

М488808

Государственный комитет СССР по народному образованию
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Луценко Геннадий Михайлович

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

05.13.01 - управление в технических системах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1989

кн. 1
БИБЛИОТ. А

Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления"
МВТУ им.Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
ЕГУПОВ Н.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ШАХТАРИН Б.И.,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ФУРАЕВ А.Б.

Ведущая организация - Калужское производственное объединение
"КТЗ"

Защита состоится " 26 " июня 1989 г. в 14³⁰ на заседании
специализированного совета К053.15.12 в МВТУ им.Н.Э.Баумана по
адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ва
чатью,

веренной пе-

С

ВТУ.

Ав

9 г.

У
специал
к

М488808

А.В.

Л-18444

Подп. к

каз № 644

Актуальность работы. В основных направлениях экономического и социального развития на двенадцатую пятилетку четко сформулированы требования к новой технике. Сроки ее разработки и освоения предстоит сократить в 3-4 раза. Вновь осваиваемые виды изделий должны превосходить по надежности и качеству не менее чем в 1,5-2 раза выпускаемую аналогичную продукцию, соответствовать по своим технико-экономическим показателям лучшим мировым образцам. Непосредственное участие в выполнении этих заданий предстоит принять испытательным центрам и лабораториям.

Среди разнообразных испытаний на воздействие окружающей среды, которым подвергаются исследуемые образцы изделий, одними из важнейших являются вибрационные испытания. В связи с этим весьма актуальной является задача создания отечественных систем вибрационных нагружений (СВН), которые позволяли бы имитировать реальные условия функционирования изделий. Такой подход с наименьшими материальными и временными затратами дает возможность, во-первых, оценить фактическую надежность изделия, обнаружить "слабые" места аппаратуры, устранить из процесса эксплуатации неблагоприятный начальный период, характеризующийся повышенной интенсивностью отказов; а во-вторых, прогнозировать уровень необходимой надежности изделий, что позволит снизить их материалоемкость.

Вместе с тем следует отметить, что разработка и создание СВН, особенно для воспроизведения реальных вибрационных нагрузок, является сложной научно-технической проблемой, требующей рассмотрения целого ряда взаимосвязанных задач: построение математических моделей функций вибрационных нагружений (ФВН), воспроизведение их с помощью СВН, оценка точности имитации вибрационных нагрузок и другие. Многие из задач, возникающих при решении указанной проблемы, находятся на начальной стадии своего решения и, как следствие, имеют место трудности, связанные с ограничением класса воспроизводимых вибраций, значительными затратами на перенастройку режимов испытаний, необходимостью в дорогостоящем нестандартном оборудовании. Сказанное особенно характерно для систем, имитирующих вибрации в неустановившихся режимах эксплуатации, которые представляют наибольшую опасность для нормального функционирования изделий.

Очевидно, что эффективное решение задачи создания СВН возможно только на основе использования вычислительной техники. Об



этом свидетельствует и тот факт, что разработка и создание СВН является составной частью работ, проводимых в соответствии с заданием целевой комплексной программы 0.80.02 "Создать и ввести в эксплуатацию системы автоматизации процессов производства и управления в народном хозяйстве на основе интеграции АСУ различного уровня, применение вычислительной техники и микропроцессорных средств", принятой ГИИТ СССР.

Цель исследования. Диссертационная работа направлена на решение задачи создания и внедрения теоретических положений, алгоритмической базы и программного обеспечения для цифровой системы управления СВН, позволяющей имитировать реальные вибрационные нагружения, действующие на изделия в условиях эксплуатации.

Методы исследования. В диссертационной работе использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе комплексного использования методов теории автоматического управления, в том числе спектральных методов расчета и проектирования САУ, вероятностного анализа линейных и нелинейных динамических систем. Кроме того, использовался математический аппарат линейной алгебры, теории дифференциальных и интегральных уравнений.

Научная новизна. диссертационной работы состоит в построении теоретических положений, алгоритмического и программного обеспечения для статистического исследования и оценки точности СВН в классе нелинейных систем при воспроизведении случайных, в общем случае нестационарных, испытательных сигналов.

Для исследования нелинейных систем был разработан способ аппроксимации нелинейных элементов, получивший название метод эквивалентной спектральной характеристики. Суть метода заключается в замене статического нелинейного элемента эквивалентным ему в статистическом смысле динамическим звеном с соответствующей спектральной характеристикой. Такой подход при рассмотрении нелинейных систем позволяет после определенных упрощений использовать математический аппарат, применяемый для исследования линейных систем.

