

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.М. ТИХОМИРОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИ-  
ЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На русском языке

(05.025 – динамика и прочность машин,  
приборов и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск 1972

4768a

НТД  
ДУЗ

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.М. ТИХОМИРОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИ-  
ЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На русском языке

(05.025 – динамика и прочность машин,  
приборов и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск 1972

4768a

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР В.А.ЛАЗАРЬИН.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ф.В. ФЛОРИНСКИЙ, доктор технических наук, профессор Е.М.ШАФИТ.

Ведущая организация: Институт механики АН УССР.

Автореферат разослан "4" сентября 1972 г.

Защита диссертации состоится "1" декабря 1972 г. на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, г.Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института, г.Днепропетровск, 10, ул.Университетская, 2.

Отзыв просим направлять в двух экземплярах по адресу: г.Днепропетровск, 10, Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

Доктор технических наук, профессор А.Е.БЕЛАН

Обязательным этапом разработки новых конструкций машин, приборов и аппаратуры являются лабораторные динамические исследования их свойств.

Повышение требований к надежности, долговечности, экономичности и оптимальности вновь разрабатываемых машин, приборов и аппаратуры ставит перед исследованиями новые задачи, тресует совершенствования методов лабораторного эксперимента.

В директивах XXIV съезда КПСС указывается на необходимость "обеспечить в новом пятилетии: дальнейшую разработку проблем теоретической и прикладной математики и кибернетики для более широкого применения в народном хозяйстве математических методов и электронно-вычислительной техники, автоматизации процессов производства...".

Внедрение в практику лабораторных динамических исследований механических систем электронно-вычислительной техники и соответствующего математического аппарата позволяет решить такие важные задачи эксперимента, как имитация эксплуатационных условий работы конструкций при лабораторных исследованиях, идентификация механических систем, сокращение времени исследований.

Одним из наиболее универсальных методов решения задач лабораторного эксперимента является применение электромеханического моделирования. В этом случае исследуемую механическую

систему представляют в виде взаимодействующих электронной и механической моделей ее частей. Таким методом может быть решена, например, задача исследования механической системы, когда математическое описание некоторой ее части неизвестно или сложно. Эта часть может быть заменена ее механической моделью, а остальная часть системы с известным математическим описанием замещена вычислительной машиной. Частями с неизвестным или сложным математическим описанием могут являться полости частично заполненные жидкостью, поглощающие аппараты междувагонных связей и т. п.

Метод может быть применен также, если исследуется часть сложной механической системы. Остальная часть системы в этом случае замещается электронной моделью для формирования усилий, действующих на исследуемую часть в условиях эксплуатации. Так может быть решена задача имитации в лаборатории усилий, действующих на перевозимый в железнодорожном вагоне груз. Путь и вагоны замещаются их электронной моделью, а груз устанавливается на вибростенде. Осуществляется взаимодействие груза и модели вагона, в котором он транспортируется. Метод электромеханического моделирования может быть применен для варьирования параметров исследуемой механической системы в процессе эксперимента с целью решения задач идентификации.

Диссертационная работа посвящена вопросам применения электромеханического моделирования к лабораторным исследованиям механических систем. Практическая реализация метода электромеханического моделирования требует решения ряда сложных технических задач. Основные из них состоят в следующем:

1) для осуществления взаимодействия электронной и механической моделей необходимы преобразователи аналогов сил, вырабатываемых электронной моделью, в силы, действующие на механическую модель (источники силы), и изменений координат механической модели в их аналоги, подаваемые на входы электронной модели (датчики). Передаточные функции идеальных преобразователей есть действительные числа, независимые от частоты входного сигнала. Особенно сложной является задача построения идеальных источников силы. Многие реальные источники силы, в качестве которых могут рассматриваться, например, электродинамические и электрогидравлические вибростенды, не являются идеальными. В частности, их передаточные функции зависят от вида исследуемых систем. Возникает задача построения идеальных преобразователей;

2) при лабораторных исследованиях к механической системе присоединяют дополнительные массы и связи для закрепления, приложения сил и измерений. В результате исследуется механическая система отличная от исходной. Возникает задача исключения влияния присоединенных масс и связей на характеристики исследуемых систем.

