

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

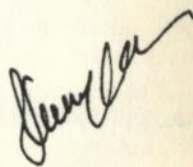
На правах рукопису

Міщенко Ігор Вікторович

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ  
НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ  
ПОСТУПОВИХ ВІДМОВАХ

05.02.09 – Динаміка, міцність машин,  
приладів та апаратури

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Харків - 1996



00760006 (J)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Динаміка та міцність машин"  
Харківського державного політехнічного університету

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
Жовдак Валерій Олексійович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Анілович Веніамін Яковлевич  
доктор технічних наук, професор  
Воробійов Юрій Сергійович

Провідна організація - Науково-виробниче об'єднання  
"Турбоатом", м. Харків

Захист відбудеться " 23 " жовтня 1996 р. о \_\_\_\_ год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.16  
у Харківському державному політехнічному університеті  
за адресою: (310002, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського  
державного політехнічного університету

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1996 р.

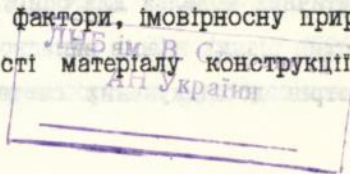
Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Бортовий В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Відповідно сучасним тенденціям розвитку машинобудування передбачається подальше збільшення ресурсу конструкцій при одночасному зростанні їх одиначної потужності з належним забезпеченням якості та надійності. Це в першу чергу відноситься до енергетичного, транспортного, авіаційного машинобудування і суднобудування. Для великої кількості конструкцій в зазначених галузях характерними особливостями є, по-перше, їх складність, що потребує застосування сучасних чисельних методів розрахунку (метод скінченних елементів (МСКЕ), метод суперелементів (МСПЕ)), по-друге, робота в умовах випадкового навантаження, до того ж ефект дії випадкових збурень грає істотну, а іноді і визначальну роль. В цьому випадку методи класичної механіки, засновані на понятті детермінізму, недостатні для розуміння та пояснення динамічних процесів, які виникають під час експлуатації в реальних умовах. Внаслідок чого у теперешній час загальновизнано, що коректні теоретичні дослідження і розробка практичних методів розрахунку таких конструкцій повинні ґрунтуватися на імовірносних методах, в основі яких лежить теорія випадкових процесів. Результати динамічного розрахунку на випадковий вплив, які викликають самостійний інтерес, водночас є вихідною інформацією для вирішення на стадії проектування задачі надійності при поступових відмовах, на долю яких припадає близько 80% усіх відмов машин, апаратів і конструкцій, які виникають з причини нагромадження в них різного роду пошкоджень (втомленість, рост тріщин, знос і т.п.).

Внаслідок сказаного, дослідження і вирішення задач надійності елементів конструкцій при поступових відмовах, враховуючи випадковий вплив, різні конструктивні фактори, імовірносну природу характеристик конструкційної міцності матеріалу конструкції, є актуальними.



Метов роботи в розробка методики, алгоритму і програмного забезпечення для ПЕОМ :

- розрахунку випадкових коливань машинобудівних конструкцій при стаціонарному і нестаціонарному випадковому впливі на основі МСкЕ;
- адекватної апроксимації густин імовірності параметрів напружено-деформованого стану (НДС) за різними критеріями, які використовуються під час вирішення задач надійності;
- чисельного вирішення задач надійності при поступових відмовах різної фізичної природи на підставі одновимірних і двовимірних марковських моделей з урахуванням вузькосмугового випадкового навантаження.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з Постановою президії АН УРСР N 474 від 27.12.85, Планом АН УРСР від 1.10.2.9., Наказом Мінвузу УРСР N 132 від 16.05.89, планами науково-технічних робіт, що виконуються у Харківському державному політехнічному університеті.

Наукова новизна. Розроблені підходи вирішення задач надійності при поступових відмовах, які базуються на використанні кінетичних рівнянь пошкоджень (КРП) і математичного апарату теорії марковських процесів, дозволяють досліджувати:

- широкий спектр різних фізичних моделей відмов, що враховують лінійні та нелінійні моделі нагромадження пошкоджень, стаціонарний і нестаціонарний характер навантаження та імовірносний розкид характеристик конструкційної міцності матеріалу конструкції;
- ефекти, пов'язані з нормалізацією густини імовірності міри пошкоджень протягом часу, суворо установлювати межі застосування математичних моделей для опису різних поступових відмов;
- вплив різних класів випадкових навантажень і конструктивних параметрів досліджуваних систем на основні показники надійності,

які найбільш часто застосовуються під час проектування.

Вірогідність результатів, отриманих на підставі розроблених методів та алгоритмів, підтверджена результатами розрахунків тестових прикладів, чисельні або аналітичні розв'язки яких відомі, а також прийнятим збігом чисельних даних з експериментальними.

Практична цінність проведених досліджень міститься в тому, що створені пакети прикладних програм, які реалізують алгоритми і методи розрахунку випадкових коливань, вирішення задачі надійності, можуть використовуватися як самостійно, так і бути складовою частиною системи автоматизованого проектування великої кількості конструкцій у різних галузях машинобудування. Використання розробленого підходу дозволяє вже на стадії проектування визначати показники надійності конструкції. Результати розрахунків і програми упроваджені в практику проектування НВО "Молнія", м. Москва.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на VI, VII, VIII Всесоюзних школах "Расчет и управление надежностью больших механических систем" (Свердловськ, 1986, 1988, 1990), Всесоюзних та міжнародних науково-технічних конференціях "Verformung und Bruch" (Магдебург, 1988), "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" (Казань, 1988), "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ" (Київ, 1989), "Волновые и вибрационные процессы в машиностроении" (Горький, 1989), "XXIII Всесоюзное научное совещание по проблемам прочности двигателей" (Москва, 1990), "Прочность и колебания конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках" (Севастополь, 1992), "I-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків" (Львів, 1993), "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье" (Харків, 1993), "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок"

методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов" (Харків, 1994). У повному обсязі робота доповідалась на поширеному науковому семінарі кафедри "Динаміка та міцність машин" ХДПУ.

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у 15 друкованих працях.

Обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, заключення, списку літератури (132 найменування), додатку та містить 144 сторінки друкарського тексту, 61 малюнок, 6 таблиць.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі міститься обґрунтування актуальності задачі, наукової новизни і практичної цінності теми дисертації. Також приведена коротка характеристика роботи.

У першій главі на підставі аналізу літературних джерел розглянутий сучасний стан питань щодо основних типів випадкових впливів на елементи конструкцій, описом КРП при поступових відмовах, використанням апарату марковських процесів під час вирішення різних задач.

Проектування нової техніки поставило вимогу більш глибокого аналізу динамічних процесів, що виникають під час експлуатації в реальних умовах, з обов'язковим дослідженням випадкових впливів, які можуть бути визначними при оцінюванні надійності конструкцій (Болотін В.В., Гладкий В.Ф., Скімов В.В., Ніколаєнко Н.А., Светлицький В.О., Свешніков А.А. Тейлор Д., Crandall S.H., Zhu W.Q. та ін.). Слід відзначити також праці, присвячені розрахунку на випадкові коливання складних машинобудівних конструкцій (Біргер І.А., Бойцов Б.В., Валяев В.І., Вронський Г.В., Воробйов Ю.С., Дем'янушко І.В., Селіхов О.Ф., Чижов В.М. та ін.).

Вироблення ресурсу машин і конструкцій пов'язане головним

чином з нагромадженням необоротних пошкоджень в їх деталях, вузлах та елементах. Ці пошкодження бувають як механічного (втомленість, зношування, розтріскування, нагромадження пластичних деформацій), так і фізико-хімічного походження (корозія, ерозія, адсорбція). У теперешній час загальним є кінетичний підхід до явищ тривалого руйнування, яке розглядається як часовий процес, що допускає його феноменологічний опис за допомогою деяких визначаючих рівнянь, які називаються КРП, як в області малої кількості циклів, так і в області багаточислової втомленості (Анілович В.Я., Біргер І.А., Благовещенський Ю.М., Болотін В.В., Вереземський В.Г., Гемінов В.М., Гусев В.С., Гусенков А.П., Когаєв В.П., Махутов М.О., Павлов П.А., Пісаренко Г.С., Селіхов О.Ф., Серенсен С.В., Трощенко В.Т., Чізов В.М. та ін.).

Для опису циклічного руйнування на стадії розвитку тріщин використовуються критерії лінійної та нелінійної механіки руйнування (Андрейків О.Є., Гуревич С.Є., Махутов М.О., Панасюк В.В., Черепанов Г.П. та ін.).

Застосування КРП дозволяє при деяких допущеннях розглядати міру пошкодження як компоненту марковського процесу. Марковські процеси, які за загальною класифікацією є окремим видом випадкових процесів, займають особливо важливе положення серед інших видів, що пояснюється в основному двома обставинами: по-перше, для них існує гарно розроблений математичний апарат, і, по-друге, за їх допомогою можна описувати точно або приблизно поведінку ряду реальних фізичних систем (Болотін В.В., Богданов Дж., Бомас В.В., Булигін В.С., Євсіков Ю.О., Міронов М.О., Козін Ф., Разевіг В.Д., Свешніков А.А., Стратонович Р.Л., Тіхонов В.І.). Теорія марковських процесів є перспективним напрямком у дослідженні процесу нагромадження пошкоджень від втомленості (Біргер І.А., Благовещенський Ю.М., Болотін В.В., Когаєв В.П., Кордонський Х.В.,

Серенсен С.В., Тімашев С.О.), однак рішення, що зустрічаються в літературі, отримані для найбільш простих КРП і при деяких допущеннях (Болотін В.В., Вуба К.Т., Жовдак В.О., Земліцький А.Ю., Кордонський Х.Б., Костецький Б.І., Стрельников В.П., Тарнопольський Г.І., Тацій В.Г., Arone R., Newby M.).

Проведений аналіз літературних джерел підтвердив актуальність та необхідність проведення намічених досліджень і дозволив сформулювати мету та конкретні задачі дисертаційної роботи.

У другій главі представлена методика приведення широкосмугового центрального випадкового процесу до еквівалентного за пошкоджуючою дією вузькосмугового центрального випадкового процесу.

У результаті вирішення задачі випадкових коливань при широкосмуговому зовнішньому впливі на елементи конструкції напруження (деформації) у небезпечних точках є також широкосмуговими випадковими процесами, що представляються в окремому випадку у вигляді суперпозиції квазігармонічних випадкових процесів. Далі проводиться приведення вказаного процесу до деякого еквівалентного за пошкоджуючою дією центрального вузькосмугового випадкового процесу. Для цього визначається одновимірна густина імовірності обгинаючої на основі існуючих методів схематизації (у цій роботі - метод повних циклів), несуча частота процесу та основні імовірнісні характеристики випадкового процесу.

Основна увага у цій главі через важливість для подальшого вирішення задачі надійності надається апроксимації одновимірній густині імовірності обгинаючої. При цьому синтезується стохастичне диференціальне рівняння (рівняння фільтру) першого порядку для змінної  $\lambda(t)$ , для чого густина імовірності  $f(\lambda)$  апроксимується системою стаціонарних густин імовірності Пірсона. Проведені дослідження показали, що шуканою густиною є  $\beta$ -густина (або  $\beta$ -розподіл), що зводить задачу апроксимації одновимірної густини

до визначення параметрів цього розподілу.

Ця задача вирішувалась різними способами і по ступеню збігу моментів вихідної і схематизованої густини можна судити про оптимальність того чи іншого способу. По першому методу досягається збіг перших двох моментів обох розподілів. Другий враховує той факт, що під час обчислювання середнього ресурсу використовуються моменти більш високого порядку, що потребує збігу не тільки першого, але і моменту, що використовується в розрахунках. Третій полягає в апроксимації вихідної густини  $\beta$ -розподілом за методом найменших квадратів.

Проведені чисельні дослідження для густин, що відповідають різним коефіцієнтам широкосмуговості  $\alpha$  ( $\alpha=1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ ), показали переваги другого з оглянутих способів.

Ця методика наведена стосовно до схематизованих процесів, коли одновимірна густина амплітуд має аналітичний вигляд. Але не існує принципових труднощів під час її використання для будь-яких отриманих тим чи іншим способом одновимірних густин, що дозволяє казати про універсальність методики при вирішенні задач надійності.

У третьій главі запропоновано чисельний метод вирішення задачі надійності на підставі одновимірних марковських моделей.

Міра пошкоджень  $z(t)$  в елементах конструкції при випадковому впливі і поступових відмовах, що трапляються в результаті нагромадження різного роду пошкоджень, описується кінетичним рівнянням виду

$$dz(t)/dt = F [z(t), \lambda(t), y_m, R(t)] \quad (1)$$

де  $z(t)$  - міра пошкоджень ( $z_0 \leq z(t) \leq z_*$ ),  $z_0$  - початкове пошкодження,  $z_*$  - значення, що відповідає руйнуванню,  $F[\cdot]$  - детермінована ненегативна для кумулятивних моделей відмов скалярна лінійна або нелінійна функція,  $\lambda(t)$  - амплітудне значення парамет-

рів НДС при гармонічному впливі,  $y_m$  - середнє значення,  $R(t)$  - вектор характеристик конструкційної міцності.

Визначення часових інтервалів  $t$  порядку  $\Delta t$ , на яких процес нагромадження пошкоджень можна враховувати приблизно марковським ( $\Delta t$  задовільняє нерівностям

$$\tau_c \gg \Delta t \gg \tau_k \quad (2)$$

де  $\tau_c$  - постійна часу системи, значно переважаюча  $10^7$  циклів,  $\tau_k$  - час кореляції  $\lambda(t)$ , що має порядок десятків циклів), дозволяє отримати умови використання апарату теорії марковських процесів. При цьому одновимірна густина імовірності  $f(z,t)$  процесу  $z(t)$  задовільняє рівнянню Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК)

$$\frac{\partial f(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[ A(z)f(z,t) \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[ B(z)f(z,t) \right] \quad (3)$$

з відповідними граничними та початковими умовами. Під час отримання коефіцієнтів рівняння ФПК використовувалися одновимірний та двовимірний релєвські закони розподілу амплітуд параметрів НДС. Таким чином, з рішення рівняння (3) можна отримати одновимірні густини імовірності міри пошкоджень  $f(z,t)$ , за якими визначаються усі основні показники надійності для кумулятивних моделей нагромадження пошкоджень: імовірність безвідмовної роботи (ІБР), густина імовірності відмов, середній час до руйнування, дисперсія часу до руйнування.