Практическая ценность. Разработанные в диссертации алгоритмы детерминированного и статистического исследования нестационарных систем при случайных входных воздействиях, базирующиеся на спектральном методе, реализованы в виде пакета прикладных программ. С помощью данного пакета можно проводить детерминированный и статистический анализ как линейных, так и нелинейных динамических сис-

тем; выполнять оценку точности их функционирования; рассчитывать по заданным математическим моделям первичного источника вибраций и транспортного агрегата функции вибрационных нагрузений, действующих на изделия. Важным фактором является быстроедействие разработанных программ благодаря использованию алгоритмов быстрых преобразований. Как следствие, пакет может быть применен не только в практике создания СВН, но и использован широким кругом специалистов, занимающихся вопросами расчета и проектирования САУ. Реализация разработанных алгоритмов хотя бы частично аппаратным путем, чему в значительной мере способствует используемый в работе базис функций Уолша, позволит создать еще более эффективные СВН.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнялась в рамках работ, проводимых на кафедре "Системы автоматического управления" МВТУ им. Н.Э.Баумана по целевой программе 0.80.02 раздел 35 "Разработка методов, алгоритмического и программного обеспечения, а также библиотеки программных модулей "испытания" для синтеза и оптимизации многоуровневых распределенных САУ и АСУ ТП с микропроцессорами" и на кафедре "Электротехника" Калужского филиала МВТУ в соответствии с хозяйственными темами Ж-13-05-81, Ж-12-07-83, Ж-15-01-86.

Результаты диссертационной работы внедрены в Калужском производственном объединении "Ока" (МПСС) при создании цифровой системы управления и обработки информации для многоцелевого автоматизированного комплекса вибрационных нагрузений, предназначенного для испытаний телеграфной аппаратуры, с годовым экономическим эффектом 65 тыс. руб., что подтверждается соответствующими актами. Кроме того, разработанный в диссертации пакет прикладных программ внедрен на Калужском заводе автомотоэлектрооборудования и используется при исследовании систем автоматического управления для автомобилей, что также подтверждено актом.

Консультантом при практической реализации результатов, полученных в диссертации, являлся главный инженер ПО "Ока" Твердов Б.И.

Материалы диссертационной работы используются в лекциях по курсу "Основы автоматики" и практических работах, проводимых на кафедре П5-КФ в Калужском филиале МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- VIII Калужской научно-технической конференции "Вклад ученых и специалистов области в развитие научно-технического прогресса" (Калуга, 1984г.);

- XI Всесоюзном научно-техническом совещании "Создание и внедрение систем автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами" (Новгород, 1986г.);

- Межвузовской научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении" (Калуга, 1987г.);

- Всесоюзном научно-техническом совещании "Микропроцессорные системы автоматизации технологических процессов" (Новосибирск, 1987г.);

- Всесоюзной научно-технической конференции "Электроника и информатика в гибких автоматизированных производствах" (Пермь, 1987г.);

- 32-м Международном научном colloquium в Высшей технической школе г.Ильменау (Ильменау, ГДР, 1987г.);

- Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и использования отраслевых информационно-диспетчерских систем на основе компьютеризации и перспективных средств связи" (Калуга, 1988г.).

Публикации. По основным положениям диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня цитируемой литературы, содержащего 108 наименований, и двух приложений. Работа выполнена на 255 страницах и содержит 143 страницы машинописного текста основной части диссертации, 55 страниц рисунков и таблиц, 57 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика научного направления, в русле которого находится предмет исследования диссертации, а также приводится краткое содержание глав работы.

В первой главе обосновывается актуальность диссертационной работы, дается обзор принципов построения аналоговых и цифровых систем управления, используемых в испытательных комплексах для воспроизведения случайных вибраций, выполнен их сравнительный анализ, определяется структура разрабатываемой СВН, излагается постановка задачи исследования и указываются те методы ее решения, которые наиболее эффективны с точки зрения их реализации с помощью ЭВМ.

