

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний Університет Запорізька Політехніка

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Методичні вказівки до самостійних робіт
для спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка
ОПП “Радіотехніка”
усіх форм навчання

2022

Моделювання радіотехнічних систем. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів для спеціальності 172 “Телекомунікації та радіотехніка”, ОПП “Радіотехніка” усіх форм навчання. - Запоріжжя: НУ “Запорізька Політехніка”, 2022. - 61 с.

Укладач: Морщавка С.В., доц., к.т.н.
Мороз Г.В.

Рецензент: Самойлик С.С., доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: Морщавка С.В.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Радіотехніки та
телекомунікації»
Протокол № 1 від 10.10.2022 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФРЕТ
Протокол № 2 від 10.10.2022 р.

ЗМІСТ

Класифікація методів моделювання радіотехнічних систем	4
Сучасні підходи до моделювання радіотехнічних систем	9
Схемотехнічне моделювання	14
Методи оптимізації	19
Практичні аспекти використання Matlab Simulink для моделювання радіотехнічних систем	24
Моделювання змішаних, цифрових та аналогових, систем	31
Методи оцінювання якості моделі	37
Наскрізне моделювання радіотехнічних систем	43
Цифрові двійники радіотехнічних систем	49
Економічні аспекти моделювання радіотехнічних систем	55
Літературні джерела	61

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Класифікація методів моделювання радіотехнічних систем (РТС) включає кілька основних підходів, які відрізняються за своїми цілями, методами розрахунків, точністю, обчислювальною складністю та застосуванням. Основні методи можна класифікувати наступним чином:

1. Аналітичні методи використовують математичні формули та рівняння для моделювання процесів у РТС. Підходять для опису простих або ідеалізованих систем. Прикладами є аналітичні розрахунки електромагнітного поля, рівня сигналу та інтерференції. Перевагою є швидкість розрахунків та легкість у розумінні. Недоліком - обмеженість точності для складних та нелінійних систем.

2. Імітаційне моделювання імітує роботу радіотехнічної системи, відтворюючи реальні сигнали та процеси для аналізу поведінки РТС у різних умовах. Використовується або дискретно-часове моделювання для моделювання систем, що змінюються в дискретні моменти часу, або імітація на основі Монте-Карло для випадкових процесів і оцінки середніх характеристик системи. Перевагою є можливість моделювання складних та динамічних процесів. Недоліком - високі обчислювальні витрати та час виконання.

3. Методи на основі кінцевих різниць або елементів (методи числового моделювання) використовують числові методи для розв'язку диференціальних рівнянь, що описують процеси в РТС. До них відносяться: метод кінцевих різниць у часі (FDTD), що застосовується для моделювання електромагнітних полів та метод кінцевих елементів (FEM), який використовується для розв'язку складних задач поширення хвиль. Перевагою є висока точність та можливість моделювання складних геометрій. Недоліком вимогливість до обчислювальних ресурсів.

4. Методи на основі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання для прогнозування параметрів систем, оптимізації конфігурацій та

адаптації в реальному часі використовують: нейронні мережі для розпізнавання шаблонів сигналів та адаптивного управління, генетичні алгоритми для оптимізації параметрів, таких як розміщення антен. Перевагами є гнучкість, здатність адаптуватися до складних умов та знаходити оптимальні рішення. Недоліком - потреба у великих даних та навчанні моделі.

5. Методи статистичного моделювання використовують статистичні моделі для оцінки середніх значень, варіацій і надійності системи та базуються на моделювання на основі статистичних ансамблів для оцінки поведінки системи в середньому або на стохастичних моделях для прогнозування випадкових впливів та завад. Перевагами є те, що вони дають статистичне уявлення про надійність і стабільність РТС. Недолік - не завжди відображають специфічні деталі процесів.

6. Гібридні методи – це поєднання декількох підходів, наприклад, аналітичних і імітаційних методів, для досягнення більш точних та комплексних результатів. Наприклад, комбінація методів кінцевих елементів і Монте-Карло для моделювання складних процесів у РТС з високою невизначеністю. Перевага - гнучкість і підвищена точність. Недолік - складність у реалізації та висока обчислювальна вартість.

7. Експериментальне моделювання, тобто виконання моделювання на базі експериментальних даних для створення моделі реальної системи. Перевага - точність, яка базується на реальних вимірах та даних. Недолік - потреба у великій кількості даних та затратність з точки зору часу і ресурсів.

Ці всі методи можуть використовуватися як окремо, так і комбіновано, залежно від задачі, обчислювальних ресурсів та необхідної точності моделювання радіотехнічної системи.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке моделювання радіотехнічних систем і для чого воно використовується?
Моделювання радіотехнічних систем — це процес створення віртуальної моделі реальної системи для дослідження її характеристик, поведінки, оптимізації та тестування без необхідності будувати фізичні прототипи. Воно дозволяє знижувати витрати, прогнозувати поведінку системи в різних умовах та знаходити оптимальні рішення.
2. Які основні методи моделювання радіотехнічних систем існують?
Основні методи моделювання включають схематичне моделювання, числове моделювання, фізичне моделювання, методи аналізу і синтезу за допомогою програмних засобів (наприклад, MATLAB, Simulink), а також методи, що використовують цифрові двійники систем.
3. Які переваги має використання числових методів моделювання в радіотехнічних системах?
Числові методи моделювання дозволяють швидко та точно оцінювати характеристики складних радіотехнічних систем, враховувати різні параметри і умови без потреби в дорогих фізичних експериментах. Вони також зменшують час розробки та вартість тестування.
4. Як класичне та сучасне моделювання радіотехнічних систем відрізняються за підходами та інструментами?
Класичне моделювання здебільшого базувалося на аналітичних формулах та наближеннях, тоді як сучасне моделювання застосовує чисельні методи, складні програмні платформи (наприклад, CST Studio, ANSYS HFSS) і інші інструменти для детального моделювання поведінки систем у реальному часі.
5. Що таке цифрові двійники і яку роль вони відіграють у моделюванні радіотехнічних систем?

Цифрові двійники — це віртуальні моделі фізичних систем, які постійно оновлюються на основі реальних даних. Вони дозволяють здійснювати моніторинг і симуляцію роботи системи в реальному часі, прогнозувати її поведінку та оптимізувати експлуатацію без необхідності втручання в фізичні об'єкти.

6. Які методи оптимізації використовуються в моделюванні радіотехнічних систем?

Методи оптимізації включають генетичні алгоритми, методи еволюційного пошуку, методи грубої пошукової оптимізації, а також стандартні методи оптимізації, як градієнтні алгоритми, що дозволяють підбирати оптимальні параметри систем для досягнення найкращих результатів.

7. Які є основні труднощі при моделюванні складних радіотехнічних систем?

Основні труднощі включають високу складність інтеграції численних компонентів системи, обчислювальні витрати на моделювання великих і складних систем, потребу в точних даних для створення моделей, а також необхідність врахування різноманітних умов, таких як навколишнє середовище та завади.

8. Як методи моделювання допомагають у розробці нових радіотехнічних систем?

Методами моделювання можна тестувати нові ідеї, перевіряти різні варіанти конфігурацій і характеристик, зменшуючи ризик помилок на ранніх етапах розробки. Моделювання також дозволяє оптимізувати параметри системи та вибирати найбільш ефективні рішення для майбутніх продуктів.

9. Що таке "схематичне моделювання" і коли воно використовується в радіотехнічних системах?

Схематичне моделювання — це створення моделей, що описують радіотехнічну систему за допомогою схем і блоків, де кожен елемент має свої параметри і функції. Це моделювання часто використовується для розрахунку параметрів радіоелектронних компонентів, таких як антени, фільтри, підсилювачі тощо.

10. Які програмні засоби найчастіше використовуються для моделювання радіотехнічних систем?

До популярних програмних засобів для моделювання радіотехнічних систем відносяться MATLAB, Simulink, CST Studio, ANSYS HFSS, COMSOL Multiphysics, а також спеціалізовані пакети для електромагнітного моделювання і симуляції мереж зв'язку та радіосистем.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. М. Месарович Основи статистичної радіотехніки 2009
2. А. Холл, Р. Фейджин, Ф. Фейджин Теорія множин та її застосування у радіотехніці, 2003
3. Ю.Крисанов, А.Стрижаков. Моделювання радіотехнічних систем, 2011
4. Overview of Radio Engineering Systems - Available in the PDF library of VNTU [PDF Library](#)
5. Mathematical Foundations of System Theory - Explains the theoretical models used to describe complex radiotechnical systems, accessible through the HNEU repository [PNS HNEU](#)
6. М. І. Skolnik Основи радарної техніки: навч. посіб. / М. І. Сколнік. — 3-е вид., перероб. та доп. — Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2008. — 1232 с.
7. J. C. Proakis Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // IEEE Transactions on Communications. — 2007. — Vol. 55, No. 9. — P. 1612–1620. [Online] Available: [IEEE Xplore](#).
8. McGowan F. Introduction to Modeling of Communication Systems // IEEE Communications Magazine. — 2011. — Vol. 49, No. 3. — P. 53–58. [Online] Available: [IEEE Xplore](#).
9. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // IEEE Journals & Magazine. [Online] Available: [IEEE Xplore](#).

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Сучасні підходи до моделювання радіотехнічних систем (РТС) базуються на використанні потужних обчислювальних ресурсів, новітніх алгоритмів і методів штучного інтелекту, що дозволяють значно підвищити точність і швидкість розробки складних РТС. Ось основні підходи, які використовуються сьогодні:

1. Числові методи високої точності (методи кінцевих елементів, методи кінцевих різниць), такі як метод кінцевих елементів (FEM) і метод кінцевих різниць у часі (FDTD), дозволяють моделювати процеси електромагнітного випромінювання і поширення хвиль з високою точністю. Зараз вони широко застосовуються для розрахунку параметрів антен, моделювання розсіювання та проникнення хвиль в складні структури, а також для аналізу завод. Але вони вимагають значних обчислювальних ресурсів, але забезпечують високу точність і деталізацію.

2. Імітаційне моделювання на основі Монте-Карло дозволяє аналізувати випадкові процеси і розподіли шляхом багатократного повторення експериментів та використовується для оцінки параметрів сигналу, розрахунку ефективності систем зв'язку в умовах завод, і моделювання складних сценаріїв взаємодії сигналів. Цей метод підходить для моделювання стохастичних процесів, таких як завод та флуктуації в каналах зв'язку.

3. Штучний інтелект та машинне навчання, зокрема, нейронні мережі, глибоке навчання та генетичні алгоритми, дозволяють оптимізувати та прогнозувати поведінку РТС та можуть бути застосовані для адаптивного управління параметрами систем, прогнозування завод, оптимізації розміщення антен та автоматизації процесу проектування. Вони також забезпечують адаптивність, гнучкість та високу точність, особливо при роботі з великими обсягами даних і у змінних умовах.

4. Методології гібридного моделювання поєднують різні підходи, наприклад, числове моделювання та імітаційне моделювання для досягнення кращої точності і продуктивності. Використовуються для моделювання складних систем, таких як багатоканальні системи зв'язку або радіолокаційні системи з високою роздільною здатністю. Дозволяють забезпечити баланс між швидкістю та точністю моделювання, а також знизити обчислювальну складність.

5. Віртуальні та цифрові двійники — точні цифрові копії реальних об'єктів чи систем використовуються для прогнозування та управління їх роботою в реальному часі та відстеження стану обладнання, прогнозування зносу, моделювання систем зв'язку в умовах реального часу. Вони забезпечують високу точність прогнозів, дозволяють оптимізувати роботу в режимі реального часу.

