МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Прикладні комплексні пакети програм в електромеханіці»
вибіркових компонент
освітньо-професійної програми першого(бакалаврського) рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою – Моделювання методом кінцевих елементів

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО
Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2022 № 8

СХВАЛЕНО
Методичною радою Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ
Протокол від 22.08.2022 № 1

ПОГОДЖЕНО
Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2022 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 15.08.2022 № 1.

Розробник: к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Метод кінцевих елементів.
2. Історія розвитку методу МКЕ.
3. Система автоматизованого проектування ANSYS.
4. Версія Ansys 2022 R1.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices, Kay H&am eyer Ronnie Belmans, Katholieke Universiteit, Belgium, 2009

2. Classroom Manual for Automotive Electricity And Electronics, Fifth Edition, Barry Hollembeak, 2011 Delmar, Cengage Learning

3. Electrical Machine Drives Control, An Introduction, Juha Pyrhönen, Valéria Hrabovcová, R.ScottSemken, 2016 John Wiley & Sons Ltd.

4. AutoCAD Electrical 2021 for Electrical Control Designers, 12th Edition

5. AutoCAD Electrical 2022 Black Book (Colored), Cadcamcae Works (May 6, 2021), 496 pages

6. An Introduction to ANSYS Fluent 2022, Available August 29, 2022, By John E. Matsson Ph.D., P.E. Beginner – Intermediate,688 pages

7. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2022, Available August 5, 2022, By Huei-Huang Lee. Beginner – Intermediate, 618 pages

8. ANSYS Tutorial Release 2022, Published July 8, 2022, By Kent L. Lawrence, Beginner, 194 pages

Допоміжна література:

1. PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS, THIRD EDITION, DR. P. C. SEN, 2014

2. Jan A. Melkebeek, Electrical Machines and Drives, Fundamentals and Advanced Modelling, Springer International Publishing AG 2018

3. Austin Hughes, Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications, Third edition, 2006

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. https://sourceforge.net/projects/kicad/
2. https://proteus.no/Download/Started_utdrag.pdf
3. https://softico.it/solutions/elektroenergetika/electrics-storm/
4. https://iowin.net/ru/elektrik/

Текст лекції

1. Метод кінцевих елементів.

Метод кінцевих елементів (МКЕ, FEM - Finite element method) - це чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь з окремими похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні задач прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення задач механіки твердого тіла, що деформується, теплообміну, гідродинаміки, електродинаміки і топологічної оптимізації.

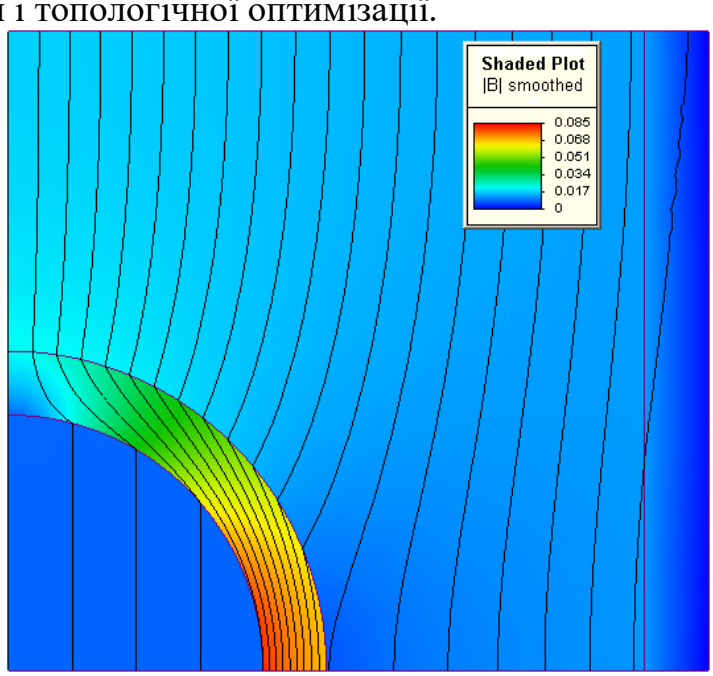


Рисунок 1 - Рішення методом кінцевих елементів двомірної магнітостатичної задачі (лінії та колір означають напрямок та величину магнітної індукції)

Суть методу полягає у його назві. Область, у якій шукається розв'язання диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеву кількість підобластей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції. У найпростішому випадку це поліном першого ступеня. Поза своїм елементом апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на межах елементів (у вузлах) є розв'язанням задачі та заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності значення сусідніх функцій межах між елементами (у вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Складається система лінійних рівнянь алгебри. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, у яких шукається рішення вихідної системи, прямо пропорційно кількості елементів обмежується лише можливостями ЕОМ. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних рівнянь алгебри має розріджений вигляд, що істотно спрощує її рішення. Якщо говорити в матричних термінах, то збираються так звані матриці твердості (або матриця

Діріхле) та мас. Далі на ці матриці накладаються граничні умови (наприклад, за умов Неймана в матрицях не змінюється нічого, а за умов Діріхле з матриць викреслюються рядки та стовпці, що відповідають граничним вузлам, оскільки в силу крайових умов значення відповідних компонентів рішення відомо). Потім збирається система лінійних рівнянь і вирішується одним із відомих методів. З погляду обчислювальної математики, ідея методу кінцевих елементів у тому, що мінімізація функціоналу варіаційної завдання складає сукупності функцій, кожна у тому числі визначена у своїй підобласті. Метод отримав широке застосування під час проектування споруд, і навіть під час моделювання моделей руху, наприклад, грунту. Метод в 2000-х роках майже відразу почав повсюдно використовуватися і змінив варіаційно-різнисні, звичайно-різнисні та інші методи.