Анализ современных тенденций разработки и производства новой продукции показывает, что с повышением сложности изделий и выполняемых ими функций имеет место стремление к организации стендовых испытаний, целью которых является имитация не только эксплуатационного режима, но и выявление принципиальных вопросов накопления повреждений. Если изделие окажется запущенным в серию прежде, чем пройдет полный объем испытаний, то в результате оно не только будет требовать значительных расходов при любых конструктивных изменениях, но и будет менее надежным.

Рассматривая принципы построения, структурные схемы и алгоритмическое обеспечение отечественных и зарубежных виброиспытательных систем и оценивая их возможности для воспроизведения вибрационных нагрузок, необходимо отметить имеющие место следующие недостатки: класс воспроизводимых вибраций ограничен гармоническими, полигармоническими и случайными стационарными сигналами; требуются значительные временные затраты на перенастройку режимов испытаний; сложность аппаратурной реализации СВН для проведения испытаний на случайную вибрацию.

Бурное развитие в последние годы цифровой вычислительной техники, повышение ее быстродействия и снижение стоимости позволяют применять ее не только для обработки экспериментальных данных, но и использовать для непосредственного управления всеми режимами вибрационных испытаний. Поэтому в диссертации развивается алгоритмический или вычислительный принцип построения СВН. В работе была обоснована структурная схема СВН, реализующая такой подход при формировании нестационарных вибраций, в состав которой вошли: управляющая микро-ЭВМ, вибростенд с усилителем мощности, блоки сопряжения и элементы обратной связи.

При создании алгоритмического обеспечения ЭВМ необходимо было выполнить требования, обусловленные следующими факторами:

1. Реальным условиям эксплуатации изделий присущи нестационарные режимы. Поэтому задача оценки точности работы СВН должна решаться для класса нестационарных входных сигналов.

2. Динамические свойства СВН при испытаниях подвергаются сильным изменениям за счет присоединенной подсистемы "амортизатор - изделие". Так как оценку точности работы СВН необходимо проводить всякий раз при смене исследуемого изделия или задании нового режима испытаний, то алгоритмическое и программное обеспечение должно обладать повышенным быстродействием, позволяющим проводить экспресс-проверку перед каждым новым испытанием.

Наиболее эффективное решение указанных задач оказалось возможным благодаря использованию спектрального метода, который рассматривается во второй главе.

Вторая глава посвящена дальнейшему развитию спектрального метода применительно к исследованию как линейных, так и нелинейных нестационарных динамических систем в базисе функций Уолша.

Основой для решения задачи статистического исследования СВН, в том числе и оценки точности имитации вибрационных нагружений, послужили следующие положения спектрального метода. От исходной формы описания СВН в виде дифференциального уравнения

$$\dot{x}^{(n)}(t) + \sum_{k=0}^{n-1} a_k(t) x^{(k)}(t) = \sum_{k=0}^m b_k(t) y^{(k)}(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – сигнал на входе системы, $x(t)$ – процесс на выходе СВН; осуществляется переход к эквивалентному интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода

$$x(t) + \int_0^T K_x(t, \tau) x(\tau) d\tau = \int_0^T K_y(t, \tau) y(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где

$$K_x(t, \tau) = \begin{cases} \frac{1}{(n-1)!} \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \frac{d^k}{d\tau^k} [a_k(\tau)(t-\tau)^{n-1}]; & 0 \leq \tau \leq t; \\ 0 & t < \tau \leq T; \end{cases}$$

и

$$K_y(t, \tau) = \begin{cases} \frac{1}{(n-1)!} \sum_{k=0}^m (-1)^k \frac{d^k}{d\tau^k} [b_k(\tau)(t-\tau)^{n-1}]; & 0 \leq \tau \leq t; \\ 0 & t < \tau \leq T. \end{cases}$$

Далее, полагая, что интегральные операторы в (2) ограничены, можем воспользоваться их матричным представлением в ортогональных базисах и перейти к уравнению с матричным оператором

$$C^x + \bar{A}^x C^x = A^y C^y, \quad (3)$$

где $\bar{A}^x$ и A^y – числовые матрицы, элементы которых определяются по формулам

$$a_{ij}^x = \int_0^T \int_0^T K_x(t, \tau) \text{wal}(i, \tau) \text{wal}(j, t) d\tau dt;$$

$$a_{ij}^y = \int_0^T \int_0^T K_y(t, \tau) \text{wal}(i, \tau) \text{wal}(j, t) d\tau dt,$$

а C^x и C^y – спектральные характеристики (СХ) соответственно $x(t)$ и $y(t)$.

Для практической реализации спектрального метода важным является выбор соответствующей системы ортогональных функций. В работе

выбор был сделан в пользу функций Уолша, что объясняется следующими причинами. Функции Уолша образуют полную ортонормированную систему. Каждая функция представляет собой прямоугольную волну и может принимать значения $+1$ или -1 . Это позволяет легко осуществить их реализацию с помощью цифровой аппаратуры и широко использовать в системах управления. Кроме того, вычисление прямого и обратного преобразования Уолша является одним из наиболее экономичных с вычислительной точки зрения по сравнению с другими системами ортогональных функций, поскольку при его расчете используются только операции сложения и вычитания и не требуются операции умножения.

Для проведения спектрального анализа нестационарных динамических систем представим формулу (3) в виде

$$C^x = A C^y, \quad (4)$$

где $A = (I + \bar{A}^x)^{-1} A^y$ – спектральная характеристика одномерной системы.

В реальных условиях эксплуатации изделия часто подвергаются воздействию вибраций, имеющих пространственный характер. Адекватная имитация многомерного вибрационного нагружения осуществляется в лабораторных условиях с помощью многокомпонентных СВН, поведение которых может быть описано векторно-матричным уравнением

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)Y(t), \quad (5)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – матрицы, элементы которых определяются параметрами системы, $Y(t)$ – вектор входных воздействий, $X(t)$ – вектор фазовых координат СВН.

Уравнению (5) в спектральной области эквивалентно соотношение вида

$$C^x = \bar{A}^x C^x + A^y C^y, \quad (6)$$

где $\bar{A}^x$; A^y ; C^x ; C^y – клеточные матрицы. Из формулы (6) имеем

$$C^x = (I - \bar{A}^x)^{-1} A^y C^y = A^x A^y C^y. \quad (7)$$

Выражение (7) является базовым при разработке алгоритма детерминированного анализа многомерных систем.

Понятие спектральной характеристики, используемое при описании динамических систем позволяет получить решение задач, составляющих содержание статистического анализа. Осредняя по множеству выражение (4) (или (7) для многомерного случая), получим

соотношение, связывающее спектральные характеристики корреляционных функций входного воздействия C^{yy} , процесса на выходе C^{xx} и исследуемой системы A :

$$C^{xx} = A C^{yy} A^T, \quad (8)$$

где

$$C_{ij}^{yy} = \int_0^T \int_0^T R_{yy}(t_1, t_2) \text{wal}(i, t_1) \text{wal}(j, t_2) dt_1 dt_2.$$

Аналогичные соотношения были получены и для других вероятностных характеристик случайных процессов (математическое ожидание, дисперсия).

Приведенные выше формулы позволили разработать следующие алгоритмы:

- Алгоритм детерминированного анализа одномерных линейных нестационарных динамических систем в базисе функций Уолша.
- Алгоритм детерминированного анализа многомерных линейных нестационарных динамических систем.
- Алгоритм исследования одномерных и многомерных систем, заданных структурными схемами.
- Алгоритм расчета статистических характеристик процессов на выходе одномерных и многомерных линейных нестационарных систем.
- Алгоритм оценки точности линейных одномерных и многомерных нестационарных систем при случайных воздействиях.

Анализ нелинейных систем представляет собой сложную задачу. Поэтому большое значение в инженерной практике имеют методы их расчета, которые позволяют после соответствующих упрощений использовать математический аппарат, применяемый для исследования линейных систем. По существу, такой подход является приближенным, так как нелинейные аналитические соотношения заменяются линейными.

Недостатки существующих методов линеаризации, а также необходимость иметь эффективный инструмент для исследования нелинейных систем в рамках спектрального метода привели к тому, что был разработан способ аппроксимации нелинейных элементов, который получил название метод эквивалентной спектральной характеристики (ЭСХ). Суть метода состоит в замене статического нелинейного элемента эквивалентным в статистическом смысле динамическим звеном с соответствующей СХ A_z таким образом, чтобы критерий, характеризующий близость двух звеньев принимал минимальное значение. Если $R_{xx}^n(t_1, t_2)$ автокорреляционная функция нестационарного случайного процесса на

выходе нелинейного элемента, $R_{xx}^A(t_1, t_2)$ - автокорреляционная функция на выходе линейного эквивалента, то критерий может иметь вид

$$\rho(R_{xx}^H(t_1, t_2), R_{xx}^A(t_1, t_2)) = \min, \quad (9)$$

где ρ - метрика в соответствующем пространстве.

