ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи



КОНОНОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 534.014.5:517.96.22

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОМЕРНЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЯДОВ

Специальность 01.02.01. - "Теоретическая механика"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ленинград
1990

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Капалин В.И.;

кандидат физико-математических наук, доцент Петухов Л.В.

Ведущая организация - Ленинградский государственный университет.

Защита диссертации состоится "____" ________________ I990 г., в "____" ч. на заседании специализированного совета К 063.38.20 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук при Ленинградском ордена Ленина политехническом институте имени М.И.Калинина по адресу: I9525I, Ленинград, Политехническая ул., 29, ЛПИ им.М.И.Калинина.

Автореферат разослан "____" ______________ I990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета В.Н.Носов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

Актуальность работы. Широкий спектр разнообразных физических явлений в механике, акустике, электродинамике, гидрогазодинамике и практически во всех динамических системах (ДС) корректно может быть представлен лишь в рамках нелинейного подхода, поскольку такого рода процессы невозможно описать путем простой экстраполяции основных положений линейной теории, основанной на принципах однородности и суперпозиции решений.

Ввиду указанной актуальности задач нелинейной динамики сложились достаточно разнообразные методы в решении этих проблем. Первые обобщающие результаты по нелинейной динамике были получены А.Пуанкаре и Л.Рэлеем, которые заложили основы методов малого параметра и осреднения. Значительный вклад в теорию и ее развитие внесли советские авторы Л.И.Мандельштам, А.А.Андропов, Н.М.Крылов, Н.Н.Боголюбов, Ю.А.Митропольский, В.О.Кононенко, К.В.Фролов, Я.Г.Пановко, К.М.Рагульский, И.И.Блехман, А.И.Лурье, Е.П.Попов и др. Отличительная особенность этих методов заключается в их тесной связи с линейной теорией. Основные задачи формируются на отыскание конкретного решения на определенные внешние воздействия и начальные возмущения. Однако распространить эти решения на произвольные внешние факторы ввиду невыполнения принципов суперпозиции и однородности не представляется возможным.

Альтернативный подход исследования предложил Н.Винер, который использовал введение В.Вольтерра функциональные степенные ряды для описания ДС. В последние годы аппарат функциональных рядов Вольтерра (ФРВ) находит успешное применение в различных областях, однако широкое внедрение затрудняется из-за сложностей вычислительного характера и высокой размерности решаемых задач.

Первоначально ФРВ использовались в системах управления (Л.Заде, В.С.Пугачев, Ю.С.Попков, К.А.Пупков), далее метод нашел применение в теории упругости (А.А.Ильюшин, Б.Е.Победря, Ю.Н.Работнов), в биологических системах (П. и В.Мармареллисы, Дж.Милсэм, Л.Старк), в радиотехнике (Б.М.Богданович, В.Б.Кашкин), в микроэлектронике (Д.А.Кабанов). Значительный вклад в развитие метода ФРВ внесли работы Дж.Баретта, Г.Ван-Триса, М.Щетцена, Р.Флейка, Г.Христенсена, Г.Трота, В.Руха, М.Флиса, П.Кроуча, В.И.Капалина, А.С.Ющенко, С.Н. Музыкина, Ю.М.Родионовой и др. В этих работах рассматривалась теория ФРВ для нелинейных ДС с сосредоточенными параметрами и при одномерном внешнем воздействии. Дальнейшее развитие теории заключается в разработке метода ФРВ на более широкие классы ДС при многомерности внешнего воздействия.

Наибольшим многообразием исследуемых нелинейных ДС обладают задачи механики, к традиционным разделам которой относят вопросы виброзащиты и использования вибрации в сложных многомерных нелинейных механических системах. Учет нелинейных эффектов и явлений позволит существенным образом модернизировать технические средства и оборудование, что приведет к получению значительного технико-экономического эффекта.

Цель работы. Разработка методов математического и программного обеспечения для исследования сложных нелинейных виброзащитных систем при многомерном внешнем воздействии с помощью функциональных рядов Вольтерра. Создание алгоритмов и математического обеспечения ориентировано на достаточно широкие классы нелинейных динамических систем с определением их полных характеристик при минимальных затратах памяти и времени вычисления на ЭВМ.

Методика исследования. На основе общих положений математической теории ДС рассматривались подходы и методы в описании и исследовании сложных нелинейных виброзащитных систем. В качестве аппарата исследования по нелинейной динамике использовались функциональные ряды Вольтерра, многомерные интегральные преобразования и кумулянтный анализ негауссовых случайных процессов.