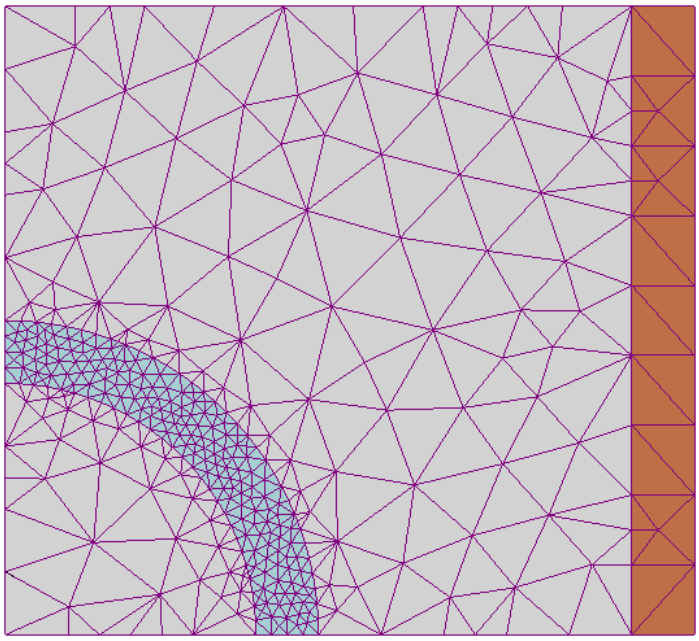


Рисунок 2 - Розбиття на кінцеві елементи. Розмір елементів можна змінювати, зменшуючи його поблизу області, що цікавить, і збільшуючи — для зниження витрат процесорного часу

Переваги і недоліки. Метод кінцевих елементів складніший за метод кінцевих різниць у реалізації. У МКЕ, однак, є ряд переваг, що виявляються на реальних завданнях: довільна форма області, що обробляється; сітку можна зробити більш рідкісною у тих місцях, де особлива точність не потрібна. Довгий час широкому поширенню МКЕ заважала відсутність алгоритмів автоматичного розбиття області на «майже рівносторонні» трикутники (похибка, залежно від варіації методу, обернено пропорційна синусу або найгострішого, або тупого кута в розбиття). Втім, це завдання вдалося успішно вирішити (алгоритми засновані на тріангуляції Делоне), що дало можливість створювати повністю автоматичні кінцево елементні САПР.

2. Історія розвитку методу МКЕ.

