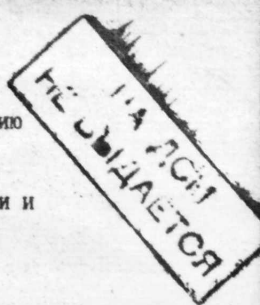


М 85497

Государственный комитет СССР по народному образованию

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана



На правах рукописи

УДК 629.11.012.8

ЖИЛЕЙКИН МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ И
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ
АВТОМОБИЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТЕНДОВЫХ И ДОРОЖНЫХ
ИСПЫТАНИЙ

05.05.03. - Автомобили и тракторы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1991

Работа выполнена на кафедре "Колесные машины" Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент ГАЛАШИН В. А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
ДМИТРИЧЕНКО С. С.
- кандидат технических наук,
доцент ПЕТРЕНКО А. М.

Ведущая организация -

Защита диссертации состоит из 3 часов на заседании специализированного совета "Транспортное машиностроение" 107005, Москва, 2-я Бауманская ул.

Ваши отзывы на автореферат прошу направлять по адресу: Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, к. 107005.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета имени Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан " 10 " 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
доктор технических наук,
профессор

М 85497



1085497

Жилейкин М.М. Разработка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в отечественном и зарубежном автомобилестроении наметилась тенденция сокращения в общем объеме экспериментально-исследовательских работ доли эксплуатационных и полигонных испытаний, которые успешно заменяются стендовыми. При этом наибольшие успехи достигнуты в оценке долговечности конструкции при накоплении необратимых повреждений (усталость, износ и т.п.). Возросло значение стендовых испытаний и в процессе разработки новых узлов автомобилей.

В связи с этим актуальной является задача разработки методов адекватного воспроизведения нагрузочных режимов агрегатов автомобиля в стендовых условиях, что, в свою очередь, требует разработки специальных моделей, имитирующих эксплуатационные условия; моделей процессов нагружения, и методов определения их параметров.

Однако существующие методы испытаний при нормальных (не ускоренных) режимах нагружения не всегда применимы на стадии проектирования, доводки и изготовления опытных образцов из-за своей продолжительности и трудоемкости. Поэтому (также) актуальной является задача разработки методов прогноза долговечности при нормальных условиях эксплуатации по результатам стендовых ускоренных (в том числе и форсированных) испытаний изделия. При этом необходимо учитывать влияние на долговечность агрегатов как жесткости нагружения (амплитудно-частотно-фазовый состав), так и "истории" процессов нагружения.

Целью исследования является создание методики прогнозирования показателей надежности (ПН) агрегатов автомобиля по результатам стендовых и дорожных испытаний (на примере упругих элементов подвески автомобилей).

Методы исследований. Основными методами, которые использовались при проведении экспериментальных исследований, являются методы теории планирования эксперимента, регрессионного, корреляционного, спектрального и взаимного спектрального анализа.

Основным методом, использованным при воспроизведении условий эксплуатации и реализаций процессов нагружения, является метод статистического моделирования (Монте-Карло).

При получении гармонического эквивалента случайного нестационарного многомерного процесса использовались методы линейной фильтрации (преобразование Гильберта), а также методы ~~нелинейного преобразования процессов.~~

7645841

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель и методика моделирования случайного нестационарного многомерного процесса нагружения агрегатов автомобиля, учитывающая взаимосвязь статистических характеристик процесса с условиями эксплуатации, что позволяет воспроизводить амплитудно-частотно-фазовую структуру реальных процессов, а также "историю" нагружения;
- предложена методика моделирования блокового гармонического процесса нагружения, эквивалентного реальному нестационарному случайному процессу нагружения по амплитудно-частотно-фазовой структуре, а также "истории" нагружения;
- разработана марковская полуэмпирическая модель изменения во времени параметра, определяющего работоспособность изделия, позволяющая по результатам стендовых форсированных ресурсных испытаний при гармоническом нагружении прогнозировать показатели надежности изделия при нормальных (не форсированных) условиях эксплуатации с помощью моделирования этих условий на ЭВМ.

Практическая ценность. Проведены комплексные исследования режимов нагружения металлорессорной подвески магистрального автопоезда семейства МАЗ, а также пневматической подвески автобусов. Выявлен механизм разрушения резинокордных оболочек (РКО) и разработаны рекомендации по изменению конструкции пневмоэлементов и РКО, позволяющие увеличить ресурс пневморессор.

Разработанные пакеты прикладных программ позволяют автоматизировать процесс сбора и обработки информации о нагрузочных режимах агрегатов автомобиля по результатам дорожных исследований, проводить определение ПН изделий на стадии доводочных испытаний.