Научная новизна. В диссертации предлагается теория расчета нелинейных ДС с сосредоточенными и распределенными параметрами, основанного на применении функциональных рядов. В рамках этого подхода были решены следующие задачи.

1. Введены представления многомерных функциональных рядов и их возможные преобразования для многомерных нелинейных стационарных и нестационарных ДС с сосредоточенными и распределенными параметрами.

2. Разработано алгоритмическое и програмное обеспечение по определению множества многомерных передаточных функций для различных типов многомерных нелинейных ДС.

3. На основе кумулянтного представления случайных процессов получены уравнения для нахождения статистических характеристик реакций многомерных нелинейных ДС.

4. Для нелинейных термодинамических систем выведены интегро-дифференциальные уравнения по определению динамических характеристик с учетом процессов нестационарного теплообмена с окружающей средой.

5. С использованием разработанного аппарата многомерных функциональных рядов Вольтерра проведены расчеты гидропневматической частично связанной виброзащитной системы подрессоривания большегрузных тягачей МАЗ-547А Минского автомобильного завода.

Теоретическая и практическая ценность. Метод функциональных рядов Вольтерра распространен на более широкий класс нелинейных ДС, подверженных в общем случае воздействию многомерного случайного процесса. Произведены технические и экспериментальные исследования сложных гидропневматических систем виброзащиты с учетом многомерности внешнего воздействия и нелинейных свойств ее термо- и гидродинамических элементов. Данный подход является одним из первых в исследовании сложных нелинейных виброзащитных систем.

Апробация работы. Основные положения диссертации доказывались и обсуждались на научно-технических конференциях МВТУ им.Баумана (1982, 1988), Белорусского политехнического института (1978, 1980, 1989), Минского автомобильного завода (1982), Конструкторского бюро транспортного машиностроения г.Москвы (1986), Пензенского высшего инженерного артиллерийского училища (1982), Дальневосточного высшего инженерного морского училища им. Адмирала Невельского (1984, 1987) и Челябинского политехнического института (1974-1989).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей, 5 тезисов докладов и 6 научно-технических отчетов по НИР, отражающих ее основное содержание.

Объем работы. Диссертация изложена на 226 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Текст занимает 134 страницы, остальные 92 страницы- рисунки и список литературы из 157 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обзор методов теории нелинейных колебаний. Рассматриваются вопросы о постановке задач исследования и проектирования сложных нелинейных ДС.

В первой главе рассматриваются теоретические основы исследования нелинейных ДС с использованием аппарата математической теории систем, функциональных рядов Вольтерра и теории случайных процессов.

Наиболее общее описание нелинейной, нестационарной, многомерной ДС с распределенными параметрами может быть представлено в виде многомерного функционального ряда Вольтерра

$$\bar{Y}(t)=\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{M}\int\limits_{\Omega}\dots\int\limits_{E^i} H_{ij}(t,\tau_1,\dots,\tau_i,\bar{Y},\xi_1,\dots,\xi_i)\prod_{\substack{k=1\\ \ell=1}}^{i,j} X(\tau_\ell,\xi_k)\,dV_\tau\,dV_\xi, \quad N,M\to\infty$$

где выходной процесс $\bar{Y}(t)$ определяется в виде функционального ряда от $ij$ полиномиальной формы внешнего воздействия $X(\tau_\ell,\xi_k)$, зависящего от временных $\tau_\ell$ и пространственных $\xi_k$ координат, посредством взятия многократного интеграла по заданным объемам $\Omega^j$, $dV_\xi=\prod_{\tau=1}^{\ell} d\xi_\tau$ и $E^i$, $dV_\tau=\prod_{\tau=1}^{k} dt_\tau$ с ядром $H_{ij}(t,\tau_1,\dots,\tau_i,Y,\xi_1,\dots,\xi_j)$ многомерного интегрального преобразования; индексы $i$ и $j$, изменяющиеся от 0 до $N$ и $M$ характеризуют степени нелинейных зависимостей по времени и пространственным координатам.

