

На правах рукопису

КАРКУЛЬОВСЬКИЙ Володимир Іванович



УДК 621.396.6:681.3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ  
В КОНСТРУКЦІЯХ РЕЗ

Спеціальність: 05.13.05 - Системи автоматизації проектування

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ - 1996



00759710 (Т)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на  
проєктування" Державного

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор  
В.О.Коваль

Науковий консультант : кандидат технічних наук, доцент  
І.І.Мофіка

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, доцент  
Когут Василь Михайлович  
кандидат технічних наук, доцент  
Веніков Дмитро Петрович

Провідне підприємство : Львівський науково-дослідний  
радіотехнічний інститут

Захист відбудеться " 10 " квітня 1996 року о 16<sup>00</sup>  
на засіданні спеціалізованої ради КО4.06.06 при Державному  
університеті "Львівська політехніка" за адресою :  
290646 , м.Львів-13, вул. С.Бандери 12.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній  
бібліотеці університету за адресою :  
290646 , м. Львів-13, вул. Професорська 1.

Автореферат розісланий " 4 " березня 1996 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
к.т.н.

С.П.Ткаченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність проблеми.

В процесі виробництва, експлуатації та зберігання радіоелектронні засоби (РЕЗ) дуже часто підлягають впливу зовнішніх механічних навантажень: вібрацій, ударних навантажень, лінійних прискорень, що може призвести до механічних порушень в окремих її елементах, порушити нормальні режими роботи, або навіть повністю вивести із ладу деякі компоненти РЕЗ.

Тому забезпечення вібростійкості та віброміцності РЕЗ є актуальною задачею, особливо в умовах використання радіоелектронної апаратури при зростаючих швидкостях і складних динамічних навантаженнях на сучасних рухомих носіях, а також жорстких вимогах до масогабаритних показників апаратури. Успішне вирішення даної проблеми можливе тільки з використанням сучасних засобів автоматизованого проектування та нових інформаційних технологій.

Ядром системи проектування є моделююча частина, яка повинна забезпечити достовірність отриманих результатів, від чого будуть залежати наступні етапи проектування. Моделювання систем віброізоляції як одного із найрозповсюдженіших засобів забезпечення віброміцності та вібростійкості РЕЗ на ранніх етапах проектування дозволяє визначити та оптимізувати параметри системи, уникнути дорогих помилок, а також суттєво скоротити витрати часу на експериментальну доводку конструкції на заключних стадіях. Точність і достовірність результатів моделювання систем суттєво залежить від точності та адекватності моделей елементів системи та методів аналізу її режимів.

Слід відмітити, що розробка моделей, і особливо форма їх програмної реалізації тісно пов'язані з алгоритмами формування рівнянь, методами аналізу і методологією проектування будь-яких складних систем. Тому проблема розробки бібліотеки моделей базових компонентів виникає завжди сумісно з розробкою нових методів і алгоритмів аналізу систем.

Програмне забезпечення систем автоматизованого проектування є саме по собі складною системою, тому при його створенні необхідно орієнтуватися на прогресивні технології розробки та існуючі інструментальні засоби їх підтримки.

В цьому напрямку в останній час все більшу увагу привертає об'єктно-орієнтоване проектування та програмування. І хоча як підхід до проектування він не новий, розвинені інструментальні

засоби його підтримки з'явилися недавно (Turbo Vision в мові Pascal, C++, Smalltalk і т.п.). Очевидно, що нові розробки в області автоматизованого проектування слід орієнтувати на такі сучасні засоби.

Аналізу механічних конструкцій РЕЗ, а особливо систем віброізоляції, присвячено багато робіт, але в переважній більшості вони орієнтовані на використання аналітичних методів та моделей (метод Лагранжа, рівняння Гамільтона), що суттєво утруднює застосування їх в системах автоматизованого проектування, оскільки при алгоритмізації процесу формування рівнянь виникають труднощі, пов'язані з вибором узагальнених координат і обчисленням роботи на віртуальних переміщеннях, значно утруднюється врахування особливостей реальних конструкцій (похибки монтажу і розмірів, специфіка просторового навантаження). Крім того використання традиційних методів ускладнює застосування еволюційного підходу до процесу проектування, який покладений в основу об'єктно-орієнтованого проектування (ООП), а також не дозволяє в повній мірі реалізувати переваги ООП - використання виразних засобів об'єктно-орієнтованих мов програмування, підтримки повторного застосування окремих складових програмного забезпечення, створення більш відкритих систем.