Целью диссертационной работы является разработка методов практической реализации электромеханического моделирования механических систем. В частности, решаются следующие задачи:

1) обеспечение взаимодействия электронной и механической моделей;

2) построение идеальных источников силы на основе существующих электродинамических вибростендов;

3) исключение влияния присоединения дополнительных масс и связей на характеристики механических систем;

4) автоматизация метода присоединенных масс при экспериментальном определении приведенных масс.

При решении поставленных задач автор опирался на работы Б.Я.Когана, Г.Корна, Т.Коря, В.А.Лазаряна, Г.Н.Микишева, С.П.Стрелкова, посвященные вопросам электронного и электромеханического моделирования и колебаниям механических систем, на работы А.И.Вышеградского, В.С.Пугачева, А.М.Солодовникова, посвященные вопросам теории автоматического управления, на работы В.О.Конonenко, Р.Кохенбургера, С.Кренделла, посвященные вопросам взаимодействия реальных источников энергии с исследуемыми системами, на работы К.Беатрис, Ё.Врис, посвященные вопросам экспериментального определения приведенных масс и на работы других авторов.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключительной части.

В первой главе дается обзор существующих методов лабораторных динамических исследований механических систем, обосновывается необходимость построения идеальных источников силы, дается обзор существующих методов исключения влияния присоединения масс и связей на характеристики механических систем, приводятся примеры решения технических задач с использованием электромеханического моделирования и дается краткий обзор известных методов экспериментального определения приведенных масс.

Во второй главе рассмотрены теоретические вопросы определения идеального алгоритма управления, обеспечения устойчивости и выбора критерия качества управления электромеханических моделей механических систем.

Подлежащая исследованиям механическая система обозначена как исходная. При лабораторных исследованиях исходную систему представляют в виде взаимодействующих механической и математической моделей ее частей.

Механическая модель составляет объект, математическая модель, реализуемая с помощью ЭВМ, составляет модель. Объект и модель взаимодействуют посредством присоединенной и управляющей систем.

Присоединенная система включает в себя устройства приложения сил, закрепления объекта и измерения. Управляющая система включает совокупность средств, позволяющих на основании информации о движении объекта, модели и присоединенной системы осуществить такое управление исполнительными устройствами, при котором движение объекта и модели эквивалентно движению соответствующих частей исходной системы. Управляющая система вырабатывает управляющие воздействия, преобразуемые присоединенной системой в силы и их аналоги, действующие на объект и модель. Система, состоящая из объекта и модели, взаимодействующих посредством присоединенной и управляющей систем, составляет полную систему.

В результате анализа матричных уравнений движения объекта и модели в исходной и полной системах, исходя из условия их эквивалентности, получен идеальный алгоритм управления электромеханических моделей в виде

$$H = (-B^z - B^p + B^c + B^h + D)J + Z^s$$

где  $H$  - вектор-столбец управляющих воздействий;  $B^z$  - диа-

гональная матрица реакций внешних связей, разорванных при выделении объекта;  $B^g$  - матрица реакций связей, невошедших в объект и модель и соединявших их друг с другом в исходной системе;  $B^c$  - матрица реакций дополнительных связей, наложенных на объект в полной системе;  $B^h$  - матрица сил и их аналогов, действующих со стороны присоединенной системы на объект и модель;  $D$  - матрица элементов дифференциальных уравнений движения присоединенной системы;  $J$  - единичный вектор-столбец;  $Z^s$  - вектор-столбец внешних сил, снятых с объекта. Все матрицы квадратные.

Анализ идеального алгоритма управления показывает, в частности, что он не зависит от вида частей исходной системы, включенных в объект и модель.

Показано, что управляющую систему удобно синтезировать из отдельных управляющих подсистем. Они будут двух видов:

1) компенсаторы, назначение которых исключить влияние отдельных подсистем присоединенной системы на характеристики объекта или компенсировать неидеальности источников силы и датчиков;

2) задающие устройства, назначение которых - формировать аналоги внешних сил или реакций разорванных связей исходной системы.

Идеальные алгоритмы построения компенсаторов определяются соответствующими частями присоединенной системы и не зависят от вида исходной системы.

Производится теоретический анализ устойчивости электромеханических моделей, когда ставится задача исключить влияние

присоединенных масс и связей на характеристики механических систем. В этом случае модель отсутствует и полная система состоит из объекта, присоединенной и управляющей систем.