Частные виды данной функциональной зависимости описывают различные классы ДС. Для нелинейных ДС с сосредоточенными параметрами функциональная зависимость имеет вид:

$$Y(t)=\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=1}^{K(M,i)}\int\limits_{E^i} H_i^{R(M,i)}(t,\tau_1,\dots,\tau_i)\prod_{q=1}^{i} X^{R(M,i,q)}(\tau_q)\,dV_\tau,$$

где интегрирование по области $\Omega^j$ заменяется конечной суммой по числу неупорядоченных выборок $K(M,i)$ $M$-го количества внешних воздействий по $i$ позициям, равного порядку ядра $H_i^{R(M,i)}(t,\tau_1,\dots,\tau_i)$, у которого появился индекс распределения внешнего воздействия $R(M,i)$.

В качестве примера для порядка ядра $i=2$ и трехмерного внешнего воздействия $M=3$ распределения $R(3,2)$ будут следующими (II, I2, I3, 22, 23, 33). Индекс у внешнего воздействия $X^{R(M,i;q)}(\tau_q)$ указывает номер $q=\overline{1,i}$ в текущем распределении $R(M,i)$. В случае одномерного воздействия $M$ = I распределение $k(1,i)\equiv 1$ сумма по $k$ пропадает и мы получаем широко распространенную форму записи функциональных рядов Вольтерра для одномерных систем.

Важным классом ДС являются нелинейные стационарные системы с сосредоточенными параметрами. В этом случае ядра интегрального представления можно записать в разностном виде $H_i^{R(M,i)}(0,\theta_1,\ldots,\theta_i)$, где $\theta_i = t_i - \tau_i$. В этом случае функциональный ряд представляется в виде многомерной свертки и на основании теорем свертки данное выражение может быть представлено в виде

$$Y(S)=\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=1}^{k(M,i)}\left\{H_i^{R(M,i)}(S_1,\ldots,S_i)\prod_{q=1}^{i}X^{R(M,i;q)}(S_q)\right\}^*,\quad N\to\infty$$

где набор функций $H_i^{R(M,i)}(S_1,\ldots,S_i)$ носит название многомерных передаточных функций (МПФ), которые полностью описывают поведение нелинейных ДС при многомерном внешнем воздействии; $S_1,\ldots,S_i$ – соответствуют комплексным аргументам многомерного преобразования Лапласа; оператор $\{\cdots\}^*$ сводит многомерную функцию к одной комплексной переменной $S$.

Использование различных типов интегральных преобразований позволяет существенно упростить задачу исследования ДС. Для систем с распределенными параметрами использование интегральных преобразований позволяет получать пространственно-временные модальные характеристики, основанные на разделении переменных методами Фурье. Общее решение при этом представляется суперпозицией пространственно-временных мод $q_{ke}(t)$ и $\varphi_{ke}(X)$

$$Y(X,t)=\sum_{e=0}^{\infty}a_{ke}\,q_{ke}(t)\,\varphi_{ke}(X).$$

Для каждой моды разложения определяется решение, как для системы с сосредоточенными параметрами. Функциональный ряд для данных нелинейных ДС расширяется дополнительной суммой по модам

$$Y(S)=\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=0}^{k(M,i)}\sum_{e=0}^{P}\left\{H_{ie}^{R(M,i)}(S_1,\ldots,S_i)\prod_{q=1}^{i}X^{R(M,i;q)}(S_q)\right\}^*.\quad N\to\infty,\ P\to\infty$$

Таким образом, используя интегральные преобразования, возможно сводить задачи динамики из временной области в область комплексного переменного, где на основе чисто алгебраических преобразований определяются все основные характеристики ДС.

В случае вырождения ядра интегрального представления $H^{R(M,i)}(t, \tau_1,..,\tau_i)$ по временным координатам система превращается в статическую. Функциональный ряд с использованием фильтрующего свойства $\delta$-функций принимает алгебраическую $i_j$ полиномиальную форму представления

$$Y(t)=\sum_{i=0}^{N}\sum_{\varkappa=1}^{\varkappa(M,i)}\sum_{e=1}^{L(M,i)} H_i^{R(M,i)C(N,i)}\prod_{q=1}^{i} X^{R(M,i,q)}(\tau_i), \quad N\to\infty.$$

Здесь ядро $H_i^{R(M,i)C(N,i)}$ вырождается в константу в виде симметричного тензора соответствующего ранга. Сочетание моментов времени $\tau_i$ по $i$ порядку ядра $C(N,i)$ характеризует реономность характеристик данных систем. Для большинства реальных представлений $L(N,i)=1$, что определяет стационарные, полиномиальные алгебраические характеристики.

