

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА имени М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

БОНДАРЕВ Александр Матвеевич

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ,
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ГРУЗОВЫЕ ВАГОНЫ
ПРИ ТОРМОЖЕНИЯХ ПОЕЗДОВ**

(05.22.07 — Подвижной состав и тяга поездов)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск

1976

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина.

Научный руководитель — заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР,
доктор технических наук, профессор В. А. Лазарян.

Научный консультант по применению АВМ —
кандидат технических наук Л. А. Манашкин.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук А. А. Львов,
доктор технических наук А. С. Ткаченко.

Ведущая организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Защита диссертации состоится _____ 1977 г.
_____ ждению
_____ рездов»,
_____ о тран-

принять
заверен-
вск. 10.
железно-

ич

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В связи с высокими темпами развития экономики нашей страны, в соответствии с задачами, поставленными XXV съездом КПСС, к железнодорожному транспорту предъявляются более высокие требования, вызванные растущими потребностями народного хозяйства в перевозках. В Директивах XXV съезда КПСС подчеркивается, что в десятой пятилетке должно быть обеспечено дальнейшее увеличение пропускной и провозной способности железных дорог на грузонапряженных направлениях, повышение скорости движения грузовых и пассажирских поездов, увеличение перевозки грузов маршрутами и увеличения среднего веса грузовых поездов.

Поэтому необходимо детально изучать динамические процессы, происходящие при переходных режимах движения, в частности, при торможениях поездов, учитывая более тяжелые условия эксплуатации подвижного состава. Необходимость исследований переходных режимов движения при торможениях поездов обуславливается ещё тем, что в этих условиях усилия в межвагонных соединениях могут достигать величин, опасных с точки зрения прочности. В связи с тем, что на вагоны в процессе эксплуатации действуют как статические, так и динамические нагрузки, причём некоторые из них имеют вероятностную природу, выбор значений сил при расчётах на прочность и выносливость представляет сложную задачу. Если вести расчёты на прочность по наибольшим значениям измеренных сил, которые очень редко проявляются в процессе эксплуатации и действуют в течение короткого промежутка времени, то это может привести к неоправданному завышению размеров элементов конструкции, а, следовательно, к утяжелению веса подвижного состава. Нормами для расчётов на прочность и проектирование механической части новых и модернизированных вагонов желез-

На
Д
у

Н
Д
191

ных дорог устанавливаются уровни допустимых продольных нагрузок. Однако, эти величины не позволяют правильно проводить расчёты на выносливость. Для проведения расчётов на выносливость необходимо знать вероятности появления нагрузок заданного уровня.

Экспериментальные исследования по определению статистических параметров нагрузок требуют много времени и связаны со значительными затратами. Как правило, экспериментальные исследования, с одной стороны, связаны с проведением ряда дорогостоящих опытов, а с другой стороны – ограничены сравнительно небольшим диапазоном варьирования параметров испытываемых конструкций. Следовательно, оценка надежности и долговечности разрабатываемых конструкций в условиях эксплуатации невозможна без всесторонних теоретических исследований статистических характеристик продольных нагрузок, возможных в условиях эксплуатации.

Опыт эксплуатации подвижного состава показывает, что некоторые узлы рам, автоцепных устройств и других элементов часто выходят из строя, что обуславливается накапливающимися повреждениями. Статистические данные ЦБ МПС показывают, что только в 1970 году стоимость поврежденных деталей и ремонта вагонов составила 1137 тысяч рублей.

Актуальность поставленной задачи определяется ещё тем, что действующая пятилетка в соответствии с решениями партии и правительства является пятилеткой качества и эффективности. Высокие показатели качества могут быть достигнуты, если при проектировании и конструировании нового подвижного состава будут использованы новейшие результаты научных исследований.

Цель работы.

1. Разработка методики теоретических исследований переходных режимов движения одномерных линейных и нелинейных систем при

НТБ
ДНУЖТ

действии на них стохастических распространяющихся возмущений определённой структуры со случайными параметрами с применением аналоговых и цифровых вычислительных машин.

2. Получение статистических параметров сил, действующих на вагоны при экстренных и полных служебных торможениях поездов в современных условиях.

Методы исследований.