Метою дисертаційної роботи є розробка діакоптичних методів та алгоритмів аналізу просторових конструкцій РЕЗ як механічних систем із зосередженими параметрами, моделей базових елементів таких систем, а також методів їх реалізації на базі об'єктно-орієнтованого підходу в програмно-методичному комплексі конструкторських САПР РЕЗ для скорочення термінів проектування та зменшення витрат на експериментальну довідку дослідних зрізів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі :

1. Розробити методику моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ, що базується на діакоптичному підході.
2. Розробити метод геометричного аналізу складних просторових механічних систем, що дає можливість отримати початкове наближення для розв'язку наступних задач.
3. Розробити метод статичного аналізу механічних систем, який дозволяє враховувати особливості кожної конкретної системи та умови просторового навантаження.

4. Розробити метод динамічного аналізу механічних систем, що базується на рівняннях кінестатики і дозволяє враховувати умови просторового навантаження та особливості реальної системи.

5. Розробити моделі компонентів механічних систем, які передбачають умови просторового навантаження і дають можливість проводити аналіз режимів системи при врахуванні особливостей їх структури та функціонування.

6. Розробити програмно-методичний комплекс для моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ із використанням прогресивних технологій та сучасних інструментальних засобів їх підтримки.

Методи досліджень включають методи системного аналізу, теоретичної та прикладної механіки, опору матеріалів, математичного моделювання, обчислювальної математики, об'єктно-орієнтованого проектування, прикладного та системного програмування.

На захист виносяться такі положення :

1. Методика моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ, побудована на принципах об'єктно-орієнтованого проектування, яка дозволяє аналізувати складні механічні системи в умовах просторового навантаження.

2. Методи геометричного, статичного та динамічного аналізів механічних систем, що дозволяють враховувати особливості конкретних механічних систем і базуються на принципах діакоптики із використанням методів теорії матриць.

3. Узагальнені моделі пружних елементів та елементів зв'язку систем віброізоляції РЕЗ, які дають можливість будувати математичні моделі конкретних елементів конструкцій і враховують особливості розроблених методів аналізу.

4. Математичні моделі широкого класу серійних віброізоляторів РЕЗ, що враховують особливості їх конструкцій при просторовому навантаженні і реалізовані у вигляді об'єктно-орієнтованої бібліотеки моделей.

5. Програмно-методичний комплекс моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ, що базується на принципах об'єктно-орієнтованого проектування і дозволяє проводити геометричний, статичний та динамічний аналіз систем віброізоляції.

Наукова новизна роботи :

- розроблена методика моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ, що включає геометричний, статичний та динамічний аналіз, які, на відміну від існуючих, базуються на принципах діакоптики та теорії

мереж і дозволяють ефективно застосувати об'єктно-орієнтований підхід до проектування;

- розроблені узагальнені моделі базових компонентів механічних систем (пружних елементів та елементів зв'язку) у вигляді багатополісників, для яких характеристики визначаються у локальній системі координат, незалежно від структури системи, в якій вони використовуються;

- розроблені математичні моделі серійних пружинних, гумово-металічних, тросових віброізоляторів та віброізоляторів із матеріалу МР для віброзахисту РЕЗ, що базуються на узагальненій моделі і дозволяють враховувати особливості конкретних конструкцій;

- розроблена об'єктно-орієнтована бібліотека моделей базових компонентів систем віброізоляції РЕЗ, яка включає моделі пружних елементів та моделі елементів зв'язку і відкрита для розширень об'єктами, класами та методами;

- розроблені склад і структура програмно-методичного комплексу для моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ, в основу якого покладені принципи об'єктно-орієнтованого проектування.

#### Практична цінність роботи :

1. Розроблено метод геометричного аналізу складних механічних систем, який дозволяє отримувати дані про взаємне розміщення окремих елементів, координати розділяючих перерізів, неточності монтажу та інші геометричні характеристики конструкції РЕЗ, що дає можливість значно спростити опис структури системи на рівні вхідної мови.

2. Розроблено метод аналізу статичного режиму механічних систем, який дозволяє проводити розрахунок критичних навантажень в конструкціях, а також обґрунтування правильності вибору віброізоляторів.

