

А. В. РЫЖОВ

4280а

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ
ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ
ПОЕЗДОВ С СУЩЕСТВЕННЫМИ
НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ В МЕЖВАГОННЫХ
СОЕДИНЕНИЯХ**

(01.025. 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
1970

А. В. РЫЖОВ

4280a

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ
ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ
ПОЕЗДОВ С СУЩЕСТВЕННЫМИ
НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ В МЕЖВАГОННЫХ
СОЕДИНЕНИЯХ

(01.025. 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
1970

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Заслуженный деятель науки СССР, член-корреспондент АН СССР, доктор технических наук, профессор В. А. ЛАЗАРЯН.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Л. А. МАНАШКИН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Доктор технических наук, профессор Ф. В. ФЛОРИНСКИЙ.

Кандидат физико-математических наук, доцент И. Н. ЩИТОВ.

Ведущая организация — Институт кибернетики АН УССР.

Автореферат разослан « 12 » января . 1970 г.

Защита диссертации состоится « 12 февраля 1970 г. на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 10, Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

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

Ученый секретарь совета, канд. техн. наук

Б. М. КЛИМКОВСКИЙ.

НТБ
ДНУЖТ

Одной из актуальных проблем динамики подвижного состава железных дорог является изучение переходных режимов движения поездов. Актуальность проблемы обусловлена тем, что при переходных режимах движения на вагоны поезда действуют большие динамические усилия (при пуске поезда в ход, например, в межвагонных соединениях могут развиваться усилия в несколько раз большие, чем сила тяги локомотива).

Исследованию динамических усилий, возникающих при переходных режимах движения поездов, посвящены работы Н. Е. Жуковского, В. А. Лазаряна, А. М. Годыцкого-Цвирко, А. У. Галеева, С. В. Вершинского, Ф. В. Флоринского и других авторов. В результате проведенных ими исследований получены решения многих задач, имеющие большое практическое и теоретическое значение. Однако развитие железнодорожного транспорта ставит на повестку дня целый ряд новых задач, требующих подчас проведения целого комплекса научных исследований. Решение этих задач аналитическими методами возможно лишь в небольшом числе случаев, а проведение экспериментов с реальными поездами требует много времени и больших затрат.

Весьма перспективным методом исследования динамики сложных механических систем, какой является поезд, следует считать математическое моделирование, осуществляемое с помощью ЭВМ, так как оно позволяет снять многие допущения, которые обычно вводятся при аналитическом исследовании, и получить в короткий срок решения поставленных задач.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию переходных режимов движения поездов с помощью АВМ.

Целью работы являлась разработка специализированной

электронной модели поезда и методов постановки и решения практических задач.

В первой главе описана расчетная схема поезда и составлены дифференциальные уравнения движения.

В качестве расчетной схемы принята одномерная система упругих тел (вагонов и локомотива), соединенных амортизаторами. Каждое упругое тело упрощенно представлено материальной точкой, в которой сосредоточена его масса, и линейно-деформируемым безынерционным элементом, жесткость которого равна продольной жесткости конструкции вагона K_k . Свойства амортизатора определяются свойствами поглощающих аппаратов, которыми оборудованы вагоны реального поезда. В настоящей работе амортизаторы считаются упруго-фрикционными (неупругое сопротивление пропорционально сжатию (растяжению) q упругого элемента, а переход от нагружения к разгрузке происходит при изменении знака произведения $q\dot{q}$). Предполагалось, что амортизаторы могут быть предварительно затянутыми некоторой силой, а в связях, соединяющих в цепочку материальные точки и состоящих из последовательно соединенных амортизатора и элемента жесткости K_k , могут иметь место зазоры.

Движение механической системы, которой представлен поезд, описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Порядок системы равен $2n-1$, где n — число экипажей в поезде. Система дифференциальных уравнений в каждом конкретном случае дополнялась соответствующими начальными условиями.

Предполагалось, что на каждую материальную точку механической системы могут действовать внешние силы (силы сопротивления поступательному движению, тормозные силы и т. п.), зависящие, в общем случае, от времени и скорости движения.