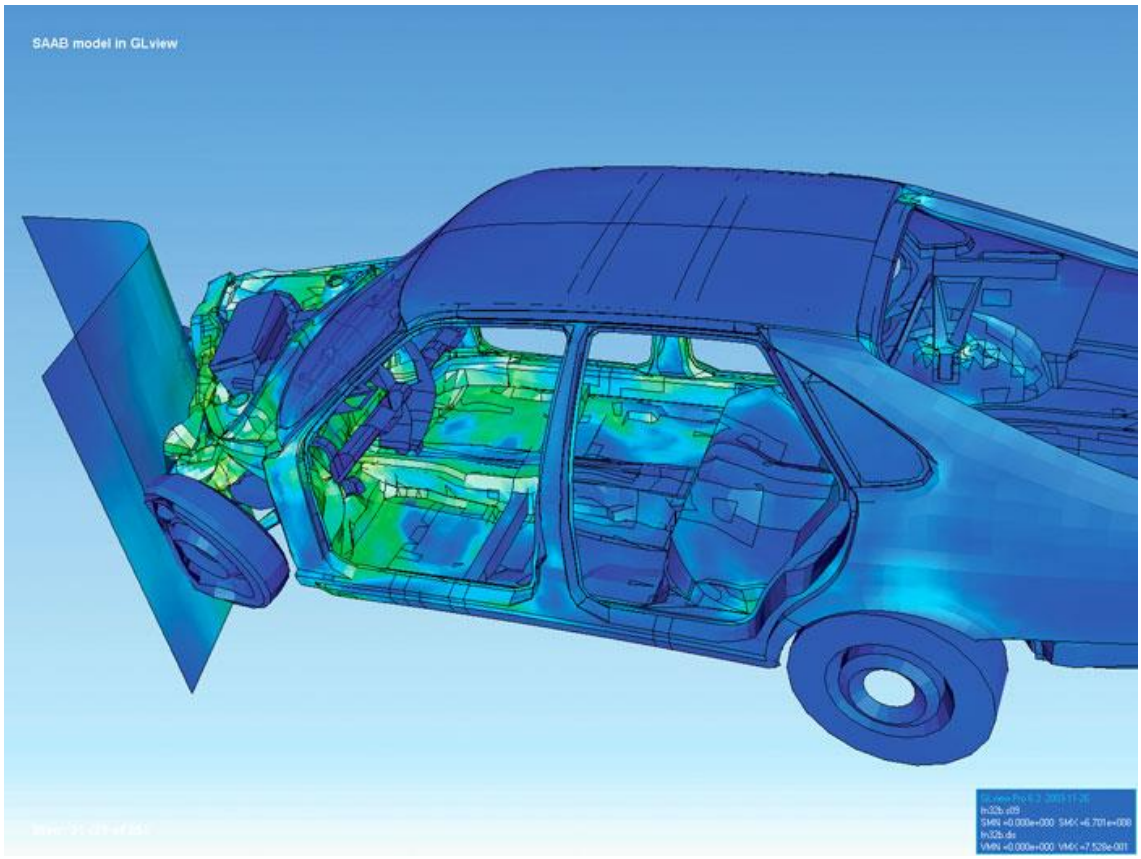


Рисунок 3 – Візуалізація деформації машини при асиметричному ударі за допомогою методу кінцевих елементів

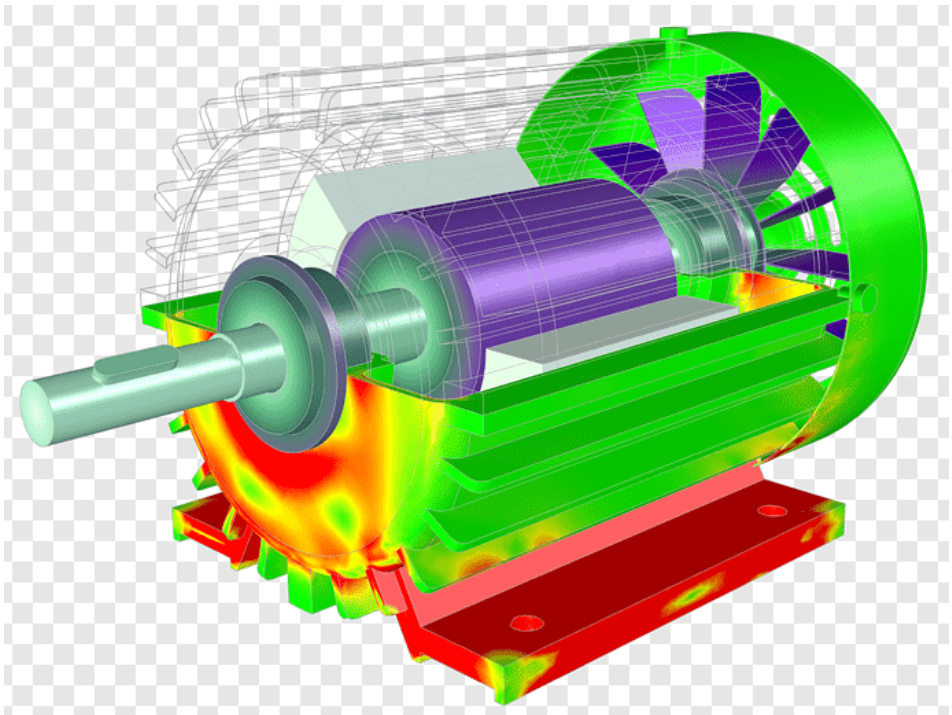


Рисунок 4 – Моделювання асинхронного електродвигуна з допомогою МКЕ

Метод кінцевих елементів виникла з необхідності нових шляхів вирішення завдань будівельної механіки та теорії пружності у 1930-х роках. Одними з основоположників ідей, що лежать в основі МКЕ, вважаються Олександр Хренніков та Ріхард Курант. Їхні роботи опубліковані у 1940-х роках. Вперше ефективність МКЕ була продемонстрована 1944 року Іоаннісом Аргірісом, який реалізував метод із застосуванням ЕОМ. У Китаї в 1950-х роках Кан Фен запропонував чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь у приватних похідних для розрахунку конструкцій гребель. Цей метод був названий методом кінцевих різниць на основі варіаційного принципу, що можна розглядати як ще один незалежний спосіб реалізації методу кінцевих елементів. Хоча перелічені підходи різняться між собою в деталях, вони мають одну спільну рису: дискретизація безперервної області сіткою в набір дискретних піддоменів, які зазвичай називають елементами.

Подальший розвиток методу кінцевих елементів пов'язаний також із вирішенням завдань космічних досліджень у 1950-х роках. Істотний поштовх у своєму розвитку МКЕ отримав у 1963 році після того, як було доведено, що його можна розглядати як один з варіантів поширеного в будівельній механіці методу Релея-Рітца, який шляхом мінімізації потенційної енергії зводить завдання до системи лінійних рівнянь рівноваги. Після встановлення зв'язку МКЕ з процедурою мінімізації він став застосовуватися до завдань, що описуються рівняннями Лапласа або Пуассона. Область застосування МКЕ значно розширилася, коли було встановлено (1968 року), що рівняння, що визначають елементи в завданнях, можуть бути легко отримані за допомогою варіантів методу зважених нев'язок, таких як метод Галеркіна або метод найменших квадратів. Це відіграло важливу роль у теоретичному обґрунтуванні МКЕ, оскільки дозволило застосовувати його під час вирішення багатьох типів диференціальних рівнянь. Таким чином, метод кінцевих елементів перетворився на загальний метод чисельного розв'язання диференціальних рівнянь чи систем диференціальних рівнянь. З розвитком обчислювальних засобів можливості методу постійно розширюються, також розширюється і клас розв'язуваних завдань. В даний час запропоновано велику кількість реалізацій методу кінцевих елементів при моделюванні процесів дифузії, теплопровідності, гідродинаміки, механіки, електродинаміки та ін.

3. Система автоматизованого проектування ANSYS.

ANSYS - універсальна програмна система кінцево-елементного (МКЕ) аналізу, що існує і розвивається протягом останніх 30 років, є досить популярною у фахівців у сфері автоматичних інженерних розрахунків (CAE, Computer-Aided Engineering) та КЕ рішення лінійних та нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних просторових завдань механіки деформованого твердого тіла та механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично та фізично нелінійні завдання контактної

взаємодії елементів конструкцій), задач механіки рідини та газу, теплопередачі та теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки пов'язаних полів. Моделювання та аналіз у деяких галузях промисловості дозволяє уникнути дорогих та тривалих циклів розробки типу «проектування – виготовлення – випробування». Система працює з урахуванням геометричного ядра Parasolid.

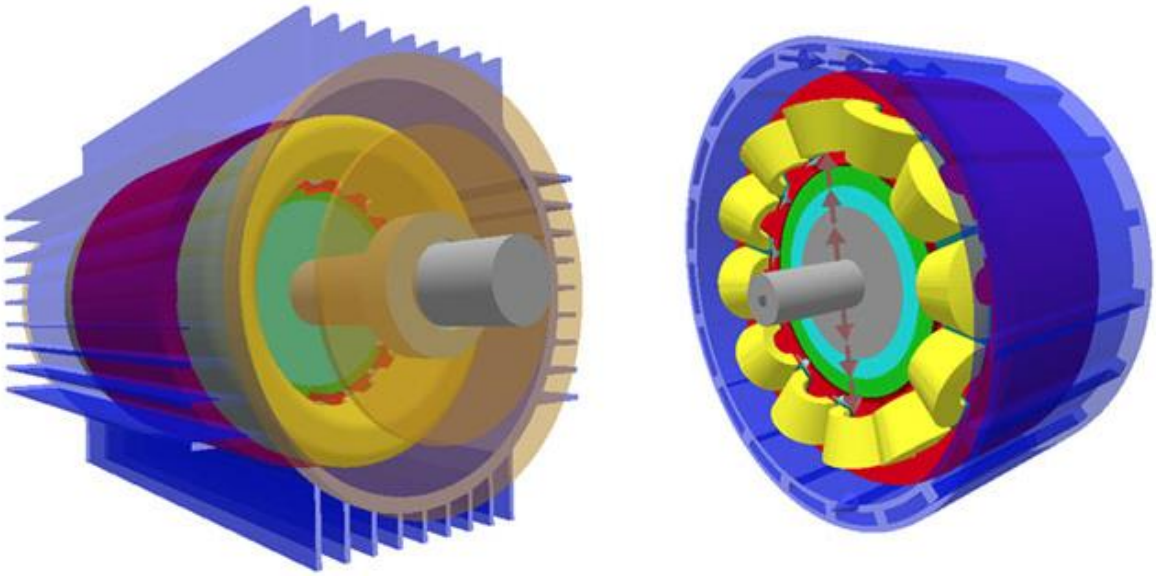


Рисунок 5 – Приклад проєкту Ansys Motor-CAD

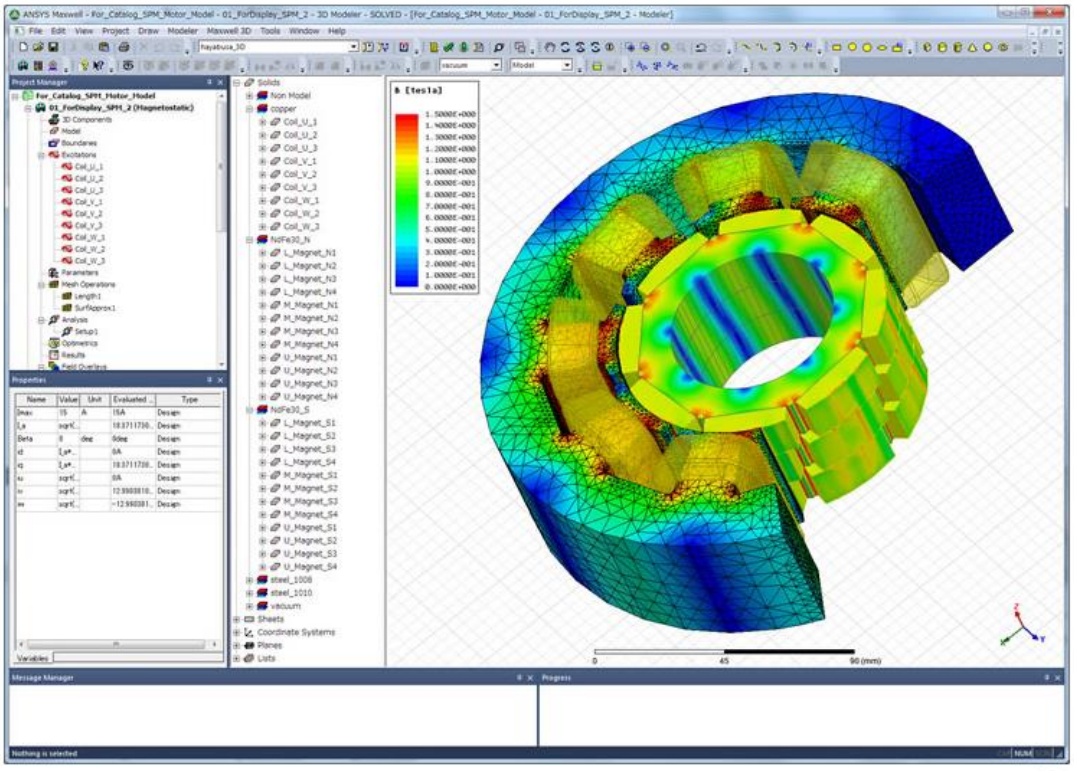


Рисунок 6 – ANSYS Maxwell - Електромагнетизм

Програмна система КЕ аналізу ANSYS розробляється американською компанією Ansys Inc. Компанія також випустила інші системи КЕ

моделювання, зокрема DesignSpace, AI Solutions (NASTRAN, ICEM CFD); призначені для використання у більш специфічних галузях виробництва.

Як стратегічний партнер фірма співпрацює з багатьма компаніями, допомагаючи їм провести необхідні зміни. Пропоновані фірмою Ansys Inc. засоби чисельного моделювання та аналізу сумісні з деякими іншими пакетами, що працюють на різних ОС.

Програмна система ANSYS поєднується з відомими CAD-системами Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor та деякими іншими. Програмна система ANSYS є досить відомою CAE-системою, яка використовується на таких відомих підприємствах, як ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, БелАЗ, General Electric, Lockheed Martin, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi та ін, а також застосовується на багатьох провідних підприємствах промисловості РФ, наприклад, ГУП НДІМосбуд і т. д.

4. Версія Ansys 2022 R1.

За інформацією компанії, у Ansys 2022 R1 представлений продукт – Ansys Forming. Це універсальне рішення для моделювання процесу формування. Воно створено для цифрового проектування та перевірки кожного етапу формування листового металу за допомогою можливостей решателя LS-DYNA. Крім того, в оновленій версії оптимізовано достовірність при зіставленні даних фізичних випробувань та комп'ютерного моделювання за допомогою Mechanical для оцінки шуму та вібрацій NVH (Noise Vibration Harshness). Користувачі можуть імпортувати дані фізичних випробувань та обчислювати критерій модальної згоди MAC для порівняння їх з даними, отриманими під час моделювання.

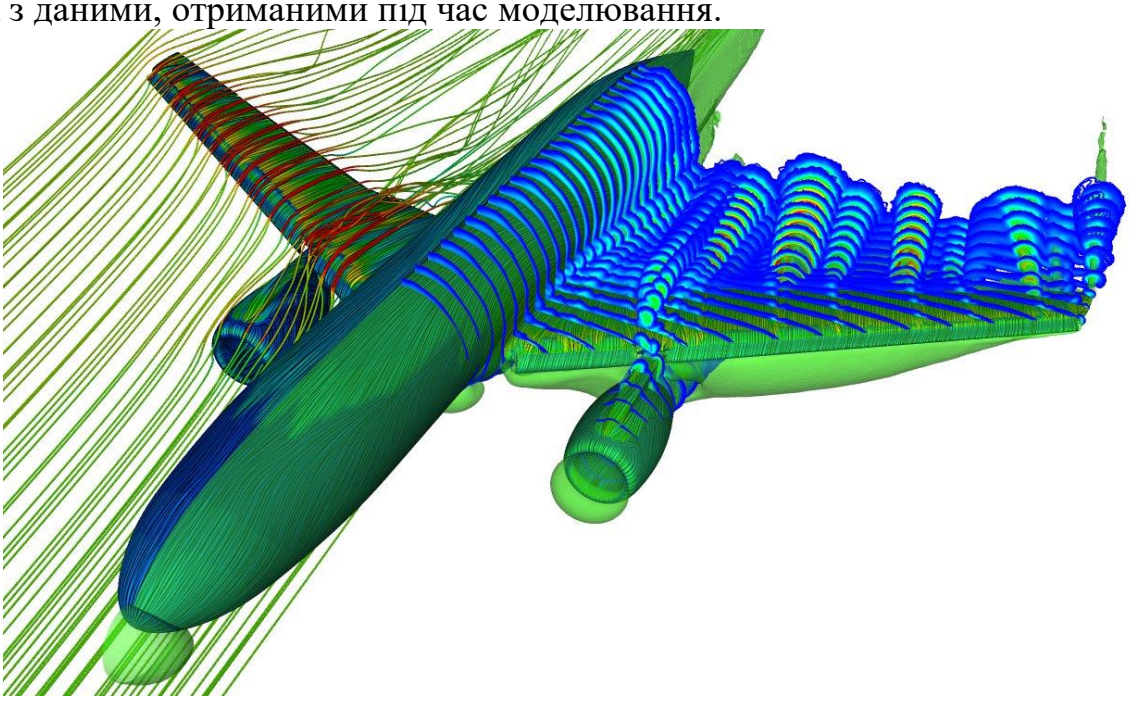


Рисунок 7 – Проект Ansys 2022 R1

У Ansys Sound 2022 R1 додано низку можливостей. Так, з'явилася функція частотного відгуку FRF (Frequency Response Function), що дозволяє досліджувати передатну функцію системи шляхом оцінки частотної характеристики та мінімізації шуму впливу на умовний приймач. Крім того, стали доступними можливості зниження шумового забруднення за рахунок показників тональності та відображення гучності звуку за стандартом ISO 532-1 у вигляді колірної карти.

Ansys 2022 R1 продовжує розширювати функціонал Ansys Additive. Користувачі Ansys Mechanical тепер можуть визначити та мінімізувати ризик помилок побудови та забезпечити належну якість деталей за допомогою моделювання процесів плавлення у шарі металевого порошку (PBF), спрямованого підведення енергії (DED) та упорскування сполучного під час друку металом (Metal Binder Jetting). Моделювання процесу DED дозволяє прогнозувати спотворення форми та значення внутрішніх напруг у конструкції на макрорівні в результаті теплового впливу для запобігання збоям друку. Оптимізоване моделювання процесу PBF розраховує деформації при моделюванні схеми сканування лазером (Scan Pattern) у 2 рази швидше. У оновленій версії також оптимізовано швидкість роботи та розширено можливості для Metal Binder Jetting (Beta), що забезпечують прогнозування великих деформацій та усадки в процесі спікання.