3. Розроблено метод динамічного аналізу складних механічних систем, що базується на принципі Даламбера та методах діагностики і теорії мереж, який дозволяє визначити динамічне навантаження на конструкції РЕЗ та оцінювати ефективність систем віброізоляції на різних стадіях проектування.

4. Реалізовано, у вигляді бібліотеки об'єктно-орієнтованих моделей, математичні моделі конкретних серійних віброізоляторів РЕЗ.

5. Розроблена структура та реалізовано програмно-методичний комплекс, який використовує розроблені методи та моделі, базується на принципах об'єктно-орієнтованого проектування і дозволяє проводити моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ, порів-

живати різні варіанти конструктивних рішень, вибирати з них кращі, що в цілому дає можливість підвищити якість результатів, скоротити час та вартість проектування.

#### Реалізація результатів роботи.

Теоретичні і практичні результати досліджень впроваджені у ВО "Оріон" (м. Тернопіль) та НДПІ ПАР і СУ (м. Львів) а також в навчальний процес кафедри САПР Державного університету "Львівська політехніка" у навчальних дисциплінах "Математичне забезпечення САПР" і "Математичне моделювання в САПР" та при проведенні дипломного проектування.

#### Апробація роботи.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких науково-технічних конференціях та семінарах : Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми забезпечення високої надійності мікроелектронної апаратури" (Запоріжжя, 1990р.); зональних конференціях "Автоматизація конструкторського проектування РЕА і ЕОА" (Пенза, 1985, 1986, 1988р.р.); Всесоюзній школі-семінарі "Досвід розробки приладо-технологічних САПР" (Львів, 1991р.); координаційній нараді секції САПР ТПВ (Львів, 1988р.); науково-технічній конференції "Машинне моделювання і забезпечення надійності електронних пристроїв" (Бердянськ, 1993р.); II та III Міжнародних науково-технічних конференціях "Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці" (Львів, 1993, 1995р.р.); обласних науково-технічних конференціях "Проблеми вдосконалення радіоелектронної апаратури" (Львів, 1985, 1989р.р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Державного університету "Львівська політехніка" (1984-1993р.р.). Дисертаційна робота доповідалась на кафедрі "Конструювання і технологія радіоапаратури", а також в повному обсязі на кафедрі "Системи автоматизованого проектування" Державного університету "Львівська політехніка".

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи відображені в чотирнадцяти друкованих працях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота займає 115 сторінок машинописного тексту і складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Робота містить 42 рисунки, 5 таблиць. Бібліографічний список складається із 176 назв.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність вибраного напрямку досліджень, визначена мета і основні задачі досліджень, сформульовані наукова новизна роботи, практична цінність отриманих результатів, положення, що виносяться на захист, а також короткий зміст роботи.

Перший розділ присвячений особливостям моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ. Розглянуто методи захисту РЕЗ від зовнішніх механічних впливів. Показано, що найбільш доступним і поширеним є захист РЕЗ за допомогою пасивних систем віброізоляції, які представляють собою складні механічні системи.

На основі детального аналізу зроблено висновок, що роботи по методах моделювання систем віброізоляції умовно можна поділити на дві великі групи.

В роботах першої групи створилися теоретичні засади моделювання, звичайно, вихідні рівняння базуються на рівняннях Лагранжа другого роду або рівняннях Гамільтона. Можливості автоматичного формування цих рівнянь по опису системи а також особливості реалізації алгоритмів на ЕОМ, як правило, не розглядаються.

Друга група робіт присвячена розробці практичних методик проектування систем віброізоляції. Методи орієнтовані на "ручний" обрахунок або на застосування простих допоміжних засобів обчислень. Моделі дуже спрощені, вводяться досить грубі припущення, наприклад, припущення про виконання умов раціонального монтажу, коливальні процеси розглядаються в лінійному наближенні. Алгоритми дуже просто реалізуються на ЕОМ, але її можливості по суті не використовуються.

Розглянуті методи в переважній більшості значно утруднюють застосування діакоптического підходу, тому не дозволяють ефективно використовувати методи об'єктно-орієнтованого проектування і програмування, які стають основою для проектування складних об'єктів і систем.

В зв'язку з цим виникає необхідність розробки діакоптических методів і алгоритмів аналізу просторових конструкцій РЕЗ та моделей базових елементів таких систем.

Обґрунтована ієрархія таких моделей, яка включає три рівні і дозволяє об'єднати на кожному із них найбільш характерні моделі конструкцій. Детально розглянута побудова моделей конструкцій на кожному із рівнів ієрархії.

У другому розділі розроблена методика моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ. Виходячи з принципів об'єктно-орієнтованого проектування методика представлена як послідовний ітераційний процес, що складається з ряду етапів.

Перший етап - аналіз структури системи. На цьому етапі розробник аналізує склад і структуру механічної системи, яка відображає реальну конструкцію РЕЗ. Виділяються елементи, способи їх з'єднання, приймаються певні припущення, виходячи із розробленої ієрархії моделей. -

Другий етап - побудова схеми. Будується схема, що відображає структуру, склад, взаємне розміщення елементів. Вводиться інформація про ці дані, яка служить вхідними даними для наступного етапу.

Геометричний аналіз. Користувач, по закінченні цього етапу, отримує інформацію про просторову структуру системи, координати необхідних елементів у глобальній системі координат.

На наступному етапі (обробка результатів геометричного аналізу) приймається рішення про перехід до статичного аналізу, або про повернення на попередні етапи.

Статичний аналіз. На цьому етапі, із використанням даних, отриманих після закінчення геометричного аналізу, знаходяться невідомі силові фактори в необхідних точках системи (реакції та моменти), а також переміщення і кути повороту, тобто визначається положення статичної рівноваги системи.

Після закінчення статичного аналізу, на етапі обробки результатів статичного аналізу, визначається можливість переходу до наступного етапу, чи повернення на попередні.

Етап динамічного аналізу дозволяє отримати необхідні дані про переміщення (лінійні і кутові), а також визначити прискорення елементів і частоти власних коливань системи для випадку малих коливань відносно положення статичної рівноваги.

Після цього, при обробці результатів динамічного аналізу, надається можливість повернутись на попередні етапи знову.

Етап аналізу результатів моделювання може стати заключним у випадку, коли отримані результати задовільняють розробника. У противному випадку виникає необхідність у модифікації складу і структури системи і поверненні на попередні етапи.

Запропонована методика дозволяє шляхом ітераційного наближення отримати структуру системи, яка задовільняє вимоги, котрі ставить до неї користувач.

Виходячи з принципу діакптики, для аналізу складна механічна система розчленовується плоскими перерізами на окремі компоненти - базові елементи та шарніри. Припускається, що в плоских перерізах виникають нормальні і дотичні напруження, які розподілені достатньо рівномірно і при розгляді рівноваги перерізу можна привести до системи сил і моментів, зосереджених в центрі жорсткості перерізу. При русі системи та деформаціях елементів розділечі перерізи залишаються плоскими.

Розроблено методи геометричного, статичного та динамічного аналізів механічних систем, які базуються на принципах діакптики із використанням методів теорії матриць.

Застосувавши метод діакптики, для кожного базового елемента чи шарніра, як багатополісника, можна побудувати співвідношення:

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{pmatrix} = M (||L_e||) \quad (1)$$

де:  $m$  - кількість полісів (перерізів) багатополісника;  $T_i$  - вектор координат  $i$ -го перерізу багатополісника в локальній системі координат;  $M(||L_e||)$  - функція від матриці характеристичних параметрів.

Тоді, для механічної системи рівняння, які описують її геометрію в матричній формі, записуються у вигляді:

$$n d t = 0 \quad (2)$$

Дані рівняння відображають умови нерозривності. У рівняннях (2):  $n$  - матриця контурів мережі із багатополісниками;  $d$  - матриця перетворення координат із локальної системи в глобальну декартову систему.

Для статичного аналізу кожний базовий елемент описується системою рівнянь, які зв'язують узагальнені переміщення перерізів (входів) із узагальненими силами в цих перерізах у локальній системі координат, яка вибирається для конкретного типу елемента:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix} = F \left( \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{pmatrix} \right) \quad (3)$$

де:  $R_i$  - вектор реакцій в  $i$ -му перерізі;  $S_i$  - вектор переміщень  $i$ -го перерізу;  $m$  - кількість з'єднувальних перерізів (входів) елемента.

В систему сил може також включатися сила, прикладена в точці вибраної системи координат (сила ваги або сила інерції). На склад-

ність структури елемента принципів обмежень не накладається.