При решении поставленной задачи использованы следующие современные методы исследований

1. Численные стохастические методы решения с помощью ЭЦМ линейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение механических систем, на которые действуют распространяющиеся возмущения определённой структуры со случайными переменными параметрами.

2. Численные методы решения с помощью ЭЦМ существенно нелинейных дифференциальных уравнений.

3. Электронное моделирование существенно нелинейных динамических систем на стандартных АЭМ с использованием специально разработанных и изготовленных электронных устройств.

4. Методы математической статистики.

Научная новизна.

Разработана электронная модель стохастически распространяющихся вдоль поезда сил случайного уровня. Создана специальная аппаратура.

Разработаны программы для статистических исследований переходных режимов движения линейных одномерных механических систем вдоль которых распространяются возмущения с переменными и случайными по длине параметрами.

При помощи математического, электронного моделирования и статистического анализа произведена оценка нагруженности вагонов при

торможениях поездов.

Методами математической статистики получены зависимости, позволяющие определять статистические параметры сил, действующих на вагоны, и их распределения для поездов весом 2000-8000 Т.

Исследовано влияние характеристик воздухораспределительных устройств и статистической неоднородности поезда по массе на величины сжимающих сил и их распределения при торможениях поездов.

Практическая ценность работы.

Проведенные исследования позволяют

1. Методами математического моделирования оценить статистические характеристики сил, действующих на вагоны при торможениях поездов.

2. Существенно сократить затраты, связанные с проведением дорогостоящих экспериментальных исследований статистических характеристик сил, действующих на вагоны поезда при торможениях.

3. Производить оценку нагруженности вагонов ещё на стадии проектирования новых конструкций фрикционных или резино-металлических поглощающих аппаратов и тормозных устройств.

4. Разработанная электронная аппаратура позволила расширить возможности стандартных АВМ, применяемых для исследований переходных режимов движения поездов.

Реализация работы в промышленности.

В соответствии с Директивами по пятилетнему плану развития народного хозяйства нашей страны на 1976-80 г.г., принятыми XXV съездом КПСС, развитие железнодорожного транспорта должно осуществляться на основе технического прогресса путём широкого внедрения новейших достижений науки и техники. В связи с этим разработка методики статистических исследований сил при переходных режимах движения одномерных линейных и нелинейных механических систем осуществлялась в тесном контакте с конструкторской организацией и машиностроительным

заводом.

Используя разработанную методику, можно правильно вести расчёты на прочность, надёжность и долговечность с применением теоретико-вероятностных методов.

Внедрённые результаты исследований в промышленность обеспечат ожидаемый экономический эффект 25 тысяч рублей в год.

Апробация работы.

Апробация разработанной методики математического моделирования переходных режимов движения при торможениях поездов осуществлялась путём сопоставления результатов статистических параметров и распределений сил, полученных с помощью АБМ и ЭЦВМ с аналогичными результатами экспериментальных исследований.

Разделы данной работы доложены и одобрены на первой республиканской конференции молодых учёных (г. Днепропетровск, 1969 г.), на симпозиуме «Проблемы моделирования динамики подвижного состава» (г. Брянск, 1973 г.), на научно-технических конференциях в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта (1973, 1974 г.г.), на научных семинарах по механике (г. Днепропетровск 1975, 1976 г.г.), на республиканском научном семинаре «Вычислительная техника, автоматическое управление и регулирование» (г. Днепропетровск, 1975 г.).

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 7 работ,

Объём работы.

Данная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения; содержит 92 страницы машинописного текста, 35 страниц рисунков, список использованной литературы из 114 наименований

Содержание работы.

В введении данной работы проводится анализ существующих методов и методик исследования переходных режимов движения поездов при

торможениях. Актуальность проблемы определения динамических нагрузок, действующих на подвижной состав при переходных режимах движения поездов, обуславливается прежде всего тем, что в этих режимах возникают усилия в межвагонных соединениях, величины которых необходимо принимать во внимание при оценке нагруженности подвижного состава.

Исследованию динамических усилий, действующих на отдельные вагоны при соударениях, а также изучению усилий, возникающих при переходных режимах движения в поездах, как системы в целом, посвящены работы Н.Е. Жуковского, А.М. Годыцкого-Цвирко, В.А. Лазаряна, Ф.В. Флоринского, С.В. Вершинского, Л.Н. Никольского, Е.П. Блохина, И.А. Панькина и других авторов. Эти исследования позволили решить широкий круг задач, имеющих большое теоретическое и практическое значения.