Три основных типа связей нелинейных ДС, описываемой соответствующей системой нелинейных преобразований как параллельное, последовательное и множительное, определяет оптимальную структуру хранения элементов множеств МПФ. Определяющими параметрами множества МПФ нелинейной ДС являются максимальный порядок ядра $N$, размерность внешних воздействий $M$, количество модальных характеристик $P$ и интегральное преобразование внешнего воздействия $X(S)$ $Y(S)=\mathcal{F}[N,M,P,X(S)]^*$.

Рассмотрение взаимодействия двух нелинейных ДС, описываемых функциональными рядами $Y1(S)$ и $Y2(S)$ определяет результирующий ряд $YR(S)$ При параллельном соединении двух систем

$$YR(S)=Y1(S)\oplus Y2(S)=FR\{NR, MR, PR, X(S)\}^*.$$

Ввиду общего внешнего воздействия $X(S)$ его размерности должны совпадать, порядок ядра результирующего ядра равен максимальному порядку из ядер, а моды колебаний аддитивно складываются. Элементы множества МПФ определяются следующим образом

$$HR_{ie}^{R(M,i)}(R(S_j))=H1_{ie_1}^{R(M,i)}(R(S_j))+H2_{ie_2}^{R(M,i)}(R(S_j))$$

$$e=\overline{0,P1+P2}\ ;\ e1=\overline{0,P1}\ ;\ e2=\overline{0,P2},$$

где $e\in e1\cup e2$ спектральное разложение результата равно сумме спектров соединяемых звеньев; $R(S_j)$ – распределение комплексных переменных $S_j$ по $i$ позициям. При умножении систем $Y1(S)\odot Y2(S)$ результирующий функциональный ряд $YR(S)$ определяется на основе свойств многомерного преобразования Лапласа и оператора сведения к одной комплексной переменной $\{\cdots\}^*$

$$YR(S)=\{F1\{X1(S)\}^*_{S=S_1}\odot F2\{X2(S)\}^*_{S=S_2}\}^*=FR\{N1+N2,M1\cup M2,P1\cdot P2,XR(S)\}^*,$$

Здесь размерность результирующего внешнего воздействия равна объединению множеств воздействий, степень нелинейности равна сумме степеней, а спектральное разложение равно произведению спектров сомножителей. Ядра результирующего ряда вычисляются по следующей формуле

$$HR_{i\ell}^{R(M,i)}(R(S_j))=\sum_{i1=1}^{i-1}H1_{i1\ell1}^{R(M1,i1)}(R(S_{j1}))H2_{(i-i1)\ell2}^{R(M2,i-i1)}(R(S_{j2})),$$

где порядок результирующих ядер МПФ $i=\overline{2,N1+N2}$; спектральное разложение форм результирующих колебаний $\ell=\ell1\odot\ell2=(P1+1)(P2+1)$; $R(M,i)$ и $R(S_j)$ - соответственно всевозможные распределения индексов внешних воздействий и комплексных аргументов, которые определяются позиционным расчленением соответствующих индексов, таким образом, чтобы

$$R(M,i)=R(M1,i1)\,/\!/\,R(M2,i-i1);$$

$$R(S_j)=R(S_{j1})\,/\!/\,R(S_{j2}),$$

где $/\!/$ - операция сцепления, заключающаяся в соединении левого и правого аргументов в одну сторону.

При последовательном соединении систем $F1\{X(S)\}^*$ и $F2\{F1\{X(S)\}^*\}^*$ результирующий функциональный ряд МПФ имеет вид

$$YR(S)=F2\{F1\{X(S)\}^*\}^*=FR\{MAX(N1,N2),M,P1\odot P2,XR(S)\}^*,$$

где по условию соединения размерности внешнего воздействия совпадают $M=M1=M2=MR$ . Осуществляя последовательную подстановку функциональных рядов $F2\{F1\{X(S)\}^*\}^*$ и приводя к одной комплексной переменной, получим функциональный ряд результирующего преобразования

$$HR_{i\ell}^{R(M,i)}(R(S_j))=\sum_{i2=1}^{i}\sum_{t=1}^{\binom{i-1}{i2-1}}\sum_{k=1}^{k(M,i2)}H2_{i2\ell2}^{R(M,i2)}(R(S_{j2}))\prod_{\tau=1}^{i2}H1_{i1\ell1}^{R(M,i1)}(R(S_{j1})),$$

Здесь происходит многократное суммирование элементов множества второго звена по порядку $i2=\overline{1,i}$ , по количеству сочетаний комплексных переменных $j$ результирующего процесса по $i2$ , равному $\binom{d-1}{i2-1}$ и по количеству неупорядоченных выборок из $M$ элементов по $i2$ позициям $K(M,i2)=(M+i2-1)!/(i2!(M-1)!)$, с произведением элементов МПФ первого преобразования $H1_{i1e1}^{R(M,i1)}(R(S_{j1}))$, где порядок $i1$ определяется по $2$-той позиции распределения комплексных переменных $S$ сомножителя от второго звена, а распределения индексов внешних воздействий определяются $2$-той позицией результирующего распределения.

Таким образом определяются преобразования основных характеристик произвольных нелинейных ДС при многомерном внешнем воздействии, заданных в виде многомерных функциональных рядов Вольтерра.

Полученные значения МПФ нелинейных ДС характеризуют реакцию системы на внешнее воздействие. При гармоническом воздействии МПФ определяют величину амплитудно-фазового отклика в его спектральном представлении. При случайном воздействии необходимо определять статистические характеристики. Нелинейные преобразования приводят к негауссовым случайным процессам, кумулянтное описание которых является наиболее приемлемым. Для данных представлений определены наборы кумулянтных или моментных функций, основанные на многомерных функциональных полиномах Вольтерра.

Так спектральная плотность $S_y(\omega)$ случайного процесса $y$ на выходе нелинейной системы, описываемой функциональным полиномом $y(s)=\sum_{i=1}^{N}\{H(s_1,\ldots,s_i)\prod_{j=1}^{i}X(s_j)\}^*$ определяется следующим образом:

$$S_y(\omega)=\sum_{i=2}^{2N}\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{i-2}\int_{R^{i-2}} Z_i\left(-\sum_{e=2}^{i-1}\omega_e-\left(\omega-\sum_{e=2}^{m-1}\omega_e\right),\omega_2,\ldots,\omega-\sum_{e=2}^{m-1}\omega_e\right)\cdot$$

$$\cdot\,\Phi\left(\omega_2,\ldots,\omega_{i-1},\omega-\sum_{e=2}^{m-1}\omega_e\right)d\omega_2\ldots d\omega_{i-1}\,;\quad m=i\div 1,$$

где функциональный ряд, описываемый ядрами $Z_i$ определяется как нелинейное преобразование процесса $y(t)$, умноженного на смещенный процесс $y(t+\tau)$, $Z(t)=y(t)\cdot y(t+\tau)$; $\Phi_i(\omega_2,\ldots,\omega_i)$ - многомерные спектральные плотности входного процесса $X(t)$. Первый член данного выражения отражает линейное преобразование ДС

$$S_{y\,лин}(\omega)=H(-\omega)H(\omega)\Phi(\omega).$$

Все последующие члены в определении спектра выходного процесса учитывают свойства нелинейной ДС посредством интегральной взаимосвязи МПФ системы и многомерных спектральных плотностей входного процесса, которые сводятся к многомерным интегралам, вычисление которых основывалось на использовании квадратурных формул и теоретико-числовых сеток.

Во второй главе рассматриваются вопросы анализа и расчета с помощью многомерных функциональных рядов Вольтерра нелинейных гидропневматических (ГП) виброзащитных систем.

Ряд положительных свойств ГП элементов, к которым относятся низкий вес, удобства регулирования, высокие виброзащитные свойства, обусловили их широкое применение. К наиболее существенным свойствам динамических характеристик ГП элементов относятся их нелинейность и зависимость от условий теплообмена.

Известные уравнения политропического закона деформации газа обычно дают существенную ошибку ( $\sim$ 50%) и не отражают гистерезионных, демпфирующих свойств пневматических элементов

$$P = P_0\left(\frac{V_0}{V}\right)^n,$$

где $P_0$, $P$, $V_0$, $V$ - соответственно начальные давления и объемы газа; $n$ - показатель политропы.

На основе термодинамического состояния газа и условий его теплообмена с окружающей средой получено нелинейное интегро-дифференциальное уравнение связи давления $P(t)$ с изменением объема $V(t)$

$$V(t)\dot{P}(t) + k\dot{V}(t)P(t) - (k-1)E\alpha_r F/(GR)(P(t)V(t) -$$

$$\int_0^t (P(t-\tau)V(t-\tau))' T_{01}(\delta,\tau)d\tau - P_0 V_0 T_{01}(\delta,t) = 0,$$

где $k$ - показатель адиабаты данного газа; $E$ - механический эквивалент тепла; $\alpha_r$ - коэффициент теплоотдачи газа через оболочку; $F$ - площадь теплоотдачи; $G$ - вес газа; $R$ - универсальная газовая постоянная; $T_{01}(\delta,\tau)$ - рассчитанная функция нестационарного теплообмена через оболочку при единичном скачке температур на его стенках, толщиной $\delta$ .

Использование аппарата функциональных рядов Вольтерра и интегральных преобразований позволяет решить данное нелинейное интегро-дифференциальное уравнение по определению динамических характеристик деформации пневматических элементов (ПЭ) в конечном аналитическом виде. Функциональную зависимость приращений давления $\Delta P$ от объема $\Delta V$ $\Delta P = \mathcal{F}\{\Delta V\}$ представим в преобразованном по Лапласу виде одномерного полинома Вольтерра со степенью нелинейности, равной $N$

$$\Delta p(S) = \sum_{i=1}^{N} \{ H_i(S_1, ..., S_i) \prod_{q=1}^{i} \Delta V(S_q) \}^*$$

тогда искомые члены функционального ряда $H_i(S_1, ..., S_i)$, которые полностью описывают динамические характеристики ПЭ будут иметь вид

$$H_1(S) = -\frac{P_0}{V_0} \{ 1 + \frac{S(k-1) - BV_0[1 - T_{01}(\delta, S)]}{S - B[1 - T_{01}(\delta, S)S]} \};$$

. . .

$$H_i(S_1, ..., S_i) = -\frac{1}{2V_0} \{ H_{i-1}(S_1, ..., S_{i-1})[1 - \frac{S_i(k-1)}{C_i(S_i, ..., S_i)}] +$$

$$+ H_{i-1}(S_2, ..., S_i)[1 - \frac{S_1(k-1)}{C_i(S_1, ..., S_i)}] \},$$

где обозначено

$$B = \frac{(k-1) E \alpha_r F}{GR};$$

$$C_i(S_1, ..., S_i) = \sum_{j=1}^{i} S_j - B[1 - T_{01}(\delta, \sum_{j=1}^{i} S_j) \sum_{j=1}^{i} S_j].$$

Характеристики нестационарного теплообмена $T_{01}(\delta, S)$ и МПФ $H_i(\omega_1, ..., \omega_i)$ определяют основные закономерности термодинамических тел, близких по своим свойствам к апериодическим звеньям, для которых характерны монотонно убывающие частотные характеристики. При гармоническом изменении объема ПЭ его давление представляется в виде линейчатого спектра, равного амплитудам МПФ, в соответствующих частотных сечениях. Динамические характеристики ПЭ во временной развертке отражают прогрев ПЭ и его гистерезисные свойства.

Реальной задачей исследования явилась частично связанная ГП система подрессоривания, которая применяется на большегрузных и длиномерных транспортных тягачах МАЗ-547А. Наряду с нелинейными ПЭ в ней добавлены нелинейные гидравлические элементы, которые характеризуются нелинейной связью перепада давления $\Delta p_i$ с расходом жидкости $Q_i$ через элементы гидравлической связи 3-х камер прямого хода.

Полное описание элементов ГП системы подрессоривания и их взаимной связи позволяет получить систему нелинейных уравнений по определению МПФ изменения давления и расхода от трехмерного внешнего кинематического воздействия $[Q_1, Q_2, Q_3]^*$

$$\Delta P_j(s) = \mathcal{F}\{HP(\Delta V_j)\} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{k(3,i)}\{HP_{ij}^{\ell(3,i)}(s_1,\ldots,s_i)\prod_{q=1}^{i} Q^{\ell(3,i,q)}(s_q)\}^{*};$$

$$Q_e(s) = \mathcal{F}\{HQ(\Delta V_j)\} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{k(3,i)}\{HQ_{ie}^{\ell(3,i)}(s_1,\ldots,s_i)\prod_{q=1}^{i} Q^{\ell(3,i,q)}(s_q)\}^{*},$$

где $Q_e(s)$ - соответствуют неизвестным расходам в гидравлической системе.