Шарніри - це вільні, частково вільні або не вільні елементи, які не описуються рівняннями (3) і які фактично можна представити у вигляді ідеального елемента із відомою кількістю ступенів вільності. Шарнір визначає спосіб з'єднання елементів у системі і описується двома системами рівнянь - рівняннями рівноваги узгацьованих сил, прикладених до його перерізів (входів) (4) та рівняннями зв'язку переміщень входів (5).

$$\Phi \left[ \begin{array}{c|c|c|c} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{array} \right] + Q = 0 \quad (4)$$

$$L \left[ \begin{array}{c|c|c|c} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{array} \right] + U = 0 \quad (5)$$

де:  $R_i, S_i$  - вектори реакцій та переміщень  $i$ -го перерізу, відповідно;  $Q, U$  - вектори зовнішніх зусиль і переміщень центра шарніра;  $m$  - кількість перерізів шарніра.

Зовнішні зусилля і кінематичні зміщення прикладаються тільки до шарнірів, точніше до деяких точок, що називаються центрами шарнірів.

Прийнявши до уваги розроблені моделі базових елементів та шарнірів, формуємо повну систему рівнянь, що описують статичний режим складної механічної системи у вигляді:

$$\begin{cases} P A R + Q = 0 & (6) \\ G B S + U = 0 & (7) \end{cases}$$

Рівняння (6) відображають рівновагу силових факторів у перерізах, а рівняння (7) - умови нерозривності механічної системи.

У даних рівняннях:  $P$  - матриця перерізів, у яку входять матриця включення багатополісників та допоміжна матриця для побудови рівнянь рівноваги для кожного багатополісника;  $Q$  - вектор зовнішніх силових факторів;  $A$  - матриця перетворень координат;  $G$  - матриця контурів мережі із багатополісниками, що об'єднує контурну матрицю включень багатополісника та допоміжну матрицю для побудови рівнянь, які описують багатополісник в переміщеннях;  $B$  - матриця перетворення координат;  $U$  - вектор зовнішніх переміщень.

При аналізі динамічного режиму конструкцій РЕЗ приймаємо такі допущення: розглядаються малі коливання відносно положення

статичної рівноваги; конструкція РЕЗ представляється як складна механічна система із зосередженими параметрами; до системи можна застосовувати метод діакоптики, тобто її можна розбити на окремі елементи, характеристики яких визначаються поперечною.

Із врахуванням розроблених моделей базових елементів та шарнірів повна система рівнянь, що описують режим малих коливань конструкції РЕЗ як складної механічної системи будуватиметься у вигляді:

$$\begin{cases} P A R + Q + I + W = 0 & (8) \\ G B S + U = 0 & (9) \end{cases}$$

Рівняння (8) відображають рівновагу силових факторів у перерізах. По принципу Даламбера в дані рівняння включено інерційні сили та сили внутрішнього опору. Сили внутрішнього опору (втрати) приймаються пропорційними швидкості деформації по гіпотезі Фойгта, що відповідає деформуванню матеріалів із явно вираженим пневмоэффектом і дуже часто застосовується для моделювання втрат в амортизаторах РЕЗ. Рівняння (9) відображають умови нерозривності. У рівняннях (8),(9):  $P$  - матриця перерізів;  $Q$  - узагальнений вектор зовнішніх силових факторів;  $A, B$  - матриці перетворень координат;  $I$  - матриця інерційних характеристик;  $W$  - матриця сил внутрішнього опору;  $G$  - матриця контурів мережі із багатополісниками;  $U$  - вектор зовнішніх переміщень. Матриця січень  $P$  та матриця контурів  $G$  будуватимуться таким же чином, як і для статичного аналізу.

Реалізовано алгоритми описаних вище геометричного, статичного та динамічного аналізів, що входять в розроблену методику.

Розроблено узагальнені моделі пружних елементів та елементів зв'язку механічних систем, котрі дозволили побудувати математичні моделі конкретних елементів конструкцій, враховуючи особливості розроблених методів аналізу.

У третьому розділі проведено аналіз конструктивних особливостей серійних амортизаторів РЕЗ, який дозволив виділити найхарактерніші пружні елементи, що входять в їх конструкції.

На основі принципу діакоптики реалізовано такий підхід до побудови математичних моделей амортизаторів та їх пружних елементів.

1. Амортизатор (пружний елемент) розглядається як умовний  $N$ -полісник, у якому з кожним полісом зв'язано шість пружних реакцій, які діють у центрі перерізу кріплення.