Для переважної більшості кінетичних рівнянь типу (1) аналітичне рішення рівняння ФПК отримати неможливо. В цьому випадку користуються чисельними методами, одним з яких є метод скінченних різниць, який використовується у цій роботі. Будівництво скінченно-різничної апроксимації вихідного рівняння ФПК, використання поперемінно явного та неявного рівнянь дає можливість отримання шеститочечного різничного рівняння, для вирішення якого застосовується метод прогонки.

Особливості, пов'язані з завданням рішення на деякому часовому шарі при дельтообразній початковій густині імовірності, долаються за допомогою гауссова наближення. Як початкове наближення також використовувався рівномірний розподіл, який дозволяє отримувати аналогічні результати.

Для деяких моделей нагромадження пошкоджень існують рішення, отримані на підставі асимптотичного наближення, що дозволило перевірити точність запропонованого методу, також вирішити питання, пов'язані з оптимальним вибором кроків за координатою і за часом.

Були проведені дослідження лінійної моделі, рівняння для якої записується у вигляді

$$dz(t)/dt = C\lambda^m = \frac{\omega}{2\pi N_0 \sigma_{-1}^m} \lambda^m, \quad (4)$$

моделі, яка використовує гіпотезу автотемельності нагромадження пошкоджень, аналогом якої для швидкості поширювання тріщини є рівняння Періса

$$dl(t)/dn = C\lambda^2 \pi_1, \quad (5)$$

та нелінійної моделі для рівняння, яке запропоновано Болотіним,

$$dz(t)/dt = C\lambda^{m-2} z^{1-\lambda^2/(Bo^2)} \quad (6)$$

До класу нелінійних також можна віднести практично усі рівняння, які описують поширювання тріщини від втоми. Чисельні дослідження були проведені для рівняння, яке враховує порогове значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (KIN) і який описує на відміну від закону Періса I та II ділянки діаграми зростання тріщини від втоми

$$dl/dN = C \left[ \left[ \lambda (\pi_1)^{1/2} \right]^m - \left[ C_0 \sigma_{-1} (\pi_{1_0})^{1/2} \right]^m \right] \quad (7)$$

де  $C_0$  - постійна, значення якої залежить від форми тріщини, та рівняння Яреми, яке описує усі 3 ділянки указані діаграми

$$dI/dN = C \left[ \frac{K_{\max} - K_{th}}{K_c - K_{\max}} \right]^m \quad (8)$$

де  $\sigma_{-1}$  - межа витривалості,  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$  - максимальне та мінімальне значення КІН,  $K_{th}$  - порогове значення КІН,  $K_c$  - в'язкість руйнування при циклічних навантаженнях.

Для нелінійної моделі розрахунки були проведені при відповідно:

- 1)  $V \geq 1000$ . У цьому випадку  $\lambda^2/(V\sigma^2) \rightarrow 0$ , внаслідок чого рівняння (6) трансформується у рівняння (5);
- 2)  $V \leq 20$ . У цьому випадку  $\lambda^2/(V\sigma^2) > 0$ , що говорить про тенденцію наближення за зовнішнім виглядом рівняння (6) до рівняння (4).

Для рівняння (7) у випадку малості ( $\lambda \gg \sigma_{-1}$ ) величини порогового КІН його неврахування не приводить до похибок.

Таким чином, запропонована методика дозволяє отримувати з достатньою для інженерних розрахунків точністю густину імовірності міри пошкоджень та довжини тріщини з використанням широкого класу КРП на стадії зародження та розвитку тріщини при випадковому зовнішньому впливі.

У четвертій главі запропоновано чисельний метод вирішення задачі надійності на підставі двовимірних марковських моделей при вузькосмуговому випадковому навантаженні.

Розглянутий у главі 3 метод вирішення має недолік, який полягає в тому, що умови його застосування можна оцінити лише якісно та їхнє суворе доведення для різних моделей нагромадження пошкоджень викликає значні труднощі. У кінетичному рівнянні (1)  $\lambda(t)$  - стаціонарний випадковий процес з відомими імовірнісними характеристиками: математичним очікуванням, кореляційною функцією  $K_\lambda(t)$  та одновимірною густиною імовірності  $f(\lambda)$ . Припустимо, що за указаними характеристиками можна збудувати рівняння фільтру, в якому як зовнішній вплив присутній нормальний білий шум  $n(t)$

$$d\lambda/dt = \Phi_1(\lambda) + \Phi_2(\lambda)n(t) \quad (9)$$

Рівняння (9) є стохастичним диференціальним рівнянням першого порядку, яке описує одновимірний марковський процес  $\lambda(t)$ .

Розглядаючи спільно кінетичне рівняння (1) та рівняння фільтру (9), можна на підставі теореми Дуба стверджувати, що  $[z(t), \lambda(t)]$  буде двовимірним марковським процесом, одновимірна густина імовірності якого задовільняє рівнянню ФПК з відповідними граничними та початковим умовами. По густині  $f(\lambda, z, t)$  визначаються усі основні показники надійності для кумулятивних моделей нагромадження пошкоджень.

Для вирішення рівняння ФПК вводиться функція  $\theta(\lambda, \omega, t)$ , яка є характеристичною функцією за змінною  $z$  та густиною імовірності за змінною  $\lambda$ , що дозволяє провести її розклад в одновимірний ряд за поліномами Лагерра нульового порядку з ваговою функцією  $f(\lambda)$  і невідомими коефіцієнтами  $C_n(\omega, t)$ . Після проведення перетворень отримується замкнена система звичайних диференціальних рівнянь (СЗДР) у комплексній формі відносно невідомих коефіцієнтів  $C_n(\omega, t)$

$$\frac{\partial C_n(\omega, t)}{\partial t} = \sum_{k=0}^n C_k(\omega, t) u_{nk} \quad (11)$$

Для вирішення СЗДР застосовується приведення матриці до діагонального вигляду, при якому реалізується алгоритм вирішення проблеми власних значень за методом Якобі з пониженням норми для дійсних матриць. Визначення центрованої густини імовірності  $f_{\omega}(z, t)$  проводилось використовуючи зворотне перетворення Фур'є.

Запропонована методика дозволяє під час вирішення задачі надійності враховувати різні фактори, пов'язані з характеристиками конструкції (імовірносне завдання кривих втомленості, середні напруження, різні показники кривої втомленості, які відповідають областям багато- та малоциклової втомленості) і зовнішнім впливом

(стаціонарність або нестаціонарність).

Чисельні дослідження застосування методики, а також дослідження, пов'язані з визначенням часових областей ефективного вживання двовимірних марковських моделей, тобто вивченням процесу нормалізації густини імовірності міри пошкоджень за часом, і впливу різних факторів, указаних вище, проводилися для лінійної моделі нагромадження пошкоджень (1).

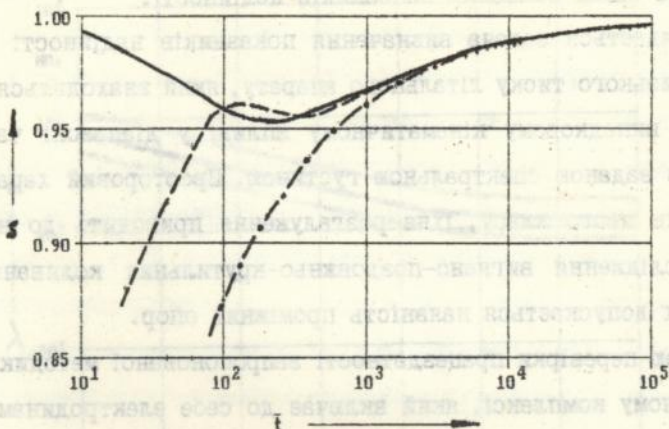
Ступінь нормалізації характеризується величиною загальної площі  $S$  густин імовірності, які отримані на підставі асимптотичного методу (нормальний закон) та двовимірних марковських моделей. У всіх проведених дослідженнях саме за значенням цього параметру (у координатах  $S - \lg N$  або  $S - \lg \bar{t}$ , де  $N$  - кількість циклів,  $\bar{t} = t/\tau_k$ ) аналізувався процес нормалізації густини імовірності міри пошкоджень.

У ході розрахунків варіювалися такі параметри: дисперсія напружень  $\sigma^2$ ; середньоквадратичний відхил логарифму меж витривалості  $\sigma_{\lg \sigma_{-1}}$ ; середні напруження  $y_m$ ; ступінь кривої втомленості  $m$ ; час кореляції  $\tau_k$ .

На мал. 1 приведені криві, які характеризують процес нормалізації при використанні різних початкових густин  $f(z)$  - нормального закону (суцільна крива), рівномірного розподілу (пунктирна крива) та дельта-функції (осьова крива). Слід відзначити:

- різний характер нормалізації для густин  $f(z)$  на часовому інтервалі  $\bar{t} < 2 \cdot 10^3$ ;
- процес рознормалізації, що знаходить відображення у зменшенні величини  $S$ , на часовому інтервалі  $\bar{t} < 2 \cdot 10^2$  під час використання нормального закону  $f(z)$ ;
- збігу процесу нормалізації для густин  $f(z)$  на часовому інтервалі  $\bar{t} > 2 \cdot 10^3$ .

З усіх указаних вище факторів найбільш впливають на норма-



Мал. 1.

лізацію величина  $\tau_k$ , розкид меж витривалості, а також нестационарність процесу навантаження.

У п'ятій главі представлено методику вирішення задачі надійності машинобудівних конструкцій при випадковому впливі. Ця задача вирішується у два етапи.

На першому етапі в рамках кореляційної теорії вирішується задача випадкових коливань усієї конструкції (модель першого рівня). Для визначення імовірносних характеристик параметрів НДС застосовується МСПЕ і МСКЕ.

Після цього за вихідними даними, які отримані у результаті вирішення відповідної задачі для конструкції у цілому, проводиться уточнений розрахунок НДС окремих, найбільш навантажених елементів конструкції (модель другого рівня). Динамічна задача для них вирішується у квазістатичній постанові. Зовнішній вплив на елемент може бути як силовим (розподілені та зосереджені зусилля), так і кінематичним (переміщення та кути повороту), який реалізується у роботі.

Другий етап складається з визначення ІБР, густини імовірності

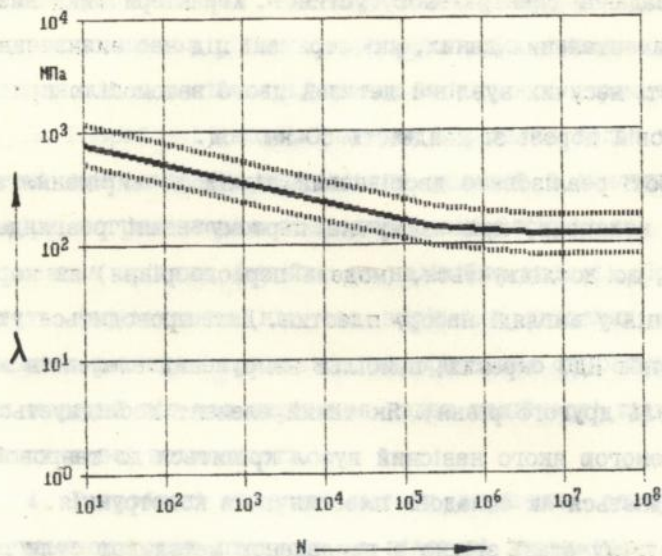
сті відмов та інших основних показників надійності.

Розглядається задача визначення показників надійності трубопроводу низького тиску літального апарату, який знаходиться при зовнішньому випадковому кінематичному впливі у діапазоні частот 0..2000 Гц з заданою спектральною густиною. Просторовий характер трубопроводів цього класу, їхнє розгалуження приводить до необхідності дослідження вигнено-поздовжньо-крутильних коливань. У трубопроводах допускається наявність проміжних опор.

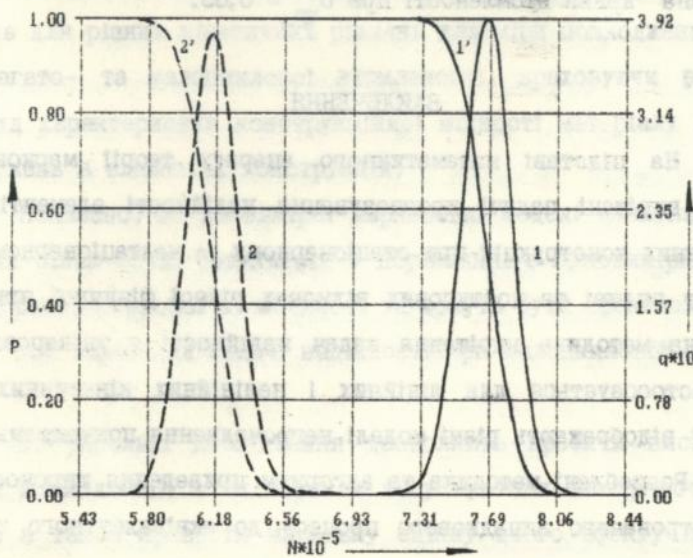
З меток перевірки працездатності запропонованої методики на випробувальному комплексі, який включає до себе електродинамічний вібростенд ВЕДС-1500 і апаратуру для випробування на випадкове навантаження "Тапір", були проведені дослідження по визначенню власних частот конструкції та імовірносних характеристик параметрів НДС.

На другому етапі розрахунку надійності використовуються результати вирішення задачі випадкових коливань. Визначені найбільш небезпечні з точки зору НДС елементи конструкції, і, використовуючи характеристики втомленості, які отримані на зразках трубопроводу, проведені розрахунки показників надійності. У розрахунках застосовувалися: 1) детермінована крива втомленості при  $\sigma_{1g\sigma-1} = 0,0$  (мал.2, суцільна лінія); 2) імовірносна крива втомленості при  $\sigma_{1g\sigma-1} = 0,05$  (мал.2, пунктирна лінія). На мал. 3 подані графіки ІБР (суцільна крива 1' та пунктирна крива 2') і густини імовірності відмов (суцільна крива 1 та пунктирна крива 2), а також значення середнього часу до руйнування (у циклах) для відповідно першого та другого варіантів завдання кривої втомленості.

Розглядається визначення показників надійності навісного вузла для кріплення акумуляторної батареї автомобіля КамАЗ при зовнішньому випадковому кінематичному впливі у діапазоні частот



Мал. 2.



$$T_2 = 615275.6$$

$$T_1 = 767300.2$$

Мал. 3.

0..50 Гц з заданою спектральною густиною. Характеристики визначені з експериментальних даних, які отримані під час визначення навантаженості несучих вузлів і деталей цього автомобіля при рухові по ґрунтовій дорозі зі швидкістю 50 км/год.

У роботі реалізовано дворівневий підхід до вирішення задачі випадкових коливань, при якому на першому етапі розглядається весь об'єкт, що досліджується, (модель першого рівня) як коробчата конструкція у вигляді набору пластин. Далі проводиться уточнений розрахунок НДС окремих, найбільш напружених елементів конструкції (модель другого рівня). Як такий елемент досліджується кутток, за допомогою якого навісний вузол кріпиться до таврової балки і розглядається як складова пластинчаста конструкція.

На другому етапі згідно з викладеною методикою були проведені розрахунки показників надійності. У розрахунках застосовувалися: 1) детермінована крива втомленості при  $\sigma_{lgo-1} = 0,0$ ; 2) імовірнісна крива втомленості при  $\sigma_{lgo-1} = 0,05$ .

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

1. На підставі математичного апарату теорії марковських процесів вирішені задачі прогнозування надійності елементів машинобудівних конструкцій при стаціонарному та нестаціонарному випадковому впливі та поступових відмовах різної фізичної природи. Розроблена методика вирішення задач надійності є універсальною, тобто застосовується для лінійних і нелінійних кінетичних рівнянь, які відображають різні моделі нагромадження пошкоджень.

2. Розроблені методика та алгоритм приведення широкосмугового центрованого випадкового процесу до еквівалентного за пошкоджуючою дією вузькосмугового центрованого випадкового процесу, що дозволяють використовувати для цього класу процесів існуючі

кінетичні рівняння для міри пошкоджень. Вирішена задача адекватної апроксимації за різними критеріями, що використовуються для вирішення задач надійності, густин імовірності параметрів НДС.

3. Розроблені чисельні методи вирішення задач надійності на підставі одновимірних марковських моделей і кінетичних рівнянь для міри нагромадження пошкоджень від втомленості та швидкості поширювання тріщини (лінійна та нелінійна моделі). Показані ефективність застосування під час вирішення указаних задач методу скінченних різниць і можливість використання одновимірних марковських моделей під час вирішення задач надійності тільки в області багатоциклової втомленості.

4. Розроблені чисельні методи вирішення задачі надійності для вузькосмугових процесів на підставі двовимірних марковських моделей і лінійної моделі нагромадження пошкоджень з використанням операційного методу і розкладання характеристичної функції міри пошкоджень за ортогональними поліномами Лагерра. Задача вирішена для різних кінетичних рівнянь для міри пошкоджень в області багато- та малоциклової втомленості, враховуючи випадковий розкид характеристик конструкційної міцності матеріалу і середніх напружень в елементах конструкцій.

Показано, що двовимірні марковські моделі дозволяють отримувати більш точні результати у порівнянні з одновимірними в області багатоциклової втомленості та можуть бути ефективно використані для вирішення задачі надійності при малоцикловій втомленості.

5. Чисельні дослідження дозволяють зробити висновок про ефект нормалізації з спливанням часу густини імовірності пошкоджень, а також провести чисельну оцінку цього ефекту для різних часових інтервалів. До факторів, істотно впливаючих на цей процес, відносяться розкид межі витривалості та нестационарність

процесу навантаження.

6. Вирішена задача випадкових коливань просторового розгалуженого трубопроводу літального апарату та навісних вузлів автомобіля КамАЗ при випадковому кінематичному впливі. Для розрахунку параметрів НДС застосовувався метод скінченних елементів. Використовувалися стрижньові скінченні елементи кільцевого поперечного перерізу і тонкі довільно орієнтовані у просторі прямокутні та трикутні скінченні елементи. Визначені імовірність безвідмовної роботи, густина відмов і середній ресурс при імовірносному завданні кривої втомленості матеріалу.

#### СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Прогнозирование надежности элементов конструкций с трещинами при случайном воздействии // Динамика и прочность машин: Респ. междувед. науч.-техн. сб.-Харьков, 1988.-Вып. 48.-С. 56-62.
2. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Применение двумерных марковских моделей к решению задач надежности при узкополосном случайном нагружении // Динамика и прочность машин: Респ. междувед. науч.-техн. сб.-Харьков, 1993.-Вып. 53.-С. 161-172.
3. Случайные колебания панелей летательных аппаратов / Жовдак В.А., Иглин С.П., Мищенко И.В. и др. // Динамика и прочность машин: Респ. междувед. науч.-техн. сб.-Харьков, 1993.-Вып. 54.-С. 175-182.
4. Жовдак В.А., Иглин С.П., Мищенко И.В. Прогнозирование надежности и оптимизация конструкций на основе кумулятивных марковских моделей в многомерном случае // Расчет и управление надежностью больших механических систем: Инф. материалы VI Всесоюзной школы.-Свердловск, 1986.- С. 205-206.

5. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Применение механики разрушения для расчета надежности конструкций с трещинами при случайном воздействии // VIII Symposium Verformung und Bruch.-Magdeburg 1988.-S. 170.
6. Иглин С.П., Мищенко И.В. Надежность и оптимизация пластинчатых систем // Расчет и управление надежностью больших механических систем: Инф. материалы VII Всесоюзной школы.-Свердловск, 1988. - С. 115.
7. Расчет ресурса панелей летательных аппаратов при усталостных отказах / Жовдак В.А., Иглин С.П., Мищенко И.В. и др. // III Всесоюзная конференция "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов": Тез. докл.-Казань, 1988.- С. 86.
8. Жовдак В.А., Мищенко И.В., Трубаев А.И. Расчет надежности трубопроводов при стационарном и нестационарном случайных воздействиях и усталостных отказах // Всесоюзная конференция "Волновые и вибрационные процессы в машиностроении": Тез. докл. [Ч.2].-Горький, 1989.-С. 90.
9. Мищенко И.В. Случайные колебания и надежность панелей летательных аппаратов // Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ": Тез. докл.-Киев, 1989.- С. 31.
10. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Применение марковских моделей к решению задач надежности при постепенных отказах // Расчет и управление надежностью больших механических систем: Инф. материалы VIII Всесоюзной школы.-Свердловск, 1990.-С. 79.
11. Расчет надежности трубопроводов при случайных вибрациях и вероятностном описании характеристик усталости / Демидов Н.И., Жовдак В.А., Мищенко И.В., Трубаев А.И. // XXIII Всесоюзное

совещание по проблемам прочности двигателей: Тез. докл.-Москва, 1990.- С. 82.

12. Жовдак В.А., Иглин С.П., Мищенко И.В. Расчет случайных колебаний и надежности пластинчато-стержневых конструкций при вероятностном описании характеристик усталости // Прочность и колебания конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках: Матер. науч. конф.-Запорожье, 1993.-С. 12.

13. Жовдак В.А., Иглин С.П., Мищенко И.В. Разработка пакета программ расчета надежности элементов машиностроительных конструкций при различных типах случайной нагрузки // Компьютер: наука, техника, технология, здоровье: Тез. докл.-Харьков, Мишколиц, 1993.- С. 31-32.

14. Жовдак В.О., Мищенко И.В. Прогнозування надійності та ресурсу елементів машин та конструкцій при випадковому навантаженні // I-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей.-Львів, 1993.-С. 214.

15. Жовдак В.А., Мищенко И.В., Тарасова Л.Ф. Определение гарантированного ресурса лопаток паровых турбин при неполном задании информации о внешних случайных нагрузках // Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов: Тез. докл.Ч.31-Харьков, 1994.-С. 64.

#### А Н Н О Т А Ц И Я

Мищенко И.В. Разработка методов решения задач надежности элементов конструкций при постепенных отказах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

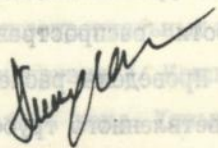
05.02.09— динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. Харьковский гос. пол. ун-тет, Харьков, 1996. Защищается диссертация, в которой предлагается методика решения задач надежности элементов машиностроительных конструкций при стационарном и нестационарном случайном воздействии и постепенных отказах различной физической природы. В основу методики положены математический аппарат теории марковских процессов (одномерные и двумерные модели) и кинетические уравнения для меры накопления усталостных повреждений и скорости распространения трещины (линейная и нелинейная модели). Проведены расчеты показателей надежности пространственного разветвленного трубопровода летательного аппарата и навесных узлов автомобиля КАМАЗ, находящихся при случайном кинематическом воздействии.

Ключові слова: випадковий вплив, міра пошкоджень, тріщина, багато- та малоциклова втомленість, марковські процеси, густина імовірності, імовірність безвідмовної роботи, густина відмов.

#### S U M M A R Y

Mishchenko I.V. Structure components probability due to the drift failures problem decision methods elaboration. The thesis for a Candidate's degree on speciality 05.02.09 - dynamics, strength of machines, devices and equipment. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1996. The thesis contained the structure components subjected to stationary or non-stationary random input probability due to the various character drift failures problem decision methods is defended. The Markov's process theory mathematical means (one-dimensional and two-dimensional models) and cu-

mulative damage and crack propagation kinetic equations (linear and non-linear models) are on the method basis. The reliability characteristics calculations for the spaced ramified tube-conducted structure of the flying object and automobile KamAZ-hung up units under random kinetic input have been carried out.



Підп. № друку 25.06.96. Формат 60x84/16. Ціна друку  
Ук. друку, фол. 1.0. Тираж 100. Зам. 35-10.

Хмельницький державний політехнічний університет,  
редакція видавничої служби  
Надруковано за розграфією ХДПУ  
310002, м. Хмельницький, вул. Фрунзе, 21



---

Підп. до друку 28.06.96. Формат 60x84/16. Папір друк.  
Ум. друк. арк. 1.0. Тираж 100. Зам. 35-10.

---

Харківський державний політехнічний університет,  
редакційно-видавничий відділ.  
Надруковано на ризографі ХДПУ.  
310002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

122 22 25

AB 35.599