Если ρ метрика в пространстве $C([0, T] \times [0, T])$, то имеем

$$\max_{0 \leq t_1, t_2 \leq T} |R_{xx}^H(t_1, t_2) - R_{xx}^A(t_1, t_2)| = \min.$$

Если ρ метрика в пространстве $L^2([0, T] \times [0, T])$, то формула (9) принимает вид

$$\iint_0^T [R_{xx}^H(t_1, t_2) - R_{xx}^A(t_1, t_2)]^2 dt_1 dt_2 = \min.$$

Так как корреляционная функция на выходе линейного динамического звена определяется соотношением (8), то эквивалентная спектральная характеристика A_0 в пространстве C может быть определена из выражения

$$\max_{0 \leq t_1, t_2 \leq T} |R_{xx}^H(t_1, t_2) - \Phi(t_1) A_0 C^{(H)} A_0^T \Phi^T(t_2)| = \min.$$

Для вычисления матрицы A_0 применимы хорошо разработанные методы оптимизации.

Использование предложенного метода ЭСХ для исследования нелинейных систем позволяет с высокой степенью точности определить статистические характеристики любой ее координаты. Конечно, данный метод не позволяет определять законы распределения выходных процессов. Кроме того, как и другие методы линеаризации, он предполагает нормальное распределение случайного процесса на входе нелинейного элемента.

Как правило, сложные системы управления задаются структурными схемами. Традиционный подход к их исследованию, когда на первом этапе определяют дифференциальные уравнения, связывающие входы и выходы звеньев системы, а на втором переходят к их спектральным характеристикам, является малоэффективным. Более предпочтительным для решения задач детерминированного или статистического анализа является применение разработанного в базисе функций Уолта аппарата структурных преобразований, основанного на спектральной форме описания элементов системы и ориентированного на использование ЭВМ.

В работе приводятся оценки погрешностей, возникающих при использовании спектрального метода для исследования динамических систем.

Алгоритмы, реализующие спектральный метод, обладают вычислительной устойчивостью, поскольку матрично-операторное уравнение (3) эквивалентно интегральному уравнению второго рода, задача нахождения решения которого принадлежит к числу корректно поставленных задач.

Третья глава работы посвящена исследованию точности имитации реальных вибрационных нагружений с помощью СВН, созданных на базе электродинамических и электрогидравлических вибраторов.

Важность этой задачи объясняется тем, что несоответствие между лабораторными испытаниями и реальными условиями эксплуатации может привести к неточным выводам о надежности испытываемой аппаратуры и свойствах виброзащитных приспособлений.

Анализ основных источников ошибки, которая имеет место при имитации вибрационных нагружений, показал, что основное влияние на ее величину оказывают следующие составляющие:

- ошибка, порожденная системой записи и обработки вибрационных сигналов при построении моделей вибросостояний изделий в режиме эксплуатации;
- ошибка, порожденная конечностью полосы пропускания вибратора и искажениями вносимыми в его АЧХ присоединенным изделием.

Основное внимание в работе уделяется нестационарным режимам (трогание с места, взлет, посадка и т.д.), так как именно они оказывают наиболее отрицательное воздействие на надежность аппаратуры. Поэтому задача оценки точности решается для класса нестационарных входных сигналов.

Решение данной задачи аппаратным путем сталкивается с трудностями как методического, так и технического характера. Действительно, поскольку вибрации являются нестационарными процессами, то для определения статистических характеристик ошибки их воспроизведения требуется проведение большого количества испытаний. Это приводит к существенным материальным и временным затратам.

В работе был использован другой подход - алгоритмический, позволяющий определить ошибку воспроизведения испытательного сигнала с помощью расчетов на ЭВМ. При таком подходе исходными данными для решения задачи оценки точности работы СВН являются:

- статистические характеристики полезного входного сигнала и помехи;
- математическая модель тракта прохождения испытательных сигналов.