Полученные значения МПФ $HP_{ij}(s_1,..,s_i)$ позволяют более полно и качественно исследовать характеристики различных типов сложных термодинамических систем виброзащиты.

Дальнеишим этапом расчета является рассмотрение всей виброзащитной системы транспортного средства, в которую добавлены нелинейные вязкоупругие характеристики дорожного полотна и шины. Нелинейными являются уравнения Эйлера пространственных колебаний виброзащитного груза. Обобщенная схема колесного хода транспортного средства содержит вектора $\bar{q}$ внешнего кинематического возмущения неровностей дорожного полотна, реакций главных значений сил $\bar{F}$ и $\bar{M}$ , действующих между элементами системы. В результате расчетов определялись МПФ неизвестных координат перемещений и усилий (рис.1), значения которых позволяют полностью описать пространственные колебания транспортируемого изделия с частично связанной ГП системой подрессоривания.

<u>В третьей главе</u>, посвященной экспериментальным и тестовым методам исследования нелинейных динамических систем, рассматриваются вопросы модельных и натурных испытаний гидропневматических систем виброзащиты. Для анализа данных систем использовались динамический стенд и комплекс измерительной аппаратуры, которые позволили записать процессы, протекающие в данной системе и сравнить их с расчетными тестовыми нагружениями, выполненные с помощью методов математического моделирования, основанных на функциональных рядах Вольтерра. Сравнение экспериментальных и расчетно-аналитических зависимостей позволяет сделать обоснованные выводы по корректности предложенных методов исследования.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

I. Теория функциональных рядов Вольтерра для одномерных стационарных нелинейных ДС с сосредоточенными параметрами была рас-

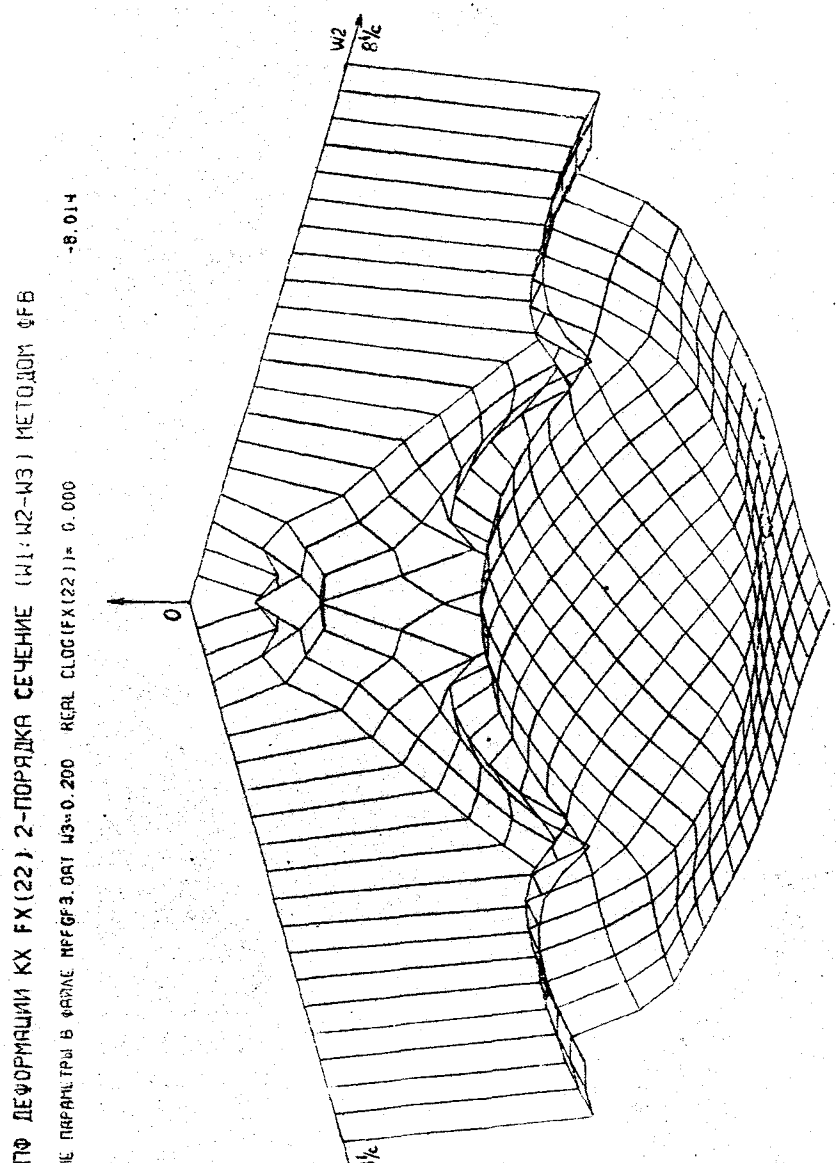


Рис. I. МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ пространена на более широкий класс систем, которые могут быть с многомерным входом, обладать нестационарностью и описываться уравнениями с распределенными параметрами.

