ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

ВАСИЛЕГА МИКОЛА МИХАЙЛОВИЧ

МОДЕЛІ И МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДКАЗНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ БОРТОВИХ РЕЗ ПРИ ТРИВАЛИХ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ЗАСОБАМИ САПР

Спеціальність: 05.13.05 - Системи автоматизації проектування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

ЛЬВІВ - 1995

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Запорізькому державному технічному університет

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Крищук Володимир Миколайович

Офіційні опоненти:
1.Доктор фізико-математичних наук, професор Савула Ярема Григоро
2.Кандидат технічних наук, доцент Притула Анатолій Вікторович

Провідна організація - Запорізький науково -дослідний
інститут радіозв'язку, м.Запоріжжя

Захист дисертації відбудеться "17" травня 1995 року о 16 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ра К04.06.06 в Державному університеті "Львівська політехніка" 290013, м.Львів, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись в науково -технічн бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка 290013, м.Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий "14" квітня 1995 року

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Ткаченко С.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Постійне функціональне й конструктивне ускладнення РЕЗ, зростання поставлених до них вимог роблять досягнення необхідного рівня показників безвідказності складною науково -технічною проблемою. Завдання підвищення безвідказності на даному етапі може бути успішно вирішене для РЕЗ шляхом комплексної автоматизації й застосування нових методів проектування, які базуються на останніх досягненнях в галузі інформаційних технологій, та удосконалення методичної організації проектних робіт.

Сучасні радіоелектронні засоби, які розміщуються на рухомих об'єктах, літальних апаратах, кораблях, самохідних машинах, автомобілях і т.п., піддаються впливу складного комплексу дестабілізуючих факторів, серед яких важливе місце займають вібраційні навантаження з широким інтервалом частот від 5 до 5000 Гц з прискореннями від одиниць до десятків і навіть сотень одиниць g. Бортові РЕЗ, як правило, експлуатуються в умовах тривалих вібраційних впливів. Згідно технічних завдань на розробку бортових РЕЗ тривалість цих впливів досягає 50000...60000 годин й більше.

Під тривалими вібраційними навантаженнями в даній роботі будемо розуміти вібраційні впливи, які здатні привести до сумарної наробки кожного елемента конструкції більше $10^4...10^5$ циклів навантаження, що відповідає вимогам відповідних нормативних документів. При тривалих вібраційних навантаженнях вихід зі строю є наслідком накопичення утомленісних пошкоджень в конструктивних елементах апаратури. У зв'язку з цим особливо актуальними є питання оцінки безвідказності конструкцій бортових РЕЗ за критерієм утомленісної міцності. Разом з цим, методи забезпечення безвідказності конструкцій РЕЗ, які враховують закономірності утомленісних пошкоджень, є мало дослідженими.

Дослідження показують, що для вирішення цієї проблеми поряд з накопиченням експериментальних даних з характеристик утомленісної міцності матеріалів, елементів конструкцій й конструкцій в цілому необхідно розробити нові методи математичного моделювання конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях та відповідні методи й методики забезпечення їх безвідказності на основі ймовірнісного моделювання засобами САПР.

Особлива роль при цьому в загальному процесі автоматизованого проектування відводиться математичному моделюванню полів механічних напруг в конструкціях бортових РЕЗ, спрямованому на забезпечення їх безвідказного функціонування в умовах тривалих вібраційних навантажень.

Істотний вклад в дослідження динамічних властивостей конструкцій внесли Амбарцумян С.А., Біргер І.А., Болотін В.В., Гусев О.С., Дмитриченко С.С., Когаєв В.П., Когут В.М., Кофанов Ю.М., Маквецов Е.М., Павлов П.А., Писаренко Г.С., Ройтман А.Б., Решетов Д.М., Серенсен С.В., Сосновський Л.А., Степнов М.М., Тартаковський О.М., Трощенко В.Т., Феодосьєв В.І. та інші відомі вчені.

Враховуючи специфіку конструкцій бортових РЕЗ - структурна неоднорідність конструкції, анізотропність властивостей сучасних конструкційних матеріалів, складність врахування дисипації енергії процесів коливання й інше - пряме запозичення наукових розробок механіки твердого деформованого тіла для аналізу динамічних характеристик конструкцій бортових РЕЗ практично неможливе.

Методи й моделі, які застосовуються на даному етапі для аналізу механічних характеристик конструкцій РЕЗ, створені на їх основі пакети прикладних програм та методики для аналізу й забезпечення заданих в ТЗ механічних характеристик конструкцій РЕЗ застосовувати для аналізу та забезпечення показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях практично невоможливо. Перш за все, це пов'язано з тим, що в існуючих методах аналізу механічних характеристик конструкцій РЕЗ на рівні блоків, розроблених Шапошниковим М.М., Крищуком В.М., Тартаковським О.М., Шалумовим О.С., моделювання механічних процесів в конструкціях при зовнішніх вібраційних навантаженнях проводиться тільки в частотній області й закінчується одержанням амплітуд вібраційних переміщень або прискорень в елементах конструкції, а в методах, розроблених Батуєвим В.П., Кожевніковим О.М., Сарафановим А.В., Трояном Ф.Д., Шалумовим О.С. для аналізу печатних вузлів й ЕРЕ, хоч і передбачений розрахунок механічних напруг у виводах окремих конструкцій ЕРЕ, але він ведеться в частотній області й відсутня можливість для розрахунку показників їх безвідказності за критерієм утомленісної міцності. Разом з тим, при оцінці утомленісної міцності конструкції, особливо в ймовірнісному

аспекті, виняткове значення має проведення аналізу динаміки конструкції бортових РЕЗ не за номінальними значеннями параметрів конструкції й зовнішніх вібраційних навантажень або за їх найгіршим сполученням, а з урахуванням розбросів цих параметрів. На жаль, до цього часу немає методів, моделей й системи аналізу, які орієнтовані на конструкції бортових РЕЗ та дозволяють проводити розрахунки напружено -деформованого стану з урахуванням указаних розбросів параметрів і тривалого вібраційного навантаження.

Питання дослідження надійності конструкцій найповніше розкриті в роботах Болотіна В.В., Дружиніна Г.В., Когаєва В.П., Решетова Д.М., Сосновського Л.А., Степнова М.М., Стрельникова В.П., Ушакова І.А.. Разом з тим, в практиці проектування бортових РЕЗ на сьогодні превалює підхід до утомленісних пошкоджень елементів конструкції, як до несподіваних відказів. Відповідно й існуючі методи та методики розрахунків зорієнтовані на цей стереотип. Нові методи розрахунків показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ повинні спиратися на подання відказів, спричинених накопиченням утомленісних пошкоджень, як поступових. Цьому повинно сприяти отримання найповнішої інформації про навантаженість конструктивних елементів при математичному моделюванні вібраційних процесів та врахування зниження межі витривалості деталей при тривалій вібрації внаслідок перевантажень, а також накопичення й узагальнення результатів експериментальних досліджень зразків матеріалів, елементів конструкцій й конструкцій бортових РЕЗ в цілому на утомленісну міцність.

Випробування на утомленісну міцність довготривалі й трудомісткі. Проте тільки вони дозволяють мати достовірну інформацію про межу витривалості конструктивних елементів. В результаті експериментальні дослідження дають нам критерії для оцінки показників безвідказності конструкцій.

Відзначимо, що сучасні засоби обчислювальної техніки дозволяють застосовувати нові математичні підходи, наприклад, інтервальний аналіз, для успішного рішення завдання забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ з урахуванням розкиду параметрів. Тому розробка методів, створення прикладних програм і на їх основі інженерних методик, які б дозволили на етапах ескізного й технічного проектування проводити на ЕОМ дослідження

безвідказності конструкцій бортових РЕЗ за критерієм утомленісної міцності, отримувати кількісну оцінку її показників, указувати шляхи досягнення потрібного рівня цих показників, являється на сьогодні найактуальнішим завданням. Очевидно, що комплексний підхід до процесу забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ на основі нових й адаптації існуючих методів, моделей та алгоритмів стосовно умов автоматизованого проектування є найдоцільнішим.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є дослідження й розробка моделей й методів математичного моделювання конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях та забезпечення їх безвідказності на основі ймовірнісного моделювання засобами САПР.

В дисертаційній роботі показано, що досягнення поставленої мети вимагає вирішення таких основних завдань:

-дослідження конструктивних особливостей бортових РЕЗ, впливу тривалих вібраційних навантажень на їх безвідказне функціонування, сучасного процесу автоматизованого проектування бортових РЕЗ з метою аналізу особливостей й обгрунтування практичної необхідності розробок, які виконуються;

-розробки інтервальних скінченно -елементних моделей, методу й алгоритму математичного моделювання механічних процесів в конструкціях бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, одержання напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ з урахуванням тимчасового характеру навантаження та розкиду параметрів конструкції й амплітуд зовнішніх вібраційних навантажень;

-розробки методу розрахунку показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, що базується на уяві про відкази, які виникають внаслідок накопичення утомленісних пошкоджень, як відказів поступових і урахуванні зниження межі витривалості деталей при тривалій вібрації;

-розробки "Програмного комплексу аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації" на основі моделей і алгоритмів, які реалізують комплексний підхід до процесу забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ на базі запропонованих в даній роботі й адаптації існуючих методів стосовно умов автоматизованого проектування;

-розробки методичного забезпечення автоматизованого проектування конструкцій бортових РЕЗ, що експлуатуються в умовах тривалих зовнішніх вібраційних навантажень, з урахуванням заданого рівня безвідказності;

-розробки й апробації методики проведення випробовувань на утомленість елементів конструкцій бортових РЕЗ, експериментальної перевірки й впровадження результатів роботи.

Методи досліджень. В процесі рішення поставлених завдань у роботі використані принципи системного підходу, математичного моделювання, структурного програмування, інтервального аналізу, теорії коливань, числові методи рішення систем рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії пружності, будівельної механіки й опору матеріалів, експериментальні методи досліджень і методи обробки результатів випробовувань.

Нові наукові результати. Наукова новизна отриманих в роботі результатів полягає в наступному:

1.Розроблено інтервальні скінченно -елементні моделі й метод аналізу напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ при використанні апріорної інформації у вигляді інтервальних чисел. Особливістю методу є підвищена точність при розрахунках амплітуд змінних механічних напруг й формуванні змішаних блоків навантаженості з урахуванням часового характеру вібраційних навантажень, що досягається шляхом урахування розсіювання конструктивних параметрів й амплітуд вібраційних навантажень засобами апарату інтервального аналізу.

2.Розроблено ймовірнісний метод розрахунку показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, що базується на показі відказів через утому як поступових. Метод дозволяє проводити розрахунки для визначення ймовірності безвідказної роботи конструктивних елементів й конструкцій бортових РЕЗ та наробки елементів конструкції до відказу за критерієм утомленісної міцності при нерегулярній навантаженості елементів конструкції з урахуванням розсіювання амплітуд діючих змінних механічних напруг й характеристик утомленісної міцності конструктивних елементів, зниження меж витривалості внаслідок перевантажень й тривалості вібраційного навантаження.

3.Створено "Програмний комплекс аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації", в якому

реалізовані моделі й методи аналізу напружено -деформованого стану та розрахунку показників безвідказності, запропоновані в дисертаційній роботі, й впроваджений комплексний підхід до процесу забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ на основі нових та адаптації існуючих методів.

4.Розроблена інженерна методика дослідження безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, яка регламентує застосування програмного комплексу на етапах ескізного й технічного проектування.

Нові положення, що виносяться на захист:

1.Інтервальні скінченно -елементні моделі й метод аналізу напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ при використанні апріорної інформації у вигляді інтервальних чисел.

2.Ймовірнісний метод розрахунку показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, що базується на показі відказів через утому як поступових.

3. Програмний комплекс аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації, в якому програмно реалізовані моделі й методи аналізу напружено -деформованого стану та розрахунку показників безвідказності.

4.Інженерна методика дослідження безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений "Програмний комплекс аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації", а також методичне забезпечння автоматизованого проектування конструкцій бортових РЕЗ дозволяє:

-скоротити строки пошуку проектних рішень в процесі автоматизованого проектування бортових РЕЗ шляхом зменшення обсягу випробовувань макетів й дослідних зразків, зниження кількості конструкторських й технологічних доробок;

-покращити показники безвідказності бортових РЕЗ шляхом прийняття обгрунтованих проектних рішень на основі детального дослідження механічних процесів в конструкціях бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях з урахуванням розсіювання конструктивних параметрів й амплітуд зовнішніх вібраційних навантажень.

Реалізація та впровадженя результатів роботи. Розроблені в дисертації методи, моделі, алгоритми, програмні й методичні засоби автоматизованого аналізу й забезпечення показників безвідказності

конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях використовувались в науково -дослідних роботах, виконаних на кафедрі "Конструювання і виробництва радіоелектронних засобів" Запорізького державного технічного університету за період з 1988 по 1994 р.р.

Основні результати роботи впроваджені в практику проектування трьох підприємств: КБ "Електроавтоматика" (м.Запоріжжя), КБ "Іскра" (м.Запоріжжя) й ВО "Радіоприбор" (м.Запоріжжя), а також використовуються в навчальному процесі Московського державного інституту електроніки й математики (технічний університет) та Запорізького державного технічного університету.

Апробація результатів роботи. Робота в цілому та її окремі результати доповідались й обговорювались на чотирьох Зональних та одинадцяти Всесоюзних (Міжнародних) симпозіумах, конференціях й семінарах, на двох семінарах наукової ради АН України з комплексної проблеми "Теоретична електротехніка, електроніка й моделювання", а також на науково- технічних семінарах кафедри "Радіотехнічні пристрої й системи" Московського державного інституту електроніки й математики з 1988 року по 1994 рік: 44 Всесоюзна наукова сесія, присвячена Дню радіо (м.Москва, 1989), Зональна конференція "Методы оценки и повышения надежности РЭС" (м.Пенза, 1990), Всесоюзна науково -технічна конференція "Автоматизированные системы обеспечения надежности РЭА" (м.Львів, 1990), Семінар по інтервальній математиці (м. Саратов, 1990), Всесоюзна науково -технічна конференція "Проблемы обеспечения высокой надежности микроэлектронной аппаратуры" (м.Запоріжжя, 1990), Школа -семінар "Опыт разработки и применения приборно - технологических САПР" (м.Львів, 1991), 46 Всесоюзна наукова сессія, присвячена Дню радіо (м.Москва, 1991), Російська науково -технічна конференція "Методы оценки и повышения надежности РЭС" (м.Пенза, 1991), Російська науково -технічна конференція "Системный анализ и принятие решений в задачах автоматизированного обеспечения качества и надежности изделий приборостроения и радиоэлектроники" (м.Махачкала, 1991), Міжнародна науково -технічна конференція "Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем" (м.Пенза, 1992), Міжнародний науково -технічний семінар "Моделирование и контроль качества в задачах обеспечения надежности радиоэлектронных устройств" (м.Шауляй, 1992), Міжнародна конференція по

інтервальним та стохастичним методам в науці й техніці "ИНТЕРВАЛ - 92" (м.Москва, 1992), Міжнародна науково -технічна конференція "Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств" (м.Бердянськ, 1993).

Публікації. За основними результатами виконаних досліджень й розробок опубліковано 19 друкованих робіт, в тому числі: 5 статей, 3 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів з висновками, заключення, списку літератури, до якого включено 300 назв, та додатків. Основний зміст роботи викладено на 218 сторінках друкованого тексту, ілюстрованого 18 рисунками й таблицями.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, викладена мета й основні завдання досліджень, дається короткий зміст роботи по розділах, сформульовані нові наукові результати та наукові положення, що виносяться на захист, вказана практична цінність роботи.

В першому розділі викладені основні особливості конструкції бортових РЕЗ на основі вимог технічного завдання й конструктивного виконання, розглянуто зміст етапів ескізного й технічного проектування, обгрунтовано вибір показників безвідказності, виконаний аналіз існуючих методів математичного моделювання конструкцій та розрахунку їх безвідказності за критерієм утомленісної міцності, обгрунтована необхідність вирішення основних завдань дисертаційної роботи, сформульована мета і поставлені завдання дисертаційної роботи.

В другому розділі викладено запропоновані інтервально-скінченно -елементні моделі та метод аналізу напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ з використанням апріорної інформації у вигляді інтервальних чисел, наведені математичні моделі конструктивних елементів й конструкцій для аналізу їх характеристик міцності при статичних і вібраційних навантаженнях.

Система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно узагальнених переміщень центрів вузлових елементів для конструкції блоку РЕЗ при статичних навантаженнях має вигляд:

$$\sum_{j=1}^{i-1} P_{21}\Delta^j + \left\{\sum_{j=1}^{i-1} P_{22} + \sum_{j=i+1}^{N_r} P_{11}\right\}\Delta^j + \sum_{j=i+1}^{N_r} P_{12}\Delta^j =$$

$$= q^i - \sum_{j=1}^{i-1} C_{ji} Q^{ji} \sum_{j=i+1}^{N_r} C_{ij} Q^{ij}, \quad (i=1,\dots,N_r), \qquad (I)$$

де $P_{11} = C_{ij}B_{11}C^t_{ij}$, $P_{12} = C_{ij}B_{12}C^t_{ji}$, $P_{21} = C_{ji}B_{21}C^t_{ij}$, $P_{22} = C_{ji}B_{22}C^t_{ji}$; N_r - число вузлових елементів; B^{ij} - локальна матриця жорсткості стержневого елемента; Q^{ij} - вектори реакцій стержневого елемента в локальній системі координат; q^i - зосереджені навантаження на вузлові елементи; Δ^j - переміщення j-го вузла; C_{ij} - матриця перетворень систем координат.