6. Паралельні та розподілені обчислення та паралельних алгоритмів, що використовуються для прискорення процесів моделювання складних систем та здійснення розрахунків в високочастотних діапазонах, моделювання великих мереж і багатокomпонентних систем, які потребують значних обчислювальних потужностей. За їх рахунок можна значно знизити час розрахунків та забезпечити ефективне моделювання складних РТС.

7. Методи оптимізації на основі генетичних алгоритмів, що імітують природний відбір для пошуку оптимальних рішень у складних задачах. Застосовуються для оптимізації параметрів систем, таких як налаштування антен, оптимальне розміщення базових станцій, та налаштування параметрів зв'язку. Дозволяють знаходити оптимальні рішення у великих і складних пошукових просторах.

8. Використання симуляційного моделювання в середовищах MATLAB, Simulink, ANSYS HFSS, що надають інструменти для моделювання і тестування різних аспектів РТС, наприклад, для аналізу сигналів, моделювання поширення хвиль, тестування систем перед розгортанням. Ці середовища містять готові бібліотеки та інструменти, що дозволяють швидко створювати і аналізувати моделі.

Ці сучасні підходи дають змогу розробляти більш ефективні, точні та надійні радіотехнічні системи, що відповідають сучасним вимогам до швидкості, якості зв'язку і стійкості до завад.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Які основні принципи сучасного підходу до моделювання радіотехнічних систем?

Сучасні підходи до моделювання радіотехнічних систем зосереджені на використанні високоточних числових методів, інструментів для моделювання складних електромагнітних полів, а також інтеграції апаратного та програмного забезпечення для більш точних і швидких розрахунків. Включають методи, як електромагнітне моделювання, використання цифрових двійників, автоматизацію процесу та застосування інтелектуальних систем для оптимізації.

2. Що таке цифровий двійник, і як він використовується у сучасному моделюванні радіотехнічних систем?

Цифровий двійник — це віртуальна копія реальної фізичної системи, яка постійно оновлюється за допомогою реальних даних з сенсорів. Цей підхід використовується для моніторингу, оптимізації, прогнозування та тестування в реальному часі, що дозволяє здійснювати налаштування радіотехнічних систем без фізичних змін.

3. Які програмні інструменти є основними для моделювання сучасних радіотехнічних систем?

Основними програмними інструментами для сучасного моделювання є MATLAB, Simulink, CST Studio, ANSYS HFSS, COMSOL, а також спеціалізовані програмні пакети для електромагнітного моделювання, таких як FEKO та Microwave Studio.

4. Що таке електромагнітне моделювання, і чому воно є важливим у контексті радіотехнічних систем?

Електромагнітне моделювання включає застосування числових методів для розв'язання рівнянь Максвелла, що описують поширення електромагнітних хвиль у різних середовищах. Це важливо для проектування антен, фільтрів, підсилювачів і інших компонентів радіотехнічних систем, оскільки дозволяє точно оцінити їхні характеристики в реальних умовах.

5. Що таке "інтелектуальні системи" в моделюванні радіотехнічних систем, і як вони використовуються?

Інтелектуальні системи в моделюванні включають застосування штучного інтелекту, машинного навчання та оптимізаційних алгоритмів для автоматичного налаштування параметрів систем, виявлення оптимальних рішень, а також для прогнозування та адаптації систем до змінюваних умов середовища.

6. Яким чином можна інтегрувати апаратне та програмне забезпечення для покращення ефективності моделювання радіотехнічних систем?

Інтеграція апаратного та програмного забезпечення забезпечує синхронізацію віртуальних моделей із реальними пристроями, дозволяючи виконувати тестування в реальному часі. Наприклад, використання програмованих логічних контролерів (PLC) для керування апаратними компонентами під час симуляцій дає можливість оцінити їхні характеристики та поведінку в реальних умовах.

7. Які переваги надає застосування методів оптимізації у моделюванні радіотехнічних систем?

Методи оптимізації допомагають автоматично знаходити найкращі параметри для радіотехнічних систем, такі як антени, фільтри, та підсилювачі. Це дозволяє досягти максимальних характеристик продуктивності (ефективності, потужності, стійкості до завад) при мінімальних витратах ресурсів.

8. Які проблеми можуть виникати при використанні методів числового моделювання радіотехнічних систем?

Однією з основних проблем є висока обчислювальна складність для великих і складних систем, що потребує значних обчислювальних потужностей. Іншою проблемою є необхідність у високоточних даних

для побудови моделей і ризик виникнення помилок, якщо дані є неповними або некоректними.

9. Як використовуються методи штучного інтелекту в сучасних підходах до моделювання радіотехнічних систем?

Штучний інтелект, зокрема алгоритми машинного навчання та нейронні мережі, використовуються для автоматичного розпізнавання патернів, прогнозування ефективності систем, адаптації до змін умов і для оптимізації складних параметрів, таких як налаштування радіочастот і вибір компонентів системи.

10. Чому використання мультифізичних моделей є важливим при моделюванні радіотехнічних систем?

Мультифізичні моделі дозволяють одночасно враховувати різні фізичні явища, що взаємодіють в радіотехнічних системах, наприклад, електромагнітні поля, термодинаміку, механіку та інші фактори. Це дозволяє більш точно прогнозувати поведінку системи і досягти кращих результатів при розробці нових радіотехнічних пристроїв.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Ресурс Elartu

2. Соколова, А. В., & Борзова, А. Б. Моделювання радіотехнічних систем: теорія та практика. Київ: Наукова думка, 2015.

3. Кловський, Д. Д., & Самойлова, А. Г. Сучасні радіотехнічні системи: розробка та оптимізація. Харків: ХНУ, 2017

4. Васильєв, В. А. Основи моделювання в радіотехнічних системах. Одеса: ОДУ. 2018

СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Базові поняття

Схемотехнічне моделювання – це методика розробки, аналізу та оптимізації електронних схем, яка дозволяє створювати їхні моделі, виконувати перевірку роботи та оцінювати характеристики без фізичного збирання. Схемотехнічне моделювання є критичним етапом в розробці різноманітних пристроїв, від простих аналогових схем до складних цифрових систем. Воно використовується для оцінки роботи схем при різних умовах, ідентифікації потенційних несправностей та оптимізації параметрів для досягнення максимальної продуктивності. Основні аспекти схемотехнічного моделювання включають:

- До основних типів схемотехнічного моделювання відносять
- аналогове моделювання, яке охоплює електронні компоненти, які обробляють аналогові сигнали (перемінний струм або безперервні рівні напруги). Використовується для аналізу схем підсилювачів, фільтрів, стабілізаторів, генераторів тощо.
 - цифрове моделювання, що застосовується для проектування схем, які працюють із дискретними сигналами, таких як логічні схеми, лічильники, тригери і процесори.
 - змішане моделювання (Mixed-Signal Simulation) поєднує елементи аналогового і цифрового моделювання, дозволяючи аналізувати схеми, які обробляють як аналогові, так і цифрові сигнали (наприклад, АЦП, ЦАП).

- Основними підходами до схемотехнічного моделювання є:
- поведінкове моделювання (Behavioral Modeling), що описує загальну поведінку компонентів на основі математичних або логічних функцій без деталізації внутрішньої структури.
 - моделювання на рівні електричних елементів (Circuit-Level Simulation), яке враховує електричні параметри всіх елементів схеми, таких як транзистори, резистори, конденсатори, що дозволяє досягти високої точності.
 - системне моделювання (System-Level Simulation), що застосовується для аналізу всієї системи на високому рівні, часто використовує

спрощені моделі компонентів, що дозволяє швидко оцінювати загальну функціональність системи.

До найбільш поширеного програмне забезпечення для схемотехнічного моделювання відносять

- SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) - найпоширеніше ПЗ для моделювання аналогових схем, що використовується для аналізу схем на транзисторному рівні, вивчення перехідних процесів, АЧХ та ФЧХ.
- LTspice – поширений аналог SPICE, зручний для розробки аналогових схем із підвищеною швидкістю розрахунків.
- Cadence Virtuoso, Mentor Graphics, Altium Designer - пакети для професійного моделювання та проектування друкованих плат, що дозволяють моделювати як аналогові, так і цифрові схеми.
- Multisim, Proteus - інтуїтивні програми для моделювання, орієнтовані на освітні цілі та базові проекти, що дозволяють візуалізувати сигнали та параметри схем.

Етапи схемотехнічного моделювання:

- побудова схеми, тобто, розміщення елементів, таких як резистори, конденсатори, діоди, транзистори та з'єднання їх відповідно до схеми.
- задання параметрів шляхом становлення параметрів компонентів (значення опору, ємності, характеристик транзисторів) та граничних умов (напруги живлення, початкові умови).
- вибір режиму моделювання: або перехідний аналіз (Transient Analysis), що дозволяє досліджувати динамічні процеси в схемі, або постійний режим (DC Analysis) у стані рівноваги схеми, або аналіз АЧХ і ФЧХ (AC Analysis) у частотній області.
- аналіз результатів з візуалізацією результатів за допомогою графіків і осцилограм, що дозволяє оцінити правильність роботи схеми і оптимізувати параметри при необхідності.

Переваги та виклики схемотехнічного моделювання

- швидкість розробки схем і пристроїв;
- можливість перевірити ефективність схеми на різних етапах розробки;
- зниження витрат, пов'язаних з тестуванням фізичних прототипів;

- але висока складність та потреба в обчислювальних ресурсах для точного моделювання;
- але необхідність точних моделей компонентів для адекватного прогнозування поведінки реальних пристроїв;
- але потреба врахування всіх зовнішніх факторів, таких як температурні та механічні впливи;

Таким чином, схемотехнічне моделювання є ключовим етапом у процесі проектування електронних схем, що дозволяє підвищити якість та ефективність електронних пристроїв. Завдяки сучасним інструментам і технологіям цей підхід продовжує розвиватися, забезпечуючи нові можливості для інженерів і дослідників.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке схемотехнічне моделювання, і яку роль воно відіграє в проектуванні радіотехнічних систем?
Схемотехнічне моделювання — це процес створення моделей радіотехнічних систем у вигляді схем, що описують їх функціонування та взаємодію компонентів. Це дозволяє аналізувати і оптимізувати характеристики системи на етапі проектування без необхідності створення фізичних прототипів.
2. Які основні етапи включає процес схемотехнічного моделювання?
Основні етапи включають розробку схеми системи, вибір компонентів, побудову моделі, її аналіз з використанням числових методів та перевірку функціонування моделі за допомогою симуляції або тестування.
3. Які програмні засоби зазвичай використовуються для схемотехнічного моделювання в радіотехнічних системах?
Для схемотехнічного моделювання використовуються програмні засоби, такі як MATLAB, Simulink, PSpice, NI Multisim, Cadence та інші спеціалізовані пакети для проектування та аналізу електронних схем.

4. Як відрізняється схемотехнічне моделювання від інших типів моделювання радіотехнічних систем?
Схемотехнічне моделювання зосереджене на побудові конкретних електронних схем і взаємодії їх компонентів, тоді як інші методи, такі як електромагнітне моделювання, фокусуються на фізичних властивостях і поширенні хвиль. Схемотехнічне моделювання є більш орієнтованим на проектування і оптимізацію компонентів, а не на їхню поведінку в реальному середовищі.
5. Як можуть бути використані моделі схемотехнічного моделювання для аналізу надійності радіотехнічних систем?
Моделі схемотехнічного моделювання можуть бути використані для вивчення впливу різних факторів, таких як температура, напруга, електричні завади та інші умови експлуатації на роботу компонентів системи. Це дозволяє прогнозувати надійність системи, проводити випробування на стійкість і виявляти слабкі місця в дизайні.
6. Що таке "обчислювальне моделювання" в контексті схемотехнічного проектування, і чому воно важливе?
Обчислювальне моделювання в схемотехніці включає використання числових методів і симуляцій для вивчення поведінки електронних схем за допомогою комп'ютерних програм. Це важливо, оскільки дозволяє швидко перевіряти різні варіанти проектування, мінімізувати помилки і оптимізувати параметри без необхідності будувати фізичні прототипи.
7. Як забезпечується точність схемотехнічного моделювання в радіотехнічних системах?
Точність схемотехнічного моделювання забезпечується за рахунок використання високоточних математичних моделей для опису компонентів системи, а також шляхом перевірки результатів моделювання на основі експериментальних даних. Важливим є також правильний вибір компонентів та врахування всіх взаємодій між ними.
8. Які види схем використовуються для моделювання радіотехнічних систем, і чим вони відрізняються?

Для моделювання радіотехнічних систем використовуються різні типи схем: функціональні, структурні, і символні. Функціональні схеми зображають взаємодію компонентів, структурні — їх фізичне розташування, а символні — абстрактні моделі компонентів, які використовуються для симуляцій.

9. Як моделювання радіотехнічних систем за допомогою схем може бути корисним для навчальних цілей?

Схемотехнічне моделювання дозволяє студентам і дослідникам зрозуміти принципи роботи радіотехнічних систем, вивчаючи взаємодію компонентів та їх вплив на загальну ефективність системи. Це також дає можливість практично застосувати теоретичні знання, створюючи і тестуючи свої власні моделі.

10. Як впливає віртуалізація на розвиток схемотехнічного моделювання в радіотехнічних системах?

Віртуалізація дозволяє створювати точні віртуальні моделі фізичних систем, що сприяє зниженню витрат на прототипування та прискорює процес проектування. Віртуальні моделі можуть бути легко налаштовані для тестування різних умов, що дозволяє імітувати роботу системи без фізичних експериментів.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Схемотехнічне моделювання електронних схем та процесів у середовищі спеціалізованих пакетів програм - [KPI Kharkiv Repository](#)
2. Схемотехнічне моделювання як засіб для пояснення процесів, що відбуваються у електричних колах [Central Ukrainian University](#)

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ

Базові поняття

Методи оптимізації використовуються для знаходження оптимального розв'язку у складних задачах, які можуть мати багато можливих варіантів. Їхнє застосування охоплює різні галузі, включаючи економіку, інженерію, штучний інтелект і науки про дані. Основні методи оптимізації поділяються на кілька категорій залежно від типу задачі та використововуваного підходу. Розглянемо найпоширеніші методи оптимізації.

Традиційно використовувані методи це класичні методи оптимізації

1. Градієнтні методи, що використовують похідні функції для знаходження мінімуму або максимуму. До них належать методи найшвидшого спуску, метод Ньютон, градієнтний спуск. Вони застосовуються для оптимізації без обмежень, таких як навчання нейронних мереж, параметрична оптимізація в інженерних задачах. Перевагою є швидка збіжність за наявності гладкої функції. Недоліком - залежність від початкової точки та можливість потрапляння в локальні мінімуми.

2. Лінійне програмування (LP), що використовується для задач з лінійними обмеженнями і лінійною цільовою функцією. Найпоширеніший метод – симплекс-метод. Використовуються для оптимізації ресурсів, транспортних задач, задач економічного планування. Перевагою є те що він ефективний для великих систем лінійних рівнянь. Недолік - обмежений тільки лінійними функціями.

3. Нелінійне програмування (NLP) враховує задачі з нелінійними обмеженнями та/або цільовими функціями та застосовується у енергетиці, економіці, задачах управління. Те, що він є гнучким в описі складних моделей є його перевагою, а те, що з ним важче знайти глобальний оптимум, особливо для великих задач - недоліком.

Евристичні методи оптимізації

1. Генетичні алгоритми (GA) імітують процес природного відбору шляхом мутації, кросоверу і вибору для знаходження оптимальних рішень. Застосовуються для задач з великим пошуковим простором, де класичні методи неефективні. Можуть знаходити глобальні оптимуми;

не потребує похідних, але мають високу обчислювальну складність; випадковість результату.

2. Метод рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) імітує поведінку зграї птахів чи риб для пошуку оптимального розв'язку. Напрямок використання оптимізація функцій, задачі кластеризації та маршрутизації. Відрізняється простотою реалізації та налаштування параметрів, але складний у налаштуванні глобальної збіжності.

3. Алгоритм мурашиних колоній (Ant Colony Optimization, ACO) наслідує поведінку мурах, які знаходять оптимальний шлях до їжі, застосовується у задачах маршрутизації, наприклад, задача комівояжера, або лабіринт. Є ефективним для комбінаторних задач. Має чутливість до параметрів; може знаходитись у локальних мінімумах.

До стохастичних методів оптимізації належать:

1. Метод Монте-Карло, що базується на випадковому виборі варіантів та використанні статистичного аналізу для знаходження оптимуму та використовується для оцінки складних розподілів, інтеграції, фінансових моделей. Простий у реалізації, особливо для багатовимірних задач. Але має недолік – часовитратність та точність залежить від кількості випробувань.

2. Метрополіс-Гастінгс алгоритм (Metropolis-Hastings) пробігає через пошуковий простір за допомогою випадкових переходів, але з прийняттям кроків на основі ймовірності. Використовується у статистичне моделюванні, задачі з обмеженнями. Може працювати з великими просторами станів, але потребує багато ітерацій; залежить від параметрів.

Методи багатоцільової оптимізації включають:

1. Метод Парето оптимізації, що фокусується на знаходженні рішень, що є оптимальними відразу за кількома критеріями. Областями застосування якого є економіка, системне управління, інженерія. Цей метод дозволяє врахувати багато цілей; генерує набір рішень. Однак у ньому можливо складно вибрати одне остаточне рішення.

2. Методи зважених коефіцієнтів перетворюють багатоцільову задачу на одноцільову шляхом додавання вагових коефіцієнтів для кожної цільової функції та використовуються у більшості оптимізаційних задач з різними

критеріями. Є простими у реалізації; дозволяють об'єднувати різні цілі, але потребують чіткого визначення вагів, що може бути складно.

Методи дискретної оптимізації включають:

1. Гілки і межі (Branch and Bound) - розбиває простір пошуку на підмножини та послідовно їх перебирає, відкидаючи неперспективні, використовується у комбінаторних задачах, задачі дискретної оптимізації. Гарантує глобальний оптимум, але потребує багато часу та пам'яті для великих задач.
2. Метод динамічного програмування розбиває задачу на підзадачі, зберігаючи їхні результати для повторного використання. Прикладами є задача рюкзака, задачі управління. Надає високу ефективність для задач з перекриттям підзадач, що також є обмеженням по типу задач.

І остання група методів це методи на основі машинного навчання, передусім, глибоке навчання з оптимізацією параметрів, тобто для налаштування параметрів нейронних мереж для мінімізації втрат за допомогою градієнтного спуску та його варіацій. Застосовується у задачах класифікації, регресії, обробки зображень та мовлення. Те, що він підходить для нелінійних та великомасштабних задач є перевагою, а те, що потребує значних обчислювальних ресурсів - недоліком.

Кожен метод оптимізації має свої переваги та недоліки, і вибір методу залежить від специфіки задачі, вимог до точності, швидкості та обчислювальних ресурсів.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке оптимізація, і чому вона є важливою в радіотехнічних системах?

Оптимізація — це процес пошуку найкращого рішення для заданої задачі з урахуванням певних обмежень та цільових функцій. Вона важлива для радіотехнічних систем, оскільки дозволяє досягати максимальних

характеристик продуктивності, мінімізувати витрати або поліпшити енергетичну ефективність при мінімальних ресурсах.

2. Які основні етапи включає процес оптимізації в радіотехнічних системах?

Процес оптимізації включає формулювання задачі оптимізації (визначення цільової функції та обмежень), вибір методу оптимізації, виконання розрахунків для знаходження оптимального рішення, а також перевірку отриманих результатів і їх адаптацію до реальних умов.

3. Які типи задач оптимізації зазвичай використовуються в радіотехнічних системах?

У радіотехнічних системах часто вирішуються задачі, пов'язані з оптимізацією параметрів антен, фільтрів, підсилювачів, розташуванням компонентів на платах, вибором частотних характеристик, а також мінімізацією шуму та завад.

4. Що таке цільова функція в задачі оптимізації, і як вона формується?

Цільова функція — це математичне вираження, яке описує мету оптимізації, наприклад, мінімізацію витрат, максимізацію ефективності або покращення параметрів системи. Вона формується на основі критеріїв, які важливі для конкретної задачі, таких як потужність, швидкість, точність чи стабільність системи.

5. Що таке градієнтний метод оптимізації, і коли його доцільно використовувати?

Градієнтний метод оптимізації використовує похідні цільової функції для знаходження напрямку найбільшого зменшення або збільшення функції. Цей метод доцільно використовувати, коли цільова функція є диференційованою, і є необхідність швидко знайти наближене рішення для задач з великими розмірами.

6. Що таке методи без похідних в оптимізації, і в яких випадках вони використовуються?

Метод без похідних не використовує інформацію про похідні цільової функції. Вони використовуються, коли функція важко або неможливо

диференціювати, або коли функція містить великий шум, і похідні не дають корисної інформації.

7. Які переваги та недоліки має метод Ньютона в задачах оптимізації?
Метод Ньютона має перевагу у швидкості збіжності при хорошому наближенні початкових параметрів і коли функція є двічі диференційованою. Недоліком є необхідність обчислення матриці Гессе, що може бути обчислювально важким для великих задач.
8. Що таке глобальна оптимізація, і чим вона відрізняється від локальної?
Глобальна оптимізація полягає в знаходженні оптимального рішення на всьому просторі можливих варіантів, в той час як локальна оптимізація шукає найкраще рішення тільки в обмеженій області, без гарантії, що воно є найкращим на всьому просторі.
9. Як можна застосувати методи оптимізації для покращення характеристик антен в радіотехнічних системах?
Методи оптимізації можуть використовуватися для налаштування параметрів антен, таких як розміри, форма, розташування елементів, що дозволяє покращити такі характеристики, як направленість, коефіцієнт посилення, ширина смуги пропускання та інші параметри.
10. Що таке еволюційні алгоритми в оптимізації, і як вони застосовуються для задач радіотехнічних систем?
Еволюційні алгоритми — це методи оптимізації, натхнені процесом природного відбору, які використовують популяції можливих рішень і зберігають найкращі з них для подальших поколінь. Вони застосовуються для складних задач, де традиційні методи не можуть дати ефективних результатів, наприклад, для оптимізації параметрів радіотехнічних систем, які мають складну нелінійну залежність.

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Methods of Optimization and Operations Research –[Water Resources Repository](#)
2. Optimization Methods (KPI, Kharkiv) –[KPI Kharkiv](#)
3. Мартинюк, П. М., Мічута, О. Р. Методи оптимізації та дослідження операцій: навч. посіб., НУВГП, Рівне, Україна, 2011.
4. Захаров, В. А. Оптимізація та її методи: Теорія та практика, Київ, 2014.
5. Глушкова, М. І., Гончаренко, В. В. Теорія оптимізації та дослідження операцій, Чернівці, 2015.

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ MATLAB SIMULINK ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Практичні аспекти використання MATLAB Simulink для моделювання радіотехнічних систем охоплюють можливості середовища для створення, аналізу та оптимізації моделей, що імітують роботу систем зв'язку, радіолокації, цифрової обробки сигналів тощо. MATLAB Simulink надає інтерактивний інструмент для побудови блокових схем, які дозволяють здійснювати складне моделювання та тестування радіотехнічних систем без фізичного прототипу. Основні аспекти та особливості використання MATLAB Simulink у цій галузі розглянемо далі.

MATLAB Simulink є інтегрованим інструментом, що дозволяє проектувати блокові схеми, моделювати динамічні системи і автоматизувати розрахунки. Він має широкий спектр додаткових бібліотек, таких як Communications Toolbox, RF Toolbox і Phased Array System Toolbox, які спеціально створені для моделювання радіотехнічних і комунікаційних систем. Симуляція блокових схем: дозволяє з'єднувати готові блоки, які представляють елементи радіотехнічної системи, такі як фільтри, підсилювачі, модулятори тощо. Підтримка MATLAB-коду: можна використовувати MATLAB-код для налаштування параметрів моделей, розрахунків характеристик та візуалізації результатів. Реалізація у реальному часі: Simulink може виконувати моделювання з урахуванням часових характеристик, що важливо для аналізу динамічних процесів у радіотехнічних системах.

При моделюванні радіотехнічних систем за допомогою MATLAB, як і у схемотехнічному моделюванні, можна виділити наступні етапи:

1. Постановка задачі, тобто, визначення основних функцій радіотехнічної системи, таких як прийом та передача сигналів, фільтрація, посилення, обробка сигналів.
2. Розробка структури моделі: побудова блок-схеми системи на основі існуючих бібліотечних блоків або створення власних компонентів. Зокрема, можна використовувати смугові фільтри: для відсічення частот поза заданого діапазону, модулятори/демодулятори: для здійснення

процесів модуляції, джерела шуму: для симуляції реальних умов передачі.

3. Налаштування параметрів моделі: задання параметрів для кожного блоку, таких як частота, потужність сигналу, тип модуляції, які дозволяють максимально точно змоделювати фізичні характеристики системи.

4. Запуск симуляції: проведення ітераційної симуляції з оцінкою параметрів сигналу на різних етапах передавання і приймання. Simulink також дозволяє здійснювати покроковий аналіз, що спрощує виявлення помилок і налаштування системи.

5. Аналіз результатів: візуалізація результатів за допомогою осцилограм, спектрального аналізу, діаграм спектральної щільності потужності (PSD), що дозволяє оцінити якість роботи системи та відповідність заданим характеристикам.

На практиці MATLAB Simulink у моделюванні радіотехнічних систем частіше всього застосовується для:

1. Моделювання каналів зв'язку: Simulink дозволяє моделювати фізичний канал зв'язку, включаючи ефекти загасання, шуму та інтерференції. Можливе моделювання каналів з множинним доступом (MIMO), що є важливим для сучасних бездротових систем.

2. Модуляція та демодуляція сигналів: інструментарій Simulink дозволяє реалізовувати різні види модуляції (AM, ЧМ, ФМ, QAM) та оцінювати їхню ефективність в умовах реального каналу.

3. Цифрова обробка сигналів (DSP): можливість реалізації цифрових фільтрів, дискретного перетворення Фур'є (DFT), вейвлет-перетворень, що є основою для аналізу і обробки сигналів у системах радіозв'язку.

4. Антени і фазовані решітки: використання Phased Array System Toolbox для моделювання антенних систем та фазованих решіток. Це дозволяє розробляти і тестувати багатоканальні антени та системи з кутовим скануванням сигналів.

5. Аналіз шумів і перешкод: MATLAB Simulink дозволяє моделювати різні типи шуму, такі як білий гаусівський шум, адитивний шум, а також перешкоди від інших передавачів. Це важливо для оцінки стійкості системи до зовнішніх впливів.

Переваги MATLAB Simulink для радіотехнічного моделювання це, передусім:

- інтерактивність та гнучкість, Simulink забезпечує простоту налаштування параметрів, можливість швидко змінювати структуру моделі та здійснювати інтерактивний аналіз.
- розширення бібліотек, широкий вибір спеціалізованих блоків для моделювання зв'язку, фазованих решіток, цифрових фільтрів і інших компонентів радіотехнічних систем.
- автоматизація розрахунків і оптимізація, можливість автоматичного налаштування параметрів і застосування алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми або методи градієнтного спуску, для налаштування системи.
- можливість реалізації реального часу, інтеграція з реальним обладнанням для тестування моделей у реальних умовах, наприклад, шляхом підключення до приймачів, передавачів та інших пристроїв.

Виклики та обмеження MATLAB Simulink у радіотехнічному моделюванні

- висока обчислювальна складність тому, що моделювання складних систем може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих фазованих решіток або систем з багатоканальним доступом.
- відповідність реальним умовам, оскільки моделі у Simulink можуть не враховувати всі фізичні аспекти, такі як нелінійність компонентів або температурні зміни, що може знизити точність моделі.
- залежність від спеціалізованих інструментів: для виконання деяких специфічних задач потрібні додаткові ліцензії на бібліотеки, такі як Communications System Toolbox або Phased Array System Toolbox.

Таким чином, MATLAB Simulink є потужним інструментом для моделювання і аналізу радіотехнічних систем завдяки своїм широким можливостям інтерактивного моделювання та розширеним бібліотекам блоків. Він дозволяє проектувати, тестувати та оптимізувати системи, що включають як аналогові, так і цифрові компоненти, реалізовувати фільтрацію, модуляцію і демодуляцію сигналів, а також враховувати ефекти реального середовища. Завдяки можливості швидкої візуалізації результатів і розширеному аналізу характеристик радіотехнічних систем, MATLAB Simulink допомагає підвищити ефективність розробки й оптимізації систем зв'язку, фазованих антен та інших складних радіотехнічних рішень.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке MATLAB Simulink і як він використовується для моделювання радіотехнічних систем?
MATLAB Simulink — це середовище для моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем, яке дозволяє створювати графічні моделі радіотехнічних систем. Він дозволяє проводити числові розрахунки, симуляції сигналів і тестування різних компонентів радіотехнічних систем, таких як фільтри, підсилювачі, антени та інші елементи.
2. Які основні переваги використання MATLAB Simulink при моделюванні радіотехнічних систем?
Основні переваги MATLAB Simulink включають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для побудови моделей, велику бібліотеку блоків для радіотехнічних компонентів, можливість інтеграції з іншими програмами та апаратними засобами, а також високу точність у числових симуляціях.
3. Які типи моделей можна створювати в Simulink для радіотехнічних систем?
У Simulink можна створювати моделі для різних типів радіотехнічних систем, таких як моделі радіочастотних фільтрів, систем модуляції та демодуляції, системи підсилення, антенні масиви, а також моделювання систем зв'язку та передачі даних.
4. Яким чином використовуються блоки Simulink для моделювання сигналів в радіотехнічних системах?
У Simulink є спеціалізовані блоки для генерації різних типів сигналів, таких як синусоїдальні, квадратні хвилі, а також модуляції сигналів (AM, FM, PM). Ці блоки дозволяють ефективно моделювати процеси передачі та обробки радіосигналів у радіотехнічних системах.
5. Як можна використовувати MATLAB для аналізу результатів симуляції радіотехнічних систем, створених у Simulink?

MATLAB забезпечує потужні інструменти для аналізу результатів симуляцій, зокрема для візуалізації сигналів, аналізу спектрів, фільтрації шумів, а також обчислення характеристик системи, таких як коефіцієнт посилення, ефективність передачі та інші важливі параметри.

6. Які особливості потрібно враховувати при моделюванні радіочастотних систем у Simulink?

При моделюванні радіочастотних систем у Simulink потрібно враховувати ефекти, пов'язані з втратою сигналу на каналі зв'язку, шумом, нелінійними ефектами в компонентах (наприклад, підсилювачах), а також ефектами відбиття сигналу і взаємодії між різними елементами системи.

7. Як Simulink може бути використаний для моделювання системи цифрової модуляції та демодуляції?

Simulink надає бібліотеки для цифрової модуляції та демодуляції, такі як блоки для модуляції BPSK, QPSK, QAM, а також для демодуляції сигналів, фільтрації шумів та корекції помилок. Це дозволяє моделювати процеси передачі і прийому даних у радіосистемах.

8. Які інструменти Simulink використовуються для аналізу стійкості та ефективності радіотехнічних систем?

Для аналізу стійкості і ефективності радіотехнічних систем у Simulink використовуються такі інструменти, як частотний аналіз, аналіз сигналів за допомогою спектрограм, часовий аналіз, а також інструменти для оцінки продуктивності системи в умовах різних завад та шумів.

9. Як можна інтегрувати фізичне обладнання з Simulink для тестування радіотехнічних систем?

MATLAB Simulink дозволяє інтегрувати фізичне обладнання за допомогою інтерфейсів, таких як підтримка DAQ (data acquisition) карт, використання периферійних пристроїв і адаптерів, а також програмування в реальному часі для тестування радіотехнічних систем безпосередньо на апаратному рівні.

10. Які проблеми можуть виникнути при моделюванні складних радіотехнічних систем у Simulink, і як їх можна вирішити?
Однією з основних проблем є висока складність моделей, що потребує значних обчислювальних ресурсів. Це можна вирішити за допомогою розподілених обчислень, використання менш детальних моделей для попередніх етапів аналізу, а також оптимізації розмірів моделей і зменшення кількості компонентів.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. EPA портал КРІ [Automation Department](#)
2. ЖТУ лекційний курс [Zhytomyr Polytechnic University](#)
3. Holly Moore. MATLAB for Engineers. Prentice Hall; 2010.
4. MathWorks. Simulink: A User's Guide. MathWorks; 2005.
5. J. J. D'Azzo, C. MATLAB for Control Engineers. McGraw-Hill; 1995.
6. K. M. S. K. V. Srinivasan. Simulink for Digital Signal Processing. Wiley; 2011.
7. M. C. Jeruchim, P. Balaban, K. S. Shanmugam, Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques. Plenum Press, 2001
8. D. K. Chaturvedi, Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink (1st ed.). CRC Press, 2010.
<https://doi.org/10.1201/9781315218335>.
9. B. Hunt, R. Lipsman, J. Rosenberg. A Guide to MATLAB®: For Beginners and Experienced Users (3rd ed.). Cambridge University Press. 2014

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІШАНИХ, ЦИФРОВИХ ТА АНАЛОГОВИХ, СИСТЕМ

Базові поняття

Моделювання змішаних систем цифрових та аналогових систем є важливою частиною розробки складних радіотехнічних, обчислювальних та вимірювальних пристроїв. Змішані системи включають як аналогові, так і цифрові компоненти, що працюють разом у межах одного пристрою. Прикладом таких систем є аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), системи обробки сигналів, мікропроцесори з вбудованими датчиками тощо. Моделювання таких систем потребує специфічних інструментів та підходів, які дозволяють врахувати особливості обох типів сигналів та забезпечити їх коректну взаємодію.

Основні питання, що виникають при моделюванні змішаних систем

1. Компонентність системи - у змішаних системах використовуються аналого-цифрові перетворення, зокрема АЦП та ЦАП, фільтри, підсилювачі, генератори та інші компоненти. Їх поведінка моделюється як на аналоговому, так і цифровому рівнях.
2. Інтерфейс між аналоговими і цифровими компонентами: забезпечення коректного обміну сигналами між цифровими та аналоговими модулями, зокрема синхронізація, тактування, частота дискретизації.
3. Часові затримки та викривлення сигналів: через відмінності у швидкості обробки аналогових і цифрових сигналів виникають затримки, які впливають на точність та стабільність системи.
4. Точність перетворення: цифрові сигнали квантуються, що призводить до похибок, які потрібно враховувати в моделі. Аналогові сигнали мають свої обмеження на точність через шум, завади тощо.

Найпоширенішими програмними засобами для моделювання змішаних систем є MATLAB Simulink, PSpice та Cadence, а також спеціалізовані інструменти, такі як SystemC-AMS та VHDL-AMS. Кожен із них має свої переваги залежно від характеру завдання.

MATLAB Simulink: використовується для моделювання систем із високим рівнем інтеграції цифрових і аналогових компонентів завдяки можливості обробки сигналів та створення блок-схем на основі бібліотек, зокрема Simscape Electrical.

PSpice: спеціалізується на моделюванні аналогових та цифрових компонентів на рівні схем, ідеально підходить для схемотехнічного аналізу.

SystemC-AMS та VHDL-AMS: ці мови опису дозволяють моделювати аналогові та цифрові компоненти на системному рівні та інтегрувати їх у загальну модель з точністю до фізичних параметрів.

Основні типи моделювання змішаних систем включають:

1. Повномасштабне моделювання: створення докладної моделі з усіма компонентами, що дозволяє максимально точно імітувати поведінку системи. Це доцільно для точного аналізу параметрів, проте потребує великих обчислювальних ресурсів.
2. Рівневе моделювання: для спрощення аналізу частини системи розбиваються на рівні (наприклад, цифрові фільтри або АЦП моделюються на рівні схем, а решта системи – на функціональному рівні).
3. Комбінований підхід: розподіл аналогової та цифрової частин на відповідні рівні абстракції, щоб оптимізувати модель без значної втрати точності. Це дозволяє, наприклад, спростити аналогову частину, тоді як цифрова буде моделюватися з високою точністю.

До прикладів змішаних систем і їх моделювання відносяться:

- аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), оскільки для їх моделювання АЦП враховуються частота дискретизації, точність, часові затримки, шумові характеристики, квантові похибки.
- цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), для яких також моделюються параметри згладжування, точність, частотна характеристика, викривлення сигналу, що відображаються як на рівні схем, так і на цифровому рівні.
- системи керування та обробки сигналів, що реалізуються як суміш цифрових алгоритмів обробки та аналогових компонентів для підсилення і фільтрації, що важливо для радіотехнічних систем.

Слід звернути увагу на наступні питання при моделюванні змішаних систем. Похибки перетворення та викривлення: цифрові сигнали мають дискретний характер, тому під час їх взаємодії з аналоговими компонентами виникають викривлення, які треба мінімізувати через налаштування параметрів перетворення. Синхронізація: при моделюванні важливо забезпечити коректну синхронізацію між аналоговими і цифровими сигналами, особливо для

систем реального часу. Оптимізація моделі: потребує балансу між точністю і продуктивністю, особливо для складних систем з високою частотою роботи.

Моделювання змішаних систем цифрових та аналогових компонентів є ключовим для розробки сучасних радіотехнічних систем. Це дозволяє оцінювати роботу комплексних пристроїв, у яких аналогові та цифрові сигнали взаємодіють, і таким чином забезпечувати точність та стабільність роботи всієї системи. Завдяки застосуванню сучасних інструментів, таких як MATLAB Simulink, PSpice та SystemC-AMS, можна здійснювати високоточне моделювання, що враховує всі особливості аналогових та цифрових сигналів і спрощує процес оптимізації системи.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке змішана система цифрових та аналогових компонентів?
Змішана система цифрових та аналогових компонентів — це система, що поєднує елементи обробки аналогових і цифрових сигналів. Такі системи часто використовуються в радіотехнічних, телекомунікаційних і автоматизованих системах для забезпечення взаємодії між аналоговими і цифровими сигналами, наприклад, в аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачах (АЦП і ЦАП).
2. Які основні складнощі виникають при моделюванні змішаних систем?
Основні складнощі при моделюванні змішаних систем включають необхідність інтеграції різних типів компонентів (аналогових і цифрових), врахування різних часових масштабів, числові розрахунки для аналогових і цифрових частин, а також забезпечення синхронізації між ними. Крім того, можуть виникати труднощі з точністю моделювання і врахуванням нелінійностей.
3. Як можна моделювати змішану систему в Simulink?
У Simulink для моделювання змішаних систем використовуються блоки для аналогових і цифрових компонентів. Аналогові блоки зазвичай

описуються рівняннями диференціальних систем, а цифрові блоки — за допомогою дискретних функцій. Симуляція змішаних систем передбачає спільне використання обох типів блоків і забезпечення їх синхронізації за допомогою таймерів та адаптивних кроків часу.

4. Чим відрізняється моделювання аналогових і цифрових частин змішаної системи?

Моделювання аналогових частин здійснюється через рівняння диференціальних або алгебраїчних рівнянь, що описують безперервні сигнали, в той час як цифрові частини обробляють дискретизовані сигнали, і моделюються через дискретні функції або різні алгоритми. Цифрові частини часто мають крок часу, а аналогові частини — безперервний час.

5. Як здійснюється перехід від аналогового сигналу до цифрового в змішаній системі?

Перехід від аналогового сигналу до цифрового здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який дискретизує сигнал за допомогою вибору частоти дискретизації та квантує значення сигналу для подальшої обробки цифровими схемами.

6. Які основні методи використовуються для синхронізації аналогових і цифрових компонентів у змішаних системах?

Для синхронізації аналогових і цифрових компонентів використовуються методи, такі як використання спільного тактового сигналу (тактової частоти), використання буферизації та фільтрації сигналів, а також застосування методів затримок і часових інтервалів для коректної обробки та передачі даних.

7. Які типи помилок і спотворень можуть виникати в змішаних системах при їх моделюванні?

В змішаних системах можуть виникати різні помилки, пов'язані з дискретизацією (наприклад, помилки квантування), затримками в обробці сигналів, шумом, спотвореннями через погану синхронізацію між аналоговими і цифровими частинами, а також помилки, пов'язані з переходом від аналогового до цифрового сигналу (АЦП).

8. Які типи перетворювачів зазвичай використовуються для зв'язку аналогових і цифрових частин системи?

Для зв'язку аналогових і цифрових частин системи використовуються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). АЦП дозволяють перевести аналоговий сигнал у цифровий, а ЦАП — повернути цифровий сигнал в аналоговий вигляд для подальшої обробки або виведення.

9. Що таке «гібридні» моделі в контексті змішаних систем, і як вони застосовуються в радіотехнічних розрахунках?

Гібридні моделі поєднують методи чисельного моделювання для аналогових і цифрових частин систем. У таких моделях одна частина системи може бути описана диференціальними рівняннями (аналогова), а інша — різними дискретними алгоритмами (цифрова). Гібридні моделі дозволяють точно передбачати взаємодію різних компонентів і обчислювати їх взаємодію для складних радіотехнічних задач.

10. Як враховуються нелінійні ефекти в змішаних системах при моделюванні в Simulink?

Нелінійні ефекти в змішаних системах можна враховувати за допомогою спеціальних нелінійних блоків в Simulink, таких як блоки для нелінійних елементів, моделей підсилювачів, фільтрів та інших компонентів, що мають складну залежність між входом і виходом.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. TINA: Analog, Digital, and Mixed-Signal Circuit Simulator [TINA Design Suite](#)
2. VHDL and Mixed-Signal Simulation with TINA [KPI Kharkiv Repository](#)
3. Приклад моделювання змішаних систем при виконанні лабораторних робіт [Department of EOM](#)
4. P. J. Smith. Multisim: Simulation and Synthesis in Electronics. NI Publications; 2023
5. A. B. Thompson. Electronic System Simulation and Design. Springer; 2020.

6. L. Zhang, K. W. Lee. Mixed Signal Systems: Concepts and Design Approaches. Elsevier; 2022.
- 7.

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МОДЕЛІ

Базові поняття

Методи оцінювання якості моделі дозволяють визначити, наскільки точно модель відображає реальні процеси або явища, і чи відповідає вона вимогам, які ставляться до системи. Існує широкий спектр методів оцінки якості моделей, який охоплює статистичні, графічні та обчислювальні підходи. Ці методи застосовуються в різних галузях: машинне навчання, фінансове моделювання, прогнозування, радіотехнічне моделювання та інші. Оцінка якості моделі є критичним етапом для будь-якої задачі моделювання, оскільки допомагає зрозуміти її надійність та ефективність.

Основні підходи до оцінювання якості моделі базуються на:

1. Кількісних оцінках - на основі числових показників визначається різниця між прогнозованими та фактичними значеннями. До них належать такі метрики, як середня абсолютна похибка, середньоквадратична похибка, коефіцієнт детермінації тощо.
2. Графічних методах, візуальних інструментах, які дозволяють порівняти результати моделювання з реальними даними. Приклади включають графіки залишків, ROC-криві для класифікаційних задач, діаграми розсіювання.
3. Крос-валідації, методи, що передбачає розбиття набору даних на навчальну і тестову частини для оцінки моделі. Він дозволяє запобігти перенавчанню та перевірити стабільність моделі.

Широковживані метрики для кількісного оцінювання обчислюються наступним чином.

Середня абсолютна похибка (MAE): визначає середнє значення абсолютної різниці між прогнозами моделі та фактичними значеннями.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Середньоквадратична похибка (MSE): визначає середню квадратну похибку між прогнозами та фактичними значеннями.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Корінь середньоквадратичної похибки (RMSE): корінь з MSE, що показує середню величину похибки в тих самих одиницях виміру, що й дані.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Коефіцієнт детермінації (R^2): показує, яка частка дисперсії залежної змінної пояснюється моделлю.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Значення R^2 від 0 до 1 вказує на якість відповідності: чим ближче до 1, тим краща модель.

F1-міра: для класифікаційних моделей обчислює баланс між точністю (precision) та повнотою (recall):

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

Можна також використовувати графічні методи оцінювання, до яких відносяться:

- графіки залишків, що показують розподіл помилок моделі, допомагають визначити систематичні відхилення чи інші аномалії.
- ROC-криві та AUC (Area Under Curve) використовуються для оцінки класифікаційних моделей, демонструють співвідношення між чутливістю (sensitivity) та специфічністю (specificity) на різних порогах.
- діаграми розсіювання допомагають візуально оцінити кореляцію між фактичними значеннями та прогнозами моделі. Ідеально, якщо точки лягають на діагональ.
- калібрувальні криві, що показують, наскільки добре модель оцінює ймовірність події, особливо актуальні для моделей, що прогнозують ймовірності (наприклад, логістична регресія).

Для отримання незміщених оцінок слід використовувати наступні методи крос-валідації

- K-fold крос-валідація, при якій дані діляться на KKK рівних частин. Модель навчається на K-1K-1K-1 частинах і тестується на залишковій, процес повторюється KKK разів, а результати усереднюються.

- Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) використовується кожне спостереження по черзі як тестовий зразок, а решта — для навчання. Цей метод є надійним, але обчислювально важким для великих наборів даних.

- стратифікована крос-валідація використовується для нерівномірно розподілених даних, коли важливо, щоб кожна частина мала однакове співвідношення класів (особливо корисна для класифікації).

Важливими метриками оцінювання якості моделі є чутливість, специфічність та інші класифікаційні метрики

Чутливість (sensitivity): відсоток правильних позитивних передбачень.

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}}$$

Специфічність (specificity): відсоток правильних негативних передбачень.

$$\text{Specificity} = \frac{\text{True Negatives}}{\text{True Negatives} + \text{False Positives}}$$

Точність (precision): частка правильних позитивних результатів серед усіх, передбачених як позитивні.

