

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

"Дослідження та випробування технічних систем"
для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
("Колісні та гусеничні транспортні засоби"),
усіх форм навчання

Частина 2 - змістовий модуль 1.

Основні терміни та визначення.
Еволюція, класифікація, етапи створення
та використання технічних систем.

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем" для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби") усіх форм навчання. Частина 2 - змістовий модуль 1. Основні терміни та визначення. Еволюція, класифікація, етапи створення та використання технічних систем / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 46 с.

Укладачі: О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;
О.В. Дударенко, доцент, канд.техн.наук;
А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук;
А.В. Щербина, доцент, канд.техн.наук

Рецензенти: О.С. Слюсаров, доцент, канд.техн.наук;
С.М. Турпак, професор, д-р.техн.наук

Відповідальний за випуск: А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук

Затверджено
на засіданні кафедри «Автомобілі»
Протокол № 8
від « 22 » лютого 2019.

Рекомендовано для видання
НМК Транспортного факультету
Протокол № 72
від « 15 » березня 2019.

ЗМІСТ

Частина 2

Вступ	60
Тематичний план лекційних занять	62
Лекція № 5. Роль випробувань в процесі проектування та створення технічних систем	65
Лекція № 6. Основні поняття та класифікація контролю і випробувань складних технічних систем	71
Лекція № 7. Дослідження складних технічних систем з використанням моделей	82
Рекомендована література	100
Основна	100
Додаткова	100

ВСТУП

Дисципліна "Дослідження та випробування технічних систем" формує у майбутніх фахівців загальне уявлення про характер взаємодії елементів складних технічних систем, якими є сучасні автомобілі. Оскільки до надійності та інших найважливіших характеристик технічних систем висуваються високі вимоги, також є необхідність їх подальшого вдосконалювання, все це ставить перед інженерно-технічними працівниками завдання одержання нових наукових знань, для цілеспрямованого пошуку й об'єктивної оцінки конструктивно-технічних рішень.

У свою чергу одержання нових знань пов'язане із проведенням двох рівнів досліджень: емпіричних, з використанням натурних експериментів, і теоретичних, на основі побудови математичних моделей, адекватних досліджуваному об'єкту.

Отже дисципліна "Дослідження та випробування технічних систем" відіграє в цьому процесі важливу роль, тому що в ній з досить високим ступенем узагальнення викладаються всі основні аспекти системного підходу й дається інструмент для орієнтації в обраній спеціальній області техніки.

Дана дисципліна дозволяє погодити між собою різні навчальні курси й пояснити студентам мету їх вивчення. Такий підхід буде сприяти кращому розумінню зв'язків між окремими елементами системи навчання й змістом багатьох підручників.

Тому що теорія технічних систем робить зрозумілою студенту всю систему навчання й проясняє місце окремих дисциплін, наприклад термодинаміки як спеціальної теорії процесів у теплових машинах, або опору матеріалів як загального вчення про міцність — в технічній системі в цілому.

Крім того, саме знання технічних систем дає системний огляд спеціальної проблематики, завдяки чому легше виявляються пробіли, які необхідно ліквідувати при повторенні навчального матеріалу, і одночасно висуває взаємозв'язки між спеціальними дисциплінами на передній план.

Після закінчення вивчення дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем", студент повинен **знати:**

- закономірності еволюції та тенденції технічного розвитку технічних систем;

- рівні класифікації, загальні ознаки, категорії та перелік необхідних властивостей технічної системи;
- роль випробувань та експериментальних досліджень в процесі проектування та створення технічних систем;
- методи випробування технічних систем з використанням фізичного та математичного моделювання;
- знати технічні засоби для проведення випробувань та досліджень технічних систем;
- методи проведення технічних вимірювань при випробуваннях та дослідженнях технічних систем;
- знати правила сертифікації складних технічних систем.

вміти:

- проводити критичний аналіз сутності, моделі та структури технічної системи;
- оцінювати необхідні якості та властивості технічної системи і на основі цього приймати необхідні конструкторські рішення;
- проводити необхідні експериментальні дослідження та випробування в процесі створення складних технічних систем;
- проводити імітаційне моделювання при створенні складних систем;
- проводити технічні вимірювання та робити обробку експериментальних даних під час випробувань систем;
- проводити сертифікацію складних технічних систем за відповідними стандартами.

володіти:

- навичками аналізу складних технічних систем при прийнятті конструктивних рішень;
- навичками проведення випробувань в процесі проектування та створення технічних систем;
- знаннями методів проведення експериментальних досліджень, випробувань та сертифікації складних технічних систем.

Матеріал, викладений у даному конспекті лекцій, надає студентам необхідну інформацію з кожного з розділів навчальної програми курсу "Дослідження та випробування технічних систем", і допоможе студентам досягти необхідного рівня знань, практичних навичок та умінь.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Загальний об'єм курсу становить 28 годин і складається з двох змістових модулів. Даний конспект лекцій дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем" складається з двох частин, і розроблений відповідно до:

Робоча програма з дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем" для студентів за напрямом підготовки 6.05050305 – "Машинобудування", спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування (Колісні та гусеничні транспортні засоби), усіх форм навчання. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 19 с.

Нижче наведено назву першого змістового модуля дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем", найменування тем лекційних занять в модулі і вказано кількість годин аудиторних занять, для студентів денної форми навчання, окремо для кожної лекції.

Для кожної теми лекції вказано перелік питань які треба розглянути під час даної лекції. Слід враховувати те, що в даному конспекті лекцій приведено лише стислий огляд питань кожної лекції. Крім того навчальним планом дисципліни передбачено активну самостійну роботу студентів за вказаними темами курсу.

Вкінці кожної лекції наведено перелік питань для самоперевірки. Для самостійної роботи студенту слід користуватися рекомендованою літературою для вивчення дисципліни, перелік якої наведено в кінці даного конспекту лекцій, а також використовувати розроблені методичні вказівки:

Методичні вказівки з вивчення дисципліни "Дослідження та випробування технічних систем" та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби"), усіх форм навчання. / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 58 с.

Змістовий модуль 1. Основні терміни та визначення. Еволюція, класифікація, етапи створення та використання технічних систем.

Тема 1. Технічна система.

Основні терміни та визначення. Сутність, модель та структура технічної системи.

Тема 2. Еволюція технічних систем.

Закономірності еволюції та тенденції технічного розвитку систем. Управління процесом технічного розвитку. Мотивація досліджень та розробок.

Тема 3. Класифікація, властивості та оцінювання технічних систем.

Рівні класифікації. Загальні ознаки. Категорії властивостей. Відношення між властивостями. Перелік необхідних властивостей технічної системи.

Тема 4. Етапи створення та використання технічних систем.

Загальні положення. Стадії створення технічних систем різних типів виробництв. Послідовність стадій створення та використання технічної системи. Розподіл стадій та операцій між виконавцями.

Тема 5. Роль випробувань в процесі проектування та створення технічних систем.

Задачі та організація експериментальних досліджень. Основні принципи побудови систем контролю та випробувань технічних систем. Роль випробувань в процесі створення технічних систем.

Тема 6. Основні поняття та класифікація контролю і випробувань складних технічних систем.

Випробування і контроль – основні терміни та визначення. Взаємозв'язок вимірювань, контролю та випробувань. Класифікації контролю та випробувань. Загальна схема експериментальних досліджень. Класифікація відмов та дефектів складних технічних систем.

Тема 7. Дослідження складних технічних систем з використанням моделей.

Мета і задачі моделювання при створенні складних систем. Загальні відомості про випробування з використанням моделей. Випробування на основі фізичного моделювання. Випробування на основі математичного моделювання. Імітаційне моделювання складних систем.

ЛЕКЦІЯ № 5. РОЛЬ ВИПРОБУВАНЬ В ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

План лекції. Задачі та організація експериментальних досліджень. Основні принципи побудови систем контролю та випробувань технічних систем. Роль випробувань в процесі створення технічних систем.

Література: [1], с.19-47.

Роль і значення випробувань у процесі створення складних технічних систем, можна зрозуміти тільки розглянувши весь життєвий цикл виробу, яким і є така складна технічна система, як сучасний автомобіль.

Етапи життєвого циклу складних технічних систем.

Створення таких великих і складних технічних систем (СТС), як автомобільна техніка, нерозривно пов'язане з удосконалюванням і розвитком методів забезпечення необхідного рівня їх безпеки й надійності, починаючи від розробки технічних вимог, технічних умов на проектування й виробництво й закінчуючи їх комплексними випробуваннями й експлуатацією.

Життєвий цикл СТС протікає в рамках організаційної структури - науково-дослідних організаціях, конструкторських бюро (КБ), промислових підприємств і експлуатуючих організацій.

Формування концепції (загального задуму системи) проводиться в науково-дослідних організаціях, наприклад НАМИ ("Автомобильный и автотракторный институт", Москва - з 1989 науково-виробниче об'єднання по автотехніці, автомобільним, тракторним і комбайновим двигунам). Основою його є зовнішня інформація, що задається директивно на підставі аналізу розвитку галузі.

У ході формування концепції формулюється призначення СТС, загальна ідея можливої її організації, визначаються характеристики середовища й необхідні ресурси, формується поняття ефективності системи й установлюються показники ефективності. Етап закінчується розробкою технічного завдання (ТЗ) проектування, що є підставою для початку, системи.

Проектування здійснюється в КБ. Ціль проектування полягає в розробці оптимального варіанта організації СТС, технічної документації, необхідної для виробництва системи на підприємствах, у створенні дослідних зразків підсистем і підготовці технічної документації для серійного виробництва. На етапі проектування визначається можливість реалізації прийнятих при формуванні рішень (моделювання, макетування й випробування макетів підсистем), а також розробляється методика випробувань і вибирається іспитова апаратура.

По розробленій технічній документації **дослідне виробництво** КБ здійснює випуск дослідної партії. У процесі дослідного виробництва всі підсистеми зазнають ретельних випробувань як у цехах дослідного виробництва, так і на спеціальних іспитових полігонах в умовах, максимально наближених до реальних експлуатаційних умов. Ціль цих випробувань - виявлення можливих невідповідностей СТС технічній документації й експериментальне відпрацювання як самої системи, так і технічної документації на відповідність вимогам ТЗ.

Етап серійного виробництва починається із впровадження технічної документації на заводи промисловості. При цьому вносяться зміни, що відбивають конкретні особливості серійного заводу.

По відкоректованій технічній документації на серійному заводі здійснюється випуск настановної партії. Її призначення - перевірка якості відкоректованої для серійного виробництва технічної документації й виявлення "нестиковки", яка може відбитися на якості серійних зразків. Випуск настановної партії завершується її випробуваннями в умовах іспитового полігона або експлуатації. Технічна документація, відкоректована за результатами випробувань настановної партії, використовується для серійного випуску систем. Серійні системи проходять цикл лабораторних (стендових і полігонних) випробувань. При задовільних результатах випробувань ухвалюється рішення про прийняття системи в експлуатацію, після чого вона транспортується до місця її експлуатації.

Основне завдання етапу експлуатації полягає в досягненні цілей створення системи, що забезпечується підтримкою її параметрів на рівні, визначеному технічною документацією. У ході експлуатації проводяться експлуатаційні випробування, поточний ремонт і модернізація. Інформація, одержувана в процесі експлуатації, надходить в проектні організації (КБ), й на серійне виробництво, де вона використовується для створення нових і модернізації існуючих систем з ме-

тою поліпшення їх якості.

Отже *функції основних етапів створення нових виробів* розподіляються таким чином:

- замовник задає необхідний рівень безпеки й надійності виробу в тактико-технічних вимогах і технічних умовах на його проектування;
- конструктори закладають необхідний рівень безпеки й надійності в проєктований виріб, використовуючи при цьому сучасні принципи й методи раціонального конструювання, методи забезпечення високого рівня технологічності проєктованих об'єктів, а також проводячи комплекс дорожніх випробувань для експериментального підтвердження правильності обраних технічних рішень при створенні виробів;
- дослідне виробництво забезпечує рівень безпеки й надійності, закладений у конструкцію виробу з використанням сучасних досягнень (в області розробки й реалізації технологічних процесів виготовлення, контролю й заводських випробувань виробу), що підвищують точність і стабільність виробництва;
- експлуатація (включаючи транспортування, зберігання) зберігає заданий замовником, закладений конструкторами й забезпечений у процесі виробництва рівень безпеки й надійності виробу, з використанням сучасних методів технічного експлуатаційного обслуговування по фактичному стану та ін.

Оскільки сучасні автомобілі - це складні й дорогі інженерні конструкції, то ефективність їх використання багато в чому визначається їхньою надійністю. А забезпечення надійності в процесі створення автомобіля полягає у виявленні й усуненні допущених при розробці конструктивних недоліків, що приводять до відмов, а також в організації умов виробництва й експлуатації автомобілів, які виключили б появу нових відмов.

Таким чином, відмови у функціонуванні автомобіля, і його елементів - пов'язані з помилками проєктно-конструкторських розробок, технології виготовлення та експлуатації.

Отже усунення помилок і недоробок проєктно-конструкторського характеру здійснюється тільки в процесі проведення різних випробувань агрегатів і систем проєктованого автомобіля.

Тому проведення різноманітних випробувань і експериментальних досліджень окремих вузлів і агрегатів на натурних зразках в ході виконання конструкторських робіт - є найбільш інформативною операцією, але й найбільш дорогою.

Експериментальні дослідження й відпрацювання конструкцій мають своєю метою розробку й уточнення методик розрахунків, їх експериментальне підтвердження. Ці дослідження звичайно виконуються на моделях у широкому діапазоні змінюваних параметрів конструкції. У деяких випадках моделі виготовляють у зменшеному масштабі, конструктивно подібними натурній конструкції. Елементи, не істотні для міцності й твердості, не відтворюються.

Зазначені випробування потрібні при розробці й впровадженні нових конструктивно-силових схем, конструкційних матеріалів, технологічних процесів і т.п. У результаті експериментальних досліджень підтверджуються фактичні характеристики й працездатність окремих вузлів і агрегатів. В експериментальному складанні повинні бути встановлені всі конструктивні елементи, що впливають на міцність і твердість (приварні елементи, місцеві вирізи, конструктивні надбудови). Дана група досліджень включає статичні й динамічні випробування окремих вузлів і агрегатів, випробування теплоізоляційних і теплозахисних покриттів.

У процесі статичних випробувань:

- визначають дійсні значення міцності і жорсткості характеристик з урахуванням усіх особливостей конструкції, технології й матеріалів;
- підтверджують прийняті в розрахунках значення коефіцієнтів безпеки й результати розрахунків напруженого стану й твердості конструкції при експлуатаційних навантаженнях або вказують на помилковість рішень використовуваних у конструкції вузлів і агрегатів;
- виявляють на підставі аналізу результатів руйнуючих випробувань дійсні причини руйнування конструктивних елементів;
- виявляють у результаті аналізу напруженого стану й деформацій, елементи й вузли недостатньої й надлишкової міцності.

Динамічні випробування проводять для різних конструктивних елементів з метою одержання значень узагальненої твердості й коефі-

цієнтів демпфірування, перевірки утомної міцності, дослідження поведінки конструкцій в умовах нестаціонарного навантаження.

У результаті виконаного комплексу досліджень уточнюється конструктивне виконання, коректується конструкторська документація, визначаються фактичні значення масових характеристик вузлів і агрегатів, доповнюються або змінюються вимоги до виробництва.

Після завершення розробки конструкторської документації продовжують експериментальне відпрацьовування конструкцій автомобіля й технології їх виробництва. Для цього виготовляється певне число натурних вузлів і агрегатів для випробувань на міцність, відпрацьовування технології, перевірки окремих систем на функціонування тощо.

Завдання відпрацьовування на цьому етапі ті ж самі, що й на попередньому, але носять контрольний характер (конструкторсько-доводочні випробування - КДВ). За результатами КДВ вносяться зміни в конструкторську документацію, коректуються характеристики вузлів і автомобіля в цілому, уточнюється технологічна документація на виготовлення зразків автомобіля.

Аналіз даних випробувань не тільки підтверджує правильність ухвалених рішень і виявляє слабкі місця, але й дозволяє оцінити резерви, закладені на попередніх етапах роботи.

В умовах серійного виробництва якість виготовлення конструкцій забезпечується виконанням вимог креслення. Однак прямий контроль не завжди можливий або досить ускладнений. Крім того, у процесі виготовлення агрегатів і відсіків можуть з'явитися приховані дефекти в результаті впливів, не забезпечених технологічним процесом. Тому для відповідальних і сильно навантажених вузлів і агрегатів у процесі їх виготовлення передбачені різні методи вибіркового контролю та випробувань.

При контрольно-вибіркових випробуваннях (КВВ) окремі зразки вузлів і агрегатів доводять до руйнування, тому при цих випробуваннях можна оцінити запас міцності. Дані випробування не є безпосередньою перевіркою міцності кожного конструктивного елемента, але вони гарантують, що при стабільному технологічному процесі коефіцієнт безпеки, закладений у конструкції, буде реалізований.

Розрізняють контрольно-вибіркові випробування від партії, періодичні й настановні. Випробуванням від партії піддають окремі деталі й прості складання (болти, тяги і т.п.) від однієї до декількох штук з партії. Періодичним випробуванням піддають порівняно складні

конструктивні елементи (вузли, агрегати) для підтвердження стабільності технологічного процесу в часі. Настановні випробування проводять у тому випадку, коли виробництво виробу відновлюється після тривалої перерви або принципових змін технології виготовлення, а також якщо виготовлення конструкції здійснюється по документації й технологічним процесам, освоєним на іншому підприємстві.

Питання для самоперевірки

1. Що таке життєвий цикл виробу?
2. Назвіть основні етапи життєвого циклу.
3. Які роботи виконуються на етапі проектування виробу?
4. З чого складається етап серійного виробництва?
5. Як використовується інформація одержана під час етапу експлуатації виробу?
6. Що забезпечує дослідне виробництво?
7. Для чого потрібні експериментальні дослідження?
8. Коли проводять динамічні випробування?
9. Що показують дані випробувань?
10. Які види контрольно-вибіркових випробувань ви можете назвати?
11. Яка головна роль випробувань в процесі проектування та створення складних технічних систем?

ЛЕКЦІЯ № 6. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ КОНТРОЛЮ І ВИПРОБУВАНЬ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

План лекції. Випробування і контроль – основні терміни та визначення. Взаємозв'язок вимірювань, контролю та випробувань. Класифікації контролю та випробувань. Загальна схема експериментальних досліджень. Класифікація відмов та дефектів складних технічних систем.

Література: [1], с.48-91; [2], с. 8-10.

Випробування і контроль – основні терміни та визначення.