Исследуется устойчивость полной системы при различных видах математических моделей ее элементов. Используемые для построения управляющей системы математические модели элементов полной системы (датчиков, источников сил, присоединенных связей) эквивалентны этим элементам в ограниченном диапазоне частот. Это несоответствие является основной причиной возможной неустойчивости полной системы. При анализе устойчивости используется критерий Найквиста.

Вначале рассматривается устойчивость полной системы, представляющей собой одноконтурную систему автоматического управления. Она содержит исходную и присоединенную системы, соединенные только в одной точке. Передаточная функция  $W_S'$  реальной разомкнутой полной системы выражена через передаточную функцию  $W_{Su}'$  идеальной разомкнутой полной системы.

В идеальной полной системе влияние присоединенной системы на характеристики исходной исключается полностью и используемые математические модели элементов полной системы абсолютно точны. Выражение имеет вид  $W_S' = \alpha_1 W_{Su}'$

Через  $\alpha_1$  обозначено произведение  $\alpha_1 = \prod_i \frac{W_i}{W_i^*}$   
где  $W_i^*$  - передаточная функция  $i$ -го элемента полной системы, определенная из его математического описания,  $W_i$  - точное значение этой передаточной функции. В идеальном случае  $\alpha_1 = 1$

Анализ устойчивости полной системы показывает:

1. В идеальном случае полная система безусловно устойчива для любых исходных систем, исходя из физического смысла задачи. В линейной постановке устойчивость полной системы показана аналитически.

2. Возможна некоторая "перекомпенсация" без потери устойчивости полной системой. Под "перекомпенсацией" понимается случай, когда коэффициент  $\alpha_1$  есть действительное число, не зависящее от частоты, оошьшее единицы. Это имеет место при неправильном масштабировании компенсатора. Найдено значение для максимально допустимого значения коэффициента  $\alpha_1$ .

3. Произведен анализ устойчивости полной системы, когда коэффициент  $\alpha_1$  является комплексной величиной. При этом передаточная функция линейной механической системы, состоящей из исходной и присоединенной, на комплексной плоскости представляется семейством окружностей, расположенных в верхней или нижней полуплоскости с центрами на мнимой оси и не пересекающих действительную ось.

Далее в работе рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости полной системы, представляющей собой многоконтурную систему автоматического управления. В ней исходная и присоединенная система соединены между собой в нескольких точках.

Анализируются вопросы выбора критерия качества управления и погрешности определения собственных форм колебаний при электромеханическом моделировании механических систем.

В третьей главе рассмотрены свойства электродинамических вибростендов, методика построения идеальных источников силы на основе существующих электродинамических вибростендов, примеры исключения влияния присоединения масс и связей на характеристики механических систем и компенсации неидеальности

датчиков.

Электродинамический вибростенд рассматривается как электронный усилитель, нагрузкой которого является электромеханический импеданс вибратора  $Z_B$ . Вид импеданса определяется механической системой, с которой стенд взаимодействует. Получено выражение для электромеханического импеданса вибратора при взаимодействии стенда с линейными механическими системами в виде

$$Z_B = A^2 \rho m_s^{-1} \Delta_s \Delta^{-1},$$

где  $A$  — силовой коэффициент электродинамического вибратора, определяемый его конструкцией,  $\rho$  — оператор Лапласа,  $m_s$  — масса  $s$ -й точки исследуемой системы, к которой присоединен вибратор,  $\Delta$  и  $\Delta_s$  — определитель и его минор при решении уравнения движения исследуемой системы относительно  $s$ -й координаты.

Произведен анализ свойств электромеханического импеданса вибратора. В частности, модуль импеданса имеет относительные максимумы, а его аргумент равен нулю на частотах, равных собственным исследуемой системы. Свойства электромеханического импеданса иллюстрируются примерами.

Для двух схем исполнения электродинамических вибростендов, с трансформаторным и бестрансформаторным выходами их усилителей, найдены условия, когда вибростенд можно рассматривать как идеальный источник силы без применения управляющих систем.

Для построения идеального источника силы на основе существующих электродинамических вибростендов строятся две управляю-

щие системы: компенсатор электрической части вибростенда и компенсатор вибратора. Назначение компенсатора электрической части состоит в том, чтобы вибростенд совместно с ним можно было рассматривать как идеальный источник силы, развиваемой подвижной катушкой вибратора. Этот компенсатор исключает влияние исследуемой системы на передаточную функцию стенда. Назначение компенсатора вибратора состоит в исключении влияния присоединения вибратора стенда, а именно, его подвижной массы, жесткости и демпфирования подвески, на характеристики исследуемой системы.

Алгоритм построения компенсатора электрической части вибростенда имеет вид

$$U_1 = V_1(p) (\bar{E}_s - V_2(p) \bar{i}_2),$$

где  $U_1$  - выходной сигнал компенсатора;  $V_1(p)$  и  $V_2(p)$  - некоторые функции от оператора Лапласа  $p$ . Вид функций определяется конструкцией вибростенда;  $\bar{E}_s$  - аналог силы, которая должна действовать на  $s$ -ю точку исследуемой системы;  $\bar{i}_2$  - аналог тока подвижной катушки вибратора.

Проведено исследование работы двух типов электродинамических вибростендов с компенсатором электрической части при различных видах входных сигналов: периодические колебания синусоидальной и прямоугольной формы, одиночные импульсы, случайный стационарный процесс, и при взаимодействии с различными механическими системами.

Некоторые результаты исследований: ошибка АЧХ уменьшается

с 92% до 5%, ошибка ФЧХ уменьшается с  $90^\circ$  до  $8^\circ$  (под ошибкой АЧХ и ФЧХ понимается их отклонения от АЧХ и ФЧХ идеального источника силы), постоянная времени вибростенда уменьшается в 5 раз, уровень шума в сигнале тока подвижной катушки вибратора уменьшается в 8 раз. Практически исключается влияние исследуемой системы на характеристики вибростенда, так что входные напряжения различной формы преобразуются в силы практически без искажений формы и фазы.

Рассмотрен метод построения компенсатора электрической части вибростенда с использованием амплитудной модуляции. В этом случае рабочий частотный диапазон стенда расширяется до 0 гц.

Практическое применение метода исключения влияния присоединенных масс и связей с использованием электромеханического моделирования подробно рассмотрено на примере многоопорной неразрезной балки постоянного сечения, к одной из точек которой присоединялись масса и жесткость. Влияние присоединения массы и жесткости на собственные частоты, формы колебаний и приведенные массы исключено практически полностью. При исследованиях применялось многоточечное возбуждение.

Приводятся примеры компенсации неидеальности датчиков скорости и тона, позволяющей использовать их в диапазоне частот  $f$  - 5000 гц.

В четвертой главе рассмотрена задача имитации усилий, действующих на перевозимый в железнодорожном вагоне груз при соударении двух вагонов. Вагоны представлены их электронной моделью. Груз установлен на вибростенде. Сформированные в мо-

дели аналоги сил преобразуются в силы, действующие на груз. Информация о движении груза вводится в электронную модель для формирования аналогов сил, действующих со стороны груза на вагон. Таким способом могут быть имитированы различные условия транспортировки (скорости, вид пути, типы вагонов и междугонных связей). При этом вид электронной модели не зависит от вида груза.

Проведено исследование влияния подвески подвижной части вибратора на качество электромеханического моделирования. Для варьирования параметрами подвески (ее жесткости и демпфирования) применялось электромеханическое моделирование.

В пятой главе рассматриваются способ автоматизации процесса экспериментального определения приведенных масс с применением электромеханического моделирования и специальные модели некоторых математических операторов.

Даны основные положения применения трех методов экспериментального определения приведенных масс: метода введения силы с фазой  $T/2$ , метода использования выражения затраченной комплексной мощности и метода присоединенных масс (жесткостей). Рассмотрен способ автоматизации применения метода присоединенных масс (жесткостей). В этом случае присоединение дополнительных масс заменяется приложением дополнительных сил инерции, а жесткостей — дополнительных сил, равных реакциям, возникающим при деформации присоединенных связей. Такой способ существенно упрощает практическое применение метода, имеется возможность плавного изменения величин присоединенных масс или жест-

ностей как в области их положительных, так и отрицательных значений без снятия сил. Приведены результаты применения трех методов. Указывается, что методы экспериментального определения приведенных масс требуют дополнительных исследований.