2. Использование многомерных интегральных преобразований для рассматриваемых классов нелинейных ДС позволило свести ререшение динамических задач из области интегро-дифференциальных вычислений в область алгебраических вычислений по определению набора многомерных передаточных функций, что существенно уменьшает объемы вычислений и приводит к получению наиболее удобных для исследования характеристик ДС.

3. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для преобразований многомерных статистических характеристик входных процессов, описываемых набором кумулянтных функций.

4. Для нелинейных термодинамических систем, с интенсивными тепловыми и деформационными процессами выведены интегро-дифференциальные уравнения по определению динамических характеристик, учитывающие процессы нестационарного теплообмена с окружающей средой.

5. Получены многомерные передаточные функции нелинейных виброзащитных систем для пневматических упругих элементов, гидропневматических подвесок, системы частично связанных гидропневматических подвесок, а также всей виброзащитной системы транспортного агрегата, учитывающей пространственные движения системы твердых тел и нелинейные вязко-упругие свойства деформируемого дорожного полотна и шины.

6. Проведены экспериментальные исследования гидропневматической подвески большегрузного тягача МАЗ-547А с определением коэффициентов и теплоотдачи на основе теории регулярного теплового режима Кондратьева и построены динамические характеристики подвески с учетом интенсивных тепловых потерь.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кононов Ю.Н., Масленников С.П. Определение динамической характеристики гидропневматической подвески// Динамика машин и агрегатов: Сб.трудов.-Челябинск.-1978.-№ 219.-С.3-7. (Челябинский политехнический институт).

2. Кононов Ю.Н., Осадчий С.В. Определение динамических харак-

теристик гидропневматических подвесок//Рук.деп.в БелНИИТИ-1989.-№ 9.-№ 151.- 15с.

3. Кононов Ю.Н., Крикун П.Д. Статистическая линеаризация гидропневматической подвески транспортных машин// Вопросы улучшения динамических характеристик машин: Сб. трудов.-Челябинск.-1976.-№ 175.-С.99-105. (Челябинский политехнический институт).

4. Кононов Ю.Н. Применение метода статистической линеаризации //Вопросы улучшения динамических характеристик машин: Сб.трудов. -Челябинск.-1976.-№ 75.-С.105-109.(Челябинский политехнический институт).

5. Есин Г.Д., Кононов Ю.Н., Масленников С.П. Спектральные характеристики транспортных машин//Вопросы улучшения динамических характеристик машин: Сб.трудов.-Челябинск.-1976.-№ 175.-С.110-113(Челябинский политехнический институт).

6. Кононов Ю.Н. Статистическая аппроксимация//Динамика машин и агрегатов: Сб.трудов.-Челябинск.-1978.-№ 219.-С.9-19.(Челябинский политехнический институт)

7. Бухалов Ю.Е., Кононов Ю.Н. Исследование нелинейной динамики транспортных машин с помощью функциональных рядов//Динамика машин и агрегатов: Сб.трудов.-Челябинск.-1978.-№ 219.-С.

8. Кононов Ю.Н., Осадчий С.В. Расчет динамической нагруженности транспортных машин// Рук.деп.-БелНИИНТИ.-1980.№ 9.-№ 152-8 с.

9. Кононов Ю.Н., Осадчий С.В. Определение частотных характеристик изгибно-крутильных деформаций многоопорной транспортной машины//Динамика машин и конструкций: Сб.трудов.-Челябинск.-1981.-№ 254.-С.3-9.(Челябинский политехнический институт)

10. Грачев А.В., Кононов Ю.Н., Леванидов А.В. Решение задачи о нелинейных колебаниях пневмоамортизатора с помощью функциональных рядов//Восьмая Дальневосточная конференция по мягким оболочкам.-Владивосток.-1987.-С.134-137.