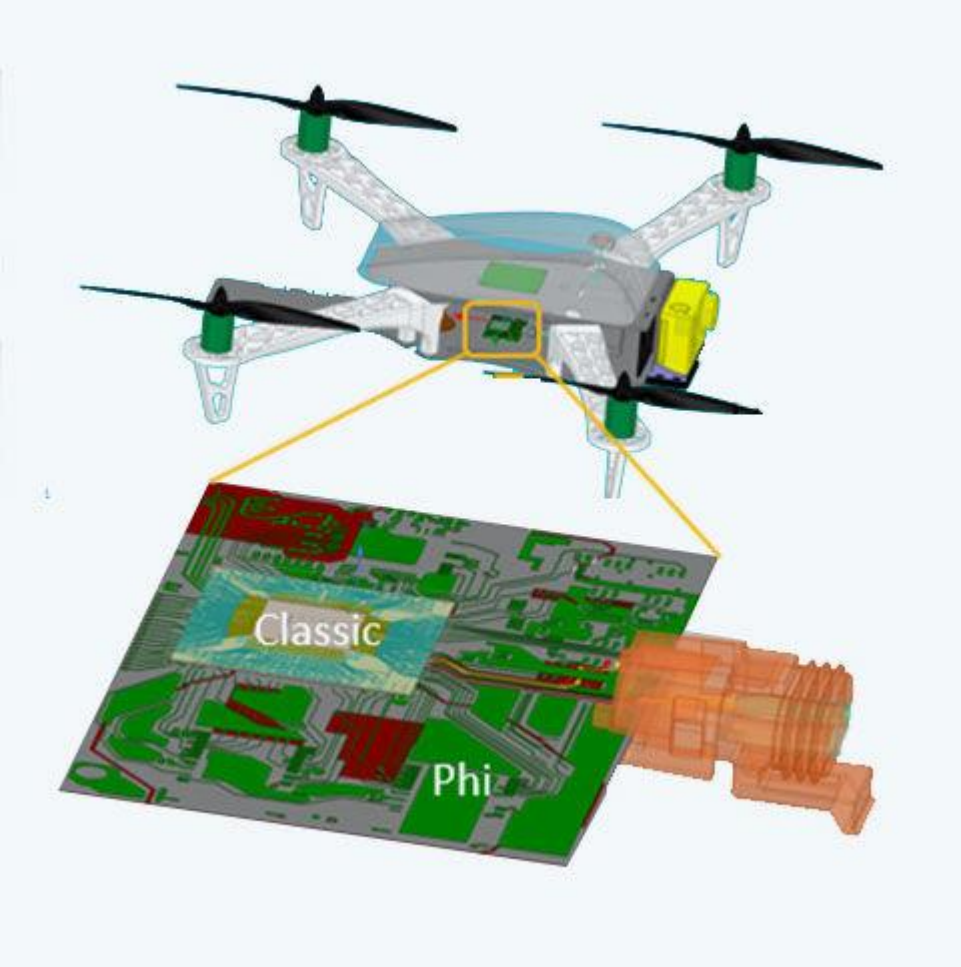


Рисунок 8 – Ansys Release, CADFEM

В Ansys Materials 2022 R1 розширені можливості надання даних та інструментів у галузі технологій 5G, електроніки та електрифікації. Інженери, що використовують інструменти Ansys Electronics Desktop, тепер можуть отримати доступ до Granta MI і більш ніж 7200 електромагнітних матеріалів для більш швидкого і точного моделювання електромагнітних явищ. Крім того, в Ansys Granta MI були інтегровані можливості машинного навчання для оптимізації параметрів процесу відповідно до цільових критеріїв, візуалізації даних та навчання з підвищеною увагою до розріджених та зашумлених даних. Серед інших оновлень – можливість оцінки впливу матеріалу на навколишнє середовище за допомогою інструменту MaterialUniverse та розширена бібліотека даних для нелінійних моделей полімерів.

В оновленій версії з'явилося безліч змін гідродинамічних рішень Ansys, що оптимізують побудову сітки, налаштування моделі та розрахунок. Так, став доступний спеціальний інструмент для аерокосмічної галузі Ansys Fluent. Він полегшує моделювання зовнішньої аеродинаміки за допомогою вбудованих методів, оптимізованих налаштувань вирішувача, параметричних можливостей та багато іншого. Вирішувач Multi-GPU Fluent оптимізує моделювання стаціонарних процесів. Результати показують, що 4 GPU забезпечують продуктивність вищу, ніж 1000 CPU. Серед інших оновлень – модель пористого середовища для ефективного моделювання акустичних явищ у Ansys Fluent, оптимізація розрахунків у Ansys Rocky, автоматизація створення сітки для складної проточної частини турбомашин за допомогою Ansys TurboGrid та багато іншого.

Рішення Ansys 2022 R1 для моделювання електроніки отримали технології для проектування друкованих плат, 3D корпусів IC, EMI/EMC, теплових, кабельних та електромеханічних систем, а також удосконалення у моделюванні систем 5G, автономних систем та електрифікації. У HFSS SBR+ стала доступна модель шорсткості поверхні, що забезпечує ефективний метод моделювання дифузного відбиття від шорстких поверхонь. У SIwave з'явилася функція моделювання змінного струму, а Motor-CAD тепер може розрахувати NVH електричної машини, оцінити результати на ранніх стадіях проектування та включити ці розрахунки як частину оцінки різних фізик проекту за допомогою Motor-CAD. Серед інших оновлень – можливість моделювання пробою діелектрика в EMA3D Charge для оцінки конструкції з потенційним ризиком пробою діелектрика та ризику пробою діелектрика між провідниками друкованої плати. Зміни також включають підтримку двостороннього зв'язку між Icepak та RedHawk для більш точного аналізу теплового режиму мікросхем та корпусів, можливість прогнозування втрат у багатожильних проводах за рахунок двостороннього зв'язку з тепловими вирішувачами у Workbench та Ansys Electronics Desktop, можливість спільного схемного аналізу перехідних процесів у EMA3D та Nexxim і багато іншого.

Ansys 2022 R1 приніс можливості для моделювання взаємодії рідин та твердих тіл (FSI), термоелектричних та інших багатодисциплінарних розрахунків, які проводяться за допомогою System Coupling. Серед них – метод екстраполяції для перенесення даних на області, що не перетинаються, оптимізація інтерполяції даних для прискорення спільних розрахунків з меншими витратами оперативної пам'яті та загальні зміни зручності використання інструментів. Крім того, дана версія API 2.0 дозволяє відкрити можливості об'ємної інтерполяції та обміну комплексними даними результатів моделювання та додатковими атрибутами між об'єктами, які використовують цей інтерфейс API.

В Ansys 2022 R1 додано можливість розрахунків взаємодії рідин та твердих тіл. Це дозволяє моделювати теплообмінники, пристрої рідинного охолодження та вихлопні системи простіше та до 50 разів швидше. В результаті з'являється можливість тестувати більше варіантів конструкції для всебічного аналізу та обґрунтованих рішень. У релізі 2022 R1 також додано ряд ключових функцій для інженерів-розрахунків, які використовують Discovery як інструмент підготовки моделей: можливість моделювання балок та оболонок, ізоляції гнучких кабелів та підтримку малих одиниць виміру. Нарешті, оптимізація продуктивності для інтерфейсу користувача Discovery забезпечила більше автоматизації для безшовного зв'язаного робочого процесу від проектування в CAD до отримання результатів чисельного моделювання. Було також розширено відстеження історії, оптимізовано підтримку шарнірних та сферичних сполук, а також з'явилися можливості постобробки.