Під випробуваннями розуміється експериментальне визначення кількісних і (або) якісних характеристик властивостей об'єкта:

- у процесі різного виду впливів на нього;
- при його функціонуванні;
- при моделюванні об'єкта й (або) впливів.

Таким чином, при будь-яких випробуваннях повинні бути встановлені характеристики властивостей продукції (об'єкта випробувань), тобто параметри або (і) показники якості: призначення, надійності, ергономічні, технологічні, екологічні, безпеки та ін. Номенклатура показників якості продукції детально представлена в ГОСТ 22851. При цьому розрізняють *два види параметрів і показників якості об'єкта випробувань (ОВ)*:

- вимірювані - фізичні величини й похідні від них;
- невимірювані (наприклад, щільність компонування, зручність користування, раціональність форми та ін.).

Вимірюваними, контрольованими й керованими є параметри наступних видів: температура й тепло, тиск і вакуум, вологість, лінійні й кутові, світлові й оптичні, акустичні, електричні й магнітні, електромагнітні й радіотехнічні; рівень, обсяг, витрата, склад і концентрація фізико-хімічних властивостей речовини; сила, маса, швидкість і прискорення; іонізуюче випромінювання; аеродинамічні й комбіновані параметри та ін. (див. ГОСТ 26001).

У широкому сенсі під виміром розуміють алгоритмічну опера-

цію, яка ставить у відповідність спостережуваному стану об'єкта, процесу, явища - певне позначення (число, номер або символ). Найпоширеніші при випробуваннях технічних виробів статистичні виміри, під якими розуміють знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних фізичних засобів. Необхідна інформація при цьому виходить із результатів вимірів за допомогою обробки експериментальних даних.

Параметри об'єкта випробувань можуть бути: постійною або випадковою величиною; детермінованою або випадковою функцією.

Для контролю характеристик необхідно задати їхні необхідні значення. Останні вказує розроблювач об'єкта в документації (кресленнях, технології, технічних умовах і т.п.). Перевірка відповідності об'єкта (продукції або процесу) установленим технічним вимогам називається технічним контролем. Аналізуючи дане визначення технічного контролю, можна стверджувати, що для всякого контролю характерне здійснення двох основних етапів:

- одержання інформації про фактичний стан об'єкта, про ознаки й показники його властивостей;
- зіставлення цієї інформації із заданими вимогами й установлення відповідності фактичних даних необхідним значенням.

В основному ці етапи розмежовані. Однак у ряді випадків границя нерозрізнена в часі. У таких випадках перший етап може бути виражений нечітко або взагалі не спостерігатися. Характерним прикладом є контроль розміру калібром, що полягає в зіставленні фактичного значення розміру із гранично припустимим.

Інформація другого етапу використовується для виробітку відповідних керуючих впливів на контрольований об'єкт. У цьому сенсі всякий контроль завжди активний. Первинна інформація зіставляється з технічними вимогами, записаними в нормативній документації, з ознаками контрольного зразка, з даними, зафіксованими за допомогою калібрів, і т.п.

На стадії розробки продукції технічний контроль полягає, наприклад, у перевірці відповідності дослідного зразка й (або) розробленої технічної документації правилам оформлення й технічному заданню.

На стадії виготовлення, технічному контролю піддають якість, комплектність, упакування, маркування й кількість пропонованої продукції, хід (стан) виробничих процесів.

На стадії експлуатації продукції технічний контроль полягає у перевірці дотримання вимог експлуатаційної й ремонтної документації.

Об'єктами технічного контролю є предмети праці (вироби, матеріали, технічна документація й т.п.), засоби праці (наприклад, устаткування підприємств) і трудові (наприклад, виробничі) процеси. Контроль здійснюється різними методами що засновані на фізичних, хімічних, біологічних та інших явищах і залежностях (законах, принципах), застосовуваних при одержанні первинної інформації про об'єкт контролю.

Взаємозв'язок вимірювань, контролю та випробувань.

Якщо розглядати поняття "виміру", "контроль" і "випробування" на основі оцінки їх внутрішньої сутності, то необхідно робити це із двох позицій.

1. Зазначені поняття формально характеризують автономні процедури, виконання яких забезпечує розв'язок того або іншого завдання. Так, наприклад, з наведеного вище визначення поняття "вимір" видно, що вимір - це деяка технічна операція, що має метою кількісне визначення фізичної величини.

По своїй суті вимір - це експериментальний процес, при якому за допомогою допоміжних засобів порівнюють невідоме значення вимірюваної величини із прийнятою одиницею виміру й визначають, яке число раз ця одиниця втримується у вимірюваній величині. Для цього одиницю величини відтворюють у зручному для порівняння виді - у так званій мірі.

Поняття "контроль" не обмежується наведеними визначеннями. Контроль (технічний контроль) визначається як перевірка відповідності показників виробу встановленим технічним вимогам. Це відноситься до контролю як за кількісною ознакою (вимірювальний контроль), так і якісною або за альтернативною ознакою.

І, нарешті, з наведеного вище визначення поняття "випробування" видно, що основна мета випробувань полягає в оцінці якості виробу при його функціонуванні в тих або інших умовах, як правило в тих, що відрізняються від нормальних.

Таким чином, виходячи з даних визначень, можна (у деякому змісті) розглядати процедури вимірів, контролю й випробувань як автономні, що виконують самостійні завдання.

2. Зазначені процедури функціонально зв'язані. Дійсно, досить очевидно, що основним джерелом відомостей про якість продукції, характер виробництва та інші показники є виміри. Саме в процесі їх проведення й виникає та інформація, яка забезпечує розв'язок завдань по оцінці показників якості продукції. Звідси випливає, що виміри входять як складений елемент у процедури й контролю, і випробувань.

Відмінність процедур виміру, контролю й випробувань полягає також і в тому, що якість вимірів характеризується погрішністю одержуваного результату, якість контролю - вірогідністю його результату, а якість випробувань - погрішністю й вірогідністю результату випробувань.

Класифікації контролю та випробувань.

Існує велика кількість видів і методів контролю продукції на різних стадіях її життєвого циклу. Їх можна класифікувати по наступних ознаках.

а) по етапах життєвого циклу продукції розрізняють контроль:

- 1) процесу проектування - перевірка конструкторської й (або) технологічної документації на стадії розробки продукції;
- 2) виробничий - перевірка виробничого процесу і його результатів на стадії виготовлення продукції. Цей вид контролю, як правило, включає допоміжні, підготовчі й технологічні операції;
- 3) експлуатаційний - перевірка на стадії експлуатації продукції. Об'єктами експлуатаційного контролю можуть бути експлуатовані вироби й процес експлуатації.

б) по впливу на виріб контроль може бути:

- 1) руйнуючим - перевірка якості продукції з порушенням її придатності до використання по призначенню. Він застосовується тоді, коли важко (неможливо) урахувати велику кількість одиничних показників якості продукції. Іноді з економічних міркувань виявляється доцільним для контролю зруйнувати певну кількість виробів. Такі процедури проводять часто при всебічному аналізі якості складних (спеціальних) систем при виконанні, наприклад, великих або малих контрольних випробувань;

- 2) неруйнуючим - перевірка якості продукції без порушення її придатності до використання по призначенню. Провідну роль серед засобів неруйнуючого контролю відіграють засоби вимірювань, що використовують оптичні, електромагнітні, ультразвукові, теплові та інші методи.
- в) по повноті охопту виробів розрізняють контроль:
- 1) суцільний - перевірка кожної одиниці продукції з однаковою повнотою. Таким чином, при суцільному контролі досліджують усі деталі (виробу) партії (100%-ий контроль);
 - 2) вибіркового - перевірка вибірок або проб з партії або потоку продукції. Даний контроль, процедури й правила якого ґрунтуються на законах математичної статистики, часто називають статистичним контролем якості продукції.
- г) по меті оцінки якості виробів розрізняють контроль:
- 1) приймальний - перевірка відповідності якості вихідних матеріалів, напівфабрикатів, виробів (деталей, складальних одиниць, комплектів і комплексів) вимогам, установленим нормативною документацією. За результатами цього контролю ухвалюється рішення про придатність виробів до поставки й використання по призначенню.
 - 2) статистичного регулювання технологічного процесу - регулярна перевірка параметрів технологічного процесу з метою оцінки їх стану й налагодження.
- д) по стадіях виробничого процесу розрізняють контроль:
- 1) вхідний - перевірка продукції постачальника, що надійшла замовникові і призначеної для використання при виготовленні, ремонті або експлуатації продукції. Вхідний контроль комплектуючих виробів досить необхідний, тому що на їхню частку доводиться до 70% усіх відмов готових виробів при їхній експлуатації.
 - 2) операційний - перевірка продукції або процесу при виконанні або після завершення певної операції. Операційний контроль забезпечує безперервність перевірки на всіх технологічних операціях виробів, що визначають якість. При цьому технологічний процес якої-небудь операції контролюється й коректується протягом усього

часу її виконання. Найбільш повно це завдання вирішують статистичні методи вибіркового контролю, коли за результатами контролю (вимірів) елементів вибірки ведуть спостереження за двома основними характеристиками ходу процесу: рівнем надійності й точністю;

- 3) прийомоздаточний - перевірка готової продукції, за результатами якої ухвалюється рішення про її придатність до поставки й (або) використання. Прийомоздаточний контроль проводиться на виході технологічного виробництва, коли виконується комплексна перевірка готового виробу. За результатами цього контролю ухвалюється рішення про його придатність до поставки й використання за призначенням;

є) по характеру виконання контроль може бути:

- 1) інспекційним - спеціально вповноважені виконавці перевіряють ефективність контролю, що раніше виконувався. Інспекційний контроль не завжди зводиться до повторення в тому або іншому обсязі раніше зробленого контролю. Ефективність уже проведеного контролю перевіряється також оцінкою, наприклад, правил виконання контролю;
- 2) летучим, який також носить інспекційний характер, але може бути розповсюджений на весь хід технологічного процесу й конструкторсько-технологічну документацію. Летучий контроль здійснюють у випадкові моменти часу, обрані у встановленому порядку. Ефективність його обумовлюється раптовістю, правила забезпечення якої повинні бути спеціально розроблені. Летучий контроль, як правило, виконується безпосередньо на місці виготовлення, ремонту, зберігання й т.п.;

ж) по прийнятих рішеннях розрізняють контроль:

- 1) пасивний - здійснюється перевірка на придатність, тобто брак тільки виявляється (фіксується);
- 2) активний - дозволяє встановити причину появи тих або інших відхилень значень параметрів виробів від норми;

з) по характеру надходження продукції на перевірку розрізняють контроль:

- 1) безперервний - вироби зазнають перевірки безупинно;

- 2) періодичний - вироби перевіряються через установлені проміжки часу;
- і) залежно від характеру обумовленого параметра розрізняють контроль:
 - 1) за кількісною ознакою - визначають числові значення найважливіших показників якості продукції і по їхньому співвідношенню із заданими нормами судять про якість виробу;
 - 2) за якісною ознакою - визначають, чи укладається контрольований показник якості продукції у задані допуски, тобто проводиться допусковий контроль;
 - 3) за альтернативною ознакою - окремий випадок контролю за якісною ознакою, коли вся продукція складається із двох груп: придатної й дефектної. Рішення про обсяг контрольованої продукції ухвалюється залежно від числа дефектів, що доводяться на певне число одиниць продукції;
- к) залежно від використовуваних засобів контролю технічний контроль можна розділити на наступні види:
 - 1) електричний;
 - 2) механічний;
 - 3) фізико-хімічний;
 - 4) контроль по контрольному зразку;
 - 5) органолептичний;
 - 6) візуальний;
 - 7) технічний огляд.

Для оцінки якісних властивостей і кількісних значень параметрів виробів на стадіях розробки, виробництва й експлуатації широко використовуються різні види випробувань. У ГОСТ 16504-81 "Випробування й контроль якості продукції. Основні терміни й визначення" випробування класифікуються по наступних ознаках: рівню проведення; мети проведення; місцю проведення; характеру зовнішніх впливів; тривалості випробувань; впливу на об'єкт випробувань; обумовленим характеристикам; стадіям життєвого циклу виробу.

Випробування за рівнем проведення підрозділяються на три види: державні, міжвідомчі й відомчі. Державні випробування - це випробування встановлених найважливіших видів продукції, проведені

головний організацією по цих випробуваннях, або приймальні випробування, виконувати державною комісією або відповідною організацією, якій надано право їх проведення.

Загальна схема експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження на відміну від випробувань проводяться з метою зміни конструктивних параметрів машини залежно від їхнього призначення й застосування. У процесі їх проведення дослідник одержує інформацію про фізичні процеси, що протікають при роботі технічної системи при різних умовах експлуатації у відносно короткий термін з наступною їхньою перевіркою на відтворюваність і обґрунтованість.

Але, при організації проведення випробувань техніки, необхідно враховувати особливості структури й умов протікання робочих процесів та їх елементів, до основних особливостей яких можуть бути віднесені їхня статистична сутність і різнозалежність фізичної природи.

У методології науки виділяють два рівні пізнання - емпіричний і теоретичний. При емпіричному рівні опираються на спостереження, експеримент, групування, класифікацію й наступний аналіз результатів експерименту. При теоретичному рівні розглядаються побудова й розвиток наукових гіпотез і теорій.

Однак, організація проведення випробувань і експериментальних досліджень заснована на виконанні логічно взаємозалежних етапів робіт зміст яких наведено нижче. До них відносяться:

- визначення об'єкта й предмета досліджень;
- постановка мети досліджень;
- розробка теоретичних основ, і допущень;
- виявлення значимих факторів, що впливають на предмет дослідження;
- визначення границь дослідження;
- розробка методики проведення досліджень;
- вибір способу проведення випробувань (модельний або натурний);
- розробка плану проведення досліджень;
- розробка експериментальної або іспитової установки;
- необхідні технічні засоби для проведення досліджень;
- обґрунтування ступеня точності вимірів і припустимих погрешностей;

- проведення досліджень;
- аналіз і обробка отриманих результатів;
- побудова висновків і рекомендацій.

У дослідницькій роботі методи, прийоми, самі об'єкти досліджень і їх терміни творчої роботи змінюються дуже часто.

Найбільш раціональними варіантами організації експериментів і досліджень можуть бути:

- порівняльна оцінка декількох об'єктів у заздалегідь установлених оптимальних режимах для: вибору й обґрунтування оптимальних параметрів машин та їх робочих органів; регулювання встановлених режимів роботи;
- експеримент для виявлення механізму явищ при якому розкривається фізична структура (модель процесу).

Для забезпечення сучасного технічного рівня й конкурентоспроможності техніки й технологій, які розробляються й впроваджуються у виробництво, необхідна їхня інтенсифікація в плані проведення патентних досліджень на всіх етапах виконання цих наукових праць.

Патентні дослідження є основою для правильного вибору напрямку, у якому необхідно вести пошук оригінальних розв'язків науково-технічних завдань. Порядок виконання таких робіт регламентований ДСТУ 33575-97. Він включає визначення предмета пошуку, країн для пошуку інформації, видів інформаційних джерел, класифікації предметів пошуку, необхідної глибини пошуку по країнах і джерелам інформації й складання відповідного документа у вигляді звіту про патентний пошук.

Класифікація відмов та дефектів складних технічних систем.

Подія, що полягає в порушенні працездатного стану, називається відмовою. Основними причинами відмов є дефекти конструкції в цілому, окремих її деталей (що є первинними структурними одиницями практично будь-якої технічної системи) і з'єднань.

Під терміном "дефект" розуміється кожна окрема невідповідність конструкції встановленим вимогам, яка може привести до відмови або ушкодження при її експлуатації. Дефекти створюються в основному на етапах конструювання, розробки технології, а також виготовлення деталей, складання й монтажу виробу і його елементів.

Відмови елементів СТС класифікуються на первинні, вторинні й

помилкові команди. Відмови всіх цих категорій можуть мати різні причини.

Первинна відмова елемента визначається як його неробочий стан, причиною якого є він сам. Необхідно виконати ремонтні роботи для повернення елемента в робочий стан. Основними причинами первинних відмов є в основному конструктивні, виробничі (технологічні) і так звані деградаційні дефекти.

Причинами дефектів конструкції (конструкторських недоробок) елементів (систем, вузлів, агрегатів) і виробу в цілому є: неповна відповідність технічних характеристик виробів пропонованим вимогам, пов'язане з нераціональним вибором принципової, структурної, конструктивної схем виробів і всього комплексу; неправильний вибір комплектуючих виробів, матеріалів і напівфабрикатів; недостатній облік можливостей розробки, експериментального відпрацювання й очікуваної якості виготовлення виробів; недостатній облік реальних умов експлуатації й застосування; помилки при проектуванні, конструюванні, експериментальному відпрацюванню виробів.

Виробничі (технологічні) дефекти виникають з наступних причин: неповна відповідність якості виготовлення виробів вимогам конструкторської документації, недостатня якість вихідних матеріалів, неправильний вибір технології, помилки в технологічній документації, порушення (при виготовленні) вимог технології й системи контролю якості продукції.

Вторинна відмова така як і первинна, за винятком того, що сам елемент не є причиною відмови. Вторинні відмови пояснюються впливом попередніх або поточних надлишкових навантажень на елемент та іншими причинами. Основні причини цих відмов: надлишкові (вихідні за межі припустимих значень) напруги електричного струму та інші небажані збурювання, джерелами виникнення яких можуть бути:

- сполучені (сусідні) елементи (системи, вузли, прилади, агрегати і т.п.);
- навколишнє середовище;
- персонал, якщо його дії приводять до виходу елементів з ладу внаслідок порушення правил (експлуатації виробів), передбачених конструкторською документацією (при цьому первісною причиною виникнення вторинних відмов можуть бути також дефекти експлуатаційної документації).

Слід зазначити, що усунення впливу джерел підвищених навантажень на елемент не гарантує повернення його в робочий стан, тому що попереднє перевантаження могло викликати в ньому необоротні зміни.

Помилкові команди представляються у вигляді елемента, що перебуває в неробочому стані через неправильний сигнал керування або перешкод, наприклад - оператор не нажав аварійну кнопку (помилкова команда від аварійної кнопки).

Питання для самоперевірки

1. Що таке випробування?
2. Які показники повинні бути встановлені при випробуваннях?
3. Які параметри вимірюють під час випробувань?
4. Що є об'єктом технічного контролю?
5. Як пов'язані між собою вимірювання, контроль та випробування?
6. Що таке вимірювання?
7. Як класифікуються процедури контролю?
8. Як класифікуються випробування?
9. Як класифікують процедури контролю по стадіях виробничого процесу?
10. Як можна розділити процедури технічного контролю по використовуваних засобах?
11. З якою метою проводять експериментальні дослідження?
12. Назвіть основні етапи проведення експериментальних досліджень.
13. Як класифікують відмови та дефекти складних технічних систем?
14. Що може бути причиною дефектів конструкції виробу?
15. Що таке помилкова команда?

ЛЕКЦІЯ № 7. ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ

План лекції. Мета і задачі моделювання при створенні складних систем. Загальні відомості про випробування з використанням моделей. Випробування на основі фізичного моделювання. Випробування на основі математичного моделювання. Імітаційне моделювання складних систем.

Література: [1], с.120-180.

Мета і задачі моделювання при створенні складних систем.

У наш час моделювання є невід'ємним елементом процесу створення будь-якої складної технічної системи (СТС).

Спочатку методи моделювання одержали широке поширення при вирішенні порівняно нескладних завдань. З появою складних систем роль моделювання при оцінці параметрів досліджуваних процесів суттєво зросла. Це пояснюється особливостями досліджуваних об'єктів, що впливають зі складності функціональних зв'язків між параметрами системи, що змінюються умовами зовнішнього середовища й оцінюваними показниками.

Звичайно при моделюванні СТС стикаються із ситуацією, коли досліджувані процеси в системі й умови зовнішнього середовища мають імовірнісний характер, велике число факторів, що впливають на оцінювані показники, оцінки шуканих параметрів потрібно одержати для широкого діапазону змін умов функціонування системи.

Моделювання (як метод досліджень) широко застосовується не тільки при підготовці технічних пропозицій і формуванні технічних вимог до створюваного зразка, але й на етапах ескізного й технічного проектування, при відпрацьовуванні зразків у замкнених системах, у складі яких передбачається їхнє використання, а також на етапі різних видів натурних випробувань, що визначають характеристики об'єктів, їх опрацьованість і можливість переходу від даного етапу випробувань до наступного або слугують підставою для передачі об'єктів у серійне виробництво.

У відповідності з усталеною практикою, звичайно застосовують

три основні види моделювання: математичне, напівнатурне й фізичне.

Кінцевою метою математичного моделювання є одержання необхідної точності оцінок обраних кількісних показників. Найбільше поширення при цьому моделюванні одержали методи статистичних випробувань, еквівалентних збурювань і інтерполяційний метод, що представляють собою прямі методи розрахунків імовірнісних характеристик систем. При цьому оцінки розраховуються в один етап без обліку результатів попереднього моделювання. У дійсності ж між оцінками, знайденими на різних етапах моделювання, існує певна статистична залежність, облік якої в багатьох випадках дозволяє суттєво скоротити число експериментів.

Тому що матеріальний внесок в обсяг моделювання для складних систем великий, то скорочення загального числа експериментів набуває важливого значення. Тому розробляються комбіновані методи використання різнорідних статистичних оцінок, при яких на кожному черговому етапі моделювання використовується раніше отримана інформація. Обчислювальні методи, використовувані для визначення оцінок параметрів як при напівнатурному, так і при фізичному моделюванні, у більшості випадків аналогічні застосовуваним при математичному моделюванні.

Методами моделювання звичайно вирішується наступне основне коло завдань:

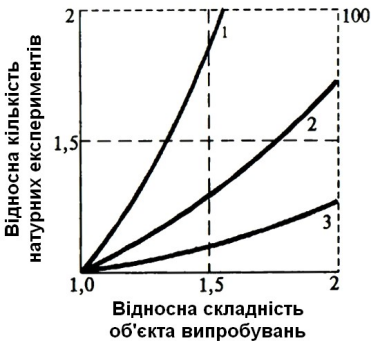
- обґрунтування технічних вимог до створюваного об'єкта і його окремим частинам;
- порівняльна оцінка ефективності існуючих зразків і їх частин, подібних розроблювальним;
- вибір раціональних технічних рішень по побудові створюваного об'єкта, його систем і підсистем і перевірка відповідності отриманих характеристик заданим на стадії як проектної розробки, так і випробувань;
- відпрацьовування систем, підсистем, блоків і їх елементів, уточнення технічних рішень і вимог до об'єктів у процесі їх створення;
- вибір і відпрацьовування алгоритмів функціонування об'єктів у реальних умовах застосування;
- попередня оцінка очікуваної ефективності створюваного об'єкта;
- відпрацьовування об'єкта в цілому перед проведенням натур-

- них випробувань;
- обґрунтування програм і методів проведення різних видів випробувань об'єкта, його систем, підсистем, блоків і елементів;
- розв'язок завдань, пов'язаних з ергономічним забезпеченням як функціонування об'єкта, так і його випробувань;
- одержання характеристик, які не можуть бути визначені (через можливі економічні, технічні, організаційні та інші види обмежень) у натурних випробуваннях, а також статистичних характеристик, необхідних для оцінки випробовуваного об'єкта;
- визначення відповідності характеристик об'єкта заданим вимогам і контрольна перевірка цих характеристик з урахуванням натурних випробувань;
- оцінка ефективності об'єкта у всьому діапазоні реальних умов його застосування й т.п.

При розв'язку перерахованих завдань математичне моделювання використовується, коли відомо досить достовірний математичний опис модельованого процесу. Напівнатурне моделювання застосовується для оцінки апаратурних рішень, ергономічної оцінки й при відпрацьовуванні зразків для уточнення технічних рішень, одержання об'єктивних оцінок для прийняття рішень про проведення натурних випробувань і можливості переходу від одного етапу випробувань до наступного. Фізичне моделювання застосовується при відсутності досить достовірного математичного опису процесу й неможливості виконання напівнатурного моделювання.

Складність сучасних випробовуваних систем і комплексів, засобів, що забезпечують експериментальне відпрацьовування об'єктів, організаційної структури експериментів і пов'язані із цим труднощі перебудови експериментів у процесі їх реалізації роблять необхідним проведення ряду заходів щодо підвищення ефективності даного етапу створення СТС. Один зі шляхів розв'язку зазначеного завдання — широке залучення методів моделювання до натурних експериментів з метою одержання в обмежений час результатів з мінімального обсягу експериментальних даних.

З рис. 7.1 видно, що збільшення обсягу супровідного моделювання дозволяє в 1,5-2 рази скоротити число натурних експериментів при відпрацьовуванні СТС.



1 - обсяг моделювання;
2,3 - відносне число натурних експериментів без моделювання та з моделюванням відповідно

Рисунок 7.1 - Взаємозв'язок обсягів моделювання й натурних випробувань

Однієї з особливостей складних систем натурного експерименту є те, що при їхній реалізації не завжди можливо провести необхідний обсяг експериментальних досліджень функціонування об'єкта в цілому або окремих його систем і підсистем у реальних умовах застосування. Тому в натурних випробуваннях доводиться створювати деяку імітаційну обстановку. У цих випадках повнота й вірогідність одержуваного експериментального матеріалу можуть бути гарантовані, якщо до досліджень притягнуті методи моделювання. Незалежно від виду моделювання й крім робіт, пов'язаних з постановкою завдання, вибором критеріїв оцінки й методів оптимізації, реалізації моделей, найважливішим завданням є розробка моделей, що об'єктивно відбиває підлягаючі вивченню процеси.

Загальні відомості про випробування з використанням моделей.

Моделювання - це метод дослідження об'єкта випробувань (ОВ) фізичних процесів, що й протікають у ньому. В основі методу лежить заміна ОВ й реальних процесів, що проходять у ньому, моделлю, структура й спосіб реалізації якої можуть вивчатися шляхом математичного, фізичного й фізико-математичного моделювання. Моделювання дозволяє скоротити обсяг, тривалість і вартість випробувань у порівнянні з лабораторними й експлуатаційними методами.

Випробування з використанням моделювання є важливим засобом вивчення властивостей ОВ. Вони дозволяють швидко й ефективно оцінити поведінку ОВ на всіх стадіях від проектування до експлуатації шляхом імітації поведінки реального ОВ іншим, більш зручним для випробувача методом. Особливо важливе значення набуває випробування з використанням моделювання в аварійних ситуаціях для уточнення процесів втрати працездатності ОВ при різних експлуатаційних умовах і режимах роботи, а також при виборі контрольованих параметрів ОВ в процесі його розробки.

За допомогою моделювання можна відтворювати роботу ряду систем, практично не прибігаючи до натурних випробувань, оптимізувати їхні характеристики, здійснювати короткостроковий або глибокий прогноз. Основне призначення моделювання - вибір оптимальної стратегії пошуку найкращого з можливих варіантів.

Однак на практиці цим проблема моделювання не обмежується. Обрана в процесі моделювання стратегія дослідження буде оптимальною для сукупності розглянутих умов. Але вона може виявитися й неоптимальною, якщо в ході дослідження розкриються нові, до того невідомі властивості системи. У цьому випадку повинне змінитися відповідно й напрямок пошуку.

Допустимо, що умовами технічного завдання на розробку двигуна автомобіля сформульовані основні вимоги: рівень надійності, значення основних параметрів, маса конструкції й т.п. Завдяки проведеній роботі поставлена мета виявилася досягнутою. Однак за допомогою моделювання були виявлені деякі нові властивості й прийнята схема конструкції двигуна та його параметрів виявилися неоптимальними. Тоді в результаті проведеного дослідження намітилася нова стратегія пошуку, що дозволяє вирішувати поставлене завдання вже при значно полегшеній конструкції. У цьому й полягає евристичний зміст ідеї моделювання, завдяки якому виявлення нових властивостей процесу при аналізі отриманих результатів визначає нові шляхи розв'язку комплексного завдання. З урахуванням цього, моделювання фізичних процесів дозволяє вирішувати завдання як би двох планів: по-перше, визначати оптимальним образом шлях розв'язку завдання при заздалегідь відомому складі факторів і, по-друге, завдяки виявленню нових властивостей і особливостей досліджуваного процесу здійснювати евристично стратегію пошуку.

Дослідження методом моделювання починається звичайно із проробки апріорної інформації з випробувань натурних об'єктів, вибору виду моделі, розробки спеціальної робочої моделі, призначеної для конкретних досліджень. Потім уже проводиться експериментування на даній моделі з наступним уточненням її виду й самих результатів моделювання. У ряді випадків моделювання закінчується серією контрольних випробувань натурних систем з метою підтвердження вірогідності отриманих результатів.

По призначенню розрізняють два основні види моделей, використовуваних при проведенні випробувань: фізичні й математичні.

Фізична модель дозволяє відтворити ОВ зі збереженням його фізичної природи процесів, що й відбуваються в ньому, при відповідних впливах зовнішніх факторів. Математична модель являє собою математичні співвідношення, що описують ОВ, процеси що й відбуваються в ньому при зовнішніх впливах.

Фізичне моделювання застосовують при дослідженні й оцінці характеристик ОВ, а також процесів їх функціонування, коли одержання експериментальних характеристик за результатами випробувань реальних ОВ пов'язане з великими труднощами й витратами й не представляється можливим здійснити математичне моделювання. У цих випадках фізична модель дозволяє виявити залежність між різними параметрами безпосереднім виміром. Потім, опираючись на теорію подоби або використовуючи метод аналогій, результати випробувань переносяться на оригінал (моделюваний об'єкт або процес).

Залежно від властивостей ОВ фізичні моделі можуть використовуватися при проведенні дослідницьких випробувань для оцінки деяких (наприклад, найбільш важко вимірюваних на ОВ) характеристик, при випробуваннях на надійність із метою визначити "слабкі" ланки й оцінити показники надійності по поведінці слабкої ланки.

Математичне моделювання застосовують у тих випадках, коли є можливість розрахувати (з використанням ЕОМ) зміни (у процесі зовнішніх впливів) параметрів, що визначають поведінку ОВ. Математичні моделі являють собою математичні співвідношення, що використовують дискретні значення вихідних даних, що й відбивають результати розрахунків також для дискретних моментів часу. Розрахунки значень параметрів на виході ОВ по відомих для дискретних моментів часу значенням вхідних параметрів, у тому числі зовнішніх впливів, називається цифровим моделюванням.

Цифрове моделювання складних ОВ на ЕОМ здійснюється шляхом "програвання" як різних варіантів описів самого ОВ, так і його взаємодії з навколишнім середовищем. Такий напрямок прийнято називати імітаційним моделюванням.

Розробка математичних моделей може вестися на основі проробки статистичних даних. Однак якщо досліджується зовсім нове явище, то на ранніх етапах дослідник не має у своєму розпорядженні достатній обсяг інформації, що дозволяє за допомогою створюваної моделі побачити не сам процес, а "намацати" лише його схему. Таке наближене відображення процесу фіксується за допомогою так званих

концептуальних моделей. Концептуальні моделі визначають нашу умовну уяву про досліджуваний процес, а точніше - дають тільки кісткову схему.

Одне з найбільш важливих завдань моделювання - це вивчення в процесі вдосконалювання систем їх характеристик, і виявлення схованих властивостей. До цих властивостей належать: оптимальні конструктивні й технологічні характеристики; фактичні значення основних параметрів при будь-яких комбінаціях зовнішніх і внутрішніх факторів; значення параметрів, що визначають екстремальні умови випробувань, розподіл характеристик надійності систем при заданих умовах експлуатації. Важливим питанням є забезпечення наукової основи для планування випробувань і прогнозування основних параметрів. Останнє повинне передувати всякому впровадженню систем у виробництво.

У своїй теоретичній і практичній основі розробка складних систем ґрунтується на методах математичного й фізичного моделювання, які є вихідним початком для оптимізації пошуку. Підхід до обох методів різний. Якщо математичні моделі - це відображення реального процесу за допомогою умовних математичних символів, то фізичні моделі — це спрощені або зменшені "макети" реальних систем. Кожна з видів моделей не виключає, а доповнює іншу й у раціональній програмі беруть участь разом.

Щоб можна було поширити результати, отримані при випробуваннях з використанням моделювання, для оцінки поведінки реальних ОВ, необхідно забезпечити певну відповідність між моделлю й ОВ. Ця відповідність може виражатися у вигляді адекватності (тобто однаковості поведінки в однакових умовах) або подібності моделі й ОВ. У більшості випадків випробувань ОВ із застосуванням моделювання важко забезпечити адекватність моделі й ОВ, тому використовуються моделі, подібні ОВ.

Процес випробувань за допомогою моделей ОВ (надалі — процес моделювання) незалежно від їхнього виду (фізична або математична) складається з однакових основних етапів: збору даних, необхідних для побудови моделі; побудови моделі; проведення випробувань на моделі; аналізу отриманих результатів.

На рис. 7.2 наведене більш детальне розкриття цих етапів стосовно до математичного моделювання.



Рисунок 7.2 – Схема процесу моделювання

Eman 1 - побудова змістовного опису моделі, у який вносять усю інформацію про ОВ. Якщо ОВ є знову розроблювальним виробом, то в змістовний опис включають дані із технічного завдання (ТЗ), умови роботи об'єкта, дані про його структуру й функціонування окремих елементів. Ці дані одержують із літературних джерел, документів, звітів про результати досліджень, відомостей про аналогічні об'єкти.

Eman 2 - побудова формалізованого опису, що полягає у відборі зі змістовного опису тих незалежних змінних параметрів, які необхідні для побудови моделі й розрахунків по ній, ці параметри повинні описувати режими роботи ОВ й процеси, що протікають у ньому при зовнішніх впливах.

Eman 3 - побудова моделі шляхом знаходження її блокової структури. Кожний блок описується рівняннями свого функціонування, а взаємодія між блоками - відповідними параметрами.

Eman 4 - обробка моделі здійснюється шляхом програмування математичної моделі на ЕОМ або налаштуванням фізичної моделі.

Eman 5 - експерименти на моделі реалізуються при математичному моделюванні шляхом відповідних розрахунків на ЕОМ.

Eman 6 - перевірка адекватності моделі включає нагромадження результатів моделювання та їх обробку із зіставним аналізом точності отриманих результатів моделювання з результатами лабораторного експерименту. Критерії адекватності визначаються на основі теорії подоби.

Eman 7 - використання результатів моделювання для наступних цілей:

- при розробці ОВ - для вдосконалювання його структури й функціонування, оптимізації процедур випробувань і контролю;
- моделювання працюючого ОВ, коли потрібна більш повна інформація про його властивості, що отримана при лабораторних випробуваннях;
- моделювання складного працюючого ОВ, коли потрібне визначення ступеня навантаження окремих блоків його структури або ефективності їх взаємозв'язків.

Можливість математичного моделювання визначається наявністю відповідних співвідношень і трудомісткістю розрахунків, яка багато в чому залежить від характеристик використовуваних ЕОМ.

Можливість застосування фізичного моделювання визначається властивостями ОВ й видами іспитових впливів. Якщо ОВ є складною технічною системою, що складається з великої кількості окремих ланок (блоків, вузлів), що мають суттєво різну міцність (стійкість) до різних видів іспитових впливів, то випробування можуть проводитися за допомогою фізичних моделей.

У тих випадках, коли ОВ має властивості, при яких складні зовнішні впливи можуть бути замінені впливами більш простими або з меншою інтенсивністю, випробування здійснюються на основі фізичного моделювання впливів на ОВ.

Випробування на основі фізичного моделювання.

Принцип фізичного моделювання досить широко використовується в практиці дослідно-конструкторського відпрацювання СТС для виявлення найбільш важливих властивостей даної конструкції, вибору оптимальних критеріїв, що визначають її якість, і т.д.

Суть фізичних моделей полягає в тому, що дослідження деякого фізичного процесу проводиться не на натурному об'єкті, а на його зменшених або спрощених певною мірою моделях. У цьому випадку самі моделі повинні бути подібні натурі в сенсі точного копіювання досліджуваних явищ.

Моделювання може бути повним, якщо система повністю замінюється моделлю або моделями, і частковим, якщо в ній замінюються моделлю один або кілька елементів. Фізичні моделі використовуються для вивчення внутрішньої структури складних фізичних процесів, для визначення не тільки вихідних, але й проміжних параметрів, для вибору й перевірки критеріїв подоби, різних фізичних констант, а також для прогнозування й пояснення різного роду явищ із достатнім ступенем точності.

Фізична модель повинна не тільки відбивати досліджуваний реальний процес, але бути менш складною, ніж сам натурний об'єкт, а якщо ні, то губиться зміст її використання. Фізична модель відрізняється від інших видів моделей насамперед тим, що вона зберігає самі істотні, визначні властивості натурального об'єкта, представлені, як правило, в іншому масштабі. Зовні вона може бути схожою на натурний об'єкт і відрізнятися від нього тільки розмірами.

Фізичні моделі зберігають специфіку реального об'єкта, вони конкретні й також складні в експерименті, а в ряді випадків і складні-

ші, ніж на натурному об'єкті. Випробування СТС - дорогий експеримент, однак за допомогою моделей дороге, а в ряді випадків унікальне устаткування може бути виключено із програми відпрацювання.

Випробування на основі фізичного моделювання ОВ складаються з наступних етапів:

- визначення мети й завдання випробування;
- побудова фізичної моделі об'єкта випробування;
- проведення випробування шляхом зовнішніх впливів на фізичну модель ОВ й одержання її реакції на цей вплив;
- аналіз, обробка й інтерпретація результатів випробувань.

Проведення розглянутих випробувань у процесі розробки ОВ дозволяє:

- визначити найбільш слабкі елементи ОВ для кожного з видів зовнішніх впливів, щоб у процесі наступної доробки забезпечити відносну рівномірність елементів і тим самим підвищити стійкість виробів до встановлених видів впливів;
- одержати попередню інформацію про відмінність у стійкості ОВ до роздільного й комплексного впливів зовнішніх факторів, що необхідно для оптимізації системи випробувань.

При аналізі результатів випробувань фізичних моделей необхідно враховувати наступне:

- реальні значення стійкості модельованого об'єкта до встановлених видів впливів виявляються тим нижче, чим більше елементів реального виробу було виключено з розгляду при побудові фізичної моделі;
- види, причини й механізми відмов, установлені за результатами випробувань фізичних моделей, не враховують відмов тих елементів, які були виключені при побудові моделей.

Неодмінною умовою застосовності фізичних моделей є забезпечення подоби натурному процесу. Ступінь відповідності моделі й ОВ виражається за допомогою критеріїв подоби.

Під критерієм подоби розуміється словесне або математичне формулювання умов, при яких модель може вважатися такою, що відбиває в заданому змісті ОВ. Відповідність моделі й ОВ в найпростішому випадку представляється безрозмірними параметрами самих процесів і тієї системи, у якій вони протікають. Основне положення теорії подоби говорить про те, що процеси, у яких критерії подоби рівні - подібні. Однак критерії подоби не завжди й не для всіх проце-

сів можуть бути виражені в явному виді - у вигляді безрозмірних комплексів. Можливі випадки, коли ці критеріальні співвідношення між моделлю й ОВ можуть бути представлені тільки в неявній формі (наприклад, для складних інформаційно-вимірювальних комплексів).

Вимога дотримання адекватності або подоби моделі й ОВ поширюється на всі види моделей і методів моделювання.

Випробування на основі математичного моделювання.

Ідея фізичного моделювання не вичерпує весь арсенал методів і засобів відпрацьовування СТС і підвищення її ефективності. Усе частіше в практику їх відпрацьовування впроваджуються математичні моделі. Природно, це справедливо для умов, коли відомий оператор досліджуваного процесу. З урахуванням цього, в загальному виді математичну модель можна представити як:

$$\bar{Y} = A \bar{X}, \quad (7.1)$$

де $\bar{Y}$, $\bar{X}$ - два вектори, перший з яких характеризує вихід, а другий - вхід системи;

A - оператор.

Тоді зі сфери дослідження безпосередньо виключається не тільки фізична модель, але й сам об'єкт. Вони стають лише джерелом інформації, використовуваної для визначення й уточнення виду моделі.

Математична модель описує структуру функціональних зв'язків між варійованим складом значимих факторів і вихідною якістю процесу. При цьому вхід і вихід моделі повинні перебувати в математичній рівновазі, стан якого може бути як статичним, так і динамічним.

Успіх моделювання визначається вдалим вибором характеристики, що визначає вихідну якість процесу, складу значимих факторів і форми функціонально-логічних зв'язків між ними. Проводячи аналіз різних видів моделі, визначають ступінь впливу внесених у модель змін на якість її функціонування.

Досить важливо при моделюванні виявити склад значимих факторів і встановити умови, що впливають на характеристики, що підлягає оптимізації. Склад значимих факторів обумовлений властивостями самої системи і його необхідно виявляти самим ретельним образом, тому що поспішність у цих питаннях завжди приводить до помилок.

Однак чим більше факторів включається в модель, тем складніше її розв'язок. Тому важливо також вчасно виключити із програми випробувань фактори, вплив яких на досліджуваний процес зневажливо малий або їх ефект порівняний з помилкою апроксимації.

Основні віхи на шляху створення математичних моделей полягають в тому, що шляхом аналізу апріорних даних вивчаються основні властивості й характер поведінки системи, можливість застосування аналітичних методів або законів, що встановлюють сукупність структурних зв'язків між усіма змінними досліджуваного процесу.

Потім на основі накопиченої інформації, будується попередня модель, результати дослідження якої повинні перебувати в безпосередній відповідності з поведінкою натурального об'єкта. Усяка помітна невідповідність їх властивостей усувається шляхом модифікації моделі, її вдосконалюванням.

Практично цей процес повинен іти безупинно. Якщо для фізичних моделей важливо зберегти фізичну подобу натурі, стосуючись не тільки вихідних характеристик, але й основних внутрішніх властивостей системи, то для математичних моделей, як правило, важливо зберегти тільки подобу реакції "виходу" на "вхід".

При розробці математичних моделей необхідно:

- виявити состав керованих і некерованих змінних;
- визначити границі досліджуваного процесу;
- визначити глибину деталізації процесу;
- установити фізичні обмеження на розробку;
- установити характер керування процесом (у статичному або динамічному режимі роботи);
- визначити необхідну точність моделювання;
- намітити шляхи подальшого вдосконалювання моделей.

Моделювання розвивається по шляху створення детермінованих і імовірнісних моделей, для яких структурні зв'язки можуть бути стохастичними й детермінованими. Детерміновані й імовірнісні процеси у свою чергу можуть бути описані відповідно детермінованими й імовірнісними моделями й навпаки.

До недоліків моделей можна віднести наступне: по-перше, вони завжди є наближеними й, по-друге, при розробці моделей потрібна досить точна й достовірна інформація.

Причина цих недоліків може полягати в наступному:

- невдало обрана вихідна характеристика, що визначає якість

- досліджуваного процесу;
- вибір складу значимих факторів будується на наближених методах що не враховують фізичні особливості процесу;
 - оцінка адекватності розроблювальної моделі може бути недостовірною;
 - деякі зі значимих факторів можуть виявитися якісними, що не мають кількісного вираження;
 - не завжди вдається підібрати прийнятну математичну форму зв'язку, що відбиває без істотних спрощень реальний процес;
 - у ряді випадків по тим або іншим причинам розроблювач моделі й сам не прагне до забезпечення високої точності, керуючись розв'язком, скажемо, тільки першочергових завдань і т.п.

Тому на практиці аналітичні моделі звичайно використовують для відповідних розрахунків і моделювання в процесі проектування при виборі декількох вихідних варіантів об'єкта. Але коли вирішується питання вдосконалювання штатної конструкції в ході експериментального відпрацювання, аналітичні моделі можуть виявитися непридатними. Для того щоб аналітична модель служила зазначеним цілям, вона повинна враховувати конструктивні рішення й вплив зовнішніх і внутрішніх факторів. А це поки вдається здійснити лише на основі обробки експериментальних даних.

Якщо мова йде про розробку математичної моделі, що задовольняє основним вимогам практики, то важливо відзначити наступне. У якості вихідної характеристики досліджуваного процесу необхідно використовувати параметри, що визначають якість СТС або її надійність. У цілому ступінь конструктивної досконалості СТС оцінюється досягнутим рівнем надійності, величинами основних параметрів, технологічністю виконання, мінімальними масами конструкції й високими експлуатаційними властивостями.

Тому, коли потрібно оцінити дані показники, то в якості вихідної характеристики слід використовувати не одну, а кілька видів моделей, кожна з яких служить певним цілям. У ряді випадків з достатнім ступенем точності модель може виражатися рівнянням регресії:

$$y = \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (7.2)$$

де $b_i; b_{ij}$ - коефіцієнти регресії;
 $x_1, \dots, x_n$ - варійовані фактори;
 ϵ - середня помилка апроксимації.

Перевага таких моделей полягає в обліку особливостей конкретної конструкції й самого досліджуваного процесу, в обліку факторів, що визначають умови випробувань. Усі фактори керовані й реєструються засобами вимірів.

Іноді в процесі відпрацювання, наприклад двигуна, для кожної конструктивної схеми розробляються свої моделі, зіставлення й аналіз яких дозволяють оптимізувати досліджуваний процес. Якщо ж необхідність у натурних експериментах існує, то математичні моделі дозволяють розробляти оптимальні плани й програми випробувань, здійснювати поточний прогноз основних характеристик і т.п.

У математичних моделях сукупність властивостей і критеріїв одного плану використовується для відбиття сукупності властивостей і критеріїв зовсім іншого плану. При цьому сукупність фізичних властивостей може представлятися символічно у вигляді набору цифрових знаків, літерних позначень і т.п. Моделі такого роду прийнято називати символічними.

Символічні моделі представляються, як правило, сукупністю умовно записаних систем рівнянь і нерівностей, що описують математичну структуру досліджуваного процесу. На відміну від символічних моделей, аналогові моделі дозволяють досліджувати реальний процес за допомогою моделей іншого аналогового процесу, подібного натурному. За умови розробки досить точних моделей досліджуваних процесів реалізація будь-якого обчислювального експерименту не становить особливої складності в порівнянні з тими витратами засобів і часу, яких вимагає натурне випробування. Складність моделювання полягає в розробці відповідних моделей і налагодженню обчислювальних програм, що досить точно відбивають реальний процес.

Математичні моделі діляться на конструктивні й описові, тобто на моделі першого й другого роду. Моделі першого роду є засобом постановки активного експерименту. На практиці при моделюванні фізичних процесів найчастіше використовуються символічні конструктивні моделі, що володіють достатньою ефективністю й простотою в операційному відношенні.

Велике практичне значення в процесі проектування й на початкових етапах розробки складних технічних систем набули аналітичні символічні конструктивні моделі в комплексі з так званими емпіричними моделями. Під емпіричними моделями в цьому випадку розуміють усякого роду залежності, отримані на підставі аналізу й обробки експериментальних даних.

Імітаційне моделювання складних систем.

Стосовно до СТС моделювання найчастіше починається з побудови концептуальних моделей і вивчення статистичних даних, що визначають вхід і вихід системи. Останнє застосовується в тих випадках, коли внутрішня структура проміжних процесів мало досліджена й не ясна або не піддається аналітичному вираженню. Завдання такого плану часто зустрічаються на практиці й одержали символічну назву завдань "чорного ящика".

Загальним елементом для всіх принципів є визначення складу значимих факторів, що впливають на досліджуваний процес. Використання того або іншого принципу обумовлене ступенем складності системи або досліджуваного процесу й глибиною розкриття внутрішніх зв'язків. Існує кілька принципів побудови математичних моделей, але використання з них того або іншого, визначається насамперед наявністю апріорної інформації, ступенем розуміння фізичних особливостей досліджуваних процесів, знанням і оцінкою передбачуваних функціональних зв'язків між елементами системи й т.п.

Основні труднощі, з якими доводиться зустрічатися при розробці математичних моделей СТС, полягають в подоланні протиріччя між вимогою можливо більшої простоти опису (без нього важко зрозуміти й розв'язати завдання) і необхідністю обліку численних параметрів, закономірностей, обмежень і взаємозв'язків, що визначають роботу системи. Складну технічну систему практично неможливо повно й детально описати в рамках єдиної математичної моделі. Тому при описі таких систем звичайно використовується модульний принцип, що передбачає розробку не однієї, а сімейства взаємозалежних і взаємодіючих між собою моделей.

Використання єдиної моделі СТС недоцільно й з методичних міркувань. Різні частини системи (підсистеми) вивчені в різному ступені, тому їх математичні описи мають різну точність, а безперервне нагромадження фізичної інформації приводить до систематичного

вдосконалювання описів окремих елементів. При використанні єдиної моделі точність моделювання цілком визначається точністю опису найменш вивчених підсистем, а будь-яка нова інформація вимагає повної переробки моделі.

Зрозуміло, перехід до модульного опису сам по собі не призведе до збільшення точності. Однак у цьому випадку з'являється можливість більш достовірного моделювання, принаймні деяких з підсистем. Зміна уявлень про окремі процеси або елементи системи при модульному описі не вимагає повної переробки моделі й стосується лише окремих її модулів.

Таким чином, *застосування модульного принципу при описі СТС дозволяє:*

- розв'язати проблему більших обсягів інформації за рахунок розподілу її між окремими блоками моделі;
- "розв'язати" вивчення окремих підсистем між собою, тому що кожний з модулів моделі може бути досліджений у квазі-автономному режимі.

Разом з тим перехід до системи моделей приводить до необхідності дослідження єднальних їхніх взаємодій. Виникає завдання координації підсистем та їх моделей між собою. Найбільш ефективні результати при описі й вивченні складних систем дає ієрархічний підхід, що передбачає розбивку системи на вертикально супідрядні підсистеми різних рівнів, розробку модульних моделей кожної з підсистем, введення пріоритетів (тобто права переваги) для підсистем старших рівнів стосовно підсистем молодших рівнів, відому автономність кожної з підсистем.

Оскільки кожна з підсистем у свою чергу може бути розбита на нові підсистеми, виникає багаторівнева ієрархічна система моделей (рис. 7.3). При ієрархічному описі СТС на верхніх рівнях розглядаються їх загальні характеристики, а на нижніх - характеристики окремих вузлів і елементів.

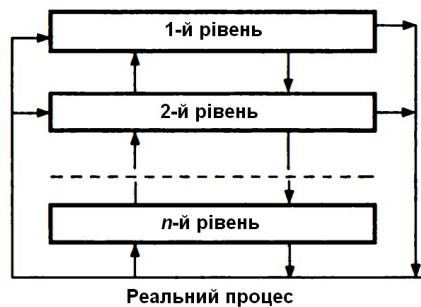


Рисунок 7.3 - Рівні ієрархічного опису СТС

Очевидно, вивчення СТС на кожному з рівнів вимагає специфічних знань і методів і найчастіше ведеться фахівцями різного профілю. На кожному рівні опису вводиться свій набір змінних, принципів і представлень, що дозволяє в значній мірі обмежитися вивченням тільки цього рівня. При цьому спостерігається відома асиметрія представлень.

Розуміння фізичних процесів і точність опису об'єкта ростуть із переходом до нижніх рівнів ієрархії. Загальні ж цілі й завдання функціонування системи, її місце в матеріальному світі більш повно розкриваються на верхніх рівнях.

При дослідженні динамічних процесів експериментально-аналітичні моделі є ефективним засобом для прогнозування ряду важливих з погляду надійності характеристик СТС. У міру нагромадження експериментальних даних точність моделювання підвищується. Щодо цього можливості експериментально-аналітичних моделей майже безмежні.

Питання для самоперевірки

1. Коли і де застосовується математичне моделювання?
2. Яка кінцева мета математичного моделювання?
3. Які задачі вирішуються методами моделювання?
4. Коли застосовується напівнатурне моделювання?
5. Для чого потрібно фізичне моделювання?
6. З чого починається моделювання?
7. Розкажіть процес проведення випробувань за допомогою моделей.
8. Де і для яких цілей використовуються результати моделювання?
9. Які вимоги пред'являються до фізичної моделі?
10. Що необхідно враховувати при аналізі результатів випробувань фізичних моделей?
11. Що необхідно враховувати при математичному моделюванні?
12. В чому може полягати недолік математичних моделей?
13. Що таке символічна модель?
14. Як підрозділяються математичні моделі?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛИТЕРАТУРА

Основна

1. Теоретические основы испытаний и экспериментальная обработка сложных технических систем / Л. Н. Александровская и др. М. : логос, 2003. 736 с.
2. Сладкова Л. А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин : учебное пособие. М. : МГУПС (МИИТ), 2016. 275 с.
3. Хубка В. Теория технических систем. М. Мир, 1987. 208 с.
4. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Круглов В. И., Шолом А. М. Сертификация сложных технических систем. М. : Логос, 2001. 342 с.

Додаткова

5. Журавлев М. П. Исследование и испытание технологических систем : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 84 с.
6. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем) : учебник. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. 186 с.
7. Шишмарев В. Ю. Надежность технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2010. 304 с.
8. Бережная К. В., Бережной В. И. Математические методы моделирования экономических систем : учебное пособие. М. : Финансы и статистика, 2006. 432 с.
9. Рекомендации по организации ремонта строительных машин агрегатным методом. М. : Стройиздат, 1987. 104 с.
10. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.
11. Кунце Х. И. Методы физических измерений. М. : Мир, 1989. 216 с.
12. Безверхий С. Ф., Яценко Н. Н. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей. М. : ИПК Издательство стандартов, 1996. 600 с.
13. Балабин И. В., Куров Б. А., Лаптев С. А. Испытания автомобилей. М. : Машиностроение, 1988. 192 с.

14. Гиг Дж. Ван Прикладная общая теория систем М. : Мир, 1981. 336 с.
15. Браверманн Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М. : Наука, 1983. 156 с.
16. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высшая школа, 1999. 275 с.
17. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики. М. : Финансы и статистика, 1998. 220 с.
18. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. С-Пб. : Политехника, 2000. 320 с.
19. Орлов П. И. Основы конструирования машин. Справочник. В 2-х т. Т.1, Т.2. М. : Машиностроение, 1987.
20. Джонсон Р., Каст Ф., Розенцвейг Д. Системы и руководство. М. : Советское радио, 1971. 648 с.
21. Калашников В. В. Сложные системы и методы их анализа. М. : Знание, 1980. 64 с.
22. Малышев В. В., Карп К. А., Кочетков В. И. Надежность сложных технических систем. М. : Логос, 1999. 88 с.
23. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М. : Мир, 1978. 305 с.
24. Михайлов Ф. А. Теория и методы исследования нестационарных линейных систем. М. : Наука, 1986. 320 с.
25. Негойце К. Применение теории систем к проблемам управления. М. : Мир, 1981. 183 с.
26. Райкин А. Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем. М. : Советское радио, 1967. 265 с.
27. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. К. : МАУП, 2003. 368 с.
28. Могилевский В. Д. Методология систем: вербальный подход. М. : Экономика, 1999. 251 с.
29. Специальные методы идентификации, проектирования и живучесть систем управления : учебное пособие / Н. И. Подлесный и др. К. : Выща школа, 1990. 446 с.
30. Цофнас А. Ю. Теория систем и теория познания. Одесса : Астропринт, 1999. 288 с.
31. Растрингин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига : Зинатне, 1981. 375 с.
32. Гайдес М. А. Общая теория систем. (Системы и системный ана-

- лиз). М. : Глобус-Пресс, 2005. 202 с.
33. Мирзоев Р. Г., Харченко А. Ф. Основные процедуры системных исследований : учебное пособие. СПб. : СПбГУАП, 2000. 180 с.
 34. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М. : МПСИ, 2005. 584 с.
 35. Конспект лекций по дисциплине "Математические основы теории систем" для студентов специальности 7 091 401 / сост. С. А. Бобриков. Одесса : ОНПУ, 2001. 101 с.