Вторая глава посвящена построению специализированной электронной модели поезда, позволяющей исследовать пуск в ход, движение через перелом продольного профиля пути, экстренное и полное служебное торможения поездов, состоящих из 32-х вагонов и локомотива, а также соударения сцепов. Электронная модель поезда была создана на базе трех АВМ типа МПТ-9. Чтобы приспособить АВМ для решения поставленного класса задач, дополнительно были разработаны и модернизированы следующие методы и схемы:

а) схема стабилизации начального состояния части системы, куда не дошла волна возмущений;

б) схема моделирования силовых характеристик связей, позволяющая оперативно изменять в широких пределах жесткостные параметры системы, величину начальной затяжки, зазора и коэффициента рассеивания энергии;

в) метод и схема моделирования сил сопротивления поступательному движению, позволяющие принимать во внимание зависимость их от скорости движения;

г) метод и схема моделирования распространяющихся вдоль механической системы, которой представлен поезд, возмущений (тормозных сил), позволяющие правильно отражать их изменение в зависимости от скорости движения и силы нажатия;

д) схема моделирования силы тяги локомотива, позволяющая учитывать особенности изменения силы тяги при пуске в ход поезда всеми видами локомотивов;

е) схема регистрации решения, позволяющая непосредственно после решения (через 1—2 минуты) получить график распределения по длине системы наибольших положительных и наименьших отрицательных значений 25-ти электрических напряжений — аналогов механических величин;

ж) схема управления работой модели, позволяющая выполнять автоматически большинство операций, требующих вмешательства оператора.

Третья глава посвящена исследованию переходного режима при пуске поезда в ход.

Задача об определении наибольших усилий, возникающих при пуске в ход однородного поезда без зазоров, решена аналитически в предположении, что амортизаторы поезда не имеют предварительной затяжки, силы сопротивления поступательному движению настолько малы, что ими можно пренебречь, а пуск в ход производится силой тяги, нарастающей по экспоненциальному закону. При решении задачи поезд был представлен в виде стержня с грузом на одном из концов. Предполагалось, что зависимость продольных усилий, возникающих в стержне, от деформации и знака скорости деформации имеет такой же вид, как и характеристика связи между материальными точками при представлении поезда дискретной расчетной схемой. В этом случае процесс нагружения стержня будет описываться решением волнового уравнения, получен-

ным для упругого стержня в работе В. А. Лазаряна «О динамических усилиях в упряжных приборах поезда при трогании с места». Наибольшие значения усилий (если время нарастания силы тяги меньше, чем время бега волны нагружения) будут иметь место в момент прихода первой волны разгрузки, распространяющейся от свободного конца со скоростью a_k , определяемой жесткостью конструкции вагонов, т. е. в момент

$$t = \frac{L}{a_n} + \frac{x}{a_k}, \quad \text{где } L — \text{длина стержня; } a_n — \text{скорость распро}$$

странения волны нагружения; x — координата сечения стержня, отсчитываемая от свободного конца. Это значение времени, фиксированное для каждого сечения стержня, подставлено вместо текущего значения времени в выражение, описывающее изменение усилий и полученное в указанной выше работе В. А. Лазаряна. Таким образом, получена формула, описывающая распределение наибольших усилий по длине поезда.

Дальнейшие исследования были выполнены с помощью электронной модели поезда. Правильность работы модели проверялась путем сопоставления результатов, полученных при моделировании, с результатами, полученными аналитически или путем численного интегрирования с помощью ЭЦВМ. Проведены сопоставления результатов моделирования с результатами, полученными в опытах с реальными поездами. Сопоставления показали, что электронная модель достаточно хорошо отражает процессы, происходящие в реальном поезде, и может быть использована для исследования переходного режима, происходящего при пуске поезда в ход.

Путем электронного моделирования пуска в ход поездов было изучено влияние на наибольшие значения усилий и ускорений величины начальной затяжки и величины коэффициента рассеивания энергии.

Проведено моделирование пуска в ход пассажирского поезда в предположении, что все вагоны испытывают постоянное сопротивление поступательному движению, пропорциональное массе. Результаты моделирования позволяют судить о влиянии на наибольшие значения усилий величины сопротивления поступательному движению и силы начальной затяжки.

Так как начальная затяжка и сопротивление движению по-разному влияют на распределение наибольших усилий по длине состава, то оказалось возможным определить среднее

значение величины силы начальной затяжки и значение некоторого постоянного коэффициента, эквивалентного сопротивлению движения реального поезда. На электронной модели подбирались такие значения силы начальной затяжки и коэффициента сопротивления поступательному движению, при которых графики распределений наибольших значений усилий, полученные при моделировании, совпадали бы с графиками, построенными по результатам испытания реального поезда. Сопоставления проводились при различных значениях силы тяги, так как в противном случае результат был бы неоднозначным.

В случае пуска в ход грузового поезда с зазорами в межвагонных соединениях при большом значении коэффициента трения рассеивания энергии и, следовательно, при широкой зоне анкилозиса амортизаторы не работают даже при значительных перепадах сил. Затухание усилий при моделировании происходит только вследствие имеющихсся в модели сопротивлений, качественно соответствующих неупругим сопротивлениям конструкции вагона и груза. С другой стороны, при малом значении коэффициента рассеивания энергии (узкой зоне анкилозиса) происходит медленное уменьшение усилий от максимального значения до значения, соответствующего верхней границе зоны анкилозиса. После проведения дополнительных исследований оказалось, что существует область оптимальных значений коэффициента рассеивания энергии. В качестве критерия оптимальности было принято наименьшее значение среднеквадратического отклонения мгновенных значений усилий от их значений по окончании ударов, полученное в течение времени от момента прихода волны ударов в данное сечение до момента окончания ударов.

Четвертая глава посвящена исследованию переходного режима при торможении поезда с локомотива.

Аналитически решена задача об определении наибольших сжимающих усилий, возникающих при торможении однородного поезда без зазоров, амортизаторы которого не имеют предварительной затяжки. В этом случае поезд был представлен в виде стержня с упругими несовершенствами, к одному из концов которого присоединено абсолютно твердое тело (локомотив). При решении задачи предполагалось, что зависимость продольных усилий от деформации и знака скорости деформации такая же, как и принятая при аналитическом

исследовании переходного режима при пуске в ход (рассеивание энергии материалом стержня гистерезисное).

В отношении тормозной силы принято допущение, что она распространяется вдоль поезда с постоянной скоростью C и достигает своего наибольшего значения в течение некоторого промежутка времени, нарастая по экспоненциальному закону. При введенных выше допущениях процесс нарастания сжимающих усилий описывается линейным волновым уравнением с правой частью. Это уравнение решено, а его решение использовано для получения формул, описывающих распределения наибольших сжимающих усилий по длине поезда при $C < a_n$ и $C > a_n$. Рассуждения, проведенные при получении этих формул, аналогичны проведенным при получении формулы, описывающей распределение наибольших усилий при пуске поезда в ход.

При $C = a$ путем предельного перехода получено решение задачи о торможении поезда, представленного упругим стержнем. Предельный переход осуществлялся в решении, полученном для $C \neq a$ в работе Ф. В. Флоринского «Исследование динамических усилий в упряжных приборах при торможении поезда». В этом случае предполагалось, что торможение производится тормозной силой, мгновенно нарастающей до постоянного значения. Показано, что при $C = a$ в стержне образуются волны разрывов, на фронте распространения которых усилия изменяются скачком. Получены формулы, описывающие распределение наибольших сжимающих и растягивающих усилий, из которых следует, что значения наибольших динамических усилий ограничены и не превышают суммарной тормозной силы.

Ряд задач о торможении решен при помощи электронной модели поезда. Для контроля работы модели было проведено моделирование торможения поезда, состоящего из локомотива и 32-х одинаковых вагонов, соединения между которыми упругие и без зазоров. При моделировании предполагалось, что тормозная сила нарастает мгновенно до постоянного значения. Результаты, полученные с помощью модели при различных значениях $\frac{C}{a}$, сравнивались с результатами, полученными аналитически. Совпадение результатов хорошее во всех случаях, кроме $C = a$. При $C = a$ в аналитическом решении проявляются такие свойства сплошной системы (например,

образование волн разрывов), получение которых при моделировании затруднительно.

Сопоставление графиков распределения наибольших значений усилий по длине системы, полученных с помощью модели при различных значениях $\frac{C}{a}$, позволило выявить влияние величины отношения $\frac{C}{a}$ на наибольшие значения усилий.

Проведено моделирование экстренного торможения поезда, состоящего из 2-х локомотивов ВЛ-22М и 29-ти груженных полувагонов. Для такого поезда имелись результаты натурных экспериментальных исследований. Совпадение наибольших значений усилий, полученных при моделировании и в опытах с реальным поездом, удовлетворительное. Тормозные пути, измеренные при испытаниях реального поезда и полученные при моделировании, совпадают. Это дает основания считать модель приемлемой для исследования переходного режима, происходящего при торможении поезда.

При помощи электронной модели было исследовано влияние величины коэффициента рассеивания энергии, зазоров и жесткостей связей на наибольшие значения усилий.

На наибольшие значения усилий, возникающих при торможении, оказывает влияние предыстория движения поезда, которая характеризуется, в частности, величиной силы тяги, имевшей место непосредственно перед торможением. Исследовано влияние этой силы тяги на наибольшие значения усилий, возникающих при торможении.

ВЫВОДЫ

I. На базе трех АВМ типа МПТ-9 создана электронная модель поезда, предназначенная для исследования переходных режимов движения поездов, состоящих из 32-х вагонов и локомотива.

II. Проведено аналитическое исследование пуска в ход поезда без зазоров, амортизаторы которого не имеют предварительной затяжки. Получена формула, описывающая распределение наибольших значений усилий вдоль поезда, из которой следует, что наибольшие значения усилий в этом случае не зависят от величины коэффициента рассеивания энергии.

III. При помощи электронной модели решена задача о пуске в ход поезда без зазоров в межвагонных соединениях мгновенно нарастающей до постоянного значения силой. Исследовано влияние величины силы начальной затяжки и сопротивления поступательному движению вагонов на наибольшие значения усилий и ускорений.

Результаты исследования следующие:

а) введение начальной затяжки, если величина ее значительно меньше величины силы тяги, приводит к уменьшению наибольших значений усилий и ускорений; если величина начальной затяжки соизмерима с величиной силы тяги, то наибольшие значения усилий и ускорений несколько увеличиваются;

б) наименьшие значения максимальных ускорений, отнесенные к ускорению поезда при равноускоренном движении без сопротивления, имеют место при отношении величины начальной затяжки к величине силы тяги, равном $0,25 \div 0,4$;

в) с увеличением коэффициента сопротивления поступательному движению наибольшие значения усилий уменьшаются;

г) разработана методика определения среднего значения величины силы начальной затяжки и величины постоянного коэффициента, эквивалентного сопротивлению движения реального поезда. Для пассажирского поезда, оборудованного поглощающими аппаратами ЦНИИ-Н-6, среднее значение величины силы начальной затяжки оказалось равным 2,5 т, а значение коэффициента сопротивления поступательному движению — 0,009.

IV. Исследования пуска в ход предварительно сжатого грузового поезда мгновенно нарастающей до постоянного значения силой, проведенные с помощью электронной модели, показали, что:

а) введение начальной затяжки силой до 15 т практически не влияет на наибольшие значения усилий в поезде;

б) увеличение коэффициента рассеивания энергии η от 0,3 до 0,8 приводит к некоторому уменьшению (не превышающему 20—25%) наибольших значений усилий;

в) наименьшее значение среднеквадратического отклонения мгновенных значений усилий от их значений при стационарном режиме движения имеет место в случае $\eta = 0,45 \div 0,6$.

V. В результате теоретических исследований торможения

поезда без зазоров в предположении, что тормозная сила распространяется вдоль состава с постоянной скоростью и не зависит от скорости движения, получена формула, описывающая распределение наибольших значений сжимающих усилий вдоль состава. Из формулы следует, что наибольшие значения сжимающих усилий не зависят от величины коэффициента рассеивания энергии.

VI. Получено аналитическое решение задачи о торможении поезда, представленного упругим стержнем с грузом на одном из концов, тормозной силой, мгновенно нарастающей до постоянного значения и распространяющейся со скоростью, равной скорости упругой волны. Полученные в этом случае формулы, описывающие распределение наибольших значений сжимающих и растягивающих усилий вдоль стержня, могут быть использованы для оценки верхних границ усилий, возникающих в реальном поезде.

VII. Исследования торможения поезда без зазоров при помощи электронной модели показали, что:

а) наибольшие усилия в поезде, представленном одномерной механической системой с упругими связями, имеют место в случае, когда скорость распространения тормозной волны равна скорости упругой волны;

б) наибольшие значения сжимающих усилий в поезде, представленном одномерной механической системой с упруго-фрикционными связями, практически не зависят от величины коэффициента рассеивания энергии η (что подтверждается и результатами теоретических исследований), а наибольшие значения растягивающих усилий уменьшаются с увеличением η .

VIII. Исследования торможений предварительно растянутого грузового поезда с помощью электронной модели показали, что:

а) увеличение коэффициента рассеивания энергии приводит к незначительному уменьшению сжимающих усилий и существенному уменьшению растягивающих;

б) с увеличением зазоров и жесткости связей усилия увеличиваются;

в) наибольшие значения усилий тем больше, чем выше уровень силы тяги непосредственно перед торможением.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов. Пуск в ход одномерных механических систем, имеющих предварительную затяжку амортизаторов. Журнал «Прикладная механика», т. V, вып. 7, 1969.

2. Е. П. Блохин, В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов, Е. В. Юспина. Ударные явления в динамике одномерных разветвленных систем. Межвед. научно-техн. сб.: «Теория механизмов и машин», вып. 6, изд-во ХГУ, 1969.

3. А. В. Рыжов, Н. А. Мыльничук, А. М. Бондарев. К вопросу об исследовании процессов торможения поездов с зазорами. Тезисы докладов на I республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, 1969.

4. А. В. Рыжов, Л. А. Тур, Л. С. Бадикова. Влияние сопротивления поступательному движению на переходные режимы поездов. Тезисы докладов на I республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, 1969.

5. В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов. Исследование переходных режимов движения сложных одномерных систем с помощью электронных моделей. Тезисы докладов на III Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике, Москва, 1969.

6. В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик, А. В. Рыжов. Применение ЭВМ к исследованиям переходных режимов движения при пуске в ход. Тезисы докладов на III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, Рига, 1969.

7. В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик, А. В. Рыжов. Исследование с помощью ЭВМ процессов торможения поездов. Тезисы докладов на III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, Рига, 1969.

8. Л. А. Манашкин, В. А. Музыкин, А. В. Рыжов. Моделирование силовых характеристик связей при исследовании переходных режимов движения поездов. Тезисы докладов на III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, Рига, 1969.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ДОЛОЖЕНЫ:

1. На V совещании по основным проблемам теории машин и механизмов, гор. Сухуми, 1967.

2. На IV Всесоюзном симпозиуме по распространению упругих и упруго-пластических волн, гор. Кишинев, 1968.

3. На I республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, г. Днепропетровск, 1969.

4. На республиканском совещании по динамике твердого тела, Донецк, 1969.

5. На III Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике, г. Москва, 1969.

6. На III юбилейной научной конференции Саратовского высшего командно-инженерного училища, г. Саратов, 1969.

7. На III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, г. Рига, 1969.

8. На заседаниях семинара по механике Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, 1968, 1969.

НТБ
ДНУЖТ

БТ 00702. Подписано к печати 6. I. 1970 г. Бумага $60 \times 84^{1/16}$. 1 печ. л.
Заказ № 287. Тираж 200 экз.

Газетное издательство и типография, г. Днепропетровск, Ленинградская, 56.

НТБ
ДНУЖТ

Сканировала Щетинина Т.В.