Рассмотрены электронные модели четырех математических операторов: дифференцирование, интегрирование, полосовой заграждающий фильтр и уравнение колебательного звена. Модели строятся исходя из требований эквивалентности электронной и математической моделей в ограниченном диапазоне частот, независимости регулировок параметров реализуемых математических операторов и применения минимума операционных усилителей.

Рассматриваемые электронные модели реализованы с использованием двух операционных усилителей.

НТБ  
ДНУЗТ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены методика определения идеального алгоритма управления электромеханических моделей механических систем, свойства алгоритма и принципы построения электромеханических моделей.

2. Разработана электромеханическая модель для имитации в лаборатории усилителей, действующих на груз, закрепленный в железнодорожном вагоне, при соударении вагонов. Вагон представлен их электронной моделью, груз установлен на вибростенде.

3. Проведено исследование метода исключения влияния присоединения масс и связей на характеристики механических систем с применением электромеханического моделирования. Метод применим для любых механических систем и входных сигналов.

4. Показаны причины неидеальности электродинамических вибростендов как источников силы. Найдены условия, когда электродинамический вибростенд можно рассматривать как идеальный источник силы без применения управляющих систем.

5. Разработан способ построения идеальных источников силы на основе существующих электродинамических вибростендов с помощью специальных управляющих систем. При этом исключается влияние исследуемой механической системы на передаточную функцию стенда и влияние стенда на динамические характеристики исследуемой системы. Способ опробован на различных типах электродинамических вибростендов.

намических вибростендов.

Показано применение способа с использованием амплитудной модуляции.

6. Рассмотрен способ автоматизации метода присоединенных масс для экспериментального определения приведенных механических систем.

7. Предложены электронные модели некоторых операторов, отвечающие ряду специфичных требований.

8. Разработанные в данной работе методы применения электромеханического моделирования могут быть использованы для лабораторных динамических исследований любых механических систем.

НТБ  
ДНУЗТ

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Манашкин Л.А., Тихомиров А.М., О построении системы управления вибростендом при динамических исследованиях механических систем. Научные труды ВУЗов Литовской ССР "Вибротехника", 4 (13), изд. "Минтис", 1970.

2. Манашкин Л.А., Тихомиров А.М. Применение математического моделирования при экспериментальных исследованиях физических систем. Материалы юбилейной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров ж.д. транспорта, Днепропетровск, 1970.

3. Лазарян В.А., Гронский В.И., Ковалев И.Е., Тихомиров А.М. О реализации автоматической системы компенсации влияния присоединенных масс и связей на характеристики механических систем при лабораторных динамических исследованиях. Тезисы докладов конференции по колебаниям механических систем, изд. "Наукова думка", Киев, 1971.

4. Компенсация влияния электродинамического вибростенда на характеристики механических конструкций, получаемые при вибрационных испытаниях. Материалы Всесоюзного симпозиума "Новые методы исследований шумов и вибраций и кибернетическая диагностика машин и механизмов, Каунас, изд. КИМ, 1970г.

5. Ковалев И.Е., Тихомиров А.М. Об экспериментальном определении динамических характеристик механических систем с демпфированием. Тезисы докладов конференции по проблеме конст-

струкционного демпфирования колебаний, изд.РКИИТА, Рига, 1971.

6. Мананкин А.А., Тихомиров А.М. Об одном способе построения полосового фильтра на аналоговой вычислительной машине, **Материалы юбилейной научно-технической конференции, ЭИИТ, Днепропетровск, 1970.**

Материалы диссертации доложены:

1. На Всесоюзном симпозиуме "Новые методы исследований шумов и вибраций и кибернетическая диагностика машин и механизмов", Каунас, 1970.

2. На юбилейной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1970.

3. На конференции по колебаниям механических систем, Киев, 1971.

4. На конференции по проблеме конструкционного демпфирования колебаний, Рига, 1971.

5. На заседаниях семинара по механике Днепропетровского отделения института механики АН УССР, 1969, 1971 г.г.

6. На заседании семинара по механике Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1972.

---

БТ 00616. Подписано к печати 14.УП.72 г. Заказ № 289  
Тираж 180. Объем 1 пл. Множительная лаборатория Днепропетровского горного института им. Артема.  
г.Днепропетровск, проспект Карла Маркса, 19.