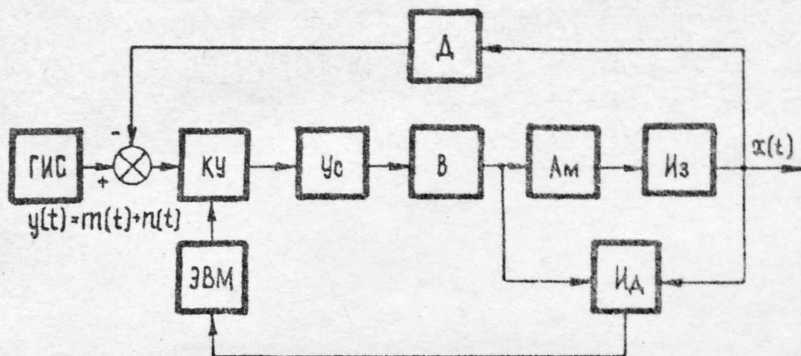


Рис. I.

При разработке алгоритма оценки точности работы СВН, она рассматривалась как система автоматического управления, в состав которой входят (см. рис. I): генератор испытательных сигналов (ГИС), корректирующее устройство (КУ), усилитель мощности (Ус), вибратор (электродинамический или электрогидравлический в зависимости от содержания конкретной работы), гасители колебаний (амортизаторы) и изделие (Из). С помощью датчиков вибрации (Д) система охвачена обратной связью. Дифференциальные уравнения элементов системы, кроме гасителей колебаний и изделий, известны заранее. В общем случае они являются нелинейными. Например, при описании электрогидравлического вибратора используются такие нелинейные зависимости как извлечение квадратного корня, функция знака и др. Параметры уравнений, описывающих гасители колебаний и изделия, определяются на этапе идентификации (Ид).

На вход системы поступает аддитивная смесь полезного сигнала $m(t)$ и помехи $n(t)$. При этом полагается, что сигналы взаимно некоррелированные случайные процессы с корреляционными функциями $R_{mm}(t_1, t_2)$ и $R_{nn}(t_1, t_2)$.

При определении статистических характеристик полезной составляющей вибрационного сигнала в работе предлагается также использовать расчетный метод. На примере транспортных вибраций показано,

что использование разработанного во второй главе алгоритмического и программного обеспечения позволяет с высокой точностью рассчитывать корреляционные функции вибрационных нагрузок для самых различных условий перевозки изделий.

Для того, чтобы задачу исследования точности СВН можно было отнести к классу задач спектрального анализа и для ее решения использовать разработанный в диссертации математический аппарат, необходимо воспользоваться спектральным представлением всех сигналов и динамических характеристик звеньев системы. С этой целью в главе получены математические модели в спектральной области для электродинамического и электрогидравлического вибростендов. Рассматриваются нелинейные модели вибраторов, а также их линеаризованные с помощью метода эквивалентной спектральной характеристики варианты.

Определяя ошибку СВН $\epsilon(t)$ как разность между значениями действительного $x(t)$ и требуемого $m(t)$ выходных процессов, в работе была получена следующая зависимость для расчета ее автокорреляционной функции

$$R_{\epsilon\epsilon}(t_1, t_2) = \varphi(t_1) [(I-A)C^{mm}(I-A)^T + AC^{nn}A^T] \varphi^T(t_2),$$

где A - спектральная характеристика СВН; C^{mm} и C^{nn} - спектральные характеристики корреляционных функций $R_{mm}(t_1, t_2)$ и $R_{nn}(t_1, t_2)$.

На основе приведенной формулы был разработан алгоритм для оценки точности работы динамических систем при случайных входных сигналах. Его программная реализация позволила практически оценить точность работы СВН, созданной на базе электродинамического вибратора УВЭ-100/5-5000, при воспроизведении стационарных и нестационарных испытательных сигналов. Результаты этих исследований приведены в четвертой главе.

В четвертой главе приведены результаты практического использования разработанного в диссертации алгоритмического и программного обеспечения на примере создания многоцелевой автоматизированной СВН с цифровой системой управления. В главе проводится детерминированное и статистическое исследование СВН, в том числе выполнена оценка точности имитации реальных вибросостояний изделий. Излагается методика определения форсированных нагрузок для телеграфной аппаратуры и приводятся результаты, полученные в процессе ее испытаний.

