



## Модельовання технологічних процесів

УДК 621.873

В.Б. Яковенко, д.т.н., проф.,  
М.М. Забродський (КНУБА, Київ)

### МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ САЕ-СИСТЕМ

**Вступ.** На сьогоднішній день розвиток промисловості призвів до створення великої кількості програмних продуктів, завданням яких є динамічне модельовання машин і механізмів. Модельовання машин за допомогою САЕ-систем дозволяє позбутися великої кількості фізичних експериментів, необхідних для визначення різних динамічних показників на різних режимах роботи механічної системи, а також від оснащення дослідної площадки складним і як правило дорогим вимірювальним та реєструючим устаткуванням. Обсяг робіт по підготовці механізму до випробувань, по установці й настроюванню вимірювального устаткування, обробці й вивченню отриманих результатів значний, а вартість таких робіт висока. Разом з тим, при проведенні фізичних експериментів не завжди можливо визначити всі динамічні показники, що цікавлять, доводиться вирішувати проблеми, пов'язані з похибкою вимірювальних приладів, повторюваністю й відтворюваністю результатів. Крім того, випробування машин на граничних або позаштатних режимах, як правило, або дуже дорогі в силу дорожнечі зразків або устаткування, які руйнуються, а нерідко й небезпечні.

Комп'ютерне модельовання - приваблива заміна фізичним експериментам, оскільки не вимагає виготовлення експериментального зразка, за допомогою комп'ютерного модельовання може бути поставлене будь-яке число чисельних експериментів і отримані будь-які динамічні показники, що цікавлять дослідника. Комп'ютерні моделі можуть бути використані для виявлення й усунення проблем ще до виробництва першого зразка, що особливо важливо для штучних і дрібносерійних виробництв. У порівнянні з натурними експериментами комп'ютерне модельовання дуже корисний інструмент, що забезпечує всебічний, рентабельний і безпечний аналіз динаміки механічних систем. Це дає можливість із мінімальними витратами піддавати ретельному аналізу в тому числі зовсім нові ідеї й рішення.

**Аналіз динаміки в проектуванні механічних систем.** Типовий аналіз механічних систем у машинобудуванні містить у собі, як правило, аналіз динаміки, міцності й довговічності. В ідеалі процес проектування іде ітераційно і починається з ескізного проекту, що визначає основні геометричні, інерційні та інші параметри системи. Далі будується її динамічна модель, за допомогою якої, наприклад, виконується параметрична оптимізація та визначаються динамічні показники системи, які в ряді галузей можуть бути обмежені різними нормами й стандартами. Крім того, за допомогою динамічної моделі визначаються зусилля взаємодії між елементами конструкції в шарнірах, зчленуваннях, опорах, силових (пружинах, ресорах, демпферах) і кріпильних елементах на робочих і екстремальних режимах роботи. Певні тут зусилля є вхідними даними для подальшого аналізу деталей механічної системи на міцність і довговічність. Якщо за результатами аналізу міцності й довговічності помітно міняються геометричні або інерційні параметри системи, тоді виконується повторний аналіз динаміки, що уточнює величини зусиль при нових значеннях параметрів, а потім повторюються інші види аналізу.

Разом з тим не варто розглядати динамічний аналіз тільки як інструмент для визначення навантажень для подальшого аналізу на міцність. У багатьох випадках, наприклад для транспортних засобів, він має виражене самостійне значення.

**Методика моделювання.** Розглянемо загальні принципи роботи інженерів-дослідників із програмним забезпеченням для моделювання динаміки механічних систем. Як і в будь-якій іншій області моделювання після постановки завдання при побудові моделі дослідник переходить від реального об'єкта до його ідеалізованої розрахункової схеми. Мистецтво дослідника полягає в умінні побудувати не саму складну, але адекватну розрахункову схему, яка б дозволила вирішити поставлене завдання найбільш ефективно.

В основі моделювання динаміки механічних систем лежить їхнє подання системою зв'язаних абсолютно твердих або пружних тіл. Найбільш універсальним способом опису положення й можливих рухів пари тіл, одним із яких може бути нерухома система координат, є використання поняття шарніра (мал.1). Сучасне комерційне програмне забезпечення дає можливість увести в модель будь-які шарніри, що зустрічаються на практиці.

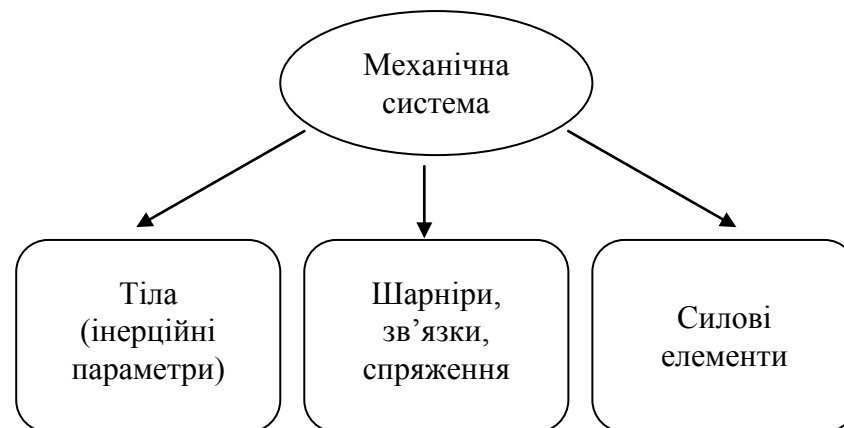


Рисунок 1. Види моделювання механічної системи.

Особливе значення має опис силових елементів, що визначають взаємодію пари тіл. Від повноти бази вбудованих силових елементів залежить застосування тої або іншої програми в кожному конкретному випадку. Разом з тим відзначимо, що моделі таких типових сил як пружина або демпфер є в будь-якій програмі, представленої на ринку. Принципові для користувача відмінності починаються в проблемно-орієнтованих моделях сил, таких, наприклад, як сили взаємодії автомобільного колеса й дороги, гусениці й ґрунту, матеріалу, що дробиться й щоби дробарки й т.д. Відзначимо також, що практично у всіх програмах є можливість опису користувачем власних математичних моделей сил на спеціалізованій вбудованій або звичайній алгоритмічній мові програмування й включення таких сил у побудовані моделі механічних систем.

Після опису моделі явно або неявно для користувача відбувається етап автоматичного синтезу рівнянь руху механічних систем за допомогою спеціальних алгоритмів. Програмна реалізація таких алгоритмів може бути виконана як у символній, так і в числено-ітераційній формі. Символьний синтез рівнянь руху припускає вивід рівнянь на одній з мов програмування (зазвичай підтримуються Fortran, C і Pascal). Далі ці синтезовані файли повинні бути відкомпільовані зовнішнім компілятором, що на виході дає виконуючі файли, які готові до використання. Числено-ітераційний метод припускає формування рівнянь руху чисельно на кожному кроці чисельного методу інтегрування рівнянь руху. Формування рівнянь руху в символній формі дозволяє ці рівняння оптимізувати з погляду кількості арифметичних операцій, що дає помітні переваги по швидкодії процесу моделювання, а чисельно - ітераційні алгоритми дають можливість простіше організувати моделювання систем зі змінною структурою [1].

**Програмні продукти для моделювання динаміки машин і механізмів.** На сьогоднішній день існує досить велика кількість програм для проведення динамічного аналізу машин. З метою з'ясування функціональних можливостей таких систем і



визначення можливих відмінностей у підходах для динамічного моделювання, був проведено короткий огляд по кожному із продуктів. Стисла характеристика кожної системи наведена нижче.

**Dynamic Designer** – це інтегрований у середовище AutoCAD/Mechanical і Mechanical Desktop розрахунковий модуль для проведення динамічного й кінематичного аналізу складних механічних систем (механізмів).

Dynamic Designer використовує графічні формати, підтримувані AutoCAD і Mechanical Desktop. Моделювання динаміки механізмів включає три етапи:

- Побудова динамічної моделі. На цьому етапі геометричні зв'язки вихідної геометрії перетворюються в шарнірні з'єднання динамічної моделі. Цей процес відбувається автоматично з можливістю наступного корегування з боку користувача. Користувач також моделює зовнішній вплив на елементи конструкції у вигляді сил, моментів і кінематичних залежностей (запропонований рух окремих частин і шарнірів).

- Анімація руху компонентів складання. На другому етапі формується система рівнянь, що описує рух моделі, що вирішується обчислювальним модулем Dynamic Designer. Модуль розраховує переміщення, швидкості, прискорення кожного компонента складання, сили реакцій і моменти в кожному шарнірному з'єднанні. При цьому користувач у процесі обчислень спостерігає миттєві знімки конфігурації системи, що відповідають тому або іншому моменту часу.

- Візуалізація результатів. [2]

**"Універсальний механізм" (UM)** – програмний комплекс призначений для моделювання динаміки й кінематики плоских і просторових механічних систем. Механізми описуються як системи твердих тіл, шарнірів і силових елементів. Підтримується безпосередня анімація руху вашої моделі в процесі розрахунку. Для аналізу доступні практично всі необхідні величини: координати, швидкості, прискорення, сили реакцій у шарнірах, зусилля в пружинах і т.д.

Розвинутий постпроцесор: лінійний аналіз, статистичний аналіз, різноманітні розрахунки й оптимізація, експорт результатів. Це ефективний інструмент для моделювання динаміки різних машин і механізмів: космічних конструкцій, роботів і маніпуляторів, залізничних екіпажів, автомобілів, кабелів і т.д. Рішення прямої й зворотної завдань кінематики й динаміки. Включає модулі для моделювання динаміки автомобілів, залізничних екіпажів, гусеничних машин, модулі оптимізації, розрахунку довговічності [3].

**«MSC.Adams»** – найбільш широко використовуваний програмний комплекс для віртуального моделювання складних машин і механізмів. Adams використовується для розробки та вдосконалювання конструкцій фактично всього, що рухається - від простих механічних і електромеханічних пристроїв до автомобілів і літаків, залізничної техніки й космічних апаратів і т.д.

За допомогою *MSC. Adams* можна швидко створити повністю параметризовану модель виробу, будуючи її безпосередньо в препроцесорі або імпортуючи з найпоширеніших CAD-Систем. Задавши зв'язку компонентів моделі, приклавши навантаження, визначивши параметри кінематичного впливу й запустивши розрахунок можна одержати дані, повністю ідентичні результатам натурних випробувань системи. Таким чином, подання про роботу виробу з'являється ще до початку розкрою металу або виливка пластику для виготовлення досвідченого зразка. Основою *MSC. Adams* є системи диференційних рівнянь, що описують динаміку досліджуваного об'єкта. Розроблювачі *MSC. Adams* продовжують підвищувати ефективність математичної бази програмного пакета. Застосування стійких методів «твердих» систем диференційних рівнянь забезпечує одержання необхідних результатів з мінімальними витратами часу, комп'ютерних ресурсів і з великою надійністю [4].

**«Pradis»** - програмний комплекс для аналізу динаміки систем різної фізичної природи. Розробка комплексу йде з 1992 року, почавши свій розвиток із платформи VAX. За цей час на практиці були протестовані математичне ядро й моделі комплексу, показана

висока надійність і точність алгоритмів і моделей. Комплекс базується на наступних принципах: універсальність і відкритість.

Принцип універсальності дозволяє виконувати аналіз будь-яких технічних систем, поведження яких описується за допомогою системи диференціальних рівнянь. Практичні можливості моделювання визначаються бібліотекою моделей комплексу. В *Pradis* можливо не тільки роздільне, але й спільне моделювання різних фізичних систем. У бібліотеку входить більше 160 моделей [5].