Реализация результатов работы. Разработанные методики моделирования эксплуатационных условий работы и пакеты прикладных программ по автоматизации процесса сбора и обработки информации о нагрузочных режимах агрегатов автомобилей по результатам дорожных исследований используются на НИЦИАМТ в отделе испытаний прочности и вибраций автомобилей и отделе испытаний грузовых автомобилей при испытаниях и доводке новых образцов автомобильной техники.

По результатам работы выпущено три отраслевых методических руководящих документа, рекомендованных к внедрению в ав-

томобильной промышленности.

Комплекс эксплуатационных мероприятий по повышению долговечности пневматических резинокордных упругих элементов подвески троллейбусов внедрены в троллейбусном парке N 2 г. Москвы в 1988 г. с годовым экономическим эффектом 29700 руб. и снижением трудоемкости ремонта подвески троллейбусов на 427 чел.-часов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы полностью доложены на научных семинарах кафедры "Колесные машины высокой проходимости" МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1986 - 91 г.г., на конференциях факультета Специального Машиностроения МГТУ в 1988 г. и в 1990 г., на научно-технической конференции, проводимой кафедрой "Автомобили" МАДИ в 1989 г., а также на НТС НИЦИАМТ.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в восьми печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников (106 наименований), приложения. Содержание работы изложено на 212 с., включающих 143 с. машинописного текста, 21 таблицу, 47 рис.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, выявлены проблемы, возникающие при проведении доводочных испытаний колесных машин и поставлена цель работы.

В первой главе дан обзор работ, посвященных методам ресурсных испытаний и определения ПН изделий машиностроения.

Изучению вопросов, связанных с повышением надежности и долговечности конструкций, посвящено большое число исследований ученых и инженеров. Теоретические основы, общая постановка и решение задач надежности и долговечности содержатся в работах Б.В.Гнеденко, Х.В.Кордонского, А.С.Проникова, В.С.Пугачева, Я.В.Шора и др.

Способы вероятностно-статистической оценки выносливости материалов, действующих нагрузок и методы расчета на долговечность и надежность силовых конструкций приведены в работах В.В.Волотина, С.С.Дмитриченко, В.П.Когаева, Д.Н.Решетова, С.В.Серенсена, М.Н.Степнова, Барлоу, Прохана, Райса и др.

Оценка фактической работоспособности изделий эксперимен-

тально-теоретическими методами приобрела за последнее время широкое распространение. Разработка методов ускоренных испытаний, оценка их точности нашли отражение в исследованиях Н. А. Бухарина, Е. И. Бурдасова, Р. В. Кутеля, В. С. Лукинского, А. Н. Островцева, И. Г. Пархиловского, Р. В. Ротенберга, В. Л. Райхера, Р. С. Судакова, О. И. Тескина, В. П. Шалдыкина, И. Г. Цитовича, Н. Н. Яценко.

Несмотря на достигнутые результаты, методы расчета долговечности деталей автомобиля практически не используются при проектировании (исключения составляют шестерни, валы и подшипники коробок передач и главных передач). Основная причина - невысокая точность и достоверность рассчитываемых ресурсов, что объясняется гипотетическим характером используемых зависимостей, статистическими свойствами предельных состояний и трудностью задания нагрузочных режимов, соответствующих реальным условиям эксплуатации. В соответствии с данной проблемой была поставлена цель работы, решить которую можно путем создания, с одной стороны, моделей реальных режимов нагружения изделий и, с другой стороны, методики прогнозирования ПН объектов на основе модельного представления процессов накопления повреждений.

Вторая глава посвящена разработке модели и методики моделирования условий эксплуатации автомобиля и реальных случайных нестационарных многомерных процессов нагружения его агрегатов.

Подробно рассмотрены случайные процессы деформации листовых металлорессор подвески автопоезда МАЗ-54322, которые являются гауссовскими, стационарными и эргодическими при неизменных условиях движения, т. е. в установившихся режимах. Однако при эксплуатации скорость движения не постоянна в течение длительного промежутка времени. В этом случае условия стационарности не выполняются. Режимы нагружения, соответствующие установившемуся движению, повторяются, поэтому случайные процессы рассматриваются как кусочно-стационарные и кусочно-эргодические. С учетом принятых допущений повторяемость установившихся режимов нагружения определяется процессом повторяемости скоростей движения в эксплуатации.

Как показывает анализ результатов дорожных (магистральных и полигонных) испытаний, все многообразие эксплуатационных условий движения автомобиля по различным дорогам можно разбить

на следующие характерные режимы:

1. прямолинейное равномерное движение с постоянной нагрузкой по дороге с однородным покрытием;
2. движение под (на) уклон и поворот с постоянной скоростью и нагрузкой по дороге с однородным покрытием;
3. движение с постоянной нагрузкой по дороге с однородным покрытием, но с переменной скоростью (разгон, торможение).

Как показывают результаты дорожных испытаний автопоезда в магистральном режиме движения, любые представляющие интерес нестационарные свойства четырехмерного гауссовского процесса деформации упругих элементов подвески при движении автомобиля с постоянной скоростью полностью описываются изменениями во времени среднего квадрата.

Показано, что вектор дисперсий в данных условиях движения представляет собой двумерное векторное поле, характеристики которого зависят для дороги данного вида от величины загрузки автомобиля и скорости его движения.

Проведенные исследования свойств временной реализации математического ожидания показывают, что изменений значений математического ожидания во времени не являются значимыми для зафиксированных условий движения. Среднее значение реализации математического ожидания процесса практически равно статическому прогибу подвески.

Следовательно, мы можем принять следующую модель векторного процесса деформаций упругих элементов подвески при равномерном прямолинейном движении автомобиля с постоянной нагрузкой по дороге с однородным покрытием:

$$\vec{X}(t) = \vec{m}_x(G) + \vec{G}_x(t, v, G) \vec{X}_0(t) \quad (1)$$

где: $\vec{X}(t)$ - исследуемый векторный процесс деформаций упругих элементов подвески;

$\vec{m}_x(G)$ - детерминированный вектор статических прогибов (математических ожиданий) упругих элементов подвески, зависящий только от величины загрузки автомобиля G ;

$\vec{G}_x(t, v, G)$ - двумерное векторное поле с.к.о. процесса $\vec{X}(t)$;

$\vec{X}_0(t)$ - векторный гауссовский процесс со стационарными и стационарно связанными составляющими с $m_{X_0} = 0$ и $G_{X_0} = 1$;

t - время;

v - скорость движения автомобиля.

Наличие математической модели исследуемого НСП необходимо для методологической обоснованности процедуры оценки его статистических характеристик, основная идея которой заключается в том, что зависимость параметров процессов от условий движения можно исследовать путем обработки записей реализаций при движении автомобиля на мерном участке при фиксированных значениях условий движения (скорость, нагрузка, тип дороги).

Как показали результаты заездов на мерных участках, спектральная и корреляционная матрицы процесса $\vec{X}_0(t)$ зависят от скорости движения и загрузки автомобиля для данных дорожных условий. Для исследования этой зависимости разложим корреляционные и взаимные корреляционные функции $\rho_{ij}(\tau, v, G)$ составляющих процесса $\vec{X}_0(t)$ по ортонормированному базису. При этом формула разложения имеет вид

$$\rho_{ij}(\tau, v, G) = \sum_{k=0}^m C_k(v, G) \varphi_k(\tau); \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

где: $\varphi_k(\tau)$ - заданная система линейно независимых функций;
 $C_k(v, G)$ - зависящие от скорости и загрузки автомобиля коэффициенты разложения.

Зависимость параметров $C(v, G)$ от величин v, G для данного типа дорог определяется в результате дорожных испытаний автомобиля методами планирования эксперимента.

Для учета зависимости характеристик двумерного векторного поля дисперсий процесса от скорости движения и нагрузки предлагается следующий подход. Достаточно оценить лишь форму двумерной плотности вероятности для различных типов дорог и описать законы изменения ее параметров.

Для этого полезно аппроксимировать двумерную плотность вероятности случайных величин частичной суммой ряда, представляющего собой разложение функции плотности по ортогональным функциям. Формально упомянутый ряд для произвольной двумерной плотности вероятности $p(x, y)$ можно записать следующим образом

$$p(x, y) = p(x)p(y) \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} C_{kr} Q_{1k}(x) Q_{2r}(y) \quad (3)$$

где: $Q_{1k}(x)$ и $Q_{2r}(y)$ - ортогональные нормированные полиномы.

$$C_{k,r} = M[Q_{1k}(x) Q_{2r}(y)] = \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) Q_{1k}(x) Q_{2r}(y) dx dy \quad (4)$$

Коэффициенты разложения $C = C(v, G)$ зависят от значений скорости и загрузки автомобиля. Характер этой зависимости исследуется по результатам дорожных испытаний методами теории планирования эксперимента.