Созданная при участии автора в КФ МВТУ им. Н.Э.Баумана на базе отечественной вибрационной и вычислительной техники СВН пред-

назначена для проведения нормальных и ускоренных вибрационных испытаний. Основным элементом системы является электродинамический вибрационный стенд УВЗ-100/5-5000, позволяющий испытывать изделия массой до 100 кг. Функционирование всех элементов системы осуществляется под управлением микро-ЭВМ "Электроника МС-1201.02". Высокое быстродействие, возможность подключения к СМ ЭВМ и развитая операционная система позволяют выполнять с ее помощью контроль за всеми этапами проведения испытаний, а также использовать СВН в подсистемах АСУ технологическими процессами. Применение в микро-ЭВМ быстродействующего микропроцессора МП-1801 ВМ2 позволяет формировать случайные испытательные сигналы в режиме реального времени. Кроме того, к достоинствам системы, созданной на базе микро-ЭВМ следует отнести: исключение ошибок оператора при задании режима испытаний; быстроту и легкость ввода новых программ испытаний, так как они хранятся на магнитном диске; автоматическое документирование результатов испытаний; возможность обслуживания нескольких испытательных установок.

Практическая проверка полученных в диссертации результатов была проведена в серии испытаний электронно-механических телеграфных аппаратов. Целью испытаний являлось определение возможности установки приемных устройств телеграфных аппаратов на подвижных транспортных средствах (автомобилях, морских судах и т.п.). Для этого были проведены исследования резонансных свойств аппаратуры и ее испытания на надежность. Причем, испытания на надежность проводились в форсированном режиме, что позволило сократить общую продолжительность работ более чем в три раза по сравнению с нормативными испытаниями.

Перед проведением испытаний осуществлялась оценка точности воспроизведения заданного испытательного сигнала. Как показали расчеты и результаты натурных экспериментов испытания аппаратуры, масса которой совместно с крепежной оснасткой превышает 40 кг, можно проводить только с использованием в системе управления СВН корректирующего фильтра или используя коррекцию параметров самого вибратора.

На основе выполненных экспериментальных работ были внесены конкретные предложения по улучшению элементов конструкции приемных устройств и повышению их надежности. Устранение выявленных недостатков позволило осуществить в технически обусловленных случаях замену используемых в настоящее время

на подвижных узлах связи приемных устройств более дешевыми, что дало годовой экономический эффект в 25 тыс.руб.) (подтверждено актом о внедрении).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к проблеме создания систем вибрационных нагружений, которые используются для имитации реальных вибрационных нагрузок, действующих на изделия в условиях эксплуатации. При этом в ходе выполнения работы были получены следующие основные научно-технические результаты:

1. Разработан, теоретически обоснован и практически проверен спектральный метод, использующий базис функций Уолша, детерминированного и статистического исследования одномерных и многомерных линейных нестационарных систем. Метод использует аппарат уравнений второго рода и приводит к корректным постановкам задач исследования, позволяет оценить скорость сходимости приближенных решений к точным и найти зависимость для оценки погрешности. Использование функций Уолша, быстрых алгоритмов для реализации вычислительных схем и корректная постановка задач позволяют получить их решения с необходимой точностью и большим быстродействием.

2. Метод обобщен на классы нелинейных систем (НС) со статическими нелинейными элементами, характеристики которых аппроксимируются кусочно-линейными функциями, полиномиальными функциями или могут быть представлены рядом Фурье. На основе метода построены быстродействующие алгоритмы статистического исследования указанных классов НС.

3. Разработан аппарат структурных преобразований, использующий базис функций Уолша и позволяющий:

- проводить детерминированное и статистическое исследование линейных и нелинейных динамических систем, заданных топологически сложными структурными схемами;

- решать задачи синтеза корректирующих устройств, реализация которых при использовании функций Уолша осуществляется с помощью простых аппаратных средств.

4. Предложен алгоритмический принцип построения автоматизированных СВН, согласно которому задачи, решавшиеся ранее в практике проектирования виброиспытательных систем аппаратным путем, выполняются с помощью программных средств, реализуемых на базе ЭВМ.

5. На основе спектральных методов статистического исследования линейных и нелинейных динамических систем построено алгоритмическое и программное обеспечение для реализации автоматизированных СВН, позволяющих имитировать реальные вибрационные условия эксплуатации изделий с заданной степенью точности.