У релізі 2022 R1 Ansys Connect замінює Ansys Platform і включає Ansys Minerva, Ansys optiSLang, Ansys Granta (Granta MI Enterprise, Granta MI Pro та Selector), а також Ansys ModelCenter. Ansys Connect дозволяє створювати цифрову нитку, пов'язуючи різні інструменти чисельного моделювання як один з одним, так і з іншими продуктами екосистеми на інших стадіях життєвого циклу активів, таких як CAD-системи, системи управління вимогами, проектування архітектури систем та іншими. Конектори Ansys optiSLang доступні для LS-Dyna, SpaceClaim, Nastran і ModelCenter, а алгоритми оптимізації від Probaligence, засновані на AI/ML, реалізують оновлені оркестровані та оптимізовані розрахункові процеси. Ansys Minerva дозволяє створювати програми на основі автоматизованих розрахункових процесів, а інструмент Ansys ModelCenter оптимізує зв'язок між моделлю архітектури системи та системою управління вимогами для побудови більш точних чисельних моделей.

Ansys Twin Builder 2022 R1 оптимізує достовірність інструментів передиктивної аналітики до 98% за рахунок комбінування інформації від фізичних і віртуальних датчиків. Оновлені можливості дозволяють оптимізувати встановлення та налаштування цифрового двійника, полегшують безліч робочих процесів, а також дозволяють простіше взаємодіяти з моделлю через Web-додаток. Основні зміни торкнулися Twin

Deployer. У ньому з'явилися інструменти гібридної аналітики, що дозволяють на ходу перекалібровувати цифрові двійники без необхідності створення іншої моделі, а також розробити прототип простого Web-додатка шляхом експорту з інтерфейсу Twin Deployer. Крім того, Twin SDK тепер підтримує State-Saving, дозволяючи робити рестарт розрахунку, а також використовувати сценарії "що, якщо". Серед інших оновлень версії – точніший контроль та накладення обмежень на вихідні параметри ROM-моделі (Reduce Order Model) для перевірки того, що вони не виходять за допустимі фізичні межі, вирішувач Dynamic ROM Builder, а також зміни Conditional Connector та підтримки параметрів у бібліотеці Modelica.

У оновленій версії Ansys розширено можливості для підтримки міжнародних стандартів безпечного та сумісного вбудованого програмного забезпечення в аерокосмічній та оборонній сфері (DO-178C, ARINC 661, FACE), автомобілебудуванні (ISO 26262, AUTOSAR) та промисловості (IEC 62508, EN 501). Крім того, завдяки можливості оцінки покриття тестів, тепер можна оптимізувати роботи з верифікації програмного забезпечення. Оновлення включають візуальну ідентифікацію та зміни UX для SCADE Suite, посібник із сертифікації системи відображення кабіни екіпажу DO-178C та бібліотеку графічних ефектів SCADE Display та багато іншого.

У Ansys medini analyze 2022R1 додалися функції, що забезпечують більш ефективне комплексне застосування методів аналізу безпеки, надійності та кібербезпеки. Так, для розробників в аерокосмічній галузі доступна повна відповідність аналізу дерев відмов стандарту ARP4761(A), а в автомобілебудуванні – аналіз автомобільної кібербезпеки відповідно до крайнього оновлення стандарту ISO 21434. Крім того, у DSM (Digital Safety Manager) можуть інформаційні панелі проектів ключові показники ефективності, що налаштовуються (автоматично одержуються з поточних даних проекту), що дозволяють відстежувати хід виконання робіт із забезпечення безпеки.

У версії 2022 R1 використовується відкрита архітектура з можливістю підключення фізичних датчиків Ansys до сторонніх симуляторів водіння, таких як IPG Automotive CarMaker або Carla, а також додано низку можливостей для встановлення датчиків. Це дозволяє валідувати та верифікувати ADAS/AV системи, включаючи сприйняття датчиків (радару, лідара та камери), за допомогою вибраного інструменту моделювання водіння. А функції для радарів та лідарів дозволяють верифікувати більші та складніші датчики незалежно від обмежень графічного процесора. Ansys AVxcelerate 2022 R1 продовжує впровадження основних функцій разом із ключовими партнерами. Оновлені можливості спільного моделювання з IPG Automotive CarMaker дозволяють автовиробникам та постачальникам забезпечувати безпеку роботи систем допомоги водію та автономних транспортних засобів за допомогою перевірки алгоритмів сприйняття, об'єднання та керування з використанням фізичного моделювання датчиків Ansys (камера, радар, лідар) у синхронізації із середовищем віртуального

тестування IPG CarMaker. AVxcelerate автоматично адаптується до доступних ресурсів за рахунок функцій для моделювання радарів та лідарів. Крім того, модель радара Ansys в реальному часі тепер враховує шорсткість поверхні, що підстилає.