Одномерные плотности вероятности $p(x)$ и $p(y)$ аналогично можно формально представить в виде ряда Эджворта.

Для разложения двумерной плотности в ряд использовались полиномы Эрмита. Коэффициенты разложения определены согласно (4).

Модель процессов деформации упругих элементов при движении автомобиля под (на) уклон и поворот с постоянной скоростью и нагрузкой по дороге с однородным покрытием практически полностью совпадает с предыдущим случаем - формула (1). Разница заключается лишь в том, что вектор математических ожиданий представляет собой сумму двух детерминированных составляющих

поворот: $\bar{m}_x(G) + \Delta \bar{m}_x(G, v, R)$

движение на

(под) уклон: $\bar{m}_x(G) + \Delta \bar{m}_x(G, \alpha)$

где: R - радиус поворота; α - угол уклона.

Зависимость математического ожидания процесса от указанных параметров определялась экспериментально.

По результате дорожных испытаний магистрального автопоезда МАЗ-54322 была установлена значимая корреляция ($K_2 \approx 0,8714$) между коэффициентами C_{ij} разложения в ряд статистических характеристик четырехмерного гауссовского процесса деформаций подвески и параметрами движения автомобиля (скорость и загрузка) для каждого типа дорожного покрытия. Поэтому, в качестве функций отклика были приняты указанные коэффициенты C_{ij} , а независимыми факторами - скорость движения v и нагрузка G .

Для получения информативной многофакторной математической модели зависимости коэффициентов C_{ij} от указанных факторов был использован полный факторный план эксперимента 3^2 с варьированием двух управляемых факторов на трех уровнях: минимальный (-1), средний (0), максимальный (+1) с тремя повторениями в каждом опыте.

При проведении дорожного эксперимента необходимо учиты-

вать влияние нерегулируемых, или внешних, переменных. В данном случае к таким переменным относятся квалификация водителя и состояние дорожного покрытия для одного типа дорог (например, асфальтовое шоссе может иметь различное качество полотна).

Т.к. невозможно исключить влияние этих внешних переменных или вычислить поправку на их воздействие, необходимо свести к минимуму их эффект путем рандомизации, позволяющей распределить влияние внешних факторов более или менее равномерно по всем условиям эксперимента. Для этого был построен план по методу латинского квадрата типа 3×3 . Далее для каждого повторения опыта проводится осреднение по всем внешним переменным.

Разработанная модель процессов нагружения позволяет проводить моделирование реализаций этих процессов за какой угодно большой промежуток времени, при этом сохраняется как амплитудно-частотно-фазовая структура процесса, так и "история", т.е. многомерные вероятностные характеристики $p(t_1, t_2, \dots)$, что является особенно важным при проведении стендовых ресурсных испытаний агрегатов автомобиля с целью оценки их показателей надежности.

Третья глава посвящена разработке модели блокового гармонического процесса, эквивалентного реальному случайному нестационарному многомерному процессу.

Для нормальных случайных функций оказывается весьма эффективным метод исследования, состоящий в том, что вместо исходной нормальной случайной нестационарной функции $X(t)$, которую мы будем считать вещественной и обладающей нулевым математическим ожиданием, вводятся две новые независимые между собой функции $A(t)$ и $\Phi(t)$, более удобные для исследования, чем функция $X(t)$. Примем $X(t) = A(t) \cos \Phi(t)$. Введем $Y(t) = A(t) \sin \Phi(t)$. При этом процессы $X(t)$ и $Y(t)$ связаны преобразованием Гильберта и справедливы соотношения

$$R_y(t_1, t_2) = R_x(t_1, t_2); \quad R_{xy}(t_1, t_1) = 0;$$
$$R_{xy}(t_1, t_2) = R_{yx}(t_2, t_1) = -R_{yx}(t_1, t_2)$$

В данном случае процесс $X(t)$ может рассматриваться как гармоническое колебание, модулированное по амплитуде и фазе случайными функциями $A(t)$ и $\Phi(t)$.

В работе получены одномерные и двумерные плотности распределения вероятностей огибающей $A(t)$ и фазы $\Phi(t)$ гауссовского

нестационарного случайного процесса (НСП) $X(t)$.

$$p(A, \varphi) = \frac{A}{2\pi\sigma^2(t)} \exp[-A^2/2\sigma^2(t)] = p(A) \cdot p(\varphi) \quad (5)$$

$$p(A) = \int_0^{2\pi} p(A, \varphi) d\varphi = \frac{A}{\sigma^2(t)} \exp[-A^2/2\sigma^2(t)] \quad (6)$$

$$p(\varphi) = \int_0^\infty p(A, \varphi) dA = \frac{1}{2\pi} \quad (7)$$

Случайные функции $A(t)$ и $\Phi(t)$ независимы между собой в один и тот же момент времени, и при этом $A(t)$ оказывается подчиненной нестационарному закону распределения Релея с плотностью вероятности (6), а функция $\Phi(t)$, играющая роль фазы - закону равномерного распределения (7) с параметром 2π .

Для совместной плотности вероятности огибающей $A(t)$ и фазы $\Phi(t)$ в два момента времени t и $t + \tau$ для НСП $X(t)$ получим

$$p(A_1, A_2, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{A_1 A_2}{4\pi^2 |\bar{R}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2|\bar{R}|^{1/2}} [\sigma^2(t)(A_1^2 + A_2^2) - 2R_x(t, \tau)A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - 2R_{xy}(t, \tau)A_1 A_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1)]\right\} \quad (8)$$

$$A_1, A_2 \geq 0; \quad 0 \leq \varphi_1, \varphi_2 \leq 2\pi$$

Поскольку двумерная плотность вероятности (8) зависит от t и τ , то огибающая $A(t)$ и случайная фаза $\Phi(t)$ являются нестационарными процессами.

Двумерная плотность вероятности огибающей НСП равна

$$p(A_1, A_2) = \frac{A_1 A_2}{\sigma^2(t)[1 - \rho^2(t, \tau)]} \exp\left\{-\frac{A_1^2 + A_2^2}{2\sigma^2(t)[1 - \rho^2(t, \tau)]}\right\} \times I_0\left(\frac{\rho(t, \tau)}{1 - \rho^2(t, \tau)} \frac{A_1 A_2}{\sigma^2(t)}\right), \quad \rho^2(t, \tau) = [R_{xy}^2(t, \tau) + R_x^2(t, \tau)]/\sigma^4(t) \quad (9)$$

где: $I_0(x)$ - функция Бесселя нулевого порядка мнимого аргумента

В предельном случае при $|\tau| \rightarrow \infty$, $I_0(0) = 1$. При этом двумерная плотность вероятности (9) равна произведению одномерных плотностей вероятностей $p(A_1, A_2) = p(A_1)p(A_2)$ т.е. значения огибающей $A(t)$ и $A(t + \tau)$ при $|\tau| \rightarrow \infty$ становятся независимыми.

Двумерную плотность вероятности случайной фазы можно найти из (8) интегрированием по лишним переменным A_1 и A_2 .

$$p(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{1 - \rho^2(t, \tau)}{4\pi^2} \left\{ \frac{[1 - \rho(t, \tau)]^{1/2} - \rho(t, \tau) [\pi - \alpha \tau \cos \varphi(t, \tau)]}{[1 - \rho^2(t, \tau)]^{1/2}} \right\} \\ \varphi(t, \tau) = \rho(t, \tau) \cos [\varphi_2 - \varphi_1 + \gamma(t, \tau)]; |\gamma| \leq 1 \quad (10)$$

$$\gamma(t, \tau) = -\alpha \tau \operatorname{tg} [R_{xy}(t, \tau) / R_x(t, \tau)]$$

При $|\tau| \rightarrow \infty$, когда $\rho(t, \tau) \rightarrow 0$, имеем

$$p(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{1}{(2\pi)^2}$$

На основании выражений (8) - (10) можно убедиться, что

$$p(A_1, A_2, \varphi_1, \varphi_2) \neq p(A_1, A_2) p(\varphi_1, \varphi_2)$$

т.е. огибающая и фаза НСП (также, как и стационарного), не являются независимыми процессами в различные моменты времени.

Полученные теоретические выводы подтверждены в работе экспериментально.

Для вычисления числа циклов эквивалентного гармонического процесса, соответствующего определенному пробегу автомобиля в реальных условиях, разобьем диапазоны изменения процесса $A(t)$ и $\Phi(t)$ на поддиапазоны шириной соответственно ΔA , $\Delta \Phi$, средними значениями соответственно A_c , Φ_c . В пределах одного поддиапазона будем считать изменяющуюся величину $A(t)$ и $\Phi(t)$ постоянной и равной среднему значению поддиапазона. В этом случае каждый из указанных НСП можно представить в виде дискретного марковского процесса с конечным числом состояний, который в случайные моменты времени может скачкообразно переходить в соседние состояния (т.е. значения процессов могут меняться на ± 1). Примем, что вероятность перехода процесса в следующее состояние зависит от того, в каком состоянии находится процесс в настоящий момент, и в каком состоянии он находился на предыдущем шаге.

Разработаны методики моделирования реализаций эквивалентных гармонических процессов, алгоритмы которых основаны на определении и воспроизведении многомерных и условных вероятностных характеристик $p(A, \Phi)$, $p(A/\Phi)$, учитывающих взаимосвязь всех случайных параметров модели на основе формулы полной вероятности Байеса.

Результатом моделирования процессов нагружения по предла-

гаемой методике является набор чередующихся во времени значений среднего, амплитуды, частоты и фазы для каждой составляющей многомерного процесса нагружения

В четвертой главе представлены материалы по разработке полумпирической модели надежности изделия. Основная идея предлагаемой методики заключается в том, что параметры модели надежности изделия могут быть получены по результатам стендовых ресурсных испытаний при форсированном нагружении, но они перекрывают также и нормальные режимы. В нормальных (не форсированных) условиях проводятся испытания модели надежности, нагружаемой спектром нагрузок на ЭВМ.

Наиболее существенными, вызывающими длительные простои автомобиля, являются отказы из-за усталостного разрушения и износа деталей. Эти повреждения относятся к разряду кумулятивных, т.е. накопленных необратимых механических повреждений. В указанных условиях наиболее приемлемым типом модели надежности являются феноменологические вероятностные модели в виде вложенной цепи Маркова.

Для построения модели введены следующие предположения.

1. Процесс эксплуатации изделия состоит из повторяющихся циклов нагружения (ЦН) с постоянными параметрами (жесткостью нагружения).

2. Состояния поврежденности дискретны и обозначены через $1, 2, \dots, j, \dots, b$ (отказ).

3. Накопление повреждений в ЦН зависит только от этого ЦН и от состояния повреждения в его начале.

4. Повреждение за ЦН может перейти из состояния, в котором оно находилось в начале этого ЦН, только в состояние с номером, на единицу большим.

С каждым циклом нагружения ассоциируется матрица переходных вероятностей (МПВ) $\vec{P}$, имеющая ленточную структуру. На главной ее диагонали стоят элементы P_j - вероятность остаться в состоянии j за один шаг; над главной диагональю q_j - вероятность перехода повреждения за один шаг из состояния j в состояние $j+1$. Остальные элементы равны нулю.

Из теории марковских цепей известно

$$\vec{P}_x = \vec{P}_0 \prod_{j=0}^x \vec{P}_j = \vec{P}_{x-1} \cdot \vec{P}; \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

$$\vec{P}_0 = \vec{I}$$
(11)

где: $\bar{I}$ - единичная матрица;

$\bar{p}_0$ - вектор-строка начальных распределений по состояниям повреждения;

$\bar{p}_x$ - вектор-строка распределений по состояниям повреждения в момент времени x .

Интегральная функция распределения (ИФР) времени поглощения $F_w(t, b)$ в состоянии b есть $p_x(b)$. Таким образом, в модели КП $w_{1,6}$ становится временем до отказа.

Рассматриваемая модель КП может быть получена с гораздо большей точностью и стать более информативной, если при стендовых ресурсных испытаниях изделия не ограничиваться сбором данных о времени до отказа, а вести наблюдение за эволюцией во времени параметров, определяющих работоспособность агрегата.

Для построения модели в этом случае разобьем весь диапазон значений определяющего параметра (ОП) "а" от начального до предельного на блоки (промежуточные состояния).

Для оценки параметров модели нам потребуется знание оценок первых четырех центральных моментов μ_i , $i=1, \dots, 4$ выборки времени достижения параметром "а" границы каждого блока. Построена квазистационарную модель процесса изменения параметра "а" с единичными скачками.

$$\begin{aligned}\mu_{1j} - \mu_{1j-1} &= \theta_j - 1 + \sum_{i=1}^{q_j-1} \tau_i; \\ \mu_{2j} - \mu_{2j-1} &= \sum_{i=1}^{q_j-1} (\tau_i + \tau_i^2); \\ \mu_{3j} - \mu_{3j-1} &= \sum_{i=1}^{q_j-1} (\tau_i + 3\tau_i^2 + 2\tau_i^3); \\ \mu_{4j} - \mu_{4j-1} - 3\mu_{3j} + 3\mu_{3j-1} &= \sum_{i=1}^{q_j-1} (\tau_i + 7\tau_i^2 + 12\tau_i^3 + 6\tau_i^4); \\ \tau_i &= p_i/q_i; \quad q_i = 1 - p_i\end{aligned} \quad (12)$$

где: n - число блоков; j - число состояний повреждения.