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}}$$

Немаловажно також здійснити перевірку на стійкість і генералізацію. Для перевірки, чи модель добре узагальнює дані (не схильна до перенавчання), проводяться додаткові перевірки:

- тестування на нових даних - оцінка якості на наборах даних, не використаних для навчання.

- робастність до шуму оцінюється при додаванні шуму до тестових даних для перевірки стійкості.

- зменшення обсягу даних, тобто, моделювання на частині доступних даних для визначення, чи не залежить модель від обсягу даних.

Використання цих методів оцінки дозволяє якісно аналізувати результати, оцінити точність, стабільність і здатність до узагальнення моделі. Обираючи метрики, варто враховувати тип даних, структуру завдання та вимоги до кінцевого результату, щоб визначити, наскільки

модель відповідає поставленим цілям і чи можна її вважати ефективною для використання в реальних умовах.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке оцінка якості моделі і чому це важливо в моделюванні радіотехнічних систем?

Оцінка якості моделі — це процес визначення того, наскільки добре модель відображає реальні процеси чи системи, які вона описує. Це важливо для забезпечення точності та ефективності моделювання, а також для прийняття правильних рішень на основі результатів моделювання.

2. Які основні метрики використовуються для оцінки якості моделі в радіотехнічних системах?

Основні метрики для оцінки якості моделі включають точність (error), коефіцієнт детермінації (R^2), середню абсолютну помилку (MAE), середньоквадратичну помилку (RMSE), а також порівняння результатів моделювання з експериментальними даними або реальними вимірюваннями.

3. Що таке "перевищення підгонки" (overfitting) і як його уникнути при оцінці якості моделі?

Перевищення підгонки — це ситуація, коли модель занадто точно підлаштовується під навчальні дані, включаючи їх шум або аномалії, що призводить до погіршення її здатності до узагальнення на нових, невідомих даних. Для уникнення перевищення підгонки можна використовувати техніки, такі як крос-валідація, регуляризація та використання простіших моделей.

4. Яким чином використовується крос-валідація для оцінки якості моделі?

Крос-валідація — це метод, що передбачає поділ доступних даних на кілька підмножин (зазвичай 5 або 10). Модель тренується на деяких з цих підмножин і тестується на решті. Це дозволяє оцінити загальну

ефективність моделі на різних підмножинах даних та зменшити можливість перевищення підгонки.

5. Що таке "недооснащення" (underfitting) і як його уникнути при моделюванні?

Недооснащення — це ситуація, коли модель занадто проста і не здатна захопити важливі закономірності в даних, що призводить до низької точності передбачень. Щоб уникнути недооснащення, необхідно вибрати більш складні моделі або додати більше ознак/факторів у модель.

6. Як використовувати метрику "середня квадратична помилка" (RMSE) для оцінки якості моделі?

Середня квадратична помилка (RMSE) є мірою різниці між значеннями, передбаченими моделлю, та фактичними значеннями. Вона визначається як квадратний корінь із середнього значення квадратів помилок. RMSE дозволяє виміряти масштаб помилок і є корисною для порівняння точності різних моделей.

7. Чим відрізняються оцінки якості моделей на основі валідаційного набору даних і тестового набору?

Оцінка моделі на основі валідаційного набору даних дозволяє налаштовувати параметри моделі, таких як гіперпараметри, а оцінка на тестовому наборі дає об'єктивну оцінку її продуктивності на нових, невідомих даних. Важливо, щоб тестовий набір не використовувався при налаштуванні моделі, щоб уникнути надмірної адаптації до даних.

8. Як оцінка якості моделі може вплинути на вибір оптимальної стратегії в радіотехнічних системах?

Оцінка якості моделі дозволяє вибрати найбільш підходящий підхід до проектування радіотехнічної системи, наприклад, для оптимізації характеристик антен, фільтрів або системи модуляції. Це також допомагає визначити, які компоненти або алгоритми потрібно покращити або оптимізувати для досягнення необхідних результатів.

9. Що таке "коефіцієнт детермінації" (R^2) і як він допомагає оцінити якість моделі?

Коефіцієнт детермінації (R^2) вимірює пропорцію змінності залежної змінної, яку можна пояснити моделлю. Значення R^2 наближається до 1 для моделей, які добре прогнозують залежність, і до 0 для моделей, які не пояснюють дані. Однак високий R^2 не завжди гарантує точність моделі, оскільки він не враховує перевищення підгонки.

10. Як використовуються графіки залишків для оцінки якості моделі?
Графіки залишків використовуються для візуального аналізу різниці між фактичними та передбаченими значеннями моделі. Ідеально залишки повинні бути випадковими і не мати явних закономірностей. Якщо графік залишків показує патерни або тренди, це може свідчити про те, що модель не зовсім правильно відображає дані і потребує вдосконалення.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Hurley, L. Evaluation Methods in Radio Systems Engineering. Wiley; 2001.
2. Smith, J, Walker, G. Modeling and Evaluation of Radio Systems. Springer; 2010.
3. Morrison, D, Gray, A. Radio Engineering and Signal Processing: Methods and Models. Elsevier; 2017.

НАСКРІЗНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Наскрізне моделювання радіотехнічних систем — це метод, який охоплює всі рівні ієрархії системи від низькорівневих електричних компонентів до функціональних характеристик, включаючи апаратні й програмні складові. Такий підхід дозволяє змоделювати систему в цілому, відображаючи її роботу на всіх етапах: від формування і передачі сигналу до його обробки та аналізу. В контексті радіотехнічних систем наскрізне моделювання є критичним для забезпечення точності, ефективності та надійності.

Основні етапи наскрізного моделювання включають:

1. Низькорівневе моделювання компонентів, на якому моделюються електричні характеристики компонентів, таких як транзистори, резистори, конденсатори, а також параметри джерел сигналів. Це дозволяє враховувати втрати, завади, нелінійності та інші фізичні ефекти.
2. Схемотехнічне моделювання, коли створюється модель електричної схеми, що відображає структуру радіотехнічного пристрою, наприклад, радіоприймача чи передавача. Важливим завданням цього етапу є вивчення схемотехнічної реалізації та оптимізація параметрів компонентів.
3. Системне моделювання сигналів на якому досліджується передача сигналів в умовах реальних перешкод, оцінюється стійкість сигналу, рівень завад, частотні спотворення, затримки. Сигнали моделюються з врахуванням можливих викривлень та адаптації до робочих частот.
4. Моделювання протоколів зв'язку, коли моделюються алгоритми, що забезпечують зв'язок між системами, включаючи модуляцію, демодуляцію, кодування та декодування сигналів. Цей етап важливий для моделювання сучасних бездротових мереж.
5. Інтеграція апаратної та програмної частин, коли моделюються як апаратні компоненти (процесори, пам'ять, сенсори), так і програмне забезпечення, яке ними керує, що дозволяє моделювати роботу в реальних умовах експлуатації.

Інструменти для наскрізного моделювання включають всі попередньо охарактеризовані середовища. MATLAB Simulink

популярний інструмент, що дозволяє моделювати електричні ланцюги, обробку сигналів, протоколи зв'язку. ANSYS HFSS та CST Studio використовуються для тривимірного моделювання електромагнітних процесів, що дозволяє досліджувати антени, фільтри, хвилеводи в умовах реального середовища. SystemC та VHDL-AMS: мови опису апаратури для моделювання цифрових та аналогових компонентів на рівні системи. PSpice та LTspice: інструменти для схематехнічного моделювання, що дозволяють аналізувати поведінку електричних схем.

Переваги наскрізного моделювання для радіотехнічних систем:

- забезпечення точності на всіх етапах наскрізне моделювання дозволяє враховувати параметри на всіх рівнях системи, забезпечуючи точність в аналізі та прогнозуванні роботи системи.
- оптимізація параметрів дозволяє досліджувати оптимальні параметри як на рівні схематехніки, так і на рівні протоколів зв'язку, підвищуючи загальну ефективність системи.
- виявлення та корекція помилок за допомогою наскрізного підходу помилки в системі можуть бути виявлені ще на етапі моделювання, що зменшує витрати на подальші випробування та налагодження.
- інтеграція з реальним обладнанням: можливість відтворення реальних умов експлуатації для тестування сумісності апаратного та програмного забезпечення.

Приклади застосування наскрізного моделювання. Розробка радіоприймачів - наскрізне моделювання дозволяє дослідити чутливість приймача, стійкість до завад, налаштування фільтрів і підсилювачів. Для системи мобільного зв'язку це дослідження якості передачі сигналу, оптимізація протоколів передачі даних, аналіз потужності та ефективності антен. Бездротові сенсорні мережі можуть отримати забезпечення точності обміну даними між сенсорами, енергоспоживання, стійкість до перешкод та налаштування ефективної роботи в умовах реального середовища. Моделювання роботи антенних систем з урахуванням електромагнітних хвиль і відбиття в умовах розміщення на конкретній платформі (наприклад, транспортний засіб, літак).

Основні виклики наскрізного моделювання:

1. Обчислювальні ресурси - наскрізне моделювання потребує значних обчислювальних потужностей, особливо для тривимірного електромагнітного моделювання та моделювання складних протоколів.
2. Врахування параметрів середовища - важливо врахувати вплив фізичних факторів, таких як температура, вологість, на роботу компонентів і передачу сигналу.
3. Синхронізація між рівнями моделі для забезпечення коректної передачі сигналів та даних між різними рівнями моделі (аналогові, цифрові сигнали, програмні компоненти) є складним завданням.

Наскрізне моделювання є ключовим підходом для розробки радіотехнічних систем, оскільки дозволяє отримати комплексну картину роботи системи на всіх рівнях. Це забезпечує ефективну оптимізацію параметрів, економію часу і ресурсів на етапах розробки, тестування і налагодження. Сучасні інструменти, такі як MATLAB Simulink, ANSYS HFSS, CST Studio та інші, забезпечують необхідний функціонал для наскрізного моделювання, що робить цей підхід важливим інструментом у розробці складних радіотехнічних систем.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке наскрізне моделювання і як воно застосовується в радіотехнічних системах?

Наскрізне моделювання — це підхід до моделювання, при якому весь процес або система моделюється від початкових умов до кінцевого результату, враховуючи всі етапи і компоненти. У радіотехнічних системах це може включати моделювання від рівня фізичних процесів до рівня роботи системи в цілому, враховуючи всі взаємодії між елементами.

2. Які основні етапи включає наскрізне моделювання радіотехнічної системи?

Основні етапи наскрізного моделювання включають: аналіз вимог до системи, створення математичної моделі, побудова та верифікація моделі, симуляція і тестування на різних етапах, а також аналіз

результатів і прийняття рішень щодо подальшого удосконалення системи.

3. Як наскрізне моделювання допомагає в оптимізації радіотехнічних систем?

Наскрізне моделювання дає змогу на всіх етапах проектування та експлуатації радіотехнічної системи провести детальний аналіз взаємодії компонентів, оцінити ефективність використання ресурсів, виявити потенційні проблеми і здійснити оптимізацію параметрів для досягнення найкращих результатів при мінімальних витратах.

4. Що таке "цикл зворотного зв'язку" в наскрізному моделюванні і як він використовується для покращення систем?

Цикл зворотного зв'язку — це процес, при якому результати симуляції або тестування системи використовуються для коригування параметрів моделі, що дозволяє покращити проектування або характеристики системи на наступних етапах. Це дозволяє ітераційно вдосконалювати систему, що особливо важливо для складних радіотехнічних систем.

5. Які основні переваги наскрізного моделювання в порівнянні з іншими методами моделювання?

Основні переваги наскрізного моделювання включають більш точне відображення взаємодії між всіма компонентами системи, можливість тестування та оптимізації на кожному етапі, а також здатність передбачати поведінку системи в реальних умовах. Це дозволяє виявити проблеми на ранніх етапах і знизити ризики при впровадженні.

6. Яким чином наскрізне моделювання може покращити процес проектування радіотехнічних систем?

Наскрізне моделювання дозволяє змоделювати систему в повному обсязі, враховуючи всі етапи її роботи і взаємодії, що дає змогу на ранніх етапах проектування оцінити ефективність різних рішень. Це дозволяє скоротити час і витрати на розробку, а також зменшити ймовірність помилок.

7. Які інструменти та програмні засоби використовуються для наскрізного моделювання в радіотехнічних системах?
Для наскрізного моделювання радіотехнічних систем часто використовуються програмні засоби, такі як MATLAB/Simulink, CST Studio, ANSYS HFSS, COMSOL Multiphysics, а також спеціалізовані інструменти для моделювання сигналів і систем зв'язку, наприклад, SystemVue чи NS3.
8. Які проблеми можуть виникнути при наскрізному моделюванні і як їх можна вирішити?
При наскрізному моделюванні можуть виникати проблеми, пов'язані з великими обсягами обчислень, необхідністю інтеграції різних типів моделей, недостатньою точністю деяких компонентів або підсистем. Для їх вирішення можна використовувати паралельні обчислення, точніші методи моделювання, а також інтеграцію з іншими системами моделювання для підвищення точності.
9. Що таке верифікація та валідація моделі в контексті наскрізного моделювання, і чому це важливо?
Верифікація моделі — це процес перевірки того, чи була модель правильно побудована згідно з вимогами і технічними умовами. Валідація — це перевірка того, чи модель адекватно відображає реальні процеси або систему. Обидва процеси є важливими для підтвердження, що результати моделювання можна використовувати для прийняття рішень.
10. Як наскрізне моделювання може бути використано для тестування та оптимізації радіотехнічних систем на різних етапах їх життєвого циклу?
Наскрізне моделювання дозволяє виконувати тестування на кожному етапі розробки радіотехнічної системи — від концептуального проектування до експлуатації. Це дає можливість виявити дефекти на ранніх етапах, провести необхідну оптимізацію параметрів і забезпечити належну якість та ефективність системи в процесі її використання.

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Іванов, А. Основи радіотехнічного моделювання. Наукова думка; 2023.
2. Захарченко, М. Моделювання радіотехнічних систем. Видавництво Харків; 2019.
3. Іваненко, І. Моделювання радіотехнічних систем. Вид. Одеська політехніка; 2022.
4. Сухаревський, О. Імітаційне моделювання в радіотехнічних системах. Тернопіль: Наука; 2018.

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Цифрові двійники (digital twins) для моделювання радіотехнічних систем — це технологія, що дозволяє створити точну цифрову копію реальної радіотехнічної системи або її компонента. Цей підхід дає змогу моделювати, тестувати й оптимізувати систему в реальному часі, віртуально відтворюючи її роботу. Завдяки цифровим двійникам можна передбачати поведінку радіотехнічних систем, виконувати прогнозування, аналізувати можливі несправності й оптимізувати роботу без необхідності фізичних експериментів.

Основні принципи цифрових двійників:

1. Точна відповідність реальній системі, тобто, цифровий двійник створюється на основі реальних параметрів системи, включаючи її фізичні, електричні, та механічні характеристики.
2. Збір та інтеграція даних у реальному часі, коли дані з фізичної системи постійно передаються цифровому двійнику, що дозволяє відображати актуальний стан об'єкта та відстежувати його роботу.
3. Моделювання поведінки та взаємодії компонентів при якому цифровий двійник дозволяє відтворювати взаємодію компонентів, включаючи передавачі, приймачі, антени, модуляційні та демодуляційні блоки, а також алгоритми обробки сигналів.
4. Прогнозування: на основі аналізу поточних і минулих даних коли цифровий двійник може передбачати майбутні стани системи, а також можливі відмови або аномалії.

До переваг використання цифрових двійників у радіотехнічних системах відносять:

- зменшення витрат досягається оскільки цифрові двійники дозволяють уникнути витрат на фізичне тестування та розробку, оскільки моделювання можна проводити віртуально;
- швидке виявлення й усунення несправностей - цифровий двійник дозволяє швидко знайти імітаційні помилки та виявити потенційні проблеми ще до їх появи у фізичній системі;
- оптимізація продуктивності при якій моделювання та тестування різних параметрів дозволяє налаштувати систему для досягнення максимальної ефективності;

- адаптація до змін умов середовища коли цифровий двійник може враховувати вплив навколишніх умов, таких як температура, вологість, завади, і моделювати відповідні зміни в роботі системи;
- можливість віддаленого управління і діагностики дозволяє моніторити систему в реальному часі та отримувати інформацію про її стан віддалено, що знижує ризик відмови.

Застосування цифрових двійників у радіотехнічних системах. При проектуванні антен і фільтрів, де цифрові двійники дозволяють моделювати та оптимізувати параметри антен, фільтрів та інших елементів радіотехнічних систем, що забезпечує точне налаштування частотного діапазону, потужності сигналу та інших характеристик. Для системи мобільного зв'язку та бездротові мережі, коли завдяки цифровим двійникам можна моделювати умови роботи систем зв'язку, тестувати стійкість до завад, ефективність передачі даних, а також оптимізувати маршрути зв'язку. Для прогнозування відмов обладнання, коли використання цифрового двійника для моніторингу стану радіотехнічної системи дозволяє прогнозувати можливі відмови й виконувати профілактичне обслуговування, знижуючи ймовірність непередбачених поломок. Моделювання складних радіочастотних середовищ, коли в умовах міських забудов або промислових об'єктів цифрові двійники допомагають точно змоделювати поширення радіохвиль, втрати потужності, відбиття й дифракцію сигналу. Обробка та аналіз сигналів, коли цифрові двійники дозволяють аналізувати сигнали, моделювати алгоритми обробки та тестувати нові підходи до поліпшення якості передачі й обробки сигналів.

Інструменти для створення цифрових двійників радіотехнічних систем це знов таки MATLAB і Simulink, ANSYS HFSS та CST Studio, SystemC і VHDLта специфічний для цифрових двійників застосунок Digital Twin Builder (Siemens), спеціалізований інструмент для створення цифрових двійників, що дозволяє інтегрувати і моделювати роботу складних систем на основі реальних даних.

Проблеми при використанні цифрових двійників у радіотехнічних системах, як і загалом для систем моделювання. Забезпечення точності даних: моделювання потребує високоточних даних для створення адекватного цифрового двійника, що часто вимагає складних калібрувань і вимірювань. Високі вимоги до обчислювальних ресурсів: створення цифрового двійника складної радіотехнічної

системи може бути обчислювально інтенсивним, особливо для реалістичного відтворення електромагнітних процесів. Інтеграція з існуючим обладнанням: необхідно забезпечити сумісність цифрового двійника з поточним обладнанням, що часто потребує розробки спеціальних протоколів обміну даними. Безпека даних: цифровий двійник збирає й обробляє великий обсяг даних у реальному часі, тому важливо забезпечити захист інформації від несанкціонованого доступу.

Цифрові двійники є перспективним підходом до моделювання радіотехнічних систем, який дозволяє підвищити надійність, ефективність і точність роботи обладнання. Завдяки цифровим двійникам інженери мають змогу тестувати нові підходи, оптимізувати параметри і прогнозувати майбутню поведінку систем без ризику для реального обладнання. Сучасні інструменти, такі як MATLAB, CST Studio та ANSYS HFSS, надають усі необхідні засоби для побудови цифрових двійників і їх ефективного використання у розробці та обслуговуванні радіотехнічних систем.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Що таке цифровий двійник і як він використовується в радіотехнічних системах?

Цифровий двійник — це віртуальна копія реальної фізичної системи, яка використовується для моделювання, моніторингу та оптимізації її роботи. У радіотехнічних системах цифрові двійники дозволяють моделювати поведінку радіоелектронних компонентів, систем зв'язку, мереж та іншої техніки, що дозволяє покращити проектування та експлуатацію без необхідності фізичних експериментів.

2. Як створюється цифровий двійник для радіотехнічної системи?

Створення цифрового двійника включає збір даних про фізичну систему, її характеристики та умови роботи, побудову математичних моделей, що описують ці характеристики, а також інтеграцію цих моделей у програмне забезпечення для симуляції. Для отримання точних

результатів використовуються методи системного моделювання, машинного навчання та великих даних.

3. Які основні переваги використання цифрових двійників у проектуванні та експлуатації радіотехнічних систем?

Основні переваги включають можливість тестування різних сценаріїв без фізичних експериментів, скорочення часу на розробку і оптимізацію систем, зниження витрат на створення прототипів і проведення випробувань, а також можливість реального моніторингу стану та ефективності системи в реальному часі.

4. Яка роль великих даних (Big Data) в створенні та використанні цифрових двійників?

Великі дані використовуються для збору і аналізу величезних обсягів інформації з фізичних систем у реальному часі, що дозволяє покращити точність цифрового двійника. Ці дані допомагають здійснювати прогнозування, моніторинг і аналіз поведінки системи на основі реальних даних з різних джерел, що забезпечує більш точне моделювання і прийняття рішень.

5. Як цифровий двійник допомагає у прогнозуванні та моніторингу стану радіотехнічних систем?

Цифрові двійники можуть відслідковувати зміни в параметрах системи в реальному часі, що дозволяє прогнозувати можливі відмови або погіршення характеристик. Це дозволяє вчасно вжити заходів для ремонту або оптимізації системи, зменшуючи час простою та витрати на обслуговування.

6. Яка різниця між цифровим двійником і традиційними методами моделювання радіотехнічних систем?

Цифровий двійник інтегрує реальні дані і фактичні умови роботи системи, що дозволяє здійснювати моніторинг і приймати рішення в реальному часі. У той час як традиційні методи моделювання часто використовуються для статичних симуляцій або планування, цифровий двійник може забезпечити динамічне і точне відображення роботи системи.

7. Які основні технічні виклики стоять перед створенням цифрових двійників для складних радіотехнічних систем?
Основні виклики включають інтеграцію різних типів даних (наприклад, з сенсорів, моделей, експериментальних даних), забезпечення високої точності та актуальності цифрового двійника, а також проблеми з обробкою великих обсягів даних і необхідність в реальному часі оновлювати моделі для точного прогнозування поведінки системи.
8. Як цифрові двійники сприяють автоматизації процесів у радіотехнічних системах?
Цифрові двійники дозволяють автоматизувати моніторинг і керування радіотехнічними системами, застосовуючи алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для прийняття рішень на основі даних, зібраних з реальної системи. Це може включати автоматичне коригування параметрів роботи, прогнозування відмов і оптимізацію ресурсів.
9. Яким чином цифрові двійники можуть допомогти в процесі тестування нових технологій для радіотехнічних систем?
Цифрові двійники дають змогу тестувати нові технології та компоненти радіотехнічних систем у віртуальному середовищі, що дозволяє оцінити їх ефективність, не ризикуючи реальними експериментами. Це скорочує час на верифікацію нових рішень і дає можливість передбачити можливі проблеми.
10. Які сфери застосування цифрових двійників можна визначити в контексті радіотехнічних систем?
Цифрові двійники можуть бути застосовані в таких сферах, як оптимізація роботи мереж зв'язку, управління радіочастотним спектром, тестування нових радіоелектронних компонентів, моніторинг і управління об'єктами радіотехнічної інфраструктури (антенні комплекси, станції зв'язку) і прогнозування стану систем у реальному часі.