Математичну модель конструкції РЕЗ при впливі сінусоїдної гармонічної вібрації запишемо в матричній формі:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t), \qquad (2)$$

де $\ddot{u}$; $\dot{u}$, u - відповідно вектори вібраційних прискорень, швидкостей та переміщень порядку n; **M**, **C**, **K** - відповідно матриці мас, демпфірування та жорсткості порядка n; p(t), - вектор динамічних навантажень.

Враховуючи складність конструкцій бортових РЕЗ та різноманітність матеріалів, в роботі для урахування демпфірування використані моделі зовнішнього тертя, внутрішнього тертя та фізичні співвідношення лінійної теорії пружності.

При використанні апарату інтервальної математики для математичного моделювання за допомогою МСЕ "поведінки" конструкцій РЕЗ в процесі формування матриць жорсткости **K**, мас **M** та демпфірування **C** всі математичні операції з числами заміняються їх інтервальними аналогами. Таким чином, початкові дані є інтервалами і враховують конструктивні, технологічні й експлуатаційні допуски. Задачу аналізу напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ в цьому випадку вирішуємо для знаходження всіх можливих рішень інтервальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь (ІСЛАР), тобто вирішуємо лінійну задачу з розкидом рішень для знаходження інтервального вектора $\mathring{X}^*$ коли глобальна інтервальна матриця $\mathring{A}$ така, що всі дійсні $A \in \mathring{A}$ невироджені:

$$\dot{X}^* = \{A^{-1}b \mid A \in \dot{A},\ b \in \dot{b}\}, \qquad (3)$$

де $\dot{b}$ - інтервальний вектор навантажень на конструкцію.

В другому розділі розроблено також метод розрахунку характеристик навантаженості конструктивних елементів при тривалому впливі сінусоїдної гармонічної вібрації.

В третьому розділі обгрунтовано вибір детермінованого методу розрахунку утомленісної міцності, розглянуто запропонований метод розрахунку показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях на основі результатів аналізу й наступного ймовірнісного моделювання, наведені математичні моделі для розрахунку показників безвідказности.

Фактично метод дозволяє проводити комплексну оцінку безвідказності конструкцій й дає три шляхи вирішення цього завдання, а вибір конкретного підхода залишається за конструктором РЕЗ, який приймає рішення в залежності від реальної проектної ситуації.

Перший шлях базується на розрахунках коефіцієнтів запасів міцності елементів конструкцій бортових РЕЗ і є традиційним.

Другий шлях - проведення ймовірнісних розрахунків для знаходження середньої наробки конструктивних елементів до відказу (метод Монте -Карло) та ймовірності їх безвідказної роботи:

$$P_d = \prod_{j=1}^{НДС} \left\{ 1 - \left[\frac{k_j \left(S^2_{\sigma_{-1d_j}} + S^2_{\sigma_{н_j}} \right)}{(\sigma_{-1d_j} - \sigma_{н_j})^2} \right]^{\frac{1}{f_j}} \right\}, \qquad (4)$$

де НДС - вид напруженого стану в конкретній точці деталі; $\sigma_н$ - діюча в конкретній точці змінна механічна напруга; k , f - коефіцієнти, які вибирають апріорі в залежності від інтервалу зміни ймовірності відказу при відповідному лінійному напруженому стані; S_σ - середньоквадратичне відхилення; σ_{-1d} - межа витривалості деталі.

Третій шлях дає можливість прогнозувати утомленісні пошкодження як поступові й вимагає проведення відповідних ймовірносних розрахунків. Для цього в дисертаційній роботі використано рівняння, яке було запропоновано Серенсеном С.В.:

$$\Delta\sigma_{-1} = \sigma_{-1n} \sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{N_{oi}} K \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1n}} - 1 \right), \qquad (5)$$

де $\Delta\sigma_{-1} = \sigma_{-1n} - \sigma_{-1i}$ - зміна межі витривалості деталі при циклічному навантаженні з амплітудами змінних напруг σ_i; n_i - кількість циклів навантаженості з амплітудою σ_i; N_{oi} - кількість циклів навантаженості до утомленісного пошкодження при навантаженні з амплітудою σ_i; m - кількість ступенів навантаженості; σ_{-1n} - значення межі витривалості непошкодженої деталі; K - параметр рівняння, який характеризує інтенсивність зниження межі витривалості внаслідок циклічних перевантажень.
Замість звичайних операцій над первинними даними розроблено операції над гістограмами й зроблена заміна звичайних арифметичних операцій в (5) на гістограмні. Цей підхід є подальшим розвитком методів інтервальної математики і дає можливість при значно менших обчислювальних витратах отримати кількісні оцінки $\Delta\sigma_{-1}$ або σ_{-1i} не гірші, ніж при використанні методу статистичних випробувань.

Четвертий розділ присвячений питанням розробки й практичної реалізації програмного комплексу аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації - складової частини автоматизованої системи забезпечення надійності і якості апаратури (АСЗНІЯА), в межах якої виконана ця дисертаційна робота.

Розроблений "Програмний комплекс аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації" дозволяє:

-проводити оцінку ефективності й вибір системи віброізоляції для амортизованих конструкцій бортових РЕЗ:

1)розрахунок системи віброізоляції для частотної області:

а) розрахунок власних частот системи віброізоляції;

б) розрахунок АЧХ (розрахунок системи віброізоляції при дії синусоїдної гармонічної вібрації, амплітуда якої може змінюватись згідно певного графіка);

2)та для часової області:

в) при дії одиничних або багаторазових ударних імпульсів прямокутної форми;

г) при дії одиничних або багаторазових ударних імпульсів синусоїдної форми;

д) при дії полігармонічних навантажень;

е) при дії віброударних навантажень;

-проводити аналіз напружено -деформованого стану конструктивних елементів, включаючи виводи електрорадіоелементів, й конструкцій бортових РЕЗ при статичних навантаженнях та при тривалій дії синусоїдної гармонічної вібрації з урахуванням розсіяння конструктивних й технологічних параметрів й величин зовнішніх навантажень шляхом використання апріорної інформації в вигляді інтервальних чисел:

1)аналіз механічних характеристик НК бортових РЕЗ для частотної області:

а) при статичних навантаженнях;

б) при динамічних навантаженнях (розглядається тільки синусоїдна гармонічна вібрація, амплітуда якої може змінюватись за відомим законом);

в) при статичних навантаженнях й використанні інтервальних чисел для параметрів конструкції й величин зовнішніх навантажень (урахування допусків);

г) при динамічних навантаженнях й використанні інтервальних чисел для параметрів конструкції та величин зовнішніх навантажень (урахування допусків);

2)аналіз механічних характеристик печатних вузлів (ПВ) бортових РЕЗ:

а) при навантаженні синусоїдною гармонічною вібрацією (розробка повністю запозичена й включена до ПК для рішення комплексних завдань аналізу, розрахунку міцності виводів ЕРЕ й забезпечення цільності та закінченості інженерної методики проектування);

б) при навантаженні синусоїдною гармонічною вібрацією й використанні інтервальних чисел для параметрів ПВ та величин зовнішніх навантажень (урахування допусків);

3)аналіз напружено -деформованого стану виводів ЕРЕ, встановлених на ПВ:

а) при навантаженні ПВ синусоїдною гармонічною вібрацією;

б) при навантаженні ПВ синусоїдною гармонічною вібрацією й використанні апріорної інформації у вигляді інтервальних чисел (урахування допусків);

-розраховувати кількісні оцінки показників безвідказності конструктивних елементів, включаючи виводи електрорадіоелементів,

й конструкцій бортових РЕЗ за критерієм утомленісної міцності:

а) оцінка тривалості навантаження з визначеним рівнем - формування блоку навантаженості елементів конструкції;

б) схематизація випадкового процесу навантаженості елементів конструкції;

в) розрахунок коефіцієнтів запасу міцності елементів конструкції;

г) розрахунок наробки до відказу елементів конструкції;

д) розрахунок ймовірності безвідказної роботи елементів конструкції;

е) розрахунок ймовірності безвідказної роботи конструкцій бортових РЕЗ;

ж) проведення всіх видів розрахунків за підпунктами а)...е) при роботі з інтервальними даними.

Розробка ПК велась на основі принципів модульного програмного забезпечення згідно технології НІРО-діаграм. Процес структурування ПК виконано за низхідним алгоритмом у відповідності до основних завдань, які вирішує ПК в процесі свого функціонування з метою реалізації певних видів аналізу конструкцій бортових РЕЗ. При цьому структура ПК та функціональні блоки формувались згідно принципів взаємозалежності, вкладеності та перекриття.

Основні обчислювальні модулі ПК для ПЕОМ реалізовані мовою FORTRAN 77, що відповідає популярній версії MS FORTRAN 5.0. Для підтримки інтервальних операцій та функцій розроблена бібліотека INTFOR.LIB, яка підтримує інтервальні операції по різним видам формування й порівняння інтервальних чисел, функції інтервальної арифметики й інтервальні розширення елементарних функцій. Інтервальні операції й функції реалізовані мовою АССЕМБЛЕР у вигляді програмних модулів типу функцій. Бібліотека може використовуватися стандартним для системи програмування FORTRAN 77 засобом на ПЕОМ типу IBM PC XT/AT, яка має математичний сопроцесор. Реалізація інтервальних операцій й функцій мовою АССЕМБЛЕР сприяє підвищенню швидкості розв'язання завдань та забезпеченню зручного інтерфейса з програмами, які написані мовою FORTRAN 77. До складу бібліотеки INTFOR.LIB включені також інтервальні операції й функції для підтримки комплексної інтервальної арифметики.

Для підтримки обчислювальних процедур з гістограмами в ПК для ПЕОМ використана бібліотека підпрограм та функцій гістограмної

арифметики - GISTFOR.LIB, яка створена на основі операцій з інтервальними числами й реалізована мовою АССЕМБЛЕР.

ПК для ПЕОМ має дружній інтерфейс, який дозволяє користувачеві формувати поточне завдання, вводити та корегувати дані, проглядати результати розрахунків у вигляді таблиць й графіків, виводити інформацію на пристрій друку. Сервісні програми реалізовані з використанням версії 5.5 TURBO-PASCAL.

В п'ятому розділі розроблена інженерна методика дослідження й забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях; наведені приклади розрахунків; подана методика й результати експериментальних досліджень, а також впровадження результатів работи.

Розроблена методика включає аналіз на вібраційні навантаження НК бортових РЕЗ з наступним аналізом ПВ й ЕРЕ, та дозволяє отримати результати розрахунків, вносити зміни в конструкцію як на рівні ПВ й ЕРЕ, так і на більш високих рівнях ієрархії - на рівні пакета плат, блока, стійки, пульта, а також проводити аналіз конструкцій, встановлених на віброізолятори, та оцінку ефективності системи віброізоляції, розширює діапазон можливих варіантів захисту апаратури від вібраційних навантажень.

Методика дозволяє конструктору проводити необхідні розрахунки на різних етапах проектування бортових РЕЗ, беручи до уваги обсяг початкової інформації й нормоване значення ймовірності безвідказної роботи конструкції. При цьому конструктор вибирає необхідний рівень деталізації розрахунків, формує відповідне завдання на проведення розрахунків, готує початкові дані, виконує розрахунки, аналізує їх результати та приймає рішення про можливість використання того чи іншого конструктивного виконання бортових РЕЗ при певних умовах експлуатації.

Практичне використання розробленої інженерної методики в межах загальної методики забезпечення безвідказності бортових РЕЗ при автоматизованому проектуванні дозволяє вирішити завдання визначення принципіальної можливості створення бортових РЕЗ з заданим рівнем показників безвідказності на етапах ескізного та технічного проектування.

Розв'язання такого завдання пов'язане з апріорною оцінкою показників безвідказності, яка неможлива без відповідних розрахунків різних по фізичній природі характеристик схем й конструкцій бортових РЕЗ. Для комплексного дослідження надійності

бортових РЕЗ та найповнішої й ефективної реалізації викладеної методики потрібно узгоджене використання різних програмних засобів автоматизації проектування РЕЗ.

У зв'язку з викладеним, в дисертаційній роботі розроблена методика забезпечення безвідказності конструкцій РЕЗ при автоматизованому проектуванні РЕЗ в межах єдиної системи, в якій відображені задачі, які можливо безпосередньо вирішити "Програмним комплексом аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації", так і зв'язки програм ПК з проблемними підсистемами системи АСЗНІЯА (автоматизована система забезпечення надійності і якості апаратури), розробленої на кафедрі РТПіС Московського інституту електроніки й математики (технічний університет).

Практична перевірка результатів дисертаційної роботи проводилась в КБ "Електроавтоматика" (м.Запоріжжя) при розробці бортових РЕЗ, які конструктивно виконані як стійка та пульт. В розділі наведені загальні напрямки досліджень й отримані результати для напівбазових блоків (модулів другого рівня, точніше, секцій першого типу), які розміщуються в стійках (модулях третього рівня), виготовлені по документації підприємства й перевірені ВТК. Загальна тривалість вібраційних навантажень на досліджувані блоки при стендових випробовуваннях 27 годин 54 хвилини або $1.788 \cdot 10^7$ циклів навантаження. Нормована ймовірність безвідказної роботи - 0.995. Наведені результати утомленісних випробувань й теоретичних розрахунків, показані шляхи вдосконалення досліджуваних конструкцій. Виконані роботи дозволили спроектувати конструкцію блока бортових РЕЗ з заданими показниками безвідказності за критерієм утомленісної міцності.

З метою перевірки й підтвердження практичної корисності розроблених в дисертаційній роботі методів, моделей, алгоритмів й програмних засобів, також для напрацювання експериментального матеріалу по характеристикам опору утомі конструктивних зварних елементів із сплава АМц та окремих варіантів конструктивного виконання пакетів ПВ були проведені експериментальні дослідження. Випробовування проводились в лабораторії випробовувань кафедри КВР ЗДТУ й у спеціалізованих лабораторіях КБ "Електроавтоматика".

В результаті випробувань вперше достовірно з'ясована межа витривалості матеріалу АМц й отриманий великий обсяг результатів для зварних з'єднань із сплаву АМц, які дали змогу побудувати

відповідні ймовірносні діаграми, уточнені характеристики опору утомі використаних в КБ "Електроавтоматика" пакетів ПВ.

Випробування дозволили відпрацювати методику утомленісних випробувань для отримання характеристик опору утомі різних елементів конструкцій й окремих вузлів конструкцій до рівня, готового для впровадження на підприємствах.

В розділі проведена статистична оцінка погрішностей методів, моделей й алгоритмів розрахунку механічних характеристик конструкцій РЕЗ.

Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджені в практику проектування підприємств та в навчальний процес вищих учбових закладів.

В висновках сформульовані основні підсумки дисертаційної роботи в цілому.

В додатках до дисертації приводяться результати експериментальних досліджень характеристик утомленісної міцності елементів конструкцій бортових РЕЗ; методика утомленісних випробувань; наведені приклади розрахунків конструкцій бортових РЕЗ з застосуванням програмного комплексу; подається опис застосування "Програмного комплексу аналізу й забезпечення надійності конструкцій бортових РЕЗ при тривалій вібрації"; представлені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Виконані дослідження є теоретичною та експериментальною розробкою й рішенням важливої наукової проблеми - підвищення ефективності й якості конструкторського проектування бортових РЕЗ з заданим рівнем показників безвідказності за критерієм міцності від утоми на основі нових точніших математичних моделей, які дозволяють прогнозувати працездатність конструкцій в умовах тривалих вібраційних навантажень і науково обгрунтувати вибір проектних рішень. В процесі рішення завдань дисертаційної роботи вперше отримано такі основні результати:

I.На основі проведених досліджень конструкцій бортових РЕЗ, як об'єкта проектування, встановлено, що пошкодження від утомленості при эксплуатації РЕЗ в умовах тривалої вібрації в значній мірі визначають їх надійність, та показано, що

забезпечення безвідказності таких конструкцій є складним завданням, рішення якого треба шукати на шляхах застосування методів математичного моделювання механічних процесів і ймовірнісних методів оцінки міцності від утомленості.

2.Проведено аналіз методів й програмних засобів автоматизації в області аналізу механічних характеристик конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях і розрахунку показників їх безвідказності за критерієм міцності від утоми та показано:

-недосконалість або відсутність моделей й програмних засобів для розрахунку механічних характеристик конструкцій бортових РЕЗ, що дозволяють з необхідною точністю визначити величини й діапазони зміни рівнів експлуатаційної навантаженності конструктивних елементів РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях й підготувати початкові дані про статистичні характеристики навантаженості деталей в експлуатації для оцінки показників безвідказності по критерію міцності від утоми;

-відсутність методів, моделей й програмних засобів для розрахунку з необхідною точністю показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ, особливо при кількісній оцінці наробки до відказу конструктивних елементів, та їх непристосованість для автоматизованого аналізу з застосуванням засобів САПР;

-недосконалість принципів алгоритмічного, інформаційного й методичного забезпечення існуючих програмних засобів автоматизації проектування РЕЗ, орієнтованих на автономну експлуатацію, що не дозволяє проводити комплексний аналіз розробок у складі інтегрованої САПР.

3.Розроблено метод аналізу напружено -деформованого стану конструкцій бортових РЕЗ, який дозволяє враховувати при розрахунках розсіювання конструктивних й технологічних параметрів, величин статичних навантажень та амплітуд вібраційних навантажень і визначити величину й діапазон зміни рівня експлуатаційної навантаженості елементів конструкції шляхом використання апарату інтервального аналізу. В межах запропонованого методу:

-розроблено метод математичного моделювання конструктивних елементів й конструкцій бортових РЕЗ для оцінки їх характеристик міцності при статичних навантаженнях;

-розроблено метод математичного моделювання конструктивних елементів й конструкцій бортових РЕЗ для оцінки їх характеристик міцності при синусоїдній гармонічній вібрації (при цьому врахована

можливість задання програмного режиму навантаження при стендових випробуваннях методом коливання частоти);

-розроблено метод побудови й аналізу скінченно- елементних моделей з урахуванням розсіяння конструктивних й технологічних параметрів та величин зовнішніх навантажень;

-розроблено метод розрахунку характеристик міцності конструктивних елементів при тривалій синусоїдній гармонічній вібрації.

4.Розроблено ймовірнісний метод розрахунку показників безвідказності конструкцій бортових РЕЗ при тривалих вібраційних навантаженнях, який дозволяє проводити розрахунки за критерієм міцності від утомленості при нерегулярній навантаженості елементів конструкції з урахуванням зниження межі витривалості внаслідок перевантажень й тривалості навантаження, який відзначається точністю розрахунків та можливістю шляхом розрахунку виявити елементи конструкцій й електрорадіоелементи, які найсильніше впливають на безвідказність. В межах цього методу:

-вибрано детермінований метод розрахунку коефіцієнтів запасу міцності конструктивних елементів;

-розроблено метод розрахунку статистичних характеристик навантаженості конструктивних елементів;

-розроблено метод розрахунку зниження межі витриалості внаслідок перевантажень й тривалості вібраційного навантаження;

-розроблено метод розрахунку кількісної оцінки наробки до відказу й ймовірності безвідказної роботи конструктивних елементів.

5.На основі запропонованих методів розроблено "Програмний комплекс аналізу й забезпечення надійності конструкцій РЕЗ при тривалій вібрації", відмінною рисою алгоритмічного й інформаційного забезпечення якого є можливість включення до його складу раніше розроблених пакетів прикладних програм й функціонування в складі системи АСЗНІЯА для виконання комплексного аналізу й забезпечення безвідказності конструкцій бортових РЕЗ. В процесі розробки програмного комплексу:

-створено алгоритми з автоматичною побудовою математичних моделей механічних процесів в конструкціях бортових РЕЗ, які дозволяють звести до мінімума кількість початкової інформації, яку потрібно ввести для аналізу моделей, й час, необхідний для зміни структур й параметрів моделей, що дозволяє в короткі строки провести аналіз кількох альтернативних варіантів конструкцій

бортових РЕЗ та вибрати найбільш вдалий;

-обгрунтовані й вибрані числові методи розрахунку моделей, які дозволили підвищити ефективність ПК;

-для практичного застосування ПК в процесі автоматизированого проектування бортових РЕЗ розроблена документація, яка відповідає вимогам ЄСПД.

6.Розроблена інженерна методика проектування конструкцій бортових РЕЗ із заданим рівнем показників безвідказності, яка передбачає як автономну експлуатацію ПК, так і його використання в складі системи АСЗНІЯА.

7.Проведено випробування елементів конструкцій бортових РЕЗ, які дозволили накопичити інформацію з характеристик опору утомі й відпрацювати методику випробувань з урахуванням особливостей досліджуваних об'єктів. Вперше отримані достовірні дані з характеристик опору утомі конструктивних елементів, виготовлених із сплаву АМц, а також з їх зварних з'єднань. Проведені дослідження по перевірці адекватності розроблених моделей, методу, алгоритмів й методики, які підтвердили правомірність використання результатів дисертаційної роботи в практиці проектування бортових РЕЗ.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1.Козина Г.Л., Василега Н.М., Крищук В.Н. О проблемах применения интервальной математики к задаче обеспечения динамических характеристик конструкций печатных узлов радиоэлектронных средств.//Труды семинара по интервальной математике. - Саратов, 1990.- С. 76-78.

2.Василега Н.М., Высоцкий В. В., Воскобойник В.А., Онищенко В.Ф. Определение статистических характеристик сопротивления усталости в рамках подсистемы АСОНИКА-М./В сб.: Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС. Пенза, 1991.-С.51-53.

3.Василега Н.М., Плехун В.В., Соболев А.Г. Система виброизоляции для пакетов плат "этажерочной" конструкции.//Теория и практика обеспечения надежности и качества радиоэлектронных средств: Сб.науч. труд.- К.: УМК ВО, 1992.- С. 33-37.

4.Крищук В. Н., Василега Н.М., Козина Г.Л. Библиотека интервальных операций и функций для системы программирования Форт-

ран-77. /В сб. трудов Международной конференции по интервальным и стохастическим методам в науке и технике "ИНТЕРВАЛ-92", Москва, 1992.- С.74-75.

5.Крищук В.Н., Василега Н.М. Программный комплекс анализа и обеспечения безотказности конструкций бортовых радиоэлектронных средств при длительных вибрационных воздействиях. /В сб. трудов Международной конференции по интервальным и стохастическим методам в науке и технике "ИНТЕРВАЛ-92". Москва, 1992.-С.76-78.

6.Крищук В.Н., Василега Н.М. Автоматизированные методы обеспечения безотказности конструкций бортовых РЭС. /В научно-техническом сборнике "Информатика", серия "Автоматизация проектирования" -М: ВНИИМИ, 1994, вып.2-3. -С.82-85.

7.Василега Н.М., Плехун В.В.,Соболев А.Г. Радиоэлектронный блок. А.с.СССР N 1339908 от 23.09.87, Бюл. N 35.

8.Василега Н.М., Плехун В.В., Соболев А.Г. Радиоэлектронный блок. А.с. СССР N 1371413 от 1.10.87.

9.Василега Н.М., Кичигина И.В., Лисин Е.В., Плехун В.В. Шарнирный резинометаллический амортизатор. А.с.СССР N 1610122 от 30.11.90,Бюл.N 44.

10.Василега Н.М., Вильченко А.В. Расчет функций распределения технического ресурса элементов конструкции РЭС методом статистических испытаний./В сб. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы обеспечения высокой надежности микроэлектронной аппаратуры". Запорожье, 1990.-С.190.

11.Василега Н.М., Воскобойник В. А. Оценка показателей надежности выводов электрорадиоизделий при длительных вибрационных воздействиях./В сб. Тезисы докладов 44 Всесоюзной научной сессии посвященной Дню радио, Ч.2.-М.: Радио и связь, 1989.-С.76.

12.Василега Н.М., Онищенко В.Ф. Методы решения интервальных моделей физических процессов в электронных устройствах./В сб. Тезисы докладов научно-технической конференции "Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств". Бердянск, 1993.-С.71.

13.Крищук В.Н., Василега Н.М., Воскобойник В.А. Методика автоматизированного расчета показателей безотказности элементов конструкции РЭС. /В сб. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы обеспечения высокой надежности микроэлектронной аппаратуры". Запорожье, 1990.-С.172.

14.Крищук В.Н., Василега Н.М. Методика исследования показате-

лей безотказности конструкций бортовых РЭС при длительных вибрационных воздействиях. /В сб. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Методы и средства оценки и повышения надежности приборовб устройств и систем". Пенза, 1992.- С.46-48.

I5.Крищук В.Н., Василега Н.М., Онищенко В.Ф. Оценка надежности конструкций РЭС при длительных вибрационных воздействиях./В сб. Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизированные системы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры". Москва-Львов, 1990.-С.97.

16.Крищук В.Н., Василега Н.М. Программный комплекс анализа и обеспечения надежности конструкций РЭС при длительной вибрации. / В сб. Тезисы докладов Международного научно-технического семинара "Моделирование и контроль качества в задачах обеспечения надежности радиоэлектронных устройств". Шяуляй, 1992.- С.28-29.

17.Крищук В.Н., Козина Г.Л., Василега Н.М. Прогнозирование прочностных характеристик конструкций РЭС с помощью интервального анализа. //В сб.: Тезисы докладов XLVI Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио. М.: Радио и связь, 1991.-С.76-77.

18.Крищук В.Н., Козина Г.Л., Василега Н.М. Учет допусков входных параметров при анализе динамических характеристик конструкций РЭС. //В сб.: Тезисы докладов школы-семинара "Опыт разработки и применения приборно-технологических САПР". Львов, 1991.-С.91.

19.Krishchuk V.N., Vasilega N.M., Kozina G.L. Interval operations and functions library for FORTRAN 77 programming system and its practice using. /Interval Computations. -St.-Petersburg - Moskow, 1992.-N4(6) Special Issue.-p.2-8.

Основні результати дисертаційної роботи повно відображені в публікаціях. В роботах 2,3,5, 6,I0,II, 12,13,I4, I5,I7,I8 Василезі М.М. належить реалізація основних положень роботи. В роботах 4,I6,19, Василезі М.М. належить програмна реалізація й отримання основних аналітичних відношень. В роботах I,7,8,9 Василезі М.М. належить основна ідея роботи і отримані практичні результати.

АНОТАЦІЯ

Vasilega N.M. The guarantee models and metods for the failure-free radio -electronic on-board devices constructions under prolonged vibration by means of Computer -Aided Design Systems. The research and the thesis for Candidate of Technical Science degree of 05.13.05 - Computer -Aided Design Systems. State University "Lvivska polytechnica", Lviv, 1995.

16 scientific theses and 3 patents are being presented which contain theoretical and experimental investigations on the development the guarantee models and methods for the failure -free radio -electronic on -board devices constructions on the stage of design using the proposed models, techniques and algoritms of complex modelling. The interval setting of the analysis problem permitted to develop and refine the method of computing of the fatigue strength of construction elements with account of gradual reducing of the endurance limit.

The results of the research have been implemented in the actual design practice.

Василега Н.М. Модели и методы обеспечения безотказности конструкций бортовых РЭС при длительных вибрационных воздействиях средствами САПР. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Системы автоматизированного проектирования. Государственный университет "Львовская политехника", г.Львов, 1995год.

Защищается 16 научних трудов и 3 авторских свидетельства, которые содержат теоретические и експериментальные исследования, посвященные разработке моделей и методов обеспечения безотказности конструкций бортовых РЭС на этапах проектирования с использованием моделей, методик и алгоритмов комплексного расчета. Интервальная постановка задачи анализа позволила развить и уточнить метод расчета усталостной прочности конструктивных елементов с учетом снижения предела вносливости.

Результаты исследований внедрены в практику реального проектирования.

Ключові слова: тривалі вібраційні навантаження, утомленісна міцність, конструкції бортових РЕЗ, засоби САПР, інтервальні скінченно -елементні моделі, показники безвідказності

Подписано к печати 06.04.1995г. Формат 60 84 1/16 объем 1 .п.л.
Заказ №151. ***Тираж 100 экз.***
Запорожье, ЗГТУ, типография, ул.Жуковского,64