2. Припускається лінійна залежність між переміщеннями по узагальнених координатах та пружними реакціями для малих коливань

амортизованого виробу відносно положення статичної рівноваги.

3. Враховуються всі можливі лінійні і кутові переміщення в кожному перерізі кріплення, а також взаємозв'язок між переміщеннями по різних координатах.

4. Втрати енергії на демпфування враховуються у вигляді коефіцієнтів демпфування.

При такому підході, узагальнені переміщення перерізів (входів) зв'язані із узагальненими реакціями в перерізах залежністю:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C^1 \dots C^N \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ C^N \dots C^N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{pmatrix} \quad (10)$$

де:

$$Q_i^T = \begin{pmatrix} R_x^i & R_y^i & R_z^i & M_x^i & M_y^i & M_z^i \end{pmatrix}$$

$$S_i^T = \begin{pmatrix} \Delta X_i & \Delta Y_i & \Delta Z_i & \Delta \varphi_i & \Delta \psi_i & \Delta \epsilon_i \end{pmatrix}$$

$R_x^i, R_y^i, R_z^i$  - зусилля в і-му перерізі;

$M_x^i, M_y^i, M_z^i$  - моменти в і-му перерізі;

$\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$  - лінійні переміщення;

$\Delta \varphi_i, \Delta \psi_i, \Delta \epsilon_i$  - кутові переміщення.

Матриця коефіцієнтів податливості  $C$  симетрична відносно головної діагоналі і складається з блоків  $C^{ij}$ . Кожен блок включає 36 коефіцієнтів податливості  $c_{lm}^{ij}$  ( $l, m = 1, \dots, 6$ ), які зв'язують переміщення (кут повороту) по координаті  $l$  в і-му перерізі кріплення з реакцією по координаті  $m$  в  $j$ -му перерізі.

Така модель дозволяє:

1. Враховувати просторове навантаження із врахуванням взаємозв'язку деформацій по різних координатах.

2. Аналітично обчислювати коефіцієнти податливості і жорсткості з врахуванням конструкцій конкретних типів амортизаторів (пружних елементів).

3. Порівняно легко отримати методику вимірювання коефіцієнтів податливості або жорсткості.

Детально розроблено моделі пружних елементів у вигляді циліндричної і конічної пружини, які базуються на узагальненій мо-

делі базових елементів. Із використанням методів прикладної механіки та опору матеріалів виведені співвідношення для обчислення параметрів цих моделей в аналітичній формі.

На основі узагальненої моделі базових елементів та моделей пружних елементів розроблено моделі широкого класу серійних амортизаторів: пружинних (АПН, АФД, АД); тросових (АТЦ, АТГ); амортизаторів із структурними пружними елементами (АВС, АШС, ДК).

Четвертий розділ присвячений розробці програмно-методичного комплексу (ПМК), його математичного, програмного, інформаційного та лінгвістичного забезпечення. Визначено особливості побудови і функціонування ПМК.

Виходячи із вимог забезпечення адаптованості програмно реалізованих моделей і методів до об'єкта, умов та засобів проектування і враховуючи ідеологію об'єктно-орієнтованого проектування, в структуру ПМК включено:

- монітор діалогового типу, який забезпечує "дружній" інтерфейс із користувачем;

- сервісні модулі (модуль управління вводом-виводом інформації на зовнішні носії; модуль управління аналізом, який реалізує керування процесом моделювання; модуль управління базою даних, що забезпечує занесення, зчитування і коректування інформації у БД, а також передачу необхідної інформації з оперативної бази даних у БД);

- база даних (БД), у якій зберігаються довідкові дані по конструкціях, а також результати моделювання (геометричного, статичного та динамічного аналізів) конструкцій РЕЗ;

- оперативна база даних (ОБД), у яку записуються проміжні результати моделювання;

- бібліотека моделей (БМ), що вміщує програмно реалізовані моделі елементів конструкцій РЕЗ.

Запропонована структура дозволила ефективно реалізувати розроблену методіку моделювання, методи аналізу і моделі компонент.

Описано математичне, програмне, лінгвістичне та інформаційне забезпечення ПМК. Детально розглянута об'єктно-орієнтована бібліотека моделей.

Всі складові частини ПМК, в тому числі і моделі компонент реалізовані на алгоритмічній мові C++.