По определенным параметрам модели можно уже судить о характере закона накопления повреждений в изделии. Например, если $q_1 < q_2 < \dots < q_{j-1}$, то это означает, что со временем сопротивляемость изделия разрушению падает, и каждый новый удар наносит все более возрастающий ущерб при прочих рав-

ных условиях. Испытание модели производится спектром нагрузок, аппроксимирующих реальные. Входное воздействие моделируется с помощью алгоритмов, разработанных в главе 3.

Предложена следующая процедура учета зависимости жесткости ЦН от истории нагружения с помощью разрабатываемой модели. Пусть зависимость нагрузок распространяется только на ближайшую слева пульсацию, и характер этой зависимости со временем остается неизменным. В этом случае случайная последовательность МПВ представляет из себя совокупность условных МПВ $\vec{P}_{ij}$ для процесса изменения ОП под действием нагрузки $\vec{L}_i$ для случая, когда в предыдущем ЦН была нагрузка $\vec{L}_i$.

Разработанные до сих пор модели надежности работают в дискретном времени $x = 0, 1, 2, \dots$. Однако когда модель нагружается блоками (циклами) различной (случайной) длительности, приходится иметь дело с МПВ, входящими в уравнение (11), в дробных степенях. Такие матрицы не являются МПВ.

Методом, позволяющим обойти эту трудность, является введение модели с непрерывным временем, но по-прежнему с дискретными состояниями и единичными скачками. В работе получена матрица переходных вероятностей $\vec{P}(t)$ марковского процесса КП в непрерывном времени, элементы которой зависят от "истории" нагружения, жесткости ЦН и от времени воздействия нагрузки с данной жесткостью. Элементы $\vec{P}(t)$ имеют вид

$$p_{ij}(t) = \prod_{k=i}^j a_k \sum_{m=i}^j \frac{e^{-a_k t}}{\prod_{n=i}^{m-1} (a_n - a_{n+1})} ; m \neq k+1; t > 0$$

где: a_k - элементы матрицы инфинитизимальных вероятностей. и зависят от номера состояния повреждения, что, как уже говорилось ранее, позволяет учесть любой (в том числе и нелинейный) характер накопления повреждений.

Все это в совокупности позволяет исследовать поведение функции распределения времени наработки на отказ изделий с различным механизмом разрушения при реальном нестационарном нагружении.

Предлагаемая методика была апробирована при исследовании ПН пневматических упругих элементов (ПУЭ) с резинокордными оболочками (РКО) подвески автобуса. Приведены результаты

стендовых ресурсных испытаний указанных упругих элементов, проанализирован их механизм разрушения. Показано, что основной причиной разрушения ПУЭ с РКО является расслоение стенки оболочки вследствие проникновения в нее газа из внутренней полости пневмоэлемента. Проводилось моделирование ИТР времени работы до отказа ПУЭ с РКО модели Н-48, работающего в составе подвески междугородного автобуса. На рис.1 представлены ИТР времени работы до отказа ПУЭ с РКО в указанных условиях (1 - выборочные ИТР, 2 - средняя ИТР, 3 - доверительная область)

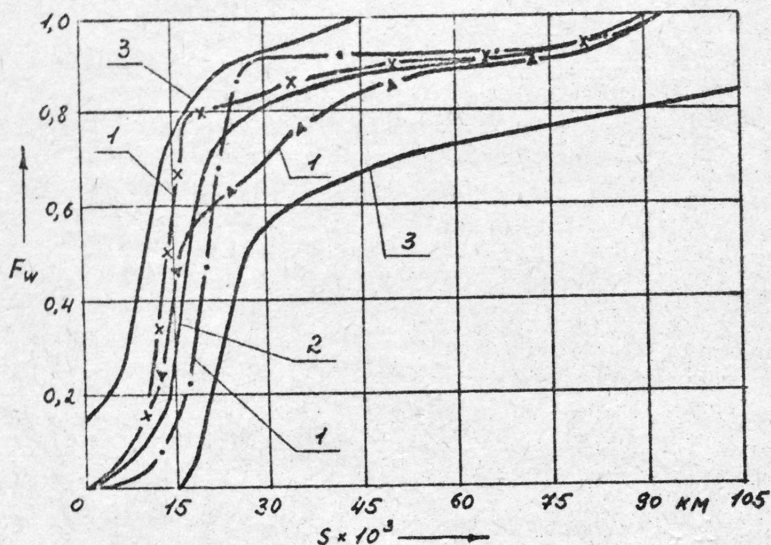


Рис. 1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили установить, что любые представляющие интерес нестационарные свойства случайного многомерного гауссовского процесса деформаций упругих элементов подвески при долговременном прямолинейном равномерном движении автомобиля полностью описываются изменением во времени среднего квадрата процесса. Дисперсия указанного процесса в данных условиях движения представляет собой двумерное векторное поле.