«*Simulation Basic*» – програмний пакет для комплексного створення систем, моделювання й аналізу рішень. Інтегрований у нього TypeDesigner - це інструмент для адаптації існуючих і створення власних типів елементів, також він може використовуватися як редактор для Modelica (Modelica Smart Editor). Modelica - вільно розповсюджуваний об'єктно-орієнтовна мова для моделювання складних фізичних систем. мова має гарну технічну підтримку з боку виробника, для нього існує велика кількість бібліотек готових компонентів, які можна використовувати для моделювання. Modelica забезпечує можливість створення широкого діапазону моделей різних типів: механічних, електричних, гідравлічних, хімічних, і ін.

Мова Modelica заснована на концепції блоків з контактами, при з'єднанні яких необхідні рівняння генеруються автоматично, що робить його привабливим для фахівців нематематичного профілю й більше простим для розуміння й використання в цілому.

*Simulation* виконує наступні завдання: моделювання системи в тимчасовій і частотній областях. Також доступне моделювання перехідних процесів у лінійних і нелінійних системах або стаціонарне моделювання для розрахунку моделі в періодичному стані (нелінійному або лінійному). Використовуючи бібліотеки Mechanics користувач вирішує завдання моделювання й аналізу механічних систем. Елементи дозволяють швидко створювати схеми з необхідною розмірністю (одномірні, плоскі й тривимірні). Механічні системи в *SimulationX* збираються за допомогою масових, інерційних елементів, елементів пружина-демпфер і елементів сил. Тривимірна візуалізація дозволяє спостерігати модель синхронно під час створення, параметризації або моделювання. Моделі можуть застосовуватись, наприклад, при аналізі вітряних електростанцій, автомобільної трансмісії, моделювання шасі або верстатів [6].

«*20-sim*» – програмний комплекс розроблений для моделювання різних технічних систем. За допомогою даного пакета можна моделювати поведження динамічних систем, які складені за допомогою діаграм, графів зв'язку, блок-схем, систем рівнянь або кожної з їхніх комбінацій. «20-sim» дозволяє моделювати поведження електричних, механічних або гідравлічних систем а також кожну з їхніх комбінацій [7].

«*Фрунд*» – комплекс моделювання динаміки систем твердих і пружних тіл. Програмна система формування рішень рівнянь нелінійної динаміки призначена для моделювання динамічних процесів у машинах і конструкціях. Вона дозволяє по опису розрахункової схеми створювати рівняння математичної моделі динаміки руху досліджуваної конструкції й генерувати програму інтегрування цих рівнянь, а так само робити їхнє рішення, обробку й вивід результатів у зручній для користувача формі.

Програмна система має у своєму розпорядженні засоби статистичної й спеціальної обробки результатів рішення залежно від характеру зовнішнього впливу. Вона дозволяє одержувати анімаційне зображення руху тіл досліджуваної механічної системи, а також містить засоби для моделювання ланцюгів керування механічного характеру в сукупності з об'єктом керування механічної природи.

Для роботи з моделями, що враховують пружні властивості окремих тіл, система використовує дані (набір власних частот і форм коливань), отримані за допомогою дискретних методів, зокрема, методу кінцевих елементів. Для цих цілей може застосовуватися будь-яка програма розрахунків МКЕ, що дозволяє будувати власні частоти й форми коливань при вільних границях [8].

**Висновки:**

Розглянуті САЕ-Системи дозволяють за допомогою розрахункових методів оцінити, як поведе себе комп'ютерна модель виробу в реальних умовах експлуатації. Допомагають переконатися в працездатності виробу, без залучення великих витрат часу та коштів. Разом з тим незважаючи на те, що кожна із систем має універсальні можливості для моделювання різних типів систем, все ж таки кожний з пакетів віддає перевагу розробці проблемно-орієнтовних модулів спрямованих на рішення завдань у конкретних областях техніки.

**Література**

1. Ковальов Р.В., Даниленко Д.В. «Введение в моделирование динамики механических систем».- М., 2009 - 9с.