6. Разработана и внедрена инженерная методика ускоренных испытаний телеграфной аппаратуры при случайных вибрационных нагружениях.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Егупов Н.Д., Твердов Б.И., Луценко Г.М. Алгоритмы идентификации и оценки точности воспроизведения испытательных сигналов в системе имитации реальных вибрационных нагружений// Техника средств связи. Серия ТПС.- 1983.- Вып. 10.- С. 29-35.
2. Луценко Г.М., Адкин М.Ю. Алгоритм расчета точности и синтеза корректирующих устройств нелинейных нестационарных систем при случайных входных сигналах// Системы управления, преобразования и отображения информации: Межвуз. научн. сб.- Рязань: РРТИ, 1987.- С. 35-37.
3. Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д., Луценко Г.М., Спектральный метод описания и расчета нестационарных систем с запаздыванием// Системы управления, сбора, передачи и отображения информации: Межвуз. научн. сб.- Рязань: РРТИ, 1985.- С. 7-13.
4. Аппаратурно-программный комплекс для имитации транспортных вибраций/ Кушнерев Л.А., Луценко Г.М., Егупов Н.Д., Твердов Б.И. и др.//Техника средств связи. Сер. ТПС.-1984.-Вып.7.-С.82-88.
5. Спектральный метод описания, расчета и исследования систем с запаздыванием, с распределенными параметрами и некоторых классов нелинейных систем. В книге: Солодовников В.В., Дмитриев А., Егупов Н.Д. Спектральные методы расчета и проектирования систем управления.- М.: Машиностроение, 1986.- С. 153-161.
6. Метод разложения решений систем дифференциальных уравнений с запаздыванием по ортогональным базисам. В книге: Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д., Шаршеналиев Ж.Ш. Спектральные методы анализа, синтеза и идентификации систем управления.- Фрунзе: Илим, 1985.- С. 43-57.
7. Алгоритм и программа для расчета выходных сигналов многомерных нестационарных САУ с запаздыванием. В книге: Дмитриев А.Н.,

- Егупов Н.Д., Шаршеналиев Ж.Ш. Спектральные методы анализа, синтеза и идентификации систем управления. - Фрунзе: Илим, 1985. - С. 57-62.
8. Луценко Г.М., Домарев В.В. Методы построения математических моделей вибрационных нагрузений, действующих на изделия в процессе эксплуатации// Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении: Тез. докл. межвуз. научно-техн. конф.-Калуга, 1987.- С. 212-213.
9. Проблемно-ориентированный комплекс для моделирования и исследования задач виброн нагружений и обработки вибросигналов на основе спектральных методов/ Егупов Н.Д., Луценко Г.М., Корнюшин Ю.П., Адкин М.Ю. и др.// Тез. докл. 32-го Международного научного colloквиума.- Ильменау, ГДР, 1987.- С. 46.
10. Автоматизированная система виброн нагружений и обработки информации для исследования, испытания и контроля изделий/Корнюшин Ю.П., Кожевников А.Е., Луценко Г.М., Адкин М.Ю.// Создание и внедрение систем автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. совещания.- Новгород, 1986.- С. 147.
11. Адкин М.Ю., Корнюшин Ю.П., Луценко Г.М. Автоматизированная система приемосдаточных испытаний телеграфных аппаратов (АСПИМ)// Электроника и информатика в гибких автоматизированных производствах: Тез. докл. Всесоюз. конф.- Пермь, 1987.- С. 51.
12. Луценко Г.М., Шехет А.Г. Спектральный метод расчета механических напряжений, возникающих в печатных платах при вибрационных нагружениях// Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении: Тез. докл. межвуз. научно-техн. конф.-Калуга, 1987.- С. 216.
13. Автоматизированная система контроля и приемосдаточных испытаний электронно-механических ТА: Отчет о НИР/ КФ МВТУ им.Н.Э.Баумана. Руководитель Н.Д.Егупов. Исполнители: В.К.Шаров, Г.М.Луценко, Ю.П.Корнюшин и др.- Шифр темы Ж-13-05-81; № ГР 81018469; Инв. № 02830044341.- М., 1984.- 319 с.
14. Исследование, разработка и внедрение автоматизированной системы приемосдаточных испытаний телеграфных аппаратов: Отчет о НИР/ КФ МВТУ им.Н.Э.Баумана. Руководитель Н.Д.Егупов. Исполнители: Адкин М.Ю., Луценко Г.М., Корнюшин Ю.П. и др.- Шифр темы Ж-П2-07-83; № ГР 80004857; Инв. № Г-50805.- М., 1986.- 132 с.