2. Разработана математическая модель и методика моделиро-

вания случайного нестационарного многомерного процесса нагружения агрегатов автомобиля, учитывающая взаимосвязь статистических характеристик процесса с условиями эксплуатации, что позволяет воспроизводить амплитудно-частотно-фазовую структуру реальных процессов, а также "историю" нагружения.

3. Разработана математическая модель и методика моделирования блокового гармонического многомерного процесса нагружения, эквивалентного реальному нестационарному многомерному процессу нагружения по амплитудно-частотно-фазовой структуре, а также "истории" нагружения.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования вероятностных характеристик случайных функций мгновенной амплитуды (огibaющей) и фазы исходного нестационарного случайного процесса. Установлено, что огibaющая и фаза исходного нестационарного случайного гауссовского процесса также являются нормальными и нестационарными. Ординаты этих процессов зависят между собой в статистическом смысле в различные моменты времени.

5. На основе изучения механизма разрушения резинокордных оболочек рукавного типа установлено, что основной причиной, приводящей к выходу пневмозлемента из строя, является диффузия газа из полости пневморессоры в "телo" РКО, что ведет за собой расслаивание и разрыв оболочки. Параметром, определяющим работоспособность пневмозлемента с РКО рукавного типа, является интенсивность утечек газа из его полости.

6. Предложен комплекс мероприятий по повышению долговечности пневматических резинокордных упругих элементов рукавного типа, касающийся изменения конструкции РКО, пневмозлемента, подвески транспортного средства, а также способов монтажа пневморессоры в подвеске. Внедрение указанных мероприятий в 1988 году в троллейбусном парке N 2 г. Москвы позволило повысить ходимость упругих элементов в 1,8 раза, что дало годовой экономический эффект 29700 руб., снижение трудоемкости 427 чел.-часов.

7. Разработана марковская полуэмпирическая модель изменения во времени параметра, определяющего работоспособность изделия, позволяющая по результатам стендовых форсированных ресурсных испытаний при гармоническом нагружении прогнозировать

показатели надежности агрегатов автомобиля при нормальных (не форсированных) условиях эксплуатации с помощью моделирования этих условий на ЭВМ.

По материалам диссертации опубликованы работы:

1. Галашин В. А., Жилейкин М. М. Оценка долговечности пневморессор с резинокордными оболочками рукавного типа подвески транспортных средств // Тр. МВТУ. - 1987. - № 483. - С. 73 - 81.
2. Галашин В. А., Грушников В. А., Жилейкин М. М. Экспериментальное исследование работоспособности рукавных пневморессор // Полигонные испытания, исследование и совершенствование автомобилей: Сб. трудов НАМИ. 1991. - С. 54 - 57.
3. Жилейкин М. М. Методика стендовых ресурсных испытаний агрегатов автомобиля при гармоническом нагружении // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1991. - № 2. - С. 24 - 29.
4. Галашин В. А., Жилейкин М. М. Прогнозирование ресурса пневматических упругих элементов с резинокордными оболочками // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. - 1991. - № 3. - С. 32 - 39.
5. Галашин В. А., Грушников В. А., Жилейкин М. М., Благодарный Ю. Ф. Исследование нагруженности металлорессор подвески магистрального автопоезда // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. - 1991. - № 4. - С. 11 - 18.
6. Галашин В. А., Грушников В. А., Жилейкин М. М. Оценка работоспособности рукавных пневморессор // Всесоюз. конф., посвященная 50-летию НАМИ: Тез. докл. - М., 1988. - С. 64.
7. А. с. 1260588 СССР МКИ F 16 F 9/04 "Упругий элемент" / В. А. Галашин, В. П. Бородин, М. М. Жилейкин, А. В. Соколов (СССР) // В. И. - 1986 - № 36.
8. А. с. 1439325 СССР МКИ F 16 F 9/04 "Пневматический упругий элемент" / В. А. Галашин, В. П. Бородин, М. М. Жилейкин, А. В. Соколов (СССР) // В. И. - 1988 - № 43.

Жилейкин
Тип. МВТУ. Заказ 56 Тираж 100 экз. Подписано к печати 30.01.92г. Объем 1 п. л.

Ротапринт МВТУ. 107005, Москва, В-5, 2-я Бауманская, д. 5