Проведено аналіз результатів моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ, який дозволив зробити висновок, що застосування розроблених на основі діакоптичного підходу моделей, методів та

алгоритмів в комплексі із використанням інструментальних засобів об'єктно-орієнтованого проектування та програмування є доцільним та результативним.

У додатках приведена детальна розробка моделей пружних елементів із гуми та матеріалу МР (додаток 1), а також тросових пружних елементів (додаток 2).

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Проблема забезпечення вібростійкості та віброміцності РЕЗ достатньо актуальна в сучасних умовах використання радіоелектронної апаратури. Для успішного вирішення даної проблеми є необхідним використання сучасних засобів обчислювальної техніки та інформаційних технологій, а також точних і адекватних моделей компонент механічних систем та методів аналізу режимів їх роботи. Однак, наявні методи та моделі не дозволяють ефективно розв'язати поставлену задачу.

При вирішенні комплексу задач, пов'язаних з розробкою методів, алгоритмів і моделей для моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ отримані такі результати.

1. В результаті аналізу проблеми моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ як складних механічних систем розроблена трирівнева ієрархія моделей компонент, яка впливає як з особливостей конструктивного виконання, так і з особливостей задач аналізу.

2. Сформульована методика моделювання вібрацій в складних механічних системах, яка включає геометричний, статичний та динамічний аналіз і на відміну від відомих, базується на використанні методів теорії мереж, методу діакоптики та принципах ООП.

3. Розроблено та реалізовано метод та алгоритми геометричного аналізу, які відсутні у відомих методиках і дають можливість отримати дані про структуру механічної системи та її геометричні параметри.

4. Розроблено та реалізовано метод та алгоритми статичного аналізу, які базуються на рівняннях рівноваги силових факторів у перерізах та умовах нерозривності і в порівнянні з існуючими дозволяють порівняно просто алгоритмізувати процедуру формування системи рівнянь статички.

5. Розроблено та реалізовано метод та алгоритми динамічного аналізу складних механічних систем, які базуються на рівняннях

кінетостатики і умовах нерозривності і на відміну від існуючих дають можливість визначити динамічні характеристики системи та ефективність віброізоляції конструкцій РЕЗ із врахуванням умов просторового навантаження.

6. Розроблено узагальнені моделі пружних елементів та елементів зв'язку як еквівалентних багатополюсникових компонент складних коливальних систем.

7. Розроблено та реалізовано у вигляді об'єктно-орієнтованої бібліотеки моделі основних типів серійних амортизаторів та елементів зв'язку (шарнірів) в конструкціях РЕЗ.

8. На основі об'єктно-орієнтованого підходу, реалізовано програмно-методичний комплекс, який використовує розроблені методи, алгоритми та моделі і призначений для моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ на різних етапах проектування, в тому числі і на початкових.

#### ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Мотыка И.И., Каркулевский В.И., Смолий Б.И. Конечно-разностная модель печатной платы.// Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. Вестник ЛПИ, 1986, N 206. -Львов: "Выща школа", С. 91-93.
2. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Математическая модель пружинных амортизаторов РЭА.// Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. Вестник ЛПИ, 1987, N 215. -Львов: "Выща школа", С. 69-72.
3. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Обобщенная модель амортизаторов РЭА.// Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. Вестник ЛПИ, 1988, N 226. -Львов: "Выща школа", С. 51-53.
4. Каркулевский В.И., Клецер И.Н., Пайюк П.В. Модели компонентов механических цепей.// Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. Вестник ЛПИ, 1989, N 236. -Львов: "Выща школа", С. 58-61.
5. Каркулевский В.И., Мотыка И.И. Уравнения статического режима систем виброзащиты.// Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств. Вестник ЛПИ, 1990, N 245. -Львов: "Выща школа", С. 38-41.

6. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Матрица жесткости амортизаторов с коническими пружинами. - В сб. Автоматизация конструирования и технологической подготовки производства РЭА. - Львов, 1985. - С. 24-30. Деп. в УкрНИИТИ 25.11.85, N 2615-Ук.
7. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Математическая модель пружинных амортизаторов РЭА при пространственном нагружении. - В сб. Совершенствование методов проектирования и производства радиоаппаратуры. - Львов, 1986. - С. 86-90. Деп. в УкрНИИТИ 14.04.86, N 1043-Ук-86.
8. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Математические модели амортизаторов РЭА.// Автоматизация конструкторского проектирования РЭА и ЭВА: Тез. докл. зональной конференции, Пенза, 1985. - С. 85-86.
9. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Алгоритмы анализа статического режима систем виброзащиты// Автоматизация конструкторского проектирования РЭА и ЭВА: Тез. докл. зональной конференции, Пенза, 1988. - С. 71-72.
10. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Алгоритмы формирования уравнений механических систем с сосредоточенными параметрами.// Проблемы обеспечения высокой надежности микроэлектронной аппаратуры: Тез. докл. Всесоюзной конференции, Запорожье, 1990. - С. 110-111.
11. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Автоматизированный анализ сложных механических систем.// Опыт разработки и применения приборно-технологических САПР: Тез. докл. Всесоюзной школы-семинара (февраль, 1991г.). Львов: ЛПО "Полярон", 1991. С. 113.
12. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Иерархия моделей для моделирования механики РЕЗ.// Досвід розробки і застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. II Міжреспубліканської НТК (лютий, 1993), Львів: ВО "Полярон", 1993. С. 43.
13. Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Застосування методів теорії мереж для моделювання механічних систем.// Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств: Тез. докл. НТК, Бердянск, 1993. С. 83.
14. Коваль В.О., Мотыка И.И., Каркулевский В.И. Моделирование вибраций в конструкциях РЕЗ.// Досвід розробки і застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. III Міжнародної НТК (липень, 1995), Львів: ВО "Полярон", 1995. С. 111-112.

Особистий вклад автора в отриманні наукових результатів полягає в тому, що положення, котрі складають суть дисертації були сформульовані і вирішені ним самостійно :

- 1) аналіз проблеми моделювання вібраційних процесів в конструкціях РЕЗ /8/;
- 2) розробка методики моделювання вібрацій в складних механічних системах, яка базується на використанні методів теорії мереж та методу діакоптики /13,14/;
- 3) розробка методів геометричного, статичного та динамічного аналізу механічних конструкцій РЕЗ, які базуються на використанні методів теорії мереж та законах механіки /5,9,10,11,13,14/
- 3) розробка узагальненої моделі пружних елементів механічних конструкцій РЕЗ, представленої у вигляді багатополюсника /3/;
- 4) розробка нових, оригінальних моделей серійних віброізоляторів та інших компонентів механічних конструкцій РЕЗ, які реалізовані у вигляді об'єктно-орієнтованої бібліотеки моделей /1,2,4,6,7,8,12,14/;
- 5) розробка та реалізація програмно-методичного комплексу для моделювання вібрацій в конструкціях РЕЗ, який використовує розроблені методи та моделі і базується на принципах об'єктно-орієнтованого проектування /11,12,14/.

Отже, особистий вклад автора в частині матеріалу, покладеного в основу дисертації, є визначальним.

#### Abstract

Karkuljovskij V.I. Development of methods simulating vibrations for the structures of radio-electronic devices (RED). Candidate of Technical Sciences Thesis in speciality 05.13.05 - "Computer-aided design systems". State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1996.

Technique of simulation of vibrations in the RED structures which includes methods and algorithms of geometrical, static and dynamic analyses; generalized model of elastic elements; mathematical models of the mechanical systems components are defended in this thesis.

It is ascertained that the use of models, methods and algorithms, developed on the basis of diacoptic approach, together with software tools of object-oriented design and programming is reasonable and effective.

#### Аннотация.

Каркулевский В.И. Разработка методов моделирования вибраций в конструкциях РЭС. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - "Системы автоматизации проектирования". Государственный университет "Львівська політехніка", г. Львов, 1996 г.

В диссертационной работе защищается методика моделирования вибрационных процессов в конструкциях РЭС, которая включает методы и алгоритмы геометрического, статического и динамического анализов; обобщенная модель упругих элементов; математические модели компонент механических систем.

Установлено, что использование разработанных на основании диакоптического подхода моделей, методов и алгоритмов в комплексе с инструментальными средствами объектно-ориентированного проектирования и программирования целесообразно и результативно.

Ключові слова: САПР, РЕЗ, математична модель, віброзахист, віброізолятор, об'єктно-орієнтоване проектування.

445033

Ав 34.249

Підписано до друку 29.02.96. Формат паперу 60x84 1/16  
Папір газетний. Друк офсетний. Безкоштовно.  
Друкарських листів 1. Зам. 93. Тираж 100.

ЛПЦ "Агрософт" м. Львів, вул. 700-річчя Львова, 63а