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Як штучний інтелект змінює майбутнє через цифрові двійники ([source](#)).
2. X. Zhang, J.Lee. "Digital Twin-driven Smart Manufacturing". Springer. 2018
3. F.Tao, M. Zhang. Digital Twin and Cyber-Physical Systems. CRC Press, 2020
4. M.Grieves, Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication". White Paper. 2014
5. В.Л. Сидоренко. Методичний підхід до ідентифікації еколого-економічного ризику промислової діяльності. Mathematical Modeling in Economics; 2022.
6. А. Черняк, Цифрові двійники в радіотехнічних системах: Теорія та практика. National Academy of Sciences of Ukraine; 2020.
7. В. Попов. Цифрові двійники для аналізу радіотехнічних систем: Моделювання та оптимізація. TechnoPress; 2021.

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Базові поняття

Економічні аспекти моделювання радіотехнічних систем відіграють важливу роль у процесах розробки, оптимізації та тестування радіотехнічних пристроїв. Завдяки сучасним методам моделювання можна значно зменшити витрати на створення і випробування нових систем, а також підвищити ефективність існуючих. У даній статті розглянуто основні економічні переваги, пов'язані з використанням моделювання для радіотехнічних систем, а також потенційні витрати та виклики.

Переваги економічного моделювання радіотехнічних систем.

Це і зменшення витрат на фізичні експерименти - моделювання дозволяє значно знизити потребу в дорогих фізичних прототипах і реальних експериментах. Тестування та перевірка різних параметрів системи, таких як ефективність антени, стійкість до завад, характеристики фільтрів та інші, можна проводити віртуально. Це дозволяє зекономити час і кошти на виробництво фізичних макетів та експерименти, особливо на ранніх етапах розробки.

Також прискорення процесу розробки - моделювання дозволяє швидше адаптувати систему до змін умов середовища або технічних вимог, а також виявляти недоліки в проекті до початку фізичного виготовлення. Завдяки цьому зменшується час розробки і, відповідно, витрати на створення системи.

Здійснюється оптимізація ресурсів і витрат на тестування - моделювання дозволяє відтворити умови роботи радіотехнічних систем і тестувати їх без необхідності виготовлення великої кількості прототипів або проведення дорогих польових випробувань. Це дозволяє скоротити витрати на тестування та прототипування, одночасно знижуючи ризик помилок на фінальних етапах.

Забезпечення конкурентоспроможності на ринку завдяки економії на розробці і тестуванні, компанії можуть швидше виходити на ринок з новими продуктами, що дає їм конкурентні переваги. Крім того, ефективне використання технологій моделювання дозволяє створювати більш інноваційні рішення, що можуть бути більш привабливими для споживачів.

Стає можливим моделювання та прогнозування життєвого циклу системи оскільки застосування моделювання дозволяє не тільки оптимізувати етапи розробки, але й передбачати поведінку системи протягом усього її життєвого циклу. Це включає в себе прогнозування можливих відмов, зносу компонентів, потребу в технічному обслуговуванні та оновленнях. Такий підхід дозволяє зменшити витрати на експлуатацію та обслуговування радіотехнічних систем в довгостроковій перспективі.

З іншого боку, виникають потенційні витрати на моделювання радіотехнічних систем:

Витрати на програмне забезпечення та обладнання. Моделювання складних радіотехнічних систем вимагає потужних обчислювальних ресурсів і спеціалізованих програмних продуктів, таких як MATLAB, Simulink, ANSYS HFSS, CST Studio. Ліцензії на такі програми можуть бути дорогими, що збільшує початкові витрати на впровадження цієї технології. Крім того, високопродуктивне обладнання для обчислень також може бути дорогим.

Навчання персоналу та технічна підтримка. Для ефективного використання сучасних інструментів моделювання необхідно мати висококваліфікований персонал, що потребує додаткових витрат на навчання. Це також включає витрати на технічну підтримку програмного забезпечення, що забезпечує безперебійну роботу всіх інструментів моделювання.

Витрати на створення цифрових двійників. Для створення високоякісних цифрових двійників потрібна точна й детальна інформація про фізичні та електричні характеристики системи. Збір і обробка цих даних може вимагати значних витрат на вимірювання, калібрування та первинне тестування систем.

Залежність від обчислювальних ресурсів. Моделювання складних радіотехнічних систем, таких як електромагнітні хвилі, взаємодії антен і завод, вимагає великих обчислювальних потужностей. Це може призвести до додаткових витрат на хмарні обчислення або серверні рішення для обробки великих обсягів даних.

Оцінка економічної ефективності включає наступні підходи.

Порівняння витрат на моделювання та експерименти. Один із важливих аспектів оцінки економічної ефективності — це порівняння вартості моделювання із витратами на реальні фізичні експерименти. У

багатьох випадках моделювання може значно здешевити процес розробки та зменшити ризик відмов на пізніх етапах проекту.

Техніко-економічне обґрунтування інвестицій. Інвестування в технології моделювання має економічний сенс, якщо економія на прототипах, тестуванні, часі розробки та випуску продукції перевищує витрати на придбання інструментів та підготовку персоналу. Таке обґрунтування дозволяє підприємствам ухвалювати обґрунтовані рішення щодо інвестицій у моделювання.

Життєвий цикл продукту. Моделювання дозволяє прогнозувати не лише початкові витрати, але й витрати на експлуатацію, обслуговування та модернізацію радіотехнічних систем. Завдяки цьому можна оптимізувати витрати на всіх етапах життєвого циклу, що в результаті призводить до зниження загальних витрат.

Моделювання радіотехнічних систем з економічної точки зору є потужним інструментом для зменшення витрат на розробку, тестування та оптимізацію. Воно дає змогу значно скоротити витрати на прототипи і фізичні експерименти, підвищити ефективність процесу розробки, а також передбачати майбутні відмови й збої в роботі системи. Однак впровадження моделювання потребує значних інвестицій в програмне забезпечення, обчислювальні потужності та підготовку персоналу. З огляду на всі переваги і витрати, доцільність використання методів моделювання визначається в кожному конкретному випадку на основі техніко-економічних розрахунків.

Типові запитання з відповідями

Наведені питання з короткими відповідями, що студент має розширити, користуючись отриманими в результаті самостійного вивчення знаннями та досвідом.

1. Як моделювання радіотехнічних систем може вплинути на зниження витрат у процесі їх розробки та експлуатації?
Моделювання дозволяє оптимізувати проектування систем, знижуючи потребу в дорогих прототипах та експериментальних дослідженнях. Це також дає змогу прогнозувати проблеми до етапу виробництва, що зменшує витрати на виправлення помилок та удосконалення систем у процесі експлуатації.

2. Як моделювання допомагає в управлінні фінансовими ризиками при розробці радіотехнічних систем?
Моделювання дозволяє передбачити можливі відмови, неточності або інші проблеми ще на етапі проектування. Це допомагає оцінити ризики, знижуючи ймовірність фінансових втрат через неефективні або непередбачувані витрати, а також забезпечує більш точні прогнози щодо бюджету.
3. Які основні економічні переваги використання числових та програмних моделей для тестування радіотехнічних систем замість фізичних експериментів?
Основні економічні переваги включають зниження вартості прототипів, відсутність необхідності в дорогих тестах та експериментах, можливість швидкого внесення змін в модель без значних витрат, а також здатність до багаторазового використання моделі для тестування різних сценаріїв без додаткових витрат.
4. Яким чином моделювання може допомогти в оптимізації ресурсів і зменшенні енергоспоживання радіотехнічних систем?
Моделювання дозволяє знайти найбільш ефективні параметри для роботи радіотехнічних систем, що включає оптимізацію використання енергії, підвищення ефективності компонентів, а також запобігання перевитратам через некоректне налаштування чи неправильну експлуатацію системи.
5. Як моделювання радіотехнічних систем сприяє більш точному плануванню бюджету і ресурсів для проектів?
Моделювання дає змогу створити точніші прогнози витрат на розробку, виробництво та експлуатацію систем. Воно також дозволяє зменшити кількість змін, що вносяться в процес розробки після початку проекту, а отже знижує ймовірність неочікуваних витрат.
6. Як впровадження моделювання в процес розробки радіотехнічних систем впливає на терміни реалізації проектів?
Моделювання дозволяє значно скоротити час, необхідний для тестування та випробувань, оскільки багато етапів можна протестувати віртуально. Це дозволяє прискорити розробку та

виведення продукту на ринок, а також зменшує потребу в фізичних тестах, що може значно заощадити час.

7. Які основні витрати можуть виникнути при впровадженні моделювання в проектування радіотехнічних систем?

Основні витрати можуть включати закупівлю програмного забезпечення для моделювання, навчання персоналу, а також створення та підтримку цифрових моделей. Проте ці витрати часто окупаються через значне зниження вартості експериментальних досліджень та прототипів.

8. Як економічний ефект від використання моделювання може бути вимірний в контексті радіотехнічних систем?

Економічний ефект можна виміряти через зменшення вартості розробки та тестування, скорочення часу на виведення продукту на ринок, зниження витрат на виправлення помилок і неполадок, а також через підвищення ефективності експлуатації системи, що веде до зменшення витрат на обслуговування та ремонт.

9. Чому важливо проводити оцінку економічної ефективності моделей радіотехнічних систем на етапі їх розробки?

Оцінка економічної ефективності дозволяє виявити можливі зони для зниження витрат і оптимізації процесу розробки до того, як система буде готова до виробництва. Це дозволяє уникнути непотрібних витрат на виправлення помилок на пізніших етапах і забезпечує більш вигідне розподілення ресурсів.

10. Яким чином можна підвищити економічну ефективність за допомогою комбінування різних методів моделювання (наприклад, числові моделі та емпіричні)?

Комбінація різних методів моделювання дозволяє використовувати їхні переваги для досягнення більш точних результатів при меншому обсязі витрат на розробку. Числові моделі можуть бути ефективними на етапі проектування, тоді як емпіричні методи можуть бути корисні для валідації та уточнення моделей, що дає можливість оптимізувати ресурси та зменшити витрати на розробку.

Додаткові джерела інформації

Надаються посилання на веб-ресурси та друковані джерела, що можуть бути корисними при вивченні теми.

1. Трофимов, І. Основи радіотехнічних систем. К:Техніка; 2009.
2. Поліщук, О. Економічний аналіз радіотехнічних систем. К:Університет; 2015.
3. Київський політехнічний інститут. Моделювання радіотехнічних систем. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47794/1/Modeliuvannia.pdf>

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА:

1. Гліненко, Л.К. Основи моделювання технічних систем. Навчальний посібник. [Текст] : Навчальний посібник / Л.К. Гліненко, Г.С. Сухонос, І.В. Горбатий, А.П. Бондарев – Львів: Бескид Біт, 2003. – 176 с.
2. Бахрушин В.Є. Математичне моделювання: Навчальний посібник [Текст] / В.Є. Бахрушин – Запоріжжя: ГУ «ЗІДМУ», 2004. – 140 с.
3. Глоба, Л.С. Математичні основи побудови інформаційнотелекомунікаційних систем. Навчальний посібник [Текст] / Л.С. Глоба – К.: Політехніка. – 2003. – 276 с
4. Чернихівський Є.М., Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: Навчальний посібник [Текст] / Є.М. Чернихівський – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.
5. Поповський В.В., Математичні основи теорії телекомунікаційних систем: Навч. посібник [Текст] / В.В. Поповський – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с
6. Матвійчук Я.М. Математичне макромоделювання динамічних систем: Теорія і практика Навчальний посібник [Текст] \ Я.М. Матвійчук – Львів: Вид-во ЛНУ, 2000 – 214 с.