, тобто властивості (властивість), які не має жодна з частин системи при будь-якому способі членування і які не виводяться з властивостей частин.

Частини системи, що мають аналогічні властивості, називаються підсистемами. Об`єднання декількох систем, що мають системну властивість, будемо називати надсистемою або системою більш високого порядку (2-го,3-го тощо). Елементом системи є об`єкт (частина системи) з однозначно визначеними відомими властивостями.

Система (підсистема, елемент) мають входи і виходи. Виходом називаються дискретна або неперервна множина «контактів», через які дія середовища передається системі. Вихід – множина контактів, через які система діє на середовище. Будь-який елемент системи має по крайній мірі один вихід і один вхід. Дія може складатись в передачі речовини, енергії, інформації або комбінації цих компонентів. Відповідно будемо говорити про речовинний, енергетичний і інформаційний обмін між системою і середовищем ( метаболізм).

Таким чином, поняття «елемент», «підсистема», «система», «над система» взаємно перетворюємі: система може розглядатись як елемент системи більш високого порядку, а елемент – як система; відношення до системи визначається не тільки її змістом, але і точкою зору, позицією, задачею дослідника.

На практиці застосовується також термін «велика система». Під великою (багатомасштабною) системою будемо розуміти систему, число підсистем якої дуже велике, а склад різнорідний. Середовище є оточенням, з яким система взаємодіє. Середовище для однієї з підсистем системи можуть служити інші сторонні системи. Середовище є також системою.

Під станом системи будемо розуміти впорядковану сукупність значень параметрів, що визначають хід процесів, який проходить в системі. Поведінка системи є розгорнута в часі послідовність реакцій системи на зовнішні дії.

Детерміновані системи назвемо S1-системами, стохастичні – S2-системи, хаотичні - S3-системами; складні системи – S0-системами.

Складні системи мають особливі властивості:

1) Унікальність: кожна система цього класу не має повних аналогів поведінки.

2) Слабкопередбачуваність: ніяке, скільки завгодно детальне знання морфології і функцій елементів (підсистем) не дозволяє визначити функції об`єкта; ніяке, скільки завгодно детальне і точне знання поведінки об`єкта на інтервалі [-T, 0] не дозволяє точно передбачити його поведінку на інтервалі [0, τ].

3) Негентропійність або цілеспрямованість: система в змозі ( у визначених межах) керувати своєю ентропією (зменшувати її, зберігати, гальмувати збільшення) при випадковому і несприятливому впливі середовища або/і здатна здійснювати поведінку, що переслідує досягнення визначеної мети.

Негентропія – (міра ймовірності перебування в даному стані) визначає « прагнення» системи до основного процесу, здатність усувати наслідки зовнішніх і внутрішніх випадкових впливів.

Цілеспрямованість - «прагнення» до досягнення мети – виражає якраз цю тенденцію: збереження і посилення основного процесу, що веде до мети. Тому поняття «негентропійність» та « цілеспрямованість» є родинними.

В простих фізичних умовах ентропія обчислюється відносно просто. Розглянемо процес прискорення пучка заряджених часток.

Для дослідника на перший план виступає властивість слабкої передбачуваності поведінки, яка по суті і є практичною ознакою складної системи, інші ж властивості можуть бути виявлені тільки в процесі дослідження, тобто при умові, що досліджування їх виявить.

Складні системи можуть мати різну природу:

а) чисто фізичні термодинамічні нерівноважені необоротні системи (вулкан, сонце);

б) технічні системи (виробництво);

в) біологічні системи (клітина, жива істота, екологічний комплекс);

г) суспільні системи різного рівня (людина, галузь промисловості, економіка країни). Чи можна припустити, що такі різні об`єкти ґрунтуються на однакових принципах?

Перед тим як шукати узагальнені закони, необхідно вивчити закони, що діють у конкретних системах – інакше нічого узагальнювати. Але це якраз і неможливо, оскільки складні системи унікальні і кожний раз досліднику приходиться мати справу з повним об`єктом.

За прийнятими правилами закон повинен виражати стійкість причинно-наслідкові зв`язків між об`єктами, процесами і величинами. Внаслідок різного понятійного апарату, що використовується для опису систем різної природи, знайти такі загальні зв`язки, які охоплювали б всі складні системи і в той же час допускали конкретизацію, не вдається. Поняття принципу є більш широким і в даному випадку більш придатним. Тому ми будемо шукати єдині принципи існування і дії складних систем. До них належать наступні принципи:

1) принцип фізичності;

2)принцип моделює мості;

3) принцип цілеспрямованості.

3.2. Принцип фізичності

Його сутність: всякій системі (незалежно від її природи) властиві фізичні закони (закономірності), що визначають внутрішні причинно наслідкові зв`язки, існування та функціонування. Ніяких інших законів (окрім фізичних ) для пояснення дії систем будь-якої природи (в тому числі живих) не потрібно.

Принцип фізичності включає декілька постулатів.

3.2.1 Постулат цілісності

Його сутність: складна система повинна розглядатись як єдине ціле. Поняття цілісності ґрунтується на специфічній загально системність властивості (групі властивостей). На цей час уявлення про те, що «більш складне» або « велике» складається з частин « менш складних» і менших» втратило сенс. При організації в систему однакових підсистем спостерігається об`єднання деяких властивостей підсистем, що підсилюють позитивне проявлення цих властивостей, але це не просте арифметичне складання. При визначеному рівні підсилення одних і послабленню інших властивостей домінуюче значення набуває нова загальносистемна властивість, що виникає внаслідок взаємодії компонентів. Таким чином, система – не множина підсистем, а цілий об`єкт, що припускає різні членування на підсистеми. Тому система не є тотожною різним членуванням.

Якщо сума частин дорівнює цілому, системи називають адитивними відносно даного членування; якщо сума більше цілого – суперадитивними; якщо ж сума менше цілого субадитивними.

Та обставина, що частина може бути складніша цілого, має фундаментальне значення для системотехніки: не всяке членування дозволяє отримати частини системи більш прості і доступні для досліджування.

Виявлення цілісності виявляє врахування усіх взаємозв`язків всередині системи, а також системи з середовищем. Необхідно виявити загальносистемну властивість, її зміст, механізм створення, фактори, які перешкоджають її появленню або знищують її рівень. Необхідно зрозуміти, які властивості підсистем подавляються загальносистемною властивістю, який механізм цього придушення і при яких умовах він втрачає силу.

3.2.2 Лінгвістичне визначення постулату цілісності

Система (як ціле) має особливу, системну властивість (властивості), якої немає у підсистем (елементів) при будь-якому способі декомпозиції. Системні властивості формуються шляхом накопичення, підсилення і проявлення одних властивостей підсистем одночасно з нівелюванням, ослабленням та прихованням інших при взаємодії підсистем. Спостерігається стрибок – перехід кількості в якість.

3.2.3 Математичне визначення постулату цілісності

Нехай система S має скінчену множину Q={Qi}, i=1, n системних властивостей. Для визначеності приймемо, що всі властивості Qi мають числову міру, не обов`язково єдину. Нехай можливо ϻ варіантів (способів) декомпозиції. При r-ій (r є ϻ) декомпозиції S = {Se} l=1, Lr (Lr-число підсистем в S). Кожна підсистема характеризується кінцевою множиною властивостей Qe = { Qek}, k=1, k, кожна властивість Qek має числову міру, взагалі кажучи, індивідуальну.

Множина властивостей всіх Lr підсистем системи при r-й декомпозиції Qr={Qe} l=1, Lr. При взаємодії підсистеми породжують кінцеву множину системних процесів Fr={Frj}, j=1,j, Frj(t)=Фrj(Qr,t).

Системна властивість Qi є функціонал ψi від процесів, що протікають в системі Qi=ψri(Fr(t),T).

Постулат цілісності складається в тому що (∀r,S) ∃!Q(S)= {Qi(s)}; i=1,n, Qi ∩Qr=Ф.

Це означає: для всіх r є ϻ системи S існує єдина множина Qi, що залежить тільки від S і не залежить від r (∃!-квантор існування і єдності) така, що в Qi і в Qr не існує жодного загального елементу.

3.2.4 Постулат автономності

Сутність: різні класи фізичних явищ можуть бути поставлені у відповідності різним групам перетворень, кожна група породжує свою геометрію. Таким чином, реалізація цієї програми ґрунтується на застосуванні теоретико-групових методів до створення фундаментальних і прикладних теорій. І хоча « геометризація» фізики не завершена, можна стверджувати, що геометричному представленню складних систем властива всезагальність та глибина.

Різниця геометрій стає різницею класів систем, ця різниця має чітку формальну ознаку - іншу групу перетворень.

В складних системах евклідова відстань, як спосіб опису, відступає на задній план, оскільки вирішальне значення набуває шлях поширення процесу. Значно ефективніше використовувати функціональний простір. По суті система і «живе» в автономному функціональному просторі. Існують інваріанти або функції від них що зберігаються при взаємодії підсистем, наприклад, добуток маси на квадрат швидкості. Але існують і більш вузькі, внутрішньо-системні «закони збереження» (наприклад, закони Кеплера).

Інваріанти визначаються фізичним змістом, побудовою та ресурсом системи, а не цільовою функцією.

3.3. Принцип моделюємості

Складна система може бути представлена кінцевою множиною моделей, кожна з яких відображає визначену грань її сутності. Цей важливий принцип дає можливість досліджувати визначену властивість або групу властивостей складної системи з допомогою однієї або декількох спрощених (вузько орієнтованих) моделей. Модель, що орієнтована на визначену групу властивостей, складної системи, завжди простіше самої системи. Створення повної моделі для складної системи взагалі немає сенсу, оскільки в силу теореми Тьюрінга, така модель буде такою ж складною, як і сама система.

Орієнтовано модель будується на основі вимірювань, які завжди обмежені. Доведення існування і стабільності орієнтованих моделей спирається на постулат додатковості.

3.3.1 Постулат додатковості

Сутність: складні системи, які знаходяться в різних середовищах (ситуаціях), можуть проявити різні системні властивості, в тому числі альтернативні (тобто несумісні в жодній ситуації окремо).

Вперше фізичний принцип додатковості для мікросвіту був сформульований Бором: електрон в одних видах взаємодії проявляє себе як частка ( пружні зіткнення), в інших – як хвиля (дифракція). Важно знайти вид взаємодії, при якому корпускулярні і хвильові властивості електрону (або фотону) проявлялись б одночасно. Це означає, що вимірювальні прилади не будуть реєструвати одночасно того, що ми називаємо «корпускулярними» та «хвильовими» властивостями. Зрозуміло, що це може бути наслідком недосконалості наших фізичних приладів, орієнтованих на альтернативність уявлень про корпускулярні та хвильові властивості. Реальність єдина і процеси обмеженості засобів пізнання ця єдність розчленуються.

Єдність властивостей може бути описана узагальнюючою теорією (метатеорією).

Розширення фізичного принципу додатковості на складні системи закономірно, оскільки його дія ґрунтується на системних властивостях мікросвіту. В системотехніці постулат додатковості вимушує шукати в різних ситуаціях відповідні їм проявлення сутності системи. Необхідність постулату додатковості пов`язана з обмеженістю наших засобів пізнання і відображення реальності. Природа єдина і цільна, але відбиття її властивостей в нашому уявленні неоднозначне і ситуаційне. Спостерігач сприймає одні грані сутності в одних умовах і інші грані сутності в інших.

3.3.2 Постулат дії

Для змінювання поведінки системи потрібний приріст дії, що перевищує деяке порогове значення. Термін прийшов з квантової механіки: перехід електрону на більш високоенергетичну орбіту вимагає енергії не менше кванта дії.

Змінювання поведінки складної системи може бути зв`язаною з енергетикою, речовиною і з інформацією, які в результаті накопичення проявляють свій вплив стрибкоподібно, шляхом якісного переходу, після перевищення порогу. Поріг є функцією трьох змінних: кількості визначеної речовини, кількості енергії визначеної якості, кількості визначеної інформації.

3.3.3 Постулат невизначеності

Підвищення точності визначення (вимірювання) якої-небудь дії складної системи над деякою межею приводить до зменшення можливої точності визначення двох (або більше) параметрів з точністю, що перевищує визначений рівень неможливо. Інакше кажучи, існує область невизначеності, в межах якої властивості можуть бути описані тільки ймовірнісними характеристиками.

Фізична причина невизначеності складається в тому, що вимірювана величина (кількісний вираз властивості) впливає на внутрішньо системний варіант. Наприклад, фізичною константою є постійна Планка. Оскільки частка «не сприймає» дії нижче порогової, імпульс, значення якого менше визначеного рівня, не в стані змінити координату частки. Тому виміряти цей імпульс шляхом вимірювання приросту координати неможливо. З іншого боку, якщо є прямий спосіб вимірювання абсолютного значення імпульсу (що перевищує поріг) з дуже високою точністю, цю точність не можна зв`язувати з змінюванням координати, оскільки останнє буде обмежено порогом дії.

3.4. Принцип цілеспрямованості

Цей принцип визначає особливе місце і роль складних систем. Цілеспрямованість в системотехніці ми будемо сприймати як функціональну тенденцію, що спрямована на досягнення системою деякого стану або на підсилення (збереження) деякого процесу. При цьому система виявляється здатною протистояти зовнішній дії, а також використовувати середовище і випадкові події.

Сукупність функцій складної системи підсилює (зберігає) процеси, що стимулюють визначені стани системи. Це може бути вираженою збільшенням (збереженням) деякого функціоналу від системи процесів (включаючи взаємодію з середовищем). Питання про те, чи має реальний об`єкт внутрішню цілеспрямованість, не обговорюється. Включаючи свою точку зору в опис системи, дослідник створює цю цілеспрямованість і виходить з неї.

Наслідком принципу цілеспрямованості є постулат вибору. Складні системи мають здатність до вибору поведінки, і отже, однозначно передбачити спосіб дії і екстраполювати їх стан неможливо ні при якому знанні властивостей системи і ситуації.

Складна система будує свою поведінку в істотному (хоча і неоднозначному) зв`язку з ситуацією. Отже, на цю поведінку можна впливати. Можна очікувати, що ступінь неоднозначності залежить від ситуації тобто зовнішніх зв`язків. Більш того, не виключено, що у визначених умовах неоднозначність зникає. Це ми спостерігаємо, наприклад, на людині. «Єдина, неповторна, яскрава» людська індивідуальність веде себе «майже» визначено і передбачено у визначених умовах. Існують тонкі способи впливу на поведінку людини: ідеологічні, психічні, етичні тощо. Але повної однозначності залежності вихідної реакції від вхідної дії не досягається. Це характерно для будь-яких живих організмів.

В системотехніці приходиться в основному мати справу з ергатичними системами, для яких постулат вибору висувається на перший план. Пізнання і практичне використання цього постулату має два аспекти.

Перший стосується стимулювання або придушенню «свободи» вибору. В дослідницьких, пошукових, творчих системах можливість вибору повинна бути максимально з метою розширення діапазону діяльності. Виконавчі системи повинні мати можливість вибору в межах поставленої задачі або не мати її зовсім. Відповідно повинні створюватись системи з великою або малою свободою вибору або керованою свободою вибору.

Другий аспект зв`язаний з кількісним описом вибору, його формувальним представленням, якісною або кількісною оцінкою і використанням цієї оцінки при розв`язанні задач більш загального характеру. Одна з задач математики складається в розробці апарату кількісного опису недетермінованих і невипадкових властивостей.

Постулат вибору дозволяє складній системі згідно її цілеспрямованістю використовувати рідкі сприятливі події, що виникають при взаємодії з середовищем, блокуючи інші (несприятливі) події і процеси.

Принципи фізичності, моделюємості, цілеспрямованості достатньо повно відображають методологію системного підходу. Принцип фізичності накладає причинно-наслідкові зв`язки об`єктам будь-якої природи і системам, що побудовані з цих об`єктів. Формалізація зв`язків і автономних законів, що визначаються ними, дозволяє виразити на єдиній мові багатомовний опис об`єктів (підсистем). Якщо автономних законів немає, сукупність об`єктів не створює системи, тоді це хаотичний набір компонентів.

Принцип моделюємості забезпечує можливість використання в системотехніці спрощених моделей, що відображають тільки ті грані сутності складної системи, які цікавлять дослідника. Виявлення нових властивостей і сутностей не обов`язково повинно супроводжуватись побудовою узагальнених людей. Відображення складної системи в цілому забезпечуються взаємодією спрощених моделей.

Принцип цілеспрямованості поширює практичний бік людської діяльності на системи будь-якої природи. Принцип цілеспрямованості дозволяє співпоставити складній системі будь-якого змісту деякий функціонал, що описує її існування як цілого. Оскільки модель системи відображає точку зору дослідника, то цей функціонал відображає і її (наприклад, враховуючи систему).

Сукупність принципів системотехніки не тільки формують єдність в методах дослідження і опису системи будь-якої природи (від фізичних до абстрактних), але і створюють концептуальну основу побудови математичного апарату: на основі автономних метрик і законів збереження будуються моделі, які оцінюються по цілеспрямованості.

Лекція №4.

**ПРИНЦИПИ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ**

4.1 Поняття про системну інженерію

Системна інженерія як дисципліна складається з двох основних напрямків: інтеграція систем та інтеграція дисциплін. У цих рамках розглядаються чотири компоненти: контекст місії, фізична інтеграція системи, організаційна структура і потік інформації, політика і право (рис. 4.1).

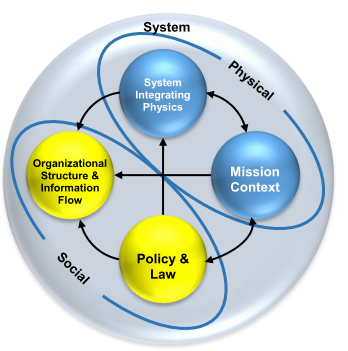


Рисунок 4.1 – Взаємовідношення між складовими системи

Системна інтеграція складається з фізичних та логічних аспектів  
системи. Системна інтеграція фізики включає в себе систему інтеграції логіки (тобто програмному забезпеченні). Програмне забезпечення повинно мати вхідні дані на стан системи впливає на передбачуване  
управління системою в поєднанні з фізичної системою. Екологічні  
взаємодії створюють логічні аномалії в роботі системи і впливають на програмне забезпечення. Як частина системи включена  
інтеграція фізики - це аспекти інтеграції системи людини (фізичні та логічні). Функціональний дизайн повинен враховувати фізіологію людини і психологію. Це забезпечує зв'язок користувачеві, оператору, супроводжуючому і виробнику в структурі системи і формує міст з  
соціальних систем, які створюють і використовують систему. Контекст місії впливає як на аспекти фізичної / логічної системи, так і на соціальні аспекти. Контекст місії є частиною інтеграції системи і в основному зосереджується на визначенні цих аспектів системи. Соціальні аспекти  
контексту місії є важливими, а фізичний / логічний вибір для системи може підкреслити або посилити їх.

Соціальні аспекти є основним рухом, визначеним організаційною структурою та потоком інформації. Організаційна структура та інформаційний потік мають справу з підтримкою та потоком системної інформації всередині організації. Це приводить до аспектів  
соціології у функціонуванні організації. Інформаційний потік є ключовим елементом у проектуванні і роботі системи. Системна інженерія заповнює організаційну структуру і підтримує необхідний потік інформації серед системних дисциплін. Потік інформації через організацію особливо стосується системних інженерів. Політика та право формують соціальний вплив на систему. Вони безумовно впливають на фізичні і логічні аспекти системи.

4.2. Постулати, принципи і гіпотези

Консорціум системної інженерії визначив набір постулатів, принципів і гіпотез, які керують інженерними системами. Ці постулати і гіпотези ґрунтуються на теорії Больцмана про розподіл газу як складної системи. Це змусило сформулювати набір основних постулатів і гіпотез, які лежать в основі системної інженерії, що призводить до семи постулатів та трьох гіпотез. Ці постулати визначають область системної інженерії, а також системні аспекти та системні впливи, які викликають занепокоєння в інженерних системах. Гіпотеза складає цілісну математичну основу для систем техніки. Крім того, система постулатів визначає набір системних принципів інженерії. Принципи є продовженням постулатів і аналізуються після них.

4.2.1 Системи інженерних постулатів

Постулат - це те, що без доказів вважається істинним, реальним або необхідним.

**Постулат 1**: Системна інженерія - це специфічна система та середовище, що є контекстно залежним. Опис: Це перше і основоположне твердження про системну інженерію. Продукт  
(тобто система) і її операційне середовище приводить в дію системну інженерію і систему інтеграції фізики, логіки, соціальних і когнітивних відносин (тобто контексту), які є основоположними для  
конкретного продукту або системи. Суттєвим для цього є розуміння місії або використання продукту, сформульованого цілями продукту. Це включає в себе аспекти системи і таким чином розглядає весь життєвий цикл продукту.

Докази: повсюдне розроблення підходів до інжинірингу систем забезпечує сильну підтримку цього постулату. Системна інженерія повинна відповідати розробленій системі, що експлуатується.

Наслідки: Цей постулат свідчить, що будь-яке застосування системної інженерії має бути організовано  
на основі розгляду системи, що розробляється або експлуатується.

**Постулат 2**: Область системної інженерії складається з підсистем, їх взаємодій між собою і їх взаємодії з системним середовищем  
Опис: З фізичного, логічного і структурного сенсу система не є єдиною механічною, або електричною, або хімічною сутності; вона охоплює набір взаємодіючих підсистем. Системна інженерія пов'язана з об'єднанням декількох підсистем, різних фізичних і логічних  
типів.   
 **Постулат 3** адресує аспекти інтеграції дисципліни.

Докази: Індивідуальні інженерні дисципліни займаються розробкою їх специфіки. Коли ці функції інтегруються один з одним і з  
навколишнім середовищем, взаємозв'язки підштовхують кінцеву продуктивність системи, включаючи виникаючі властивості, які не видно з окремих функцій системи.

Наслідки: системний інженер зосереджується на взаємодії цих підсистем, а не на вузькому проекті. Ці системні взаємодії, включаючи взаємодію з системним середовищем, можуть керувати дизайном так сильно, як і підсистема функціонує сама і, при поєднанні, потенційно може створити несподівану систему.

**Постулат 3**: Функція системної інженерії полягає в інтеграції інженерних дисциплін

Опис: Дисципліна інженерних систем є власною інженерною дисципліною, але не є незалежною від інших інженерних та соціальних дисциплін. Інженерні системи прагнуть інтегруватися і включити інші інженерні та соціальні дисципліни для створення елегантна система протягом всього життєвого циклу системи.

Докази: Будь-яка складна система розроблена на основі багатьох інженерних дисциплін і соціальних аспектів, що впливають на інтеграцію.   
 Наслідки: Взаємодія дисциплін - це центр системної інженерії.  
Мета полягає в базовому розумінні кожної дисципліни з детальним розумінням їх взаємодії. Це включає різні аспекти організаційної інтеграції. Системному інженеру необхідно усвідомлювати організаційні та соціологічні впливи на розвиток системи. Системний інженер також повинен «інженерувати» ці відносини.

**Постулат 4**: Впливає на системну інженерію та на організаційну структуру.  
 Опис: Технічні аспекти системи не є єдиним напрямком системної інженерії.  
 Розроблена система керує процесом розробки, що має відповідний  
вплив на структуру організаційних систем розвитку та оперативної діяльності. Аналогічно структура організації впливає на розробку системи. Ці фактори також впливають на культуру організації.  
 Докази: Організаційне віддзеркалювання надає приклади, коли організація відображається в системі функцій.

Наслідки: Системний інженер повинен бути в курсі культури, організаційної взаємодії та їх потенційному впливі на конструкцію системи. Інженер систем повинен зрозуміти, як інформація проходить через організацію, фільтрується і інтерпретується організацією, і охоплені проектуванням системи або операційними процедурами.    
 **Постулат 5**: Системні інженерії впливають на бюджет, графік, політику, закон.

Опис: Кожен проект має загальні обмеження, які виходять за межі фізичного та екологічного. Зокрема, більшість (якщо не всі) проекти мають обмежений бюджет і графік. Крім того, всі системи повинні відповідати усталеній організаційній і державній політиці і законам.  
Ці політики та закони створюють додаткові обмеження на бюджети, графіки та технічні рішення. Ці фактори забезпечують контекст, в якому система розробляється і діє. Крім того, вибір дизайну системи також впливає на ці фактори. Урядова політика і закон базуються на  
розуміння законодавців про те, які системи можуть реально досягти своїх намірів. Аналогічно на корпоративну політику / політику компанії впливають типи систем корпорації.

Докази: Кожен проект має ці обмеження. Нескінченних бюджетів або графіків не існує. Політика і застосування закону пронизують наші системи. Державна політика і законодавство базуються на законодавцях  
розуміння рішень, необхідних для досягнення своїх намірів. Аналогічно, корпоративні / компанії бюджети та графіки базуються на розумінні керівниками бюджету та часових рамок, в яких необхідно розробити систему. Це розуміння можна побачити в бюджеті та розподілі графіків,  
які охоплюють як загальне фінансування, так і розуміння часових рамок.

Наслідки: Соціальний вибір сприяє встановленню цих обмежень. Люди обмежують бюджет, графіки, політику та закони. Таким чином, фізичні та логічні рішення за допомогою цих обмежень зв'язують теорію соціального вибору.

**Постулат 6**: Інженерія систем охоплює весь життєвий цикл системи.

Опис: Інжиніринг систем - це не просто фаза розвитку, а продовжується в процесі експлуатації системи, виведення з експлуатації та утилізації. Організаційні відносини і цілі змінюються, коли система просувається через ці фази, але інженерна система продовжує   
інтегрувати системні функції та системні дисципліни на всіх етапах життя системи. Інженерна робота відповідає за роботу системи. Системна інженерія відповідає за різні зміни / оновлення системних можливостей.

Докази: системне проектування під час фаз розвитку добре зрозуміло. Під час операційної фази інженерні системи все ще є важливими, оскільки система проходить через технічне обслуговування,  
оновлення, нові адаптації, переорієнтація на нові підходи тощо.  
Виведення з експлуатації та утилізація, інжиніринг систем має важливе значення для належного роз'єднання системи та забезпечення відповідності політиці та законам, що впливають на систему.

**Постулат 7**: Розуміння системи розвивається в процесі функціонування системи.

Наслідки: розуміння системи погіршується під час операцій, якщо воно системою не підтримується.

Опис: Поглиблене розуміння системи в цілому досягається з розвитком системи через операції. Як система прогресує через розвиток, тим більше необхідні детальні рішення і, оскільки розуміння поглиблюється, ці детальні рішення можуть бути прийняті.  
Розуміння системи також може регресувати, якщо внаслідок бездіяльності відбуваються організаційні зміни (втрата досвіду), виходу на пенсію ключових досвідчених осіб, або закриття постачальників.  
  Докази: Це поглиблення розуміння спостерігається в будь-якому розвитку системи. Процес оцінювання показує, як системи переходять від перегляду концепції до перегляду вимог проекту та прийняття. Висновки, що отримані в ході операційної фази, дуже багато  
значать для будь-якої системи.

Наслідки: вимоги виводяться в процесі розробки системи. Це  
відноситься також до витрат і графіків, особливо для нових систем, де розвивається або операції призводять до несподіваних змін. Аналогічно системні інженери розробляють моделі для прогнозування  
можливостей системи, а потім доопрацювання цих моделей як тестування і досвіду експлуатації. Системні моделі набувають вірності в процесі проектування та взаємодії між проектами підсистеми.

4.2.2 Принципи систем інжинірингу

Системи інженерних постулатів складають основу принципів системної інженерії. Прийнято істини, які застосовуються по всій дисципліні, використовувати як принципи. Ці істини служать керівництвом для застосування системної інженерії.

**Принцип 1**: Інженерія систем інтегрує систему і дисципліни, враховуючи обмеження бюджету та графік. Це є застосуванням постулату 5. Бюджет і графік стримує інтеграцію систем, що розробляють або експлуатують систему. Зауважте, що бюджет є  
сума, що виділяється для виконання розробки або функціонування системи і не є фактичною вартістю. Орієнтація системної інженерії полягає в тому, щоб утримати витрати в межах бюджету або їх рекомендувати, коли рішення не відповідає передбачуваному системному застосуванню.

**Принцип 2**: Складні системи будують складні системи. Цей принцип є фундаментальним для виконання системної інженерії. Інженер систем повинен розглядати як складну систему (організацію), що розвиває систему, так і комплекс самої системи. Такий подвійний фокус формує основу системної інженерії. Постулати 4 і 5 також охоплюють цю подвійність.

**Принцип 3**: У процесі розробки системи інженерія систем спрямована на поступове поглиблення розуміння взаємодій, чутливості та поведінки системи. Цей принцип є застосуванням постулату 7. Це  
поглиблене розуміння дає змогу розвиватись інженерно-технологічним рішенням, необхідним для створення системи. У центрі уваги системної інженерії є розуміння взаємодій системи, багато з яких не очевидні до інтеграції системи (наприклад, фізична та логічна інтеграції, оскільки сучасні засоби інженерії систем не дозволяють досить глибоко розуміти  
системні взаємодії. Це призводить до безперервного зменшення невизначеності системи та визначення чутливості системи. По мірі розвитку інженер систем шукає найкращий баланс  
продуктивності, вартості, графік і ризик. Існує кілька підпринципів для глибшого розуміння системної взаємодії, чутливості та поведінки.

Підпринцип 3 (а): Вимоги та моделі відображають розуміння системи. Точність і повнота системних вимог і системних моделей відображають розуміння системи. Система, яка недостатньо вивчена, призводить неточних моделей системи. Метою інженерії системи є розуміння системи яке потім виробляє належну специфікацію вимог і належне представлення системи в системах моделей.

Підпринцип 3 (б): Вимоги конкретні, узгоджені з перевагами розробників організації. Налаштування - це окремий атрибут. Проте організація в цілому повинна в деяких точка консолідації цих індивідуальних переваг і узгодження конкретних цінностей (тобто  
продуктивність, вартість, графік), яких система досягне. Ці узгоджені переваги поряд з деякою згодою на невизначеність їх міри є системними  
вимогами. Вони характерні для розробленої системи та вимог, які необхідні для успішного завершення роботи системи. Вони ретельно визначені як частина системної інженерії.

Підпринцип 3 (в): Вимоги та дизайн поступово визначаються як  
розвиток вимог на ранній стадії розуміння системи. Інші технічні вимоги виводяться на основі системного рішення, які просуваються протягом всього етапу розробки.

Підпринцип 3 (г): Ієрархічні структури не є достатніми, щоб повністю моделювати систему взаємодії і зчеплення. Системні взаємодії і зв'язки різноманітні, включаючи послідовний, паралельний, вкладений і циклічний відносини. Часто існують численні взаємозалежні відносини, які забезпечують зв'язки між ними функцій системи та навколишнього середовища. Ієрархічні структури не розрізняють тонкі ефекти взаємодії від сильних ефектів взаємодії.

Підпринцип 3 (д): Структура розбиття продукції забезпечує структуру інтегрування витрат з функціями системи. Вона пов'язує витрати та графік з функціями та компонентами системи. Вартість і графік визначають обмеження (постулат 5) в системі і повинні бути чітко прив'язані до системи, її функцій та операцій.

**Принцип 4**: Інженерія систем охоплює весь життєвий цикл системи  
Це застосування постулату 6 через набір підпринципів, які є важливими в усьому життєвого циклу системи. Деякі ролі системних інженерів висвітлені в наступних підпринципах.

Підпринцип 4 (a): Інженерія систем дає розуміння системи, що  
має важливе значення для успішного розвитку будь-якої системи.

Підпринцип 4 (б): Інженерія систем моделює систему. Системний інжиніринг розробляє та підтримує моделі системного рівня, які допомагають у розробці та аналізі системи.

Підпринцип 4 (в): Інженерія систем розробляє та аналізує систему.  
Інженерні системи проектуються та аналізуються на системному рівні. В ідеалі це не лише когнітивна інтеграція результатів різних моделей дисципліни, а скоріше використання моделей системного рівня для виконання проектування на системному рівні.

Підпринцип 4 (г): Інженерія систем перевіряє систему.  
Системна інженерія є критичним аспектом системного тестування. Системний інженер повинен визначити тестові цілі на системному рівні для забезпечення тестування не тільки конкретних цілей тестування дисципліни, а також на системному рівні. Це може включати окрему систему тестів, модифікація тестів дисципліни для цілей системного рівня або аналіз на рівні системи тестових даних для отримання системного рівня розуміння.

Підпринцип 4 (д): Інженерія систем має важливу роль у збірці та  
виготовлення системи. Виробництво системи є інтегрованою діяльністю між компонентами системи і оснащення. Крім того, зміни у виробництві часто мають системний рівень наслідків і можуть несподівано змінити системні взаємодії.

Під-принцип 4 (е): Інженерія систем має важливу роль під час операцій та зняття з експлуатації. Системне проектування має ключову роль у системних операціях, які визначаються системою  
взаємодій. Вони призводять до оновлення системних моделей, що використовуються.

**Принцип 5**: Інженерія систем ґрунтується на середніх теоріях.  
Системна інженерія складається з набору теорій середнього діапазону, оскільки немає ні єдиної теорії фізики, ні уніфікованої теорії логіки, ні уніфікованої теорії соціології, але є єдина теорія системної інженерії. У ній представлені три можливі теоретичні основи  
підпринципів.

Підпринцип 5 (a): інженерні системи мають фізичну / логічну основу, що є специфічною для системи. Системна інженерія включає фундаментальні фізичні та логічні математичні специфічні для системи поняття. Таким чином, створені математичні основи системної інженерії  
включають математичну основу фізики / логіки системи. Системний інженер повинен повністю зрозуміти, що вони є різними для різних типів систем.

Підпринцип 5 (б): Інженерія систем має математичну основу.  
Існує кілька теорій, важливих для інженерії систем, які дозволяють створити математичну основу дисциплін. Системні інженери, в інженерній системі, мають керувати інформацією про систему та її взаємодію. Статистична інженерія є також значним математичним інструментом, що дозволяє розуміти систему і пояснювати невизначеність. Системи інженерії використовують такі ключові поняття, як поділ між системою і середовищем, рекурсивний характер інженерних концепцій систем, оскільки вони застосовуються до різних «рівнів» системи.

Далі опишемо 7 пунктів теоретичного базису для системної інженерії.

1. Базис теорії систем. Постулат 2 виходить з цього базису. Системна інженерія використовує ключові концепції, такі як поділ між системою і навколишнім середовищем та рекурсивною природою понять системної інженерії, які застосовуються до різних рівнів системи.

2. Основа теорії прийняття рішень і вартості: раціональне прийняття рішень щодо дизайну системи вимагає відображення переваг зацікавлених сторін в єдину шкалу цінностей. Гіпотеза 3, нижче, стверджує, що це реальний підхід.

3. Базова модель: інформаційна система представлена ​​і підтримується в моделях, і експортується до документів, коли це необхідно.

4. Основа держави: системні уявлення максимізують використання змінних стану та функцій і визначаються як відображення з вхідних станів у вихідні стани.

5. Основна мета: системи існують для досягнення цілей, які представлені як обмеження вихідних змінних стану функцій.

6. Основа управління: обмеження на функцію виведення змінних стану досягаються за допомогою фізичних законів для управління тими змінними стану в межах їх діапазонів.

7. Основи знань: індивідууми та організації конструюють та підтримують знання системи. Інженерні системи використовують наявні знання структури та вдосконалення формування нових знань. Інформація і теорія є важливою частиною цієї основи. Ця основа знань є ключовим аспектом інтеграції дисципліни.

8. Прогнозована основа: знання системи є невизначеними. Невизначеності необхідно моделювати імовірнісно, ​​щоб зрозуміти рівень довіри до системи знання та забезпечити належне прийняття рішень.

Підпринцип 5 (c): Інженерія систем має специфічну соціологічну основу організації. Системна інженерія включає фундаментальні соціологічні концепції, специфічні для організація розвитку та операцій. Це результат постулатів 3 і 4.

**Принцип 6**: Системи інженерних карт управляють взаємодією дисципліни в межах організації. Це є застосуванням постулатів 3 і 4. Зрілість інженерної організації встановлює необхідність  
для формальності організаційної структури. Організації, які не мають досвіду в конкретній системі, будуть вимагають більш формальної структури для успішного розвитку системи. Досвідчені організації з  
певною системою можуть успішно функціонувати з мало формальною організацією. Зверніть увагу на те, що керівництво займається організаційною одиницею відповідальності та кадрових питань. Системний інженер працює з управлінням проектами та вирішує виявлені прогалини або перешкоди в інформаційній системі організаційної структури і як ці прогалини та бар'єри призведуть до недоліків у проектуванні, виробництві та експлуатації систем.

**Принцип 7**: Якість прийняття рішень залежить від охоплення знань, що знаходяться в системі процесу прийняття рішень  
Цей принцип походить від постулату 2. Інженерні організації часто створюють торговельні дослідження або завдання  
розслідувати та вирішувати конкретні проблеми. Ефективність рішення залежить від залучення правильних осіб, які приймають рішення, у достатній мірі повне розуміння контексту прийняття рішень і прийняття рішення. Рішення є процесом залежним. Методи прийняття рішень безпосередньо зумовлені інформацією, необхідною для прийняття рішення виробників.

**Принцип 8**: Політика та закон повинні бути належним чином зрозумілі, щоб не надто стримуватись при обмеженні впровадження системи. Це застосування постулату 5. Політика і закон діють як важливі обмеження на систему. Вимоги не завжди повинні містити політику і закон, хоча вони часто пишуться в форматі, що відповідає вимогам. Контекст політики та законів значно відрізняється, часто буває багато  
слабкіше, ніж вимоги, і, швидше, відображає очікування системи високого рівня, ніж конкретність функціонального або операційного вибору системи. Часто більшість інтерпретують політику як більш гнучку, ніж Закон. Системний інженер повинен зрозуміти, наскільки гнучкість є прийнятною для тих, які встановлюють політику (чи то урядові чи організаційні), і ті, хто приймає закони.

**Принцип 9**: Інженерно-технічні рішення приймаються в умовах невизначеності з урахуванням ризику. Цей принцип походить від постулатів 2, 3, 4 і 7. Інформація про систему поступово  
розуміється через процес розвитку і через процес операції. Є кілька  
джерел невизначеності в розвитку і операціях. Деякі з них природно ґрунтуються на прогресивному розумінні системи (постулат 7). Невизначеність існує через неможливість передбачити майбутнє з упевненістю. Невизначеність виникає в багатьох аспектах системної інженерії, включаючи обмежені знання про системні середовища та соціальні аспекти організації, які впливають на інформаційне забезпечення. Невизначеність і чутливість повинні моделюватись протягом усього процесу. Рішення щодо інженерних систем повинні бути прийняті з достатнім розумінням системного контексту та знанням того, що невизначеність існує навіть тоді, коли досягається розуміння.

**Принцип 10**: Верифікація - це наочне уявлення про всі функції системи і взаємодії в операційному середовищі. В ідеалі вимоги є рівними (тобто, на одному рівні деталізації в дизайні) і збалансовані  
представлення системних функцій і взаємодій. На практиці вимоги не рівні і врівноважені в їх поданні системних функцій і взаємодій. Перевірка прагне довести що система буде виконувати, як очікують розробники на основі своїх вимог, моделей, конструкцій. Це призводить до принципу, що належне виконання функцій системи (тобто,  
виходи знаходяться в межах необхідних діапазонів для заданого стану входів) є центром перевірки системи. Таким чином, у центрі уваги системи перевірки повинні бути функції системи. Зосереджуючись на  
належних системних функцій, можна визначити підхід верифікації для системи, яка фокусується на його успішному застосуванні.

**Принцип 11**: Валідація є продемонстрованим розумінням цінності системи для системних учасників Перевірка системи спирається на очікування зацікавлених сторін, а не на вимоги системи, моделей, а також проектної інформації. Вона об'єднує систему так, як вона розроблена і побудована з системою очікуваних результатів зацікавленими сторонами. Часто припускається, що вимоги відображають зацікавлену сторону очікування. Це важко досягти на практиці через об'єднання зовнішніх зацікавлених сторін  
очікування. Таким чином, вимоги чітко не відображають  
очікування зацікавлених сторін (внутрішніх або зовнішніх) у багатьох розробках системи.

**Принцип 12**: Інженерні рішення систем обмежені часовими рамками для системної потреби. Цей принцип стосується зміни характеру систем, що базується на часі, коли рішення приймаються  
системою. Інженерне рішення системи для системи формується контекстом сучасного стану і нових доступних технологій. Таким чином, терміни прийняття рішень є важливим аспектом набору рішень, доступних для системного інженера. З часом ступінь узгодженості зацікавлених сторін і переваг користувачів, як правило, зменшується,  
змінюється навколишнє середовище, нові технології або склад зацікавлених сторін та користувачів.

4.2.3 Стратегії технічних систем

Виходячи з поточних постулатів і принципів, обговорених вище, існує кілька стратегій інженерних систем. Ці стратегії забезпечують базовий підхід до розробки системи на системному рівні.

Стратегія 1: Стратегії теорії систем

Опис: Існує два аспекти цієї стратегії, що стосуються системи в цілому.  
   
1. Системна інженерія ділить свій простір представлення на систему, систему навколишнього середовища, а також внутрішніх і зовнішніх контекстів системи (постулат 2). Система є предметом, який розробляється, оцінюється, будується і експлуатується. Це суб'єкт  
спроектований для досягнення однієї або декількох цілей. Середовище є фізичним, логічним, та середовище, в якому працює система. Контекст являє собою інституційні, правові, політичні та економічні елементи, з якими безпосередньо не взаємодіють, але які визначають цілі системи, створюють систему, інакше впливаючи на систему.

2. У ієрархічних уявленнях, як правило, застосовуються інженерні концепції систем рекурсивно до кожного рівня ієрархії. Рекурсивна стратегія є типовою для систем. Часто це пов'язано з наявністю людей, що контролюють або зацікавлені в різних частинах системи. Теорія інженерії систем, поняття, практика і термінологія повинні враховувати відмінності в точках зору і повинні забезпечувати точне використання інформації.

Стратегія 2: Стратегії теорії вартості

Ці стратегії стосуються цінності, яку надає система зацікавленим сторонам.   
1. Системне значення походить від функцій корисності фон Неймана-Моргенштерна. Функції корисності фон Неймана-Моргенштерна були відправною точкою для розробки теорії ігор. Математичне представлення, ґрунтується на одній осі скалярних чисел.   
Дуже поширений спосіб, в якому люди використовують єдину шкалу цінностей у різних людських уподобаннях. Фон Нейман і Моргенштерн показали, що якщо значення може бути виміряне за допомогою єдиної скалярної метрики, то різноманітні математичні операції можуть бути  
виконуватись і використовуватись як основа для «раціонального рішення». Тепер багато зусиль спрямовується на застосування цього підходу інженерії як засобу для точного визначення мети (систем) системи і цілей. В ідеалі бажано створити і вибрати оптимальне проектування серед усіх можливих варіантів дизайну.

2. Коли неможливо побудувати утиліту фон Неймана-Моргенштерна, система може використовуватися для визначення системних цілей і переваг. Для систем, цілі яких можуть бути чітко визначені у грошовому вираженні прибутку. Однак для будь-якої системи, в якій прибуток не є основною метою, то деякий інший  
скалярний показник може бути вибраний і використаний як єдиний показник значення для цієї системи.

3. Специфікація вимог повинна використовуватись, якщо це практично можливо під час проектування системи.  
Це випливає з принципу 3, де вимоги поступово визначаються як  
дизайн дозріває. Формулювання вимог занадто рано призводить до непотрібних обмежень при проектуванні системи і може призвести до відмови або порушення системних обмежень під час  
розвитку.

Системні моделі є важливим інструментом інженерії систем, як зазначено в підпринципі 4 (б). Системні моделі забезпечують комплексне знання системи та системного середовища  
в цілому. Моделі можуть бути формальними або неформальними (у свідомості індивідів). Для вдосконалення систем інженерія вимагає все більшого використання відповідних формальних моделей, які мають специфічне використання. Будівництво формальних моделей заради самого себе недопустиме, оскільки відволікає час і ресурси від корисних  
цілей. Всі формальні моделі повинні мати специфічні, відомі способи використання, які варто створити і підтримувати.

1. Інженерія систем максимізує використання моделей для представлення, підтримки та генерування  
знання. Системні моделі забезпечують інтегровані бази знань системи. Між іншим, ці моделі забезпечують транспортне середовище для передачі інформації на рівні системи  
протягом всього життєвого циклу системи.

2. Представлення на системному рівні повинні включати як мінімум ті, що стосуються вартості, наміру, дизайну,  
невдачі, продуктивність, поведінка та агентство. Ці типи системних моделей надають цінну інформацію з різних аспектів  
системного рівня. Звичайно, сама система є повним представництвом системи. Моделі, охоплюючи повний обсяг системи, забезпечують лише частковий вигляд систем. Моделі вартості представляють переваги зацікавлених сторін, в ідеалі використовуючи єдину скалярну метрику.  
Моделі наміру втілюють переваги моделей цінностей у більш специфічні  
заяви про намір для системи, в ідеалі вказані як обмеження на змінні стану через деякий час. Моделі наміри вказують, що система "повинна робити" на відміну від того, що дійсно створюється системою. Два типи моделей наміру були визначені на сьогоднішній день: офіційна концепція операцій і цільова функція. Дизайнерські моделі представляють розроблену систему, на відміну від намірів для системи.  
Інформація від моделей наміру може бути зіставлена ​​з розробленими моделями шляхом зіставлення загальних змінних стану та обмеження між двома типами моделей. Розроблена система спрямована на досягнення цілей, визначених намірами системи. Дизайнерські моделі включають «моделі фізичного стримування», які являють собою компоненти, існуючі всередині інших компонентів, такі як існуючі підсистеми всередині фізичної форми-системи в цілому. Спрямовані графіки можуть представляти абстрактні взаємодії системного рівня як інтегрованих моделей дизайну. Моделі відмов являють собою механізми, за якими компоненти проектної моделі виходять з ладу і їх  
ефекти поширюються через систему, або за допомогою яких порушуються наміри. Моделі дизайну є відправною точкою для створення моделей відмов дизайну. Однак невдачі  
часто створюють нові шляхи, які не представлені в номінальних моделях проектування, наприклад, електричних коротких замикань або вибуху. При цьому моделі відмов більше описують повні уявлення системи, ніж номінальні моделі. Інші моделі відмов на основі намірів, шляхом оцінки шляхів порушення наміру за допомогою зверху вниз  
ієрархії невиконання цілей. Моделі продуктивності представлені в різних типах. Основні типи, описані тут, не є  
моделями моделювання продуктивності. Моделі поведінки є уявленнями, які імітують поведінку системи. Вони можуть включати  
абстрактні моделі, такі як автомати, але також можуть включати часові області моделювання, що варіюються від суто програмних моделей без «реального» обладнання або програмного забезпечення. Дані, отримані з використанням цих моделей, імітують більшу чи  
меншою мірою фактичну поведінку системи. Агентські моделі є уявленнями про «агентів», які керують, проектують, будують, тестують і аналізують систему. До них належать представництва організацій та окремих осіб пов'язані з цими видами діяльності. Моделі динаміки системи забезпечують структуру моделювання для захоплення організаційної взаємодії з системою або системою проектування. Моделі агентства необхідні для опису критичних атрибутів та продуктивності організацій, що створюють системи. Моделі відмов являють собою механізми, за якими компоненти проектної моделі виходять з ладу і їх  
ефекти поширюються через систему, або за допомогою яких порушуються наміри. З багатьох ефекти відмови поширюються по тих же шляхах, які існують в номінальному проекті.

1. Системне проектування повинно забезпечувати проектування та представлення системи. Це пов'язано з моделюванням системи, як це обговорювалося в стратегії 3 і субпринципі 4 (б).

2. Системне проектування має одночасно, з номінальною конструкцією системи, також адресу проектування системи для пом'якшення невиконання цілей.

3. Інженерні системи розгортають пасивні та активні засоби контролю змінних стану всередині системи з урахуванням відповідних обмежень для досягнення відповідної мети. Інженерні системи повинні враховувати всі доступні засоби для досягнення системних цілей.  
Контроль змінних стану може бути досягнутий шляхом забезпечення пасивного контролю системи фізики, такі як зі структурами, або активний контроль через відкрите або замкнуте управління  
систем.  
4. Системне проектування має використовувати і розширювати класичні теорії управління поняттями стану оцінювання та державний контроль для оцінки здатності системи досягати цілей. Застосування теорії керування є невід'ємною частиною розробки та аналізу системи  
обговорюється в підрозділі 5 (б). Застосовуються концепції оцінки та контролю стану основою для визначення показників продуктивності системи для тих частин системи, на які поширюється система  
активного контролю.

Стратегія 7: Стратегії знань

Стратегії знань спрямовані на вирішення людських пізнавальних і соціальних факторів в інженерії складних систем (постулат 4 і принцип 6). До них відноситься той факт, що організації та установи є центрами формування та підтримки знань. У певному сенсі  
організації «знають» більше, ніж будь-яка особа в організації.

1. Інженерні системи повинні використовувати існуючі джерела знань про систему. Існує багато джерел знань про систему в рамках розробки або організація операцій.

2. Системна інженерія повинна прийняти мінливість людської інтерпретації прийнятної і очікуваної поведінки системи. Системні організації - це соціальні структури, для яких важливі соціологічні принципи.  
3. Інженерні системи повинні моделювати взаємодію системи і організації для виявлення інформаційних прогалин, бар'єрів та резервуарів. Системну інженерію треба розуміти, як соціальну структуру організації..

Стратегія 8: Інтелектуальні стратегії

Прогностичні стратегії спрямовані на прогнозування різноманітних майбутніх подій та їх наслідків для проекту будівництва системи, а також самої системи (постулат 7 і принципи 1, 3, 4, 5, 7 і 9). Вони включають прогнозування вартості та графік інформації для управління проектом. Всі ці методи використовують імовірнісні  
підходи для вирішення невизначеностей прогнозування, роблячи ймовірнісні методи центральним аспектом  
інженерних систем.

1. Системи інженерії використовують прогностичні моделі продуктивності, надійності, вартості.

2. Системи інженерного прогнозування включають оцінки невизначеності. Всі прогнози є невизначеними і тому вимагають оцінки цих невизначеностей.

2.4 Гіпотези інженерних систем

Гіпотези є твердженнями, які учасники консорціуму обговорюють і можуть вважати перевіреними (або, можливо, спростованими) через дослідження. Ці висловлювання викликають певну евристику.  
Поняття, знайдені в теорії складності, задаються в контексті практичного застосування (тобто з реальними кордонами і обмеженнями), а не в теоретичному нескінченному контексті. Кожна з гіпотез залежить від часу, що обговорювалось раніше в принципі 12.

Гіпотеза 1: Якщо рішення існує для конкретного контексту, то існує хоча б один ідеал.

Для даного системного контексту, який має системне рішення, існує ідеальний (оптимальний) або найкраще збалансований) дизайн системи для виконання місії. Бюджет, графік, рішення  
часові рамки, політика, право та організаційна культура визначають контекст.

Гіпотеза 2: Складність системи більша або дорівнює ідеальній складності системи.

У кожному оперативному контексті та часових рамках рішення мінімальна складність системи. Необхідною для виконання всіх системних виходів є оптимальна складність системи, а складність  
альтернативної конструкції системи рівна або перевищує ідеальну (тобто, оптимальну). Це простіше - краща гіпотеза. Мінімальна складність передбачає всі аспекти системи, як визначено  
в контексті опису гіпотези 1. Бути простим лише в одному контексті не обов'язково. Рішення мінімальної складності передбачає найкращий баланс. Деякі аспекти є більш складними, ніж альтернативи та інші аспекти можуть бути менш складним. Це схоже на твердження бритви Оккама. Як вважав Альберт Ейнштейн: "все має бути зроблено якомога простіше, але не простіше", що підкреслює потужну істину системного моделювання та системної інженерії.

Наслідки: Ця гіпотеза стверджує, що менша складність є кращою для даного контексту. Це також стверджує, що більш складне системне рішення, ніж оптимальне, може виконати системне застосування,  
але не настільки елегантно. Заплановані результати системи задовольняють всі її операційні потреби.

Гіпотеза 3: Ключові переваги зацікавлених сторін можуть бути представлені математично.

Системні інженери повинні розуміти і математично представляти переваги ключових зацікавлених сторін для прийняття рішень, які узгоджуються з уподобаннями зацікавлених сторін і до них  
досягти системних цілей. Це також є основою для перевірки продуктивності системи.

Наслідки: Модель системної вартості повинна бути конструктивною для даної системи та зацікавлених сторін.

Гіпотеза 4: Реальна фізична система є досконалою моделлю системи

Ця гіпотеза дає уявлення про ідею, яка вже давно підтримується серед статистичне моделювання. Фізична система є єдиною повною, повною або досконалою моделлю системи. Відзначимо також, що копії систем фізично не ідентичні. Таким чином, фізична система представляє себе лише однаково, а не інші фізичні копії системи.

Наслідки: Це є математичним доказом ідеї, яка вже давно знайома  
при статистичному моделюванні. Досконала модель, будучи самою системою, означає, що всі інші моделі обмеження повинні бути визнані. Існують різні системні моделі, які можуть показувати різні  
аспекти системи, але жодна модель системи не може показати всю систему. Крім того, одна копія фізичної системи не ідентична іншій копії системи. Таким чином, варіації в копіях однієї фізичної системи можна очікувати при різних рівнях допуску залежно від конструкції  
і підходів до виготовлення.

Лекція №5.

**ФУНКЦІОНАЛЬНО-СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД**

* 1. Структурність та організованість системи

Будь-яка система певним чином впорядкована і організована. З організації системи випливає її структура, тобто внутрішня форма системи, що включає спосіб взаємозв’язку елементів системи та їх взаємодію.

Структура – це лише один з аспектів її форми або внутрішньої організації. Структура притаманна кожній системі, хоча будь-яка з систем має свою специфіку, яка залежить від природи складових частин. Структура зв’язує ці частини, що приводить до появлення системних властивостей. Стійкість структури є важливим проявленням самої системи. Отже, структура – це внутрішня будова і спосіб взаємодії елементів системи , а також необхідна умова існування системи.

Структуру системи можна описати такими характеристиками або ознаками:

* кількість зв’язків т характер взаємодії елементів системи;
* інтенсивність зв’язків (їх частота, що припадає на один елемент);
* кількість зовнішніх зв’язків.

Найбільш поширеними структурами є:

* лінійна;
* кільцева;
* сотова;
* зіркова;
* ієрархічна;
* змішана.

Організація системи, по-перше, відображає міру досконалості структури системи, а, по-друге, є процесом функціонування, розвитку системи. Протилежним організованості є поняття ентропії. Система та її структура знаходяться в безперервному процесі становлення та набуття нових якостей. По-третє, організованість системи проявляється в функціональному аспекті, що передбачає збереження системи та її основних функцій. Елементи системи в процесі її розвитку набувають нових якостей і функцій.

Координація системи – це певна узгодженість, підігнаність компонент цілого один до одного. Організованість системи проявляється також у такій її ознаці як ієрархічність структури.

Таким чином, сутність організованості системи виявляється в наявності її структури як способу взаємодії елементів та в постійному вдосконаленні, впорядкованості структури.

* 1. Функціональність системи

Система може виникнути та існувати за умови знаходження її властивостей в межах умов її збереження, тобто коли частини відповідають цілому. Таке відношення частин до цілого є функцією системи, яку в системному її розумінні можна визначити як зовнішній вияв властивості і внутрішнього змісту елементу, що спрямовані на збереження та розвиток системи.

Функціональна залежність виявляється:

* між окремими елементами системи;
* між елементом і системою в цілому;
* між системою та іншою більшою системою, до складу якої входить перша система.

Важливою ознакою функцій елементів є їх доцільний характер по відношенню до системи.

Система зберігає цілісність своєї структури і спрямованість свого руху лише за наявності в ній регуляційних процесів. Згідно з принципом Ле-Шательє, система лише тоді є системою, коли в її структурі в умовах впливу зовнішніх сил виникають процеси, які спрямовані на протидію цим силам і на збереження існуючого стану системи.

Саморегуляція – прагнення до такого стану узгодженості властивостей елементів, при якому б всі вони набували функціонального доцільного характеру стосовно головної функції системи. Таке прагнення проявляється в адаптації, тобто в оптимальній саморегуляції системи.

Функціональна система являє собою динамічну взаємодію організму з середовищем. Властивість функціональності системи означає, що умовою існування системи та обов’язковим її атрибутом є наявність функцій – внутрішньосистемних, загальносистемних та зовнішніх.

Стійкість системи характеризується гомеостазисом (незмінністю стану). Безвідмовність системи – це здатність системи виконувати покладені на неї функції в потрібний момент часу при заданих умовах.

* 1. Відмежованість системи і середовища

Існують дві точки зору на середовище:

а) середовище – це зовнішнє оточення системи, все те, що знаходиться (існує) поза системою;

б) систему оточують внутрішнє і зовнішнє середовища.

В цілому, вважають, що система починається там, де спостерігається відмежування від оточуючого середовища. Дуже складно визначити межі складної, високоорганізованої, відкритої системи. У цьому ипадку відмежованість слід розглядати як ступінь автономності головних характеристик (ознак) системи. Види відмежованості:

* речовинна відмежованість;
* просторова або топологічна відмежованість;
* структурна відмежованість;
* функціональна відмежованість.

Чим більша кількість та інтенсивність зв’язків елемента, тим він тісніше входить до системи і, відповідно, межа системи проходить там, де зв’язки відсутні або ж їх кількість та інтенсивність мінімальна. Більшість систем не має границі, яка б однозначно відокремлювала їх від зовнішнього середовища.

З поняттям відмежованості нерозривно зв’язано поняття відкритості системи. Чим менш відкритою є система, тим більше вона відмежована від середовища і навпаки. При цьому відкритість системи ідентифікується за функціональною ознакою.

Середовище будь-якої системи є інша, вища система. Кожна система при такому підході розглядається як підсистема більшої системи і саме ця більша система і буде виконувати роль середовища для меншої системи. Однак, системна організованість світу в реальності не має такої чіткої системної структурованості та ієрархії. Тому варто розглядати середовище конкретної системи як неорганізовану або недостатньо організовану сукупність об’єктів, явищ, процесів, що безпосередньо оточують систему та впливають на неї.

Взаємодію системи з середовищем можна характеризувати такими положеннями:

1. Середовище постійно впливає на систему, яка пов’язана з ним багатообмінними процесами;
2. Необхідною умовою життєдіяльності систем є наявніть середовища, з якого система отримує речовину, енергію інформацію.
3. Вплив середовища на систему неоднозначний: активний або пасивний, сприятливий або несприятливий.
4. Середовище може бути неорганізованим (стохастичним), організованим або мати змішаний характер.
5. Система впливає на середовище через свої зовнішні функції, які задаються метою її розвитку (існування).
6. Система використовує середовище як джерело існування та як утилізатор продуктів своєї життєдіяльності.
7. В процесі взаємодії системи з середовищем змінюються межі системи.

Адаптаційні процеси сприяють існуванню системи, якщо зберігається певна рівновага між системою і середовищем. Рівновага порушується у випадках агресивності системи або середовища.

Одним із видів взаємодії системи і середовища є конвергенція, яка найчастіше спостерігається в умовах організованого середовища. Умови існування конвергенції:

* спільне середовище існування двох систем;
* відсутність суперечностей, протилежностей між системами;
* спільність і несуперечність цілей розвитку систем;
* змістовна однорідність систем.

Лекція №6.

**МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ**

6.1 Сутність системного аналізу

Термін ***«системний аналіз»*** переважно використовується для характеристики процедури проведення системного дослідження, що полягає в розчленуванні проблеми на її складові, які доступніші для вирішення, у використанні адекватних спеціальних методів для розв’язання окремих підпроблем і, зрештою, в об’єднанні часткових рішень таким чином, щоб проблема була вирішена загалом.

Системний аналіз наприкінці ХХ ст. стає загальним світоглядом, який використовують спеціалісти у різних галузях.

Системний аналіз грунтується на таких *методологічних засадах:*

− органічна єдність об’єктивного та суб’єктивного в процесі наукового дослідження;

− урахування структурності системи, що визначає цілісність і стійкість її характеристик;

− урахування динамізму системи;

− міждисциплінарний характер системних досліджень;

− органічна єдність формального та неформального при проведенні аналізу.

6.2 Принципи системного аналізу

У сучасних умовах системний аналіз грунтується на реалізації певної сукупності системних принципів, до яких належать такі:

*1. Принцип оптимальності* – це знаходження варіанта рішення, який є найкращим за комплексом показників для заданих умов.

*2. Принцип емерджентності* виражає таку властивість системи: чим більша система і чим більша різниця між розмірами частини та цілого, тим вищою є імовірність, що властивості цілого дуже відрізняються від властивостей частин.

*3. Принцип системності* передбачає підхід до об’єкта як до комплексного утворення, системи, що представлена сукупністю взаємозв’язаних часткових елементів (функцій), реалізація яких забезпечує досягнення певного ефекту в мінімальні терміни, з мінімальними витратами ресурсів тощо.

*4. Принцип ієрархії* – це тип структурних відносин у складних багаторівневих системах, які характеризуються впорядкованістю, організованістю взаємодії між окремими рівнями по вертикалі.

*5. Принцип інтеграції* передбачає, що дослідження спрямовуються на вивчення інтегративних властивостей і закономірностей. Інтегративні властивості проявляються в результаті сполучення елементів з утворенням цілого, а також сполучення функцій у часі та просторі.

*6.* *Принцип формалізації* спрямований на отримання кількісних і комплексних характеристик об’єкта і його елементів.

6.3 Етапи системного аналізу

У загальному вигляді системний аналіз складається з таких процедур:

• формулювання проблеми;

• ідентифікація призначення системи;

• ідентифікація змінних і взаємозв’язків між ними;

• ідентифікація функцій і структури системи;

• ідентифікація оточення (зовнішнього середовища) системи;

• генерація та визначення альтернативних потоків;

• оцінювання ресурсів, необхідних для реалізації можливих варіантів;

• визначення наявності ресурсів;

• оцінка ефективності варіантів і вибір прийнятної альтернативи;

• реалізація (впровадження) обраної альтернативи та коригування дій.

Етапи системного аналізу можна подати наступним чином [8]:

***1-й етап.*** Аналіз проблеми.

***2-й етап.*** Визначення системи.

***3-й етап.*** Аналіз структури системи.

***4-й етап.*** Формулювання загальної цілі та критерію системи.

***5-й етап.*** Декомпозиція цілі, виявлення потреби у ресурсах і процесах.

***6-й етап.*** Виявлення ресурсів і процесів, композиція цілей.

***7-й етап.*** Прогноз та аналіз майбутніх умов.

***8-й етап.*** Оцінка цілей і засобів.

***9-й етап.*** Відбір варіантів.

***10-й етап.*** Діагноз існуючої системи.

***11-й етап.*** Розроблення комплексної програми розвитку.

***12-й етап.*** Проектування організації для досягнення цілі.

6.4 Методи системного аналізу

У системному аналізі використовується велика кількість методів, кожен із яких має свої переваги і недоліки, а також сферу застосування стосовно як типу об'єкта, так і етапу його дослідження.

Усі методи у системному аналізі поділяються на такі групи:

1) **неформальні методи:** методи «мозкової атаки», метод сценаріїв, метод експертних оцінок, метод «Дельфі», діагностичні методи, морфологічні методи;

2) **графічні методи:** метод дерева цілей, матричні методи, сіткові (мережеві) методи;

3) **кількісні методи:** методи економічного аналізу, статистичні методи;

4) **методи моделювання:** кібернетичні моделі, описові моделі, нормативні операційні моделі (оптимізаційні, імітаційні, ігрові).

Розглянемо методи системного аналізу більш детально.

**Методи «мозкової атаки»**

Основна мета методів даного типу − пошук нових ідей, їх широке обговорення і конструктивна критика. Гіпотеза полягає у припущенні, що серед великої кількості ідей є щонайменше кілька прийнятних.

**Метод сценаріїв**

Це методи підготовки та узгодження уявлень про проблему або аналізований об'єкт, викладені у письмовому вигляді.

**Методи експертних оцінок**

Основою цих методів є різні форми експертного опитування з наступним оцінюванням і вибором найбільш кращого варіанта.

**Метод «Дельфі»**

На відміну від традиційних методів експертних оцінок метод Дельфі передбачає повну відмову від колективних обговорень. Це робиться для того, щоб зменшити вплив таких психологічних факторів, як приєднання до думки більш авторитетного фахівця, небажання відмовитися від публічно висловленої думки, проходження за думкою більшості.

Основа методу − зворотний зв'язок, ознайомлення експертів з ситуацією за допомогою моделі.

**Діагностичні методи**

Є прийомами обстеження системи, її підсистем з метою удосконалення форм і методів її роботи.

**Морфологічні** **методи**

Основна ідея морфологічних методів − систематично знаходити все мислимі варіанти вирішення проблеми чи реалізації системи шляхом комбінування виділених елементів або ознак. Цей підхід був розроблений і застосований швейцарським астрономом Ф. Цвіккі і довгий час був відомий як метод Цвіккі.

**Матричні методи**

Матричні форми подання та аналізу інформації широко використовуються на різних етапах системного аналізу як допоміжний засіб для представлення та аналізу систем та їх структур.

**Сіткові (мережеві) методи**

Сіткові методи є найбільш наочним і зручним засобом відображення динамічних, що розвиваються у часі, процесів, їх аналізу та планування із включенням елементів оптимізації. Використовуються головним чином на етапі побудови програм розвитку.

Для проведення системного аналізу важливим є використання таких загальнонаукових методів.

**Абстрагування** − метод, який дає змогу переходити від конкретних питань до загальних понять і законів розвитку.

Зміст цього методу полягає в суттєвому відволіканні від несуттєвих властивостей, зв’язків, відносин, предметів та в одночасному виділенні, фіксуванні певних сторін цих предметів, що цікавлять дослідника.

**Конкретизація** − метод дослідження предметів у всій їх різноманітності, у якісній багатогранності реального існування на відміну від абстрактного вивчення предметів.

**Ідеалізація** – конструювання подумки об’єктів, яких немає в дійсності або які практично нездійсненні. Мета ідеалізації: позбавити реальні об’єкти деяких притаманних їм властивостей і наділити (подумки) ці об’єкти певними нереальними і гіпотетичними властивостями.

**Агрегування** – побудова цілісного об’єкта з окремих елементів.

**Декомпозиція** – науковий метод, який передбачає заміну вирішення завдання вирішенням серії менших завдань; процес розділення, що дозволяє розглядати будь-яку досліджувану систему як складну, що складається з окремих взаємопов'язаних підсистем, які, в свою чергу, складаються із елементів.

Існують також такі важливі процедури системного аналізу: **аналіз, синтез, індукція** та **дедукція**, які будуть розглянуті нижче

Отже, основними етапами системного аналізу є наступні.

1. Визначення цілей:  
   • якщо правильні цілі не визначені, проблема не буде вирішена!  
   • консультуватися з іншими;  
   • використовувати мультидисциплінарну команду;  
   • система може мати декілька цілей;  
   • визначити свого споживача;  
   • встановити потреби споживача;   
   • вибрати міру ефективності;  
   • обговорити з споживачем мету проекту  
   • гарантувати, що споживач чітко розуміє та погоджується з метою проекту.
2. Кількісна оцінка цілей:  
   • визначити та написати цільову функцію - це кількісне вираження цілей або завдань проекту;

• цільова функція може приймати форму , де  - незалежні змінні, що представляють значення параметрів під контролем системного аналітика;  
• необхідно визначити набір обмежень; набір обмежень складається з рівнянь, які визначають область можливих рішень.

1. Розробка моделі системи

• найчастіше це відповідальність системного аналітика або інженера;  
• мати на увазі, що модель є абстракцією системи;

• іноді використовується два етапи: 1) модельний розв'язок - спрощуючий етап, де компоненти системи моделюються і аналізуються як підсистеми. Це може бути корисним для кращого розуміння системи. 2) інтеграція моделі - моделюється вся система (наприклад, компоненти підсистеми інтегровані)

• існує делікатний баланс між деталізацією моделі та можливістю ефективного та ефективного аналізу режиму. Моделювання деталей може запропонувати кращу реальність при збільшених обчислювальних витратах. За певних обставин проста модель може виявитися більш цінною, ніж більш складна модель. Цілі проекту повинні диктувати необхідний рівень деталізації.

• багато типів моделей доступні для використання;

• тип обраної моделі залежить від системи, цілей, перспективних (часових) моделей;

• слід вибрати найбільш «відповідну модель» .

1. Оцінка альтернатив

• метою є знайти оптимальне рішення;

• визначити альтернативні рішення;

• зібрати якомога більше інформації про альтернативні рішення - може вимагати пошуку літератури, отримання технічних даних та даних про вартість обладнання, експлуатації, технічного обслуговування та іншої відповідної інформації;

• виконувати аналіз чутливості для визначення відповіді на зміну параметрів моделі

• верифікація - обрана модель відтворення комп'ютерного коду;

• валідація - модель системи вірно відтворює реальну систему  
5. Детальний дизайн і розробка

• завершити проектування та необхідні дії.

Оптимальне рішення - поєднання ресурсів, що найкраще відповідає поставленим цілям і задовольняє всі обмеження.

Типи моделей:

• культові - фізичні моделі, які є зображеннями реального світу; розміри зазвичай масштабуються вгору або вниз; наприклад, моделі автомобілів можуть бути побудовані і випробувані в аеродинамічній трубі

• аналогова - модель, яка замінює один набір властивостей на інший; може бути знаковим або математичним; електричний опір часто використовується як аналог тертя рідини, що протікає в трубі; Цей підхід не так широко використовується, як колись - цифрові комп'ютери дозволили розробити інші методи моделювання, які замінили аналогові моделі

• стохастично - ймовірнісна модель, що використовує випадковість для врахування незмірюваних факторів (наприклад, погоди)  
• детермінована - модель, яка не використовує випадковість, але використовує явні вирази для відносин, які можуть або не можуть включати в себе часові темпи змін;

• дискретна - модель, коли змінні стану змінюються поступово, а не постійно з часом (наприклад, кількість вимірювальних прикладів на складі); може бути детермінованою або стохастичною;

• безперервна - модель, змінні стану якої постійно змінюються з часом (наприклад, тиск у вимірювальній лінії); зазвичай використовуються набори диференціальних рівнянь; необхідні початкові умови (важко отримати для деяких систем!);

• комбінована - модель, при якій деякі змінні стану постійно змінюються, а інші змінюються у часи подій;   
• математично - абстрактна модель, зазвичай написана у формі рівняння;

• об'єктно-орієнтовані - використовувати об'єкти, які є абстракціями об'єктів реального світу і розвивати відносини і дії між об'єктами; приходить з області штучного інтелекту  
• евристика - евристика (правила) використовується для моделювання системи; приходить з області штучного інтелекту  
  
.

Лекція №7.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

7.1 Поняття моделі та моделювання. Властивості та класифікація моделей.

Натурний експеримент, тобто дослідження властивостей та поведінки об’єкта керування в певних умовах з використанням самого об’єкту, є важливою складовою у сферах проектування систем та їх управління. Однак у багатьох випадках натурне моделювання є неможливим або недоцільним. Наприклад, експерименти на об’єкті керування при управлінні технологічними процесами у режимі реального часу, проектуванні складних систем та пристроїв можуть бути економічно недоцільні або неможливі через неготовність самого об’єкту.

Модель (від лат. *modulus* – міра, зразок, норма) – це об’єкт-замінник, створений з метою відтворення при певних умовах суттєвих властивостей об’єкта-оригіналу. Модель може бути представлена фізичним об’єктом, подібним до оригіналу, або описом об’єкта у вигляді математичних формул, тексту, комп’ютерної програми.

*Метою моделювання* є здобуття, обробка, представлення і використання інформації про об'єкти, які взаємодіють між собою і зовнішнім середовищем; модель тут виступає як засіб пізнання властивостей і закономірностей поведінки об'єкту. Основним призначенням моделі в задачах управління є прогноз реакції об’єкту на керуючі впливи. Крім того, моделі використовуються для дослідження об’єкта, аналізу його чутливості.

Основні властивості моделей:

* цілеспрямованість;
* скінченність;
* спрощеність;
* повнота;
* адекватність.

  Цілеспрямованість моделі полягає в тому, що вона завжди будується з певною метою. Ця мета має вплив на те, які властивості об’єктивного явища вважаються істотними, а які – ні. Модель є проекцією об'єктивної реальності під певним кутом зору. Наприклад, моделі вимірювальної інформаційної системи як інформаційної, фінансової та енергетичної системи будуть зовсім різними. Інколи, залежно від мети, можна отримати ряд проекцій об'єктивної реальності, що вступають у протиріччя. Це характерно, як правило, для складних систем, в яких кожна проекція виділяє суттєве для певної мети з безлічі несуттєвого. *Задача моделювання* полягає в тому, що для заданого об’єкта потрібно підібрати такий опис, який у повній мірі відображав би оригінал з точки зору заданої мети моделювання.

Скінченність моделі визначає те, що модель відтворює лише скінчену кількість властивостей та відношень, і через це модель завжди є більш простою, ніж оригінал.

Повнота моделі полягає в тому, що вона має відображати всі істотні з точки зору мети моделювання властивості оригіналу.

Необхідною умовою для переходу від дослідження об’єкта до дослідження моделі і подальшого перенесення результатів на об’єкт дослідження – вимога адекватності моделі і об’єкта. *Адекватність –* це відтворення моделлю з необхідною повнотою всіх властивостей об’єкта, важливих для цілей даного дослідження Це найголовніша властивість моделі, яка визначає можливість її використання. Оскільки будь-яка модель простіша за оригінал, ніколи не можна говорити про абсолютну адекватність, при якій модель за всіма характеристиками відповідає оригіналу. Модель називається *ізоморфною* (однаковою по формі), якщо між нею і реальною системою існує повна поелементна відповідність, і *гомеоморфною*, якщо існує відповідність лише між найбільш значними складовими частинами об'єкту і моделі.

*Моделювання* включає створення, дослідження та використання моделей об’єктів. Методи моделювання широко використовуються в різних сферах людської діяльності, особливо в сферах проектування і управління, де основними є процеси ухвалення ефективних рішень на основі інформації, що отримується. *Метою моделювання* є здобуття, обробка, представлення і використання інформації про об'єкти, які взаємодіють між собою і зовнішнім середовищем, а модель тут виступає як засіб пізнання властивостей і закономірностей поведінки об'єкту.

*Теорія моделювання* є розділом науки, що вивчає способи дослідження властивостей об'єктів (оригіналів) на основі заміщення їх іншими об’єктами (моделями). Вирізняють натурні, фізичні, мовні та математичні моделі.

7.2 Математичні моделі

Зупинимося на одному з найбільш універсальних видів моделювання – математичному, що ставить у відповідність модельованому фізичному процесу систему математичних співвідношень, вирішення якої дозволяє отримати відповідь на питання про поведінку об'єкту без створення фізичної моделі, яка часто є дорогою і малоефективною. Отже, *математичною моделлю* називається сукупність математичних співвідношень, рівнянь, нерівностей, що описують основні закономірності, властиві досліджуваному процесу, об'єкту або системі.

На підставі різних критеріїв класифікації, виділяють наступні види моделей:

* динамічні або статичні;
* детерміновані або стохастичні;
* неперервні, дискретні або дискретно-неперервні;
* лінійні чи нелінійні;
* з розподіленими або зосередженими параметрами;
* аналітичні, імітаційні чи комп’ютерні.

Динамічні моделі відтворюють поведінку нестаціонарних об’єктів, що змінюються у часі. Статичні моделі описують стан об’єкта у деякий момент часу. Такі моделі розробляються для стаціонарних об’єктів, зміни яких у часі не є істотними стосовно періоду розробки та використання моделі.

Детерміновані моделі використовують для опису процесів, що не містять істотної випадковості. Наприклад, поведінку більшості технічних систем можна охарактеризувати за допомогою так званих фазових змінних – фізичних величин типу потоку і потенціалу. При цьому доцільно виділити в об'єктах моделювання досить великі елементи, що розглядаються як неділимі одиниці. Закони функціонування елементів системи задаються компонентними рівняннями, що зв'язують різнорідні фазові змінні**.** Загальність опису процесів, що відбуваються в різних технічних системах, дозволяє виділити декілька типів елементів: *R* – елемент розсіювання енергії; *С* і *L* – елементи накопичення енергії. Поєднанням цих простих елементів і джерел фазових змінних отримують еквівалентну схему технічної системи будь-якої складності і її математичну модель.

Для моделювання нестаціонарних імовірнісних процесів використовують стохастичні моделі. Якщо об’єкт моделювання стаціонарний і піддається випадковим впливам, то модель називають статистичною. Наприклад, для моделювання функцій перетворення вимірювальних пристроїв досить скористатися детермінованим способом опису, тоді як для аналізу похибок, оцінки інформаційних характеристик необхідно застосувати ймовірнісно-статистичні методи.

Неперервні моделі представляють системи з неперервними процесами, а дискретні моделі відображають поведінку систем з дискретними станами. Дискретно-неперервні моделі використовуються, коли на об’єкті виділяються обидва типи процесів.

Якщо при описі моделі використовуються лише лінійні математичні конструкції (наприклад, лінійні алгебраїчні рівняння), то модель називають лінійною, інакше – нелінійною.

Моделі з розподіленими параметрами описують просторове поширення явищ, а моделі з зосередженими параметрами нехтують просторовою складовою. Динамічні неперервні детерміновані моделі з розподіленими параметрами використовують апарат диференціальних рівнянь у частинних похідних, а з зосередженими параметрами – звичайних диференціальних рівнянь.

Для аналітичних моделей властиво те, що процеси функціонування об’єкта представляються у вигляді аналітичних математичних залежностей: алгебраїчних, диференціальних, інтегральних рівнянь або їх систем, логічних умов. Дослідження аналітичних моделей можливе за допомогою методів:

* аналітичних;
* чисельних;
* якісних.

Аналітичні методи полягають у пошуку явних залежностей між характеристиками. Однак такі залежності можливо отримати лише для невеликої кількості простих моделей, як правило, лінійних. Інколи виконують спрощення моделей для отримання можливості вивчити хоча б загальні властивості об’єкта.

Чисельні методи дозволяють отримати розв’язок аналітичних моделей, для яких застосування аналітичних методів неможливо або недоцільно. Розв’язок чисельними методами здійснюється для конкретних вихідних даних і має додаткову похибку.

Якісні методи дозволяють зробити певні висновки по моделі, не маючи розв’язку у явному вигляді. Наприклад, такі методи використовуються у теорії автоматичного управління для оцінки ефективності різних варіантів систем управління.

Імітаційне моделювання передбачає представлення моделі у вигляді алгоритму та комп’ютерної програми, яка дозволяє відтворити поведінку об’єкту. *Імітаційні моделі* розглядаються як експерименти, що проводяться на комп’ютерах, з математичними моделями, що імітують поведінку реальних об'єктів. При цьому імітуються елементарні явища, що складають процес, зі збереженням їх логічної структури та послідовності у часі, що дозволяє отримати відомості про стан системи у певний момент часу та оцінити характеристики системи. Імітаційні моделі дозволяють вирішувати більш складні задачі, ніж аналітичні. Наприклад, вони дозволяють досить легко враховувати вплив випадкових факторів.

Традиційно під моделюванням на ЕОМ розумілося лише імітаційне моделювання. Але завдяки розвитку графічного інтерфейсу та графічних пакетів значного поширення набуло комп’ютерне структурно-функціональне моделювання, а також розпочалося використання комп’ютера з метою концептуального моделювання, наприклад для побудови систем штучного інтелекту.

Під комп’ютерною моделлю найчастіше розуміють:

* умовний образ об’єкта чи деякої системи об’єктів (або процесів), описаних за допомогою взаємозалежних комп’ютерних таблиць, схем, діаграм, графіків, малюнків, анімаційних фрагментів, гіпертекстів і т. ін., що відбивають структуру та взаємозв’язки між елементами об’єкта чи системи. Комп’ютерні моделі такого типу називають структурно-функціональними;
* окрему програму, сукупність програм чи програмний комплекс, що дає змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворювати   
  (імітувати) процеси функціонування об’єкта (системи об’єктів), що функціонує під впливом різних, як правило випадкових, факторів (імітаційну модель).

Інколи застосовується комбіноване (аналітико-імітаційне) моделювання, яке полягає в тому, що об’єкт декомпозується на окремі підсистеми. Для тих підсистем, для яких це можливе, використовуються аналітичні моделі, а для інших розробляються імітаційні моделі.

Розробка моделей поєднує в собі науку і мистецтво. На жаль, немає чіткого формального алгоритму, який би дозволив побудувати модель для будь-якого об’єкту. Тому можна висунути лише певні методичні рекомендації щодо розробки моделей.

Лекція №8.

**СТАТИЧНІ І ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМ**

8.1 Статичні характеристики

Робочі характеристики вимірювальних систем розділяються на дві групи:

а) статичні характеристики;

б) динамічні характеристики.

Якщо в приладах, які використовуються для вимірювання кількості, остання змінюється з часом або не змінюється, то характеристики цього приладу називаються "статичними характеристиками".

До статичних характеристик відносяться:

а) правильність;

б) точність;

в) чутливість;

г) лінійність;

д) відтворюваність;

е) повторюваність;

ж) роздільна здатність;

з) поріг;

і) дрейф;

к) стабільність;

л) допустиме відхилення;

м) діапазон або проміжок.

Це ступінь близькості, з якою зчитування наближається до істинного значення величини, що підлягає вимірюванню. Точність може бути виражена наступними способами:

a) точкова точність:

Така точність визначається тільки в одній конкретній точці шкали. Вона не дає ніякої інформації про точність в будь-якій іншій точці шкали.

б) точність у відсотках до масштабу:

Коли інструмент має рівномірний масштаб, його точність може бути виражена в діапазоні масштабу шкали.

c) точність як процент від істинного значення:

Найкращий спосіб уявити ідею точності полягає в тому, щоб вказати її в термінах істинного значення вимірюваної кількості. Точність: це показник відтворюваності, тобто з урахуванням фіксованого значення кількості, точність є мірою ступеня узгодження в межах групи вимірювань. Точність складається з двох характеристик:

a) відповідність:

Розглянемо резистор, що має справжнє значення, як 2385692, який вимірюється омметром. Але читач може читати послідовно, значення як 2,4 М внаслідок недоступності відповідного масштабу. Похибка, створена внаслідок обмеження читання шкали, є похибкою точності.

б) кількість значущих цифр:

Точність вимірювання отримують з числа значущих  
цифри, які використовуються для читання. Значущі цифри передають фактичну інформацію про величину і точність вимірювання кількості.  
Точність може бути математично виражена як:



де ,  – точність,  - значення -го виміру,  - середнє значення всіх вимірів.

Чутливість описує найменші змінювання вимірювальної змінної, на яку вимірювальний прилад реагує. Вона визначається як відношення змінювань вихідної величини до вхідної і математично описується як відношення приросту y до приросту x.

y

dy

dx

 x

Рис.

Таким чином, якщо калібрувальна крива є лінійною, чутливість приладу є нахилом калібрувальної кривої. Якщо калібрувальна крива не є лінійною, то чутливість змінюється.

Відтворюваність - це ступінь близькості, з якою дане значення може бути неодноразово виміряне. Вона визначається в значеннях шкали за певний період часу.

Повторюваність визначається як варіації шкали читання та випадкового характеру дрейфу. Дрейф можна розділити на три категорії:

a) Нулевий дрейф: якщо калібрування поступово зміщується внаслідок прослизання, постійного набору або через неналежне розігрівання електронних контурів, то виникає дрейф нуля.

б) Дрейф діапазону або дрейф чутливості: якщо існує пропорційна індікація по всьому масштабу, то дрейф називають дрейфом діапазону або дрейфом чутливості.

c) Зональний дрейф: у випадку, якщо дрейф виникає лише на частині шкали приладу, його називають зональним дрейфом.

Роздільна здатність: якщо вхід повільно збільшується від деякого довільного вхідного значення і знайдено, що вихідний сигнал взагалі не змінюється, поки не буде перевищений певний приріст, то це збільшення називається роздільною здатністю.

Поріг: якщо вхідний сигнал приладу збільшується дуже поступово від нуля, то існує деяке мінімальне значення, нижче якого не можна виявити зміну вихідного сигналу. Це мінімальне значення визначає поріг приладу.

Стабільність: це здатність інструменту зберігати свою продуктивність на протязі всього зазначеного терміну експлуатації.

Толерантність: максимально допустима похибка вимірювання задається в термінах деякого значення, яке називається толерантністю (розкид, зазор).

Діапазон або проміжок: мінімальне та максимальне значення величини, для якої використовується прилад, що призначений для вимірювання називається його діапазоном.

Динамічні характеристики: набір критеріїв, визначених для приладів, в яких швидко змінюється вхідний сигнал з часом, називається «динамічними характеристиками».

8.2 Динамічні характеристики

Основними динамічними характеристиками є:

1. швидкість відклику;  
   2) вимірювальне відставання  
   3) Правильність  
   4) Динамічна похибка

Швидкість відповіді (відгуку): визначається як швидкість, з якою вимірювальна система реагує на зміни вимірюваної кількості

Вимірювання відставання: це уповільнення або затримка реакції вимірювальної системи на зміни вимірюваної кількості. Існують вимірювальні лаги двох типів:

a) Тип затримки: у цьому випадку відповідь вимірювальної системи починається відразу після того, як відбулася зміна вимірюваної кількості.

б) Відставання часу затримки: у цьому випадку реакція вимірювальної системи починається після мертвого часу після введення вхідного сигналу. Достовірність визначається як ступінь, до якої система вимірювання вказує зміни величини вимірюваної величини без динамічної похибки.

Динамічна похибка: це різниця між справжнім значенням кількості, що змінюється з часом, та значенням, яке вказує система вимірювання, якщо не передбачається статична похибка. Її також називають похибкою вимірювання.

Лекція №9.

**ПЛАНУВАННЯ І УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ**

Для опису планування і управління в системах використовується обширний математичний апарат. Покажемо приклади планування і управління з використанням розділу математики, який називається дослідженням операцій (ДО).

9.1 Дослідження операцій в теорії систем

Операцією називається будь-який захід або система заходів, що об’єднаний (об’єднані) єдиним замислом і спрямований (спрямовані) на досягнення якої-небудь мети (в нашому випадку, – планування і управління в системах). В кінцевому рахунку задача зводиться до прийняття рішення в системі. Операція – загальний термін, який означає будь-яку цілеспрямовану дію. З операцією завжди асоціюється деякий суб’єкт або об’єкт, який формулює мету операції. Зрозуміло, що такий об’єкт повинен мати штучний інтелект. Поряд з суб’єктом повинен існувати досліджувач операції, що знаходить спосіб використання ресурсу, тобто можливостей оперуючої сторони в інтересах досягнення мети.

В ДО можна виділити три основні напрямки. Перший напрямок – формалізація процесу або явища та побудова моделі процесу (а не операції). З допомогою однієї і тієї ж моделі можуть вивчатись різні операції.

Другий напрямок – постановка завдання. Суб’єкт формулює мету операцію. Мета повинна бути зовнішнім фактором по відношенню до операції і, крім того, формалізована. Задача дослідника операції – провести аналіз невизначеностей, обмежень і сформулювати оптимізаційну задачу

 (9.1)

де  - елемент деякого нормованого простору , що визначається природою моделі,  - множина, яка може мати скільки завгодно складну природу, що визначається структурою моделі і особливістю лосліджуваної операції. Отже, задача ДО трактується як оптимізаційна задача.

Третій напрямок – розв’язання оптимізаційної задачі.

Успішне завершення задачі вимагає неформальних міркувань. Перевірка якості рішення, його відповідності початковій меті перетворюється в важливу задачу теорії.

В якості моделі операції розглядається деяка сукупність, що складається з:

а) суб’єкта , що формулює мету операцію;

б) запасу ресурсів для проведення операцій;

в) набору стратегій або способів використання операцій;

г) критерія – способу порівняння різних стратегій.

Мета операції може бути досягнута не єдиним чином і тут критерій служить для відбору найбільш економної стратегії. Обмеження розділяються на дві групи:

* фізичні;
* критеріальні.
  1. Типові оптимізаційні задачі
     1. Транспортна задача

Нехай в пунктах  знаходяться склади, на яких зберігаються товари в кількостях  відповідно. В пунктах  знаходяться споживачі товарів, яким необхідно поставити ці товари в кількостях, не менших ніж  відповідно. Позначимо через  вартість перевезення одиниці вантажу між пунктами  і .

Будемо досліджувати операцію перевезення споживачам товарів в кількостях, достатніх для того, щоб задовільнити потреби споживачів. Позначимо через  кількість товару, що перевозиться з пункту  в пункт . Для того щоб задовільнити запити споживачів, необхідно, щоб виконувалась мета операції

 (9.2)

та фізичні обмеження

. (9.3)

Виконання нерівностей (9.2) і (9.3) можна забезпечити нескінченним числом способів. Для цього сформулюємо правило відбору на основі деякого критерію

. (9.4)

Тепер задачу сформулюємо наступним чином: визначити величини , які задовольняють обмеженням (9.2), (9.3) і мінімізують функцію (9.4). Обмеження (9.3) є умовою балансу або закон збереження , тобто умова фізичного типу. Умова (9.2) є метою операцією, оскільки зміст операції в тому і складаються, щоб забезпечити запити. Зазначені умови складають, по суті, модель операції. Реалізуєма операція буде залежити від критерію, тобто від того, як вибирається спосіб для досягнення мети операції. Критерій може виступати як спосіб формалізації мети і як принцип відбору способу дії з числа допустимих.

9.2.2 Задача розподілу добрив

Розглянемо задачу розподілу обмеженої кількості добрив між посівами  різних сільськогосподарських культур. Припустимо, що урожайність  культури з номером  є нелінійною функцією від  - кількості внесених на одиницю площі добрив (рис. 9.1)







Рисунок 9.1 Розподіл урожайності від кількості внесених добрив

Тоді урожай культури номера  буде рівним  , де  - площа, що зайнята культурою номера . Будемо вважати, що сумарна площа фіксована, тобто

 (9.5)

де  - задане число, що описує загальну площу. Будемо також вважати, що продукція повинна бути отримана у визначеному асортименті, тобто

 (9.6)

де  - задані числа.

Введемо обмеження

 (9.7)

де  - сумарна кількість добрив.

Позначимо через  ціну одиниці продукції номера  , а через  - ціну одиниці добрив. Тоді сумарний прибуток від продажі продукту, за вирахуванням витрат на купівлю добрив, буде дорівнювати

 (9.8)

Можна розшукати такий спосіб розподілу земель, який максимізує функціонал (9.8) при обмеженнях (9.5)…(9.7). Величину  також вважаємо шуканою.

* + 1. Задача складання розкладу

Розглянемо задачу: знайти такий розподіл ресурсу і таке призначення черговості робіт, при яких сукупність робіт, що складають проект, будуть виконані за мінімальний час. Припустимо, що керівник проекту визначає перелік робіт  , необхідних для завершення проекту і потрібний ресурс для його виконання. Ресурс може бути різної природи. Це можуть бути люди (кількість робочої сили різної кваліфікації), обладнання, сировина, гроші тощо. Якщо об’єм потрібного ресурсу заданий, це означає, що заданим є деякий векторний норматив: кожній роботі поставлений у відповідність деякий вектор, який дає перелік об’ємівресурсу різної природи, що необхідні для завершення робіт. Однак, виконання робіт буває ускладнене багатьма обмеженнями:

а) обмеження логічного характеру, які диктують порядок виконання робіт;

б) обмеження об’єму ресурсу.

* 1. Узагальнення результатів

З точки зору математики, ми розглядаємо задачі математичного програмування. Транспортна задача – найпростіша задача лінійного програмування. Задача про розподіл добрив – задача нелінійного програмування. Третя задача про складання розкладу є задачею цілочисельного програмування.

Якщо є декілька критеріїв оптимізації, то маємо ситуацію невизначеності цілей. Подолати цю невизначеність формальними методами неможливо. Тут потрібні додаткові дослідження та гіпотези.

Якщо характер операцій є стохастичним, то математичний вигляд критерію

, (9.9)

де  - випадковий параметр з відомим законом розподілу,  - вектор конструкивних характеристик системи. Операція

 (9.10)

має зміст лише тоді, коли ми фіксуємо значення . Тоді, розв’язуючи задачу (9.10), отримуємо функцію , тобто кожному значенню  співпоставляємо значення , що є рішенням задачі (9.10). Значить, стратегія  є оптимальною стратегією, якщо ми знаємо . Для цього треба провести усереднення

 (9.11)

Ситуація виявляється більш складною, якщо мова йде про вибір параметрів конструкції або плану у випадку їх одноразового користування. У цьому випадку немає ніякого сенсу використовувати інформацію про статистичні характеистики. Тоді треба постулювати справедливість деякої гіпотези, вводити функцію ризику, оцінювати шанси тощо. Гіпотеза повинна формулюватись наступним чином: функція мети вибирається так, якби система призначена для багаторазового використання.

Лекція №10.

**ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ**

Рішення в складних системах у більшості випадків приймаються в умовах невизначеності. В дослідженні операцій розрізняють три види невизначеностей:

1. невизначеність цілей;
2. невизначеність знань про навколишнє середовище;
3. невизначеність дій реального противника або партнера.

10.1 Невизначеність цілей

Формалізація цілі є складною проблемою. Розглянемо нелінійну задачу оптимізації системи на прикладі розподілу добрив, де цільова функція має вигляд

 (10.1)

який по суті є комбінацією двох критеріїв: сумарної вартості продукції та витрат на її виробництво. Дослідник намагається знайти таку стратегію, яка максимізує прибуток і мінімізує витрати

, (10.2)

де функції  характеризують відповідно прибуток та втрати. Така задача, як правило, не має рішень.

Для зведення цієї задачі до стандартної задачі оптимізації, сформулюємо додаткові гіпотези, що не випливають з постановки задачі. Прикладом такої гіпотези є введення цільової функції

 (10.3)

Якщо ж критеріїв багато, наприклад,

 (10.4)

а ресурс для їх досягнення міститься в “одних руках”. Це типова задача будь-якого великого проекту. Реальна конструкція, наприклад, вимірювальної інформаційної системи буде складати компроміс між якостями цієї системи, які треба досягти. Яких якостей треба досягти спочатку важко сформулювати. Це є основою невизначеності цілей, що приводить до багатокритеріальності. Отже, невизначеність цілей вимагає залучення додаткових гіпотез для того, щоб сформулювати мету операції.

Зупинимось на найбільш поширених способах подолання невизначеності цілей шляхом вибору способів дії (або вектора ), який забезпечує виконання системи нерівностей (10.4) одночасно.

10.1.1 Лінійна згортка

Замість  окремих критеріїв  пропонується один критерій виду

 (10.5)

де  - деякі додатні числа, нормовані визначеним чином, наприклад,  Величини  показують, наскільки змінюється цільова функція при змінюванні критерію  на одиницю. Коефіцієнти  визначаються в процесі експертизи і відображають уявлення оперуючої сторони про зміст компромісу, який вона вимушена прийняти. Отже, зміст компромісу заключається в ранжуванні цілей, яке разом з призначенням вагових коефіцієнтів і є тою додатковою гіпотезою, яка дозволяє звести задачу з багатьма критеріями до задачі з єдиним критерієм, що визначається формулою (10.5).

10.1.2 Використання контрольних показників

Часто в задачах планування і проектування задається система нормативів  Це значить, наприклад, що параметри майбутньої конструкції повинні бути такими, щоб максимізувати функцію  при умовах 

В таких випадках цільову функцію зручно подати у вигляді

 (10.6)

і шукати вектор , який забезпечує максимальне значення . При заданому значенні вектора  величина  дає значення найгіршого з показників . Отже, умова  означає вибір такої системи конструктивних параметрів , яка максимізує відношення -го реально досягнутого значення критерія до його контрольного значення. Якщо значення  жорстко не задані, то вони можуть бути визначені в результаті стандартного опитування.

10.1.3 Найпростіший спосіб подолання невизначеності цілей

Припустимо, що критерії  повинні задовільняти обмеженням

 (10.7)

Нехай, наприклад, основним критерієм є . Тоді приходимо до однокритеріальної задачі  при умові (10.7). Схема подібної редукції до однокритеріальної задачі є найбільш простою, що широко використовується на практиці.

10.1.4 Введення метрики у просторі цільових функцій

Будемо вважати, що однокритеріальна задача вже розв’язана

 і в  -й задачі знайдений вектор з компонентами  , який дає максимальне значення критерію :

 (10.8)

Сукупність скалярних величин  визначає у просторі критеріїв деяку точку, яку ми назвемо точкою “абсолютного масимуму”. Якщо вектори  різні, то не існує такого вибору, який дозволив би досягнути цієї точки: точка  є недосягнутою у просторі критеріїв. Введемо тепер додатно визначену матрицю . Тоді скалярна величина

 (10.9)

визначає у просторі критеріїв деяку відстань від точки, що відповідає даному вектору , до точки “абсолютного максимума”.

10.1.5 Компроміси Парето

В попередніх підрозділах задача зводилась до однокритеріальної. Інший спосіб – скоротити множину початкових варіантів, тобто виключення з неформального аналізу ті варіанти рішень, які заздалегідь є поганими. Такий підхід сформулював у 1904 році Парето. Нехай зроблений вибір становить  і припустимо, що існує деякий інший вибір  такий, що для всіх критеріїв виконуються нерівності

 (10.10)

причому хоча б одна з нерівностей є строгою.

Очевидно, що вибір  є кращим, ніж . Тому всі вектори , що задовільняють (10.10), треба зразу ж виключити з розгляду. Є сенс проводити порівняння, тобто неформальний аналіз тільки тих векторів , для яких не існує  такого, що для всіх критеріїв задовільняються нерівності (10.10). Множину всіх таких значень  називають множиною Парето, а вектор  називається непокращуваним вектором результатів (вектором Парето), якщо з умови  для будь-якого  випливає .

В теорії прийняття рішень існує термін “принцип Парето”, який заключається в тому, що потрібно вибирати в якості рішення тільки той вектор  , який належить множині Парето. Принцип Парето не виділяє єдиного рішення, він тільки звужує множину альтернатив. Заключний вибір залишається за суб’єктом.

Принцип Парето грає важливу роль при автоматизації систем. Розробник повинен шукати компроміс, тобто будувати множину Парето, вивчення якого дає більшу інформацію.

10.2 Природні невизначеності в системах

Припустимо, що нам відома мета (добратися з пункту А в пункт В). Необхідно прокласти маршрут літака таким чином, щоб забезпечити мінімум часу польоту і мінімум витрати пального. Але час польоту залежить ще від інших чинників, зокрема, погоди. Цільову функцію (час польоту) запишемо у вигляді

 (10.11)

де  - деякий параметр (або функція), який нам невідомий і його не можна контролювати. Вибір , який забезпечує мінімум , може суттєво залежати від .

В цій задачі вибір дій здійснюється для умов, коли цільова функція задана не зовсім точно, оскільки містить невизначений параметр. При розв’язанні задачі  можна визначити вектор  лише як функцію параметра :

 (10.12)

Якщо ніякої інформації про фактор невизначеності  немає, то і результат оптимізації  є довільним. В реальних ситуаціях інформація про параметр  має вигляд , де  - деяка множина. Однак такої інформації також недостатньо. Формула (10.12) визначає лише деяке відображення множини невизначеності природних факторів  на множину , яку природно назвати множиною невизначеності результату.

Побудова  зв’язана з великим обсягом складних обчислень. В той же час існує щн один підхід, який дає строгу, хоча і однобічну оцінку. Це є принципом найкращого гарантованого результату. Для будь-якого 

 (10.13)

то і для будь-якого 

 (10.14)

Число , яке визначене формулою (10.14), називається гарантованою оцінкою, а відповідне  - гарантуючою стратегією в тому змісті, що, яке б не було значення параметра невизначеності , вибір  гарантує, що при будь-якому  значення цільової функції буде не менше, ніж . Для отримання гарантуючої стратегії необхідно розв’язати наступні задачі оптимізації:

1. розрахувати  для будь-якого ; в результаті будуть знайдені  та  ;
2. обчислити  ; в результаті будуть визначені  і 

Вибір гарантуючої стратегії поведінки – це раціональний спосіб прийняття рішень, що гарантує від всяких неконтрольованих випадковостей. Необхідно прийняти рішення, яке зв’язане з визначеним ризиком, оскільки можна отримати не тільки більше, але і менше значення цільової функції.

10.3 Невизначеності дій противника або партнера

Розглянемо ситуацію, в якій беруть участь багато суб’єктів (багато оперуючих сторін), причому кожний з них намагається досягнути своєї мети

 (10.15)

Формально така ситуація включає в себе проблему багатокритеріальності, що вимагає відшукування вектора , при якому досягається максимум критеріїв . Загальний випадок ситуації з багатьма суб’єктами складніше і вимагає для свого аналізу цілої низки специфічних гіпотез. Пояснимо це на прикладі двох суб’єктів.

Нехай два суб’єкти А і В, що мають можливість вибору векторів  та , намагаються досягнути своїх цілей

 (10.16)

В окремому випадку може виявитись, що  Таку систему будемо називати антагоністичною.

Загальний випадок нетотожності інтересів (цілей) партнерів (суб’єктів) будемо називати конфліктом. При вивченні конфліктних ситуацій, тобто при вивченні можливих способів вибору зручно ототожнювати дослідника з одним із суб’єктів. Умовимось, наприклад, ототожнювати “ми” з суб’єктом А. В зв’язку з тим, що результати вибору залежать від вибору суб’єкта В, ми повинні прийняти ту чи іншу гіпотезу про його поведінку, яка, в свою чергу, буде залежати від характеру інформованості суб’єкта В. Тут можливі декілька гіпотез (випадків).

Перший випадок. Кожний з суб’єктів не має ніякої інформації про вибір, який зробив інший суб’єкт. У цьому випадку можна знайти гарантовану оцінку, яка виражається формулою

 (10.17)

а для суб’єкта В - формулою

 (10.18)

При розв’язанні задач (10.17), (10.18) знаходяться вектори  і  , які реалізують значення  та . Це означає, що зробивши вибір , ми при будь-яких умовах (будь-якому виборі  ) гарантуємо, що значення нашої цільової функції  буде не менше, ніж .

В нашій ситуації можуть бути запропоновані і різні варіанти ризику. Наприклад, ми можемо прийняти гіпотезу про те, що інший суб’єкт використовує гарантуючу стратегію . Тоді наш вибір буде іншим 

Ми визначимо вектор  і відповідне значення функції  При цьому , але .якщо противник (партнер) зробить інший вибір, наприклад, , то може виявитись, що . Але ризик є ризик: ми сформулювали гіпотезу і якщо вона виявилась неправильною, то і результат може виявитись зовсім інший.

Другий випадок. Нехай в момент вибору суб’єкт А знає вибране суб’єктом В значення . Тоді нашу стратегію (вибір ) необхідно шукати у вигляді функції  Для визначення ц ієї функції потрібгно розв’язати задачу оптимізацію

 (10.19)

Умова (10.19) визначить шукану стратегію . Для цього випадку можна також обчислити гарантований результат ; він може відрізнятись від :

 (10.20)

і в усіх випадках  Відзначимо, що вибираючи свою стратегію (вектор ), ми в цій ситуації ніяк не можемо вплинути на вибір, який зробив інший суб’єкт.

Третій випадок. Припустимо, що суб’єкт В в момент прийняття свого рішення буде знати наш вибір; наприклад, ми повинні повідомити його суб’єкту В. У цьому випадку ми не можемо чинити вплив на вибір, який зробить суб’єкт В. Дійсно, якщо ми знаємо цільову функцію суб’єкта В, то природно зробити припущення про те, що суб’єкт В буде робити вибір з умови

 (10.21)

Розв’язуючи задачу (10.21), ми можемо визначити відгук об’єкта В на наш вибір, який згідно з нашою гіпотезою, буде оптимальною стратегією суб’єкта В:

 (10.22)

Тепер ми можемо розпорядитися вибором . Дійсно, підставляючи (10.22) в вираз для цільової функції  , отримаємо

 (10.23)

і тепер свій вибір ми можемо зробити з умови

 (10.24)

Отже, інформація про те, що суб’єкт В буде знати наш вибір і гіпотеза про те, що суб’єкт В вибере свою оптимальну стратегію, дозволяють нам так діяти на його вибір, щоб він в максимальній мірі відповідав нашим цілям.

Лекція №11.

**МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ВИПАДКОВОГО СТАНУ СИСТЕМ**

Розглянемо систему, яка може знаходитись у різних випадкових станах. Математичним апаратом, що описує стан системи, є потоки подій.

11.1 Потоки випадкових подій в системі

Розглянемо послідовність випадкових подій , що реалізуються у випадкові моменти часу , причому . Таку послідовність подій називають потоком випадкових подій. Іншими словами, потоком подій називають послідовність однорідних подій, що з’являються одна за одною у випадкові моменти часу. Наприклад, це може бути потік відмов вимірювальних приладів, потік заявок на ремонт цих приладів тощо.

Поток подій являє собою послідовність випадкових точок  на осі часу з випадковими інтервалами  , що їх розділяють.

Якщо події є однорідними, то їх можна рахувати при накопиченні.

Основні властивості потоку подій.

1. Ординарність. Потік подій називається ординарним, якщо події в ньому з’являються поодиноко, тобто ймовірність виникнення двох і більше подій на малому інтервалі часу  дуже мала порівняно з ймовірністю однієї події.

Інтенсивністю потоку подій називається функція

 (11.1)

яка являє собою середнє число подій, що приходяться на одиницю часу. В чисельнику (11.1) записане математичне очікування випадкового числа подій , що попадають на малий інтервал часу .

Властивість ординарності в математичному вигляді можна записати через умовну ймовірність

 (10.2)

де  - значення випадкового процесу в момент часу . Наприклад,  означає, що на інтервалі  реалізовано  подій з потоку, що досліджується. Ясно, що 

1. Відсутність післядії. Потік називається потоком без післядії, якщо для будь-яких інтервалів часу, що не перекриваються, числа подій  та  де  - -тий та -тий момент часу, а  - деякі інтервали часу, являють собою незалежні випадкові величини.

Якщо потік без післядії є ординарним і має постійну інтенсивність , то число подій , що попадає на інтервал часу довжиною  має розподіл Пуассона з параметром :

, (11.3)

де  -середнє число подій, які попадають на інтервал .

Ординарний потік подій, в якому відсутня післядія, називається пуассоновським потоком.

3. Стаціонарність. Потік подій називається стаціонарним, якщо всі його ймовірнісні характеристики не змінюються з часом, наприклад, ймовірність попадання якого-небудь числа подій на часовий інтервал  залежить тільки від довжини цього інтервалу і не залежить від того, де на вісі часу розміщується цей інтервал. Для стаціонарного потоку подій інтенсивність .

11.2 Види потоків

Ординарний стаціонарний потік без післядії називається найпростішим (або стаціонарним пуассоновським) потоком. Більш складним є потік з обмеженою післядією. Це потік, у якому випадкові інтервали часу  між сусідніми за часом подіями є незалежними випадковими величинами.

Стаціонарний потік з обмеженою післядією називається потоком Пальма. Для такого потоку випадкові інтервали  є послідовністю незалежних однаково розподілених випадкових величин. У найпростішому потоку функція розподілу

 (11.4)

а щільність розподілу

 (11.5)

тобто інтервали часу  між окремими подіями розподілені однаково з щільністю (11.5), а тому потік є стаціонарним. Зазначена щільність характеризує показниковий розподіл. Незалежність величин  випливає з відсутністю післядії в найпростішому потоці. Найпростіший потік є потоком Пальма. Потік Пальма буде відрізнятись від найпростішого, якщо інтервал між сусідніми подіями являє собою невід’ємну випадкову величину з розподілом, який відрізняється від (11.5).

Потоком Ерланга -го порядку з параметром  називається потік Пальма, у якого інтервали між подіями розподілені за законом Ерланга -го порядку

 (11.6)

де  Потік Ерланга можна отримати з найпростішого, якщо в останньому зберігати кожну  -ту подію, а всі інші відкидати.Тому можна вважати найпростіший потік потоком Ерланга -го порядку  Використовуючи нормований потік Ерланга, можна:

1. при  отримати найпростіший потік без післядії;
2. при , що дорівнює декілька десятків отримати потік Пальма, у якого інтервали між подіями розподілені за законом, який є близьким до нормального;
3. при дуже великих  (більше сотні) отримуємо потік Пальма, який є близьким до невипадкового.

11.3 Граничні теореми теорії потоків

Центральна гранична теорема теорії ймовірностей стверджує, що при великій кількості незалежних випробувань закон розподілу наближаються до нормального. Аналогічні результати існують для випадкових потоків. Гранична теорема для сумарного потоку стверджує, що сума незалежних ординарних стаціонарних потоків подій сходиться до пуссоновського стаціонарного (найпростішого) потоку, якщо потоки, що складають суму, впливають однаково на сумарний потік. Останнє фактично означає, що інтенсивність окремих потоків відрізняється не дуже сильно. Сумарна інтенсивність  потоків розраховується за наступною формулою

 (11.7)

де  - інтенсивність  -го потоку подій.

Неважко бачити, що умови, які висуваються в граничній теоремі для сумарного потоку, аналогічні умовам, які використовуються в центральній граничній теоремі для випадкових величин.

Відзначимо також, що сума пуассоновських потоків знову є пуассоновським потоком подій. Більш того, якщо потоки є нестаціонарними, то їх сума знову ж таки буде близькою до пуассоновського потоку.

На практиці потоки можуть не тільки складатись, але і розріджуватись. Зрозуміло, що при багатьох розрідженнях потоку, коли число розріджень  , інтенсивність потоку . Якщо ж після кожного випадкового розрідження потоку останній стискувати так, щоб його інтенсивність не зменшилась порівняно з попереднім потоком, то при  результуючий потік буде найпростішим з інтенсивністю . Це є сутністю граничної теореми для розріджених потоків. Відзначимо, що в теоремі початковим потоком є стаціонарний потік Пальма.

Лекція №12.

**ВИКОРИСТАННЯ АПАРАТУ МАРКОВСЬКИХ ЛАНЦЮГІВ ДЛЯ ОПИСУ СИСТЕМ**

Як було зазначено раніше, поведінка систем може бути описана з допомогою гауссівських процесів. В наступних лекціях розглянемо інший спосіб опису систем з використанням марковських ланцюгів та марковських процесів.

12.1 Класифікація та ймовірність станів системи

Реальні випадкові процеси, які описують фізичну систему , характеризуються тим, що вони можуть знаходитись в якомусь дискретному стані , сукупність яких разом з відрізками, що з’єднують геометричні зображення станів, будемо називати неорієнтованим графом станів. Якщо ці відрізки являють собою стрілки, то граф називається орієнтованим (рис. 12.1).



Рисунок 12.1 – Граф станів, що описує життєвий цикл технічного пристрою

Стан  означає виробництво апаратури на заводі,  - вимірювальний прилад знаходиться в експлуатації і технічно справний, - пристрій в експлуатації, але має несправності, що суттєво не впливають на його функції,  - апаратура несправна,  -апаратура в ремонті,  -утилізація пристрою.

Стан  називається джерелом, система виодить з цього стану і більше туди не повертається. Стан  називається кінцевим або поглинаючим. З цього стану не виходить жодної стрілки.

Стани  та ,  і  - а також подібні інші називаються сусідніми. Стан  називається транзитивним, якщо є стрілки, що ведуть в цей стан і виходять з нього. На рис. 12.1 – це всі стани, за виключенням  та .

Нехай система  має кінцеву або пронумеровану множність станів  . Позначимо через  випадковий стан системи в момент часу . Ймовірність  -го стану  в в момент  називається ймовірність події, яка складається в тому, що система  в момент  буде знаходитися в стані . Таким чином,

, (12.1)

причому внаслідок того, що граф станів створює несумісну повну групу подій

 (12.2

12.2 Марковські ланцюги

Випадковий процес, який протікає в системі  з дискретними станами  називається марковським, якщо для будь-якого моменту часу  ймовірність кожного з етапів системи в майбутньому (тобто при ) залежить тільки від її стану на даний час (при ) і не залежить від того, коли і як вона прийшла в цей стан, тобто не залежить від поведінки системи в минулому. Майбутнє тут здійснює зв’язок з минулим тільки через сучасність.

Нехай переходи з одного стану в інший здійснюються в дискретні моменти часу при  (одиниць часу, наприклад, секунд), тобто при  де . Це означає що процес протікає неперервно, але стан процесу реєструється дискретно. Розглянемо випадковий процес , що являє собою випадкову функцію дискретного часу. Функція  якщо стан системи . Такий випадковий процес є послідовністю подій виду , де .

Ймовірність станів системи описується формулою

 (12.3)

Ця формула визначає ймовірність того, що на -му кроці система  буде знаходитись в стані . Фактично (12.3) – це одномірний закон розподілу випадкового процесу , що протікає в системі  з дискретними станами і з дискретним часом.

Процес, що протікає в системі , називається марковським процесом з дискретними станами і дискретним часом або марковським ланцюгом, якщо для будь-якого фіксованого моменту часу (будь-якого кроку ) умовні ймовірності стану системи в майбутньому (при залежать тільки від стану системи на даний час (при ) і не залежать від того, коли (на якому кроці, при ) і звідкіля система прийшла в цей стан. Марковський ланцюг є різновидністю марковського процесу. Ланцюг, в якому умовні ймовірності станів у майбутньому залежать тільки від стану системи на даному останньому кроці і не залежать від попередніх кроків, називається простим ланцюгом Маркова.

Головним завданням, яке часто ставиться при дослідженні марковського ланцюга, є визначення безумовних ймоірностей знаходження системи  на будь-якому кроці в стані , тобто при  Для визначення цих ймовірностей необхідно знати умовні ймовірності переходу системи на  кроці в стан , якщо відомо, що на попередньому -му кроці вона була в стані . Величина

 (12.4)

називається перехідною ймовірністюмарковського ланцюга на -му кроці. При  маємо ймовірність того, що на -му кроці система затримається (залишиться) в стані .

Якщо перехідні ймовірності не залежать від часу або номеру кроку, то  і марковський ланцюг називається однорідним. Перехідні ймовірності однорідного марковського ланцюга записуються у вигляді матриці

, (12.5)

яка називається матрицею перехідних ймовірностей (МПІ). Наприклад,  означає, що система, яка знаходиться у –му стані, в наступний момент часу перейде в -тий стан. В першому рядку матриці містяться ймовірності переходу з першого стану в інші стани (). Перший стовпець, навпаки, означає ймовірність переходу з інших станів в перший.

Основні властивості МПІ:

1.  (12.6)
2.  (12.7)

Рівність (12.7) випливає з властивостей ймовірностей подій, що створюють повну групу.

Розглянемо важлиі задачі, які розв’язуються з допомогою МПІ. Нехай дана МПІ  і необхідно визначити ймовірність переходу з одного стану в інший за довільне число кроків, тобто . Крім того, треба знайти абсолютний розподіл ймовірності знаходження системи в момент часу . Позначимо абсолютну ймовірність  того, що система в момент  має стан . Величини  створюють вектор абсолютного розподілу марковського ланцюга в момент :

 (12.8)

Нехай початковий абсолютний розподіл , а матриця перехідних ймовірностей . Необхідно визначити абсолютний розподіл  при довільному .

Розв’язання подібних задач грунтується на використанні рівняння Чепмена-Колмогорова

 (12.9)

З рівності (12.9) випливає

 (12.10)

Нехай - ймовірність того, що початковий стан системи був , де . Для визначення ймовірності того, що в момент  стан системи буде , скористаємося формулою повної ймовірності:

 (12.11)

Звідси випливає, що

 (12.12)

Співвідношення (12.12) можна узагальнити наступним чином

 (12.13)

Нехай заданий початковий розподіл марковського ланцюга

 (12.14)

Практичний інтерес викликає поведінка  при . Існування границі означає, що встановлюється стаціонарність режиму роботи. Якщо така границя існує, тобто  то ця границя називається граничним абсолютним розподілом марковського ланцюга. Існування граничного розподілу залежить від виду початкового розподілу. В загальному випадку різним початковим розподілам відповідають різні граничні.

Особливий інтерес являють такі марковські ланцюги, які мають граничні абсолютні розподіли одні і ті ж при будь-якому початковому розподілі. Вони називаються фінальними, а марковські ланцюги, які мають такий розподіл, називаються ергодичними. Фінальний розподіл визначається з рівняння

 (12.15)

яке задовільняє умові нормування 

Лекція №13.

**ВИКОРИСТАННЯ АПАРАТУ МАРКОВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ОПИСУ СИСТЕМ**

В попередній лекції описувались дискретні або розривні марковські процеси, в яких при малих часових змінюваннях  ймовірність збереження попереднього стану перевищувала ймовірність змінювання стану. Для неперервних процесів при будь-якому малому інтервалі часу  існує деяке мале (порядку  ) змінювання стану.

13.1 Марковські процеси з дискретними станами та неперервним часом

Нехай в системі на протязі деякого випадкового часу  в системі зберігається с тан . Далі система переходить в стан  і знаходиться в ньому  одиниць часу і т. д. Випадкові інтервали часу є деякими неперервними випадковими величинами.

Введемо випадковий процес , який реєструє описану еволюцію системи, тобто значення цього процесу в будь-який момент часу  є номером стану в цей же самий момент . Це означає, що реалізація процесу є дискретно постійна. При деяких додаткових умовах цей процес називається марковським ланцюгом з неперервним часом.

Розглянемо набір моментів часу , а потім . Всі моменти часу, які взяті раніше моменту  є минулими моментами, а після - майбутніми. Розглянемо умовну ймовірність

 (13.1)

Даний процес  називається марковським або марковським ланцюгом з неперервним часом, якщо для будь-якого моменту часу  умовні ймовірності (13.1) всіх станів системи в майбутньому (тобто при ) залежать тільки, від того, в якому стані  знаходиться система  тепер (при ), але не залежить від того, коли і як вона прийшла в цей стан, тобто які були стани системи в минулому (при ).

В математичному вигляді вищеозначене записується наступним чином:

 (13.2)

Ймовірнісні властивості процесу в майбутньому не залежать від минулого при відомому теперішньому стану. Як і раніше, матриця  називається матрицею перехідних ймовірностей. Якщо  то марковський ланцюг називається однорідним.

У дискретному випадку час  був квантований, дискретизований. Тепер час став неперервним і всі елементи МПІ визначаються при . Якщо розглянути елемент МПІ за дуже малий період часу , то можна очікувати схожості властивостей марковських процесів, як неперервних, так і з дискретними станами.

Будемо вважати, що  є неперервною функцією при , а також має похідну, щонайменше при , де - числова матриця. З’ясуємо ймовірнісний зміст матриці . Спочатку відзначимо, що . Дійсно, розглянемо . Природно припустити, що границя цієї функції дорівнює одиниці при . Аналогічно отримуємо  Але це означає, що

 або  внаслідок неперервності матриці .

Встановимо ймовірнісний зміст матриці .

 (13.3)

Якщо 

то будь-який елемент цієї матриці, наприклад,  є ймовірністю переходу з стану  в стан  за нескінченно малий період часу, віднесений до одиниці часу. Таким чином,  є щільністю переходу з стану  в стан . Можна записати

 (13.4)

Розглянемо діагональні елементи  МПІ. Згідно з формулою (13.3) маємо

 (13.5)

де  - ймовірність виходу системи з стану  за малий період часу . При цьому маємо  де  ймовірність виходу системи з стану  за нескінченно малий період часу віднесений до одиниці часу. Величина  називається щільністю виходу системи з стану . За аналогією з (13.4) можна записати 

З ймовірнісної трактовки випливає, що  при . Навпроти, , а . Матриця  називається матрицею щільності переходів марковського ланцюга.

13.2 Рівняння Колмогорова та методи його розв’язання

Рівняння Чепмена-Колмогорова для часів  і  має вигляд

 (13.6)

Введемо до розгляду абсолютний розподіл марковського ланцюга з неперервним часом

 (13.7)

Компоненти останнього вектора є ймовірністю знаходження системи в різних станах в момент часу , наприклад,  - ймовірність того, що в момент  стан системи буде . Абсолютний розподіл має такий же фізичний зміст, як і в дискретному випадку.

При  отримуємо початковий розподіл марковського ланцюга . Абсолютний розподіл в будь-який момент часу зв’язаний з початковим розподілом рівністю

 (13.7)

Для іншого моменту часу  маємо

 (13.8)

або  (13.9)

При цьому

 (13.10)

Візьмемо похідні від (13.9), (13.10) по змінній  і припустимо, що . Тоді

 (13.11)

або . (13.12)

Для абсолютного розподілу маємо інший вигляд рівняння Колмогорова

 (13.13)

Рівняння (13.12) та (13.13) розв’язуються при наступних початкових умовах:

 (13.14)

 (13.15)

Ці рівняння являють собою системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку з постійними коефіцієнтами і їх рішення мають матричний вигляд

 (13.16)

 (13.17)

Матричний експоненціал можна записати у вигляді степеневого ряду



або 

де  - фундаментальна матриця для матриці ,  - власні числа матриці .

Лекція №14.

**МОДЕЛІ ТИПУ “ ХИЖАК - ЖЕРТВА ”**

Система «хижак — жертва» — складна [екосистема](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0), для якої реалізовано довготривалі [стосунки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B7%D0%B0%D1%94%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_%D0%BC%D1%96%D0%B6_%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%BC%D0%B0%D0%BC%D0%B8) між [видами](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%B4_(%D0%B1%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F)) [хижака](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%B6%D0%B0%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE) і жертви, типовий приклад [коеволюції](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D1%96%D1%8F). Відносини між хижаками і їх жертвами розвиваються циклічно, що є ілюстрацією нейтральної рівноваги.

14.1 Біологічна система

Пристосування, що виробляються жертвами для протидії [хижакам](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%B6%D0%B0%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE), сприяють виробленню у хижаків механізмів подолання цих пристосувань. Тривале спільне існування хижаків і жертв призводить до формування [системи](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0) взаємодії, при якій обидві групи стійко зберігаються на досліджуваної території. Порушення такої системи часто призводить до негативних [екологічних](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F) наслідків. Негативний вплив порушення коеволюційних зв'язків спостерігається при [інтродукції](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%96_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%B8) видів. Зокрема, [кози](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D0%BB_%D1%81%D0%B2%D1%96%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9) і [кролики](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%96), інтродуковані в [Австралії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%8F), не мають на цьому [материку](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BA) ефективних механізмів регуляції чисельності, що призводить до руйнування природних [екосистем](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0).

14.2 Математична модель

Припустимо, що на деякій території мешкають два види [тварин](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B8): [кролики](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%96) (живляться [рослинами](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B8)) і [лисиці](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B8%D1%86%D1%8F_(%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%B0_%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B2)) (харчується кроликами). Нехай число кроликів, число лисиць. Використовуючи [Модель Мальтуса](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C) з необхідними поправками, які враховують поїдання кроликів лисицями, приходимо до наступної системи, що носить ім'я [моделі Вольтерри — Лотки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%96%D0%B2%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%9B%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8-%D0%92%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B8):

, (14.1)

Тут  – кількість жертв,  – кількість хижаків. Коефіцієнт пропорційності  – сумарний коефіцієнт, який враховує кількість жертв, які можуть бути з‘їдені одним хижаком, а також ймовірність зустрічі хижака з жертвою,  – величина, обернена часу, за який кількість жертв збільшується в  разів;  – показник пропорційності, отриманий аналогічно такому ж показнику для першого рівняння моделі;  – коефіцієнт пропорційності, який враховує здатність хижаків до розмноження та ймовірність зустрічі хижака з жертвою.

Ця система має рівноважний стан, коли число [кроликів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%96) і [лисиць](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B8%D1%86%D1%8F_(%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%B0_%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B2)) є сталим. Відхилення від цього стану призводить до коливань чисельності кроликів і лисиць, аналогічним коливанням [гармонічного осцилятора](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BE%D1%81%D1%86%D0%B8%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80). Як і у випадку гармонічного осцилятора, це поведінка не є структурно [стійкою](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80): невелика зміна моделі (наприклад, врахування обмеженості ресурсів, необхідних кроликам) може призвести до [якісної зміни поведінки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F_%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84). Наприклад, рівноважний стан може стати стійким, і коливання чисельності будуть [затухати](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B3%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%96_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F). Можлива і протилежна ситуація, коли будь-яке мале відхилення від положення рівноваги призведе до катастрофічних наслідків, як ось повне вимирання одного з видів. На питання про те, який із цих сценаріїв реалізується, модель Вольтерри — Лотки відповіді не дає: тут потрібні додаткові дослідження.

З точки зору теорії коливань [модель Вольтерри — Лотки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%96%D0%B2%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%9B%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8-%D0%92%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B8) є консервативною системою, що володіє першим інтегралом руху. Ця система не є грубою, оскільки найменші зміни правій частині рівнянь приводять до якісних змін її динамічної поведінки. Однак, можливо трішки модифікувати праву частину рівнянь таким чином, що система стане автоколебальною. Наявність стійкого граничного циклу, властивого грубим динамічним системам, сприяє значному розширенню області застосування моделі.

Груповий спосіб життя хижаків та їхніх жертв радикально змінює поведінку моделі, надає їй підвищену стійкість. Обґрунтування: при груповому способі життя знижується частота випадкових зустрічей хижаків з потенційними жертвами, що підтверджується спостереженнями за динамікою чисельності [антилоп](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%B0) в парку [Серенгеті](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D1%82%D1%96).

Модель спільного існування двох біологічних видів (популяцій) типу «хижак — жертва» називається моделлю Вольтерри — Лотки. Була вперше отримана [Альфредом Лоткою](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D1%80%D0%B5%D0%B4_%D0%94%D0%B6%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D1%81_%D0%9B%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B0) в 1925 році (використовував для опису динаміки взаємодіючих біологічних популяцій). У 1926 році (незалежно від Лотки) аналогічні і більш складні моделі були розроблені італійським математиком [Віто Вольтеррой](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D1%82%D0%BE_%D0%92%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B0). Його глибокі дослідження в області екологічних проблем створили основу математичної теорії біологічних співтовариств (математичної екології).

14.3 Аналіз поведінки моделі

У теперішній час при побудові моделі біологічних співтовариств широко використовується прийнята в екології класифікація взаємодій між видами (як і при описі неживої системи нам необхідно знати, які сили врівноважують систему), а саме:

конкуренція (-,-) – кожний з видів пригнічує (справляє негативну дію) на ріст іншого виду, хоча існує і внутрішньовидова конкуренція;

симбіоз (+,+) або комменсалізм (+,0) – кожен з видів прискорює ріст іншого виду ("жертви"), інший ("жертва") прискорює ріст першого ("хижака");

хижацтво (+,-) – один вид ("хижак") подавляє ріст іншого виду ("жертви"), інший ("жертва") – прискорює ріст першого ("хижака").

Перевага цієї класифікації в її простоті і логічності. Використовуючи наведену класифікацію, розглянемо систему з двох популяцій (або видів), особини однієї з яких слугують їжею для особин іншої (взаємодія типу "хижак-жертва").

Крім балансових рівнянь біомас, які отримують із законів збереження речовини, нам ще необхідно знати швидкість споживання жертви хижаком, яка, природно, залежить як від чисельності жертви, так і від чисельності хижака. Цю залежність в екології зазвичай називають трофічною функцією. Вид цієї функції залежить від багатьох факторів, таких як мисливська стратегія хижака, захисна реакція жертви, наявність сховищ для жертви тощо.

Вольтера розглядав рівняння, що описують взаємодії між видом жертви з густотою Х і хижаком, що її знищує, з густотою Y, і в такому вигляді:

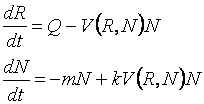
http://manualsem.com/pictures/books/modelyuvannya-i-prognozuvannya-stanu-dovkillya.files/image087.gif (14.2)

http://manualsem.com/pictures/books/modelyuvannya-i-prognozuvannya-stanu-dovkillya.files/image088.gif.

При відсутності хижака () ріст чисельності (або густоти) популяції відбувається відповідно до логістичного рівняння з істинною швидкістю росту  і ємністю середовища , а швидкість виїдання жертви, як і в попередніх рівняннях, пропорційна добутку густот хижака і жертви.

Член () в рівнянні (14.2) виражає пригнічуючу дію, яку даний вид (жертва) справляє на свій власний ріст (наприклад, у результаті конкуренції). Цей член називається "демпфуючим" (таким, що зменшує амплітуду коливань),  – коефіцієнт смертності.

У теперішній час для опису системи "хижак-жертва" або "споживач-ресурс" широко використовується така система:

, (14.3)

|  |
| --- |
|  |
|  | http://manualsem.com/pictures/books/modelyuvannya-i-prognozuvannya-stanu-dovkillya.files/image091.gif  Рисунок 14.1 Рішення системи (14.2) |

де  – кількість ресурсу;  – чисельність споживачів (популяції);  – швидкість надходження ресурсу в систему;  – швидкість споживання ресурсу однією особиною популяції;  - частина ресурсу, що витрачається на відтворення (виробництво потомства); m – коефіцієнт смертності, який обернено пропорційний середній тривалості життя особин в даних умовах середовища. Найпростішим випадком є такий, коли , ,  – сталі величини. Відносно вибору трофічної функції  приймаються різні припущення, зокрема припускають, що вона залежить тільки від , причому в нулі вона дорівнює нулю, а при збільшенні  вона зростає, причому має асимптоту .

Останнє обмеження відображає той факт, що навіть при достатності ресурсу швидкість його споживання завжди обмежена. Як показують результати численних реальних спостережень, вся різноманітність трофічних функцій може бути розбита, в основному, на два великих класи. До першого класу (чи типу) відносяться обмежені і випуклі вгору функції (рис. 4.2, а), до другого – обмежені функції -подібного виду (рис. 4.2, б). Перший тип характерний для безхребетних хижаків і багатьох видів хижих риб. Звичайно такий тип трофічної функції мають хижаки, нездатні до навчання, тобто "дурні" хижаки. Другий клас трофічних функцій характерний для організмів (популяцій), які проявляють досить складну поведінку, "здатних" до навчання. Таку поведінку мають багато хребетних хижаків, яких умовно можна назвати "розумними".

Лекція №15.

**УМОВИ САМООРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМ**

15.1 Поняття складної системи і явищ самоорганізації в них

Найчастіше мають справу з складною поведінкою, ніж зі складною системою. Внаслідок деяких процесів можуть виникати явища самоорганізації в них.

Перший приклад. Теплова конвекція на прикладі сковороди з маслом, що поступово знизу нагрівається, і при деякій температурі створюються чарунки Бенара. Ці ячейки обумовлені нерівноваженістю системи, яка виводиться з рівноваги під дією температури . В системі порушується симетрія і в стороннього мініатюрного спостерігача з’являється уява про простір-час. Між окремими віддаленими частинами об’єму масла спостерігається кореляція, когерентна поведінка та самоорганізація. Випадкова поведінка складної системи перетвоюється в детерміновану. При одних і тих же значеннях параметрів можливе декілька різних рішень: тільки випадок вирішує, наприклад, в якому напрямку циркулює рідина в чарунках Бенара. При  з впорядкованого руху рідини в чарунках Бенара виникає турбулентний рух, тобто поведінка системи з нерівноважного руху переходить в хаотичний режим.

Другий прилад. Явище самоорганізації в хімії або реакція Білоусова-Жаботинського. При змішуванні сульфату церію , малонової кислоти , бромату калія  з розчином сірчаної кислоти виникає нерівноважена система з великомасштабними кореляціями і спостерігається періодичне змінювання червоного кольору на блакитний (хімічний годинник). Це є прикладом самоорганізації і бістабільності. Червоний колір обумовлений іонами , а блакитний колір – іонами . Причиною такої поведінки системи є автокаталіз, а іноді і гетерокаталіз.

Третій приклад. Самоорганізація в ферритових структурах. В таких структурах під дією магнітного поля створюються чіткі області ферриту (домени), в яких магнітні моменти мають однаковий напрямок. Властивості ферритових зразків сильно змінюються, що дає можливість використовувати їх в техніці надвисоких частот, наприклад, в спрямованих відгалужувачах, вентилях, фазообертачах тощо.

Четвертий приклад. Системи з оптичною пам’яттю, зокрема використання нелінійних середовищ, які опромінюються променем лазера. Це дає можливість записувати інформацію.

Інші приклади. Прикладами самоорганізації є створення регулярних структур (барханів) в пустелях під дією вітрів, окрасу метеликів під дією сонця (біологічна самоорганізація), коралових рифів в океані тощо. Ще додамо приклади самоорганізації: хмари майже правильної форми, кільця Сатурна, солітони, генерація лазерного випромінювання, перехід від сприйняття до думки в мозку людини.

Основні висновки з першого питання:

1. основним фактором, що приводить до самоорганізації систем, є їх нерівноваженість, що не пов’язана з міжмолекулярною взаємодією;
2. для виникнення такої нерівноваженості система повинна мати властивість кооперативної дії, коли навіть віддалені частини системи діють однаково;
3. такі системи обов’повинні бути нелінійними;
4. в усіх подібних системах для самоорганізації необхідний зовнішній приток енергії, речовини або інформації;
5. зазначені системи мають багато ступенів свободи у внутрішній структурі;
6. при самоорганізації виникає можливість для мініатюрного внутрішнього спостерігача отримати позиційну та часову інформацію, тобто, створюється простір-час.

15.2 Дисипативні системи

В свій час Аристотель стверджував, що всі динамічні системи прагнуть до рівноваги, а Платон доводив постійність та мінливість систем як складових частин реальності. Все це відноситься до дисипативних систем, в яких є втрати енергії. Вони відносяться до природних систем, як і саме життя.

Дисипативні системи є неінваріантними відносно часу, тобто вони є незворотними. Ці системи пов’язані з незникаючими потоками між системою і зовнішнім середовищем. Нерівноваженість виявляє потенційні можливості, що містяться в нелінійності і якби дрімають в рівновазі або біля неї.

Можливість множинних рішень в нелінійних системах ставить питання про вибір між різними результатами (течія рідини в чарунці Бенара не моде бути одночасно ліво- або правоспрямованим, кіт Шредінгера не може одночасно бути живим та мертвим). Вибір може статися за рахунок флуктуацій в системі, тобто відхилень від стаціонарності.

Стійкість (глобальна) є проявленням конструктивної ролі незворотності в природі. Локальна нестійкість приводить до порушень симетрії та біфуркаціям. Порушення симетрії є передумовою інформації.

15.3 Біфуркації в складних системах

Властивістю складного є:

1. виникнення біфуркаційних переходів далеко від рівноваги при наявності придатних нелінійностей системи;
2. порушення симетрії вище точки рівноваги;
3. створення і підтримка кореляцій макроскопічного масштабу.

Стійкі стани в фазовому просторі називаються аттракторами. Моделлю виникнення хаотичної поведінки є дивні аттрактори. Впорядкованість в системі має вигляд компромісу між двома антагоністичними факторами – нелінійним процесом і процесом типу транспортного.

Поведінка систем описується мовою теорії ймовірностей та математичної статистики. Хаотична динаміка схожа з марковським ланцюгом (послідовність станів). Стан системи можна уявити у вигляді символів типу . У цьому випадку динаміка систем називається символічною динамікою.

Складне – це здатність - системи до переключення між різними типами поведінки. Для оцінки переключення вводять колективні змінні, наприклад, кліматичний потенціал. Другий початок термодинаміки змусив засумніватись в концепції, що пояснює складне шляхом зведення його до простоти прихованого світу. Згідно з цим, ентропія зростає тільки в результаті незворотних процесів. В стані рівноваги матерія є “сліпою”, а в сильно нерівноважних умовах вона набуває здатності пізнавати відмінності в зовнішньому світі.

Квантовий оператор є своїм для кожної квантової величини. Його власні значення (спектр) характеризує стан величини. Хвильова функція вибрана для того, щоб підкреслити дуалізм “хвиля-частка”. Джерелом порядку є нерівноваженість, тобто те, що породжує порядок з хаосу.В теорії відносності стверджується неможливість деякого спостереження.

Залежність змінної складової  системи від параметра  може бути представлена у вигляді біфуркаційної діаграми на рисунку 15.1.

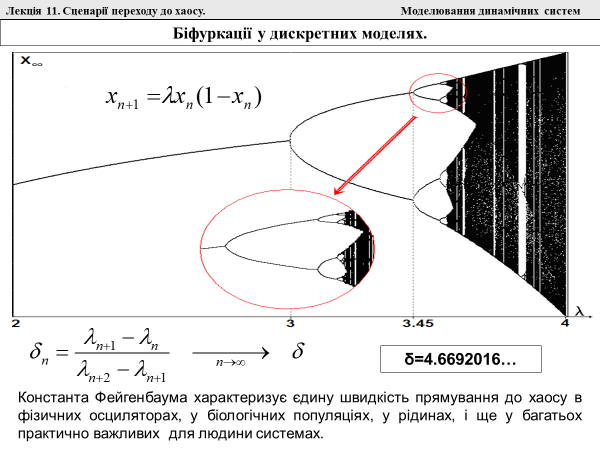


Рисунок 15.1 – Приклад біфуркаційної діаграми динамічної системи

При  відбувається роздвоєння кривої (біфуркація) внаслідок дії випадкових флуктуацій та порушення симетрії системи. Інформація отримується при переході до асимптотично стійких станів (аттракторів). Зображення дивного аттрактора у фазовому просторі приведено на рисунку 15.2.



Рисунок 15.2 – Приклад зображення “дивного” аттрактора у фазовому просторі

Отже, поняття складного включає:

* виникнення біфуркаційних переходів далеко від рівноваги в нелінійних системах;
* порушення симетрії вище точки біфуркації;
* створення і підтримка кореляцій макроскопічного масштабу.

Лекція №16.

**ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ, ЩО САМООРГАНІЗУЮТЬСЯ**

16.1 Диссипативна самоорганізація (синергетичний підхід)

Визначення такої самоорганізації, дав Г. Хакен в 1980-і рр. в рамках синергетики: «Самоорганізація- процес упорядкування (просторового, часового чи просторово-часового) у відкритій системі, за рахунок узгодженої взаємодії безлічі елементів її складових».

Характеристики системи повинні бути наступні:

• відкрита (наявність обміну енергією/речовиною з навколишнім середовищем);  
• містить необмежено велике число елементів (підсистем);  
• є стаціонарний стійкий режим системи, в якому елементи взаємодіють між собою хаотично (некогерентно).

Характеристики процесів є такими:

• інтенсивний обмін енергією / речовиною з навколишнім середовищем, причому абсолютно хаотично (не викликаючи впорядкування в системі);  
• макроскопічне поводження системи описується декількома величинами - параметром порядку і керуючими параметрами (зникає інформаційна перевантаженість системи);

• є деяке критичне значення керуючого параметра (пов'язаного з надходженням енергії / речовини), при якому система спонтанно переходить в новий впорядкований стан (перехід до сильної нерівноваги);  
• новий стан обумовлено узгодженою (когерентною) поведінкою елементів системи, ефект впорядкування виявляється тільки на макроскопічному рівні;

• новий стан існує тільки при невпинному потоці енергії / речовини в систему. При збільшенні інтенсивності обміну система проходить через низку наступних критичних переходів; в результаті структура ускладнюється аж до виникнення турбулентного хаосу.

Для однозначності визначення терміну, його зв'язку з характеристиками системи і процесу, оцінимо його на трьох стандартних прикладах самоорганізації:

• лазер - просторове впорядкування;

• чарунки - Бенара - просторове впорядкування;

• реакція Білоусова - Жаботинського - просторово-часове впорядкування.  
[лазер](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80)— пространственное упорядочение.

Нобелівський лауреат Ілля Пригожин створив нелінійну модель реакції Белоусова- Жаботинського, так званий брюсселятор. Оскільки для виникнення впорядкування в таких системах необхідний приплив енергії або відтік ентропії, її диссипація, Пригожин назвав ці системи диссипативними. Внаслідок нелінійності, наявності більше одного стійкого стану в цих системах, в них не виконується ні другий початок термодинаміки, ні теорема Пригожина про мінімум швидкості виробництва ентропії. Однак існують приклади просторово-часових дисипативних структур - автохвилі ламінарного горіння і теплові хвилі (автохвилі) в шарі нерухомого каталізатору, для яких повне виробництво ентропії в системі є функціоналом автохвильових рішень задачі (термодинамічної функцією Ляпунова). А його мінімум відповідає фізично змістовного вирішення завдання.

За аналогією опису систем з фазовими переходами, що самоорганізуються, дисипативна самоорганізація отримала назву фазового переходу в нерівноважній системі. Методи синергетики були використані практично в усіх наукових дисциплінах: від фізики і хімії до соціології та філології. Наприклад, нейронні мережі описані як дисипативні структури. Останнім часом практично зникло використання спочатку необхідного математичного апарату нелінійних рівнянь. Це призвело до того, що будь-яка система природного походження, яка не належить компетенції рівноважної термодинаміки, стала розглядатися як самоорганізована.

16.2 Консервативна самоорганізація

У 1987 році інший Нобелівський лауреат Жан-Марі Лен- засновник супрамолекулярної хімії ввів терміни «самоорганізація» і «самозбірка», внаслідок необхідності опису явищ впорядкування в системах високомолекулярних сполук при рівноважних умовах, зокрема створення ДНК.

Вивчення речовини в наностані, створення складної структури в процесі кристалізації без зовнішнього впливу також рекомендувало розгляд цих явищ як самоорганізації. Але, на відміну від синергетичного підходу, ці явища відбуваються в умовах, близьких до термодинамічної рівноваги. Таким чином, рівноважні фазові переходи, такі як кристалізація, також виявилися самоорганізацією. Для усунення плутанини, феномен упорядкування в рівноважних умовах часто визначають як консервативна самоорганізація.

16.3 Континуальная самоорганизация

Концепція еволюційного каталізу, що розроблена А. П. Руденко, є альтернативною концепцією самоорганізації для біологічних систем. На відміну від когерентної самоорганізації в дисипативних системах з великим числом елементів (макросистем), розглядається континуальна самоорганізація для індивідуальних (мікро-) систем. В рамках даного підходу визначається, що самоорганізація як саморозвиток системи відбувається за рахунок внутрішньої корисної роботи проти рівноваги. Прогресивна еволюція з природним відбором можлива тільки як саморозвиток континуальної самоорганізації індивідуальних систем.  
  
  
.