Однако дальнейшее развитие железнодорожного транспорта, которое в конечном итоге ведёт к увеличению веса поездов и росту скорости движения, требует совершенствования методов и методик теоретических исследований нагруженности подвижного состава при переходных режимах.

Поэтому целью работы является разработка такой методики исследования с помощью АБМ и ЭЦВМ переходных режимов движения поездов при торможениях, которая позволит оценить методами математического моделирования нагруженность вагонов в этих режимах, то есть оценить статистические характеристики сил, действующих на вагоны. Для выполнения этой задачи необходимо разработать алгоритмы и электронные охваты дополнительных к АБМ устройств, с помощью которых можно проводить стохастические исследования стандартными АБМ и ЭЦВМ.

Обоснование структуры диссертационной работы.

Статистические исследования нагруженности вагонов при торможениях поездов проведены теоретически с применением методов математического моделирования и средств вычислительной техники.

После обзора существующих методов исследований поставлена

задача и определена цель исследований.

В первой главе приведены и обосновываются принятые математические модели переходных режимов движения поезда при торможении.

Вторая глава посвящена численным статистическим исследованиям с помощью ЭЦМ переходных режимов движения при торможениях сжатых поездов. Результаты исследований апробируются данными экспериментальных исследований. Здесь же обосновывается возможность упрощения математического описания внешних сил, что в последующем используется при создании специализированной электронной модели поезда.

В третьей главе описывается работа отдельных элементов и всей специализированной электронной модели поезда. Результаты электронного моделирования также апробируются данными экспериментальных исследований.

Четвёртая глава содержит все основные результаты статистических исследований по экстренным и полным служебным торможениям грузовых поездов, анализ их и обобщение.

Работа завершается заключением.

В первой главе «Математическое моделирование переходных режимов движения» приводятся дифференциальные уравнения, описывающие продольные колебания вагонов в грузовом поезде при переходных режимах движения. Для случаев, когда зазоры не влияют на характер протекания переходного процесса, расчётная схема поезда представлена в виде линейного стержня с грузом на правом конце. Движение системы описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Решение этого уравнения в стохастической постановке получено численным интегрированием дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени обобщённых координат. В случаях, когда зазоры оказывают влияние на характер протекания переходного процесса, поезд представлен в виде одномерной цепочки твёрдых тел, соединённых нелинейными деформируемыми элементами.

С целью сокращения затрат машинного времени при численных исследованиях с помощью ЭЦМ и объёма оборудования при электронном моделировании выполнялись преобразования математической модели поезда, которые позволили описать движение поезда системой дифференциальных уравнений более низкого порядка. Так, в результате выполненных преобразований оказывается возможным представить расчётную схему поезда, состоящего из 78 гружённых четырёхосных полувагонов и двух локомотивов в виде одномерной цепочки из 10 твёрдых тел, соединённых нелинейными деформируемыми элементами. Отличие величины максимальных сжимающих сил, возникающих при представлении такого поезда 80, 20, 16 и 10 твёрдыми телами, в случае экстренного торможения предварительно растянутого поезда не превышает 10 % от наибольшего уровня сил. Применяемое преобразование оказывается весьма удобным при электронном моделировании задачи о торможении поезда, поскольку переход от более тяжёлого веса поезда к более лёгкому и обратно осуществляется путём изменения масштабов времени и уровня тормозных сил. При этом машинные параметры электронной модели поезда остаются прежними.

После выполненных упрощений по преобразованию расчётной схемы поезда оказалось, что 1) в моделируемый элемент входит несколько вагонов, 2) жесткости эквивалентного соединения моделирующего элемента во столько раз меньше жесткости одного междувAGONного соединения, во сколько раз элемент длиннее одного вагона, 3) зазор эквивалентного соединения равен сумме зазоров междувAGONных соединений, 4) все междувAGONные соединения, включённые в моделирующий элемент, работают синхронно на одних и тех же участках силовой характеристики, 5) тормозная сила, действующая на элемент моделирующей системы, определяется как сумма тормозных сил, действующих на вагоны, входящие в данный элемент.

Учитывая, что значение тормозной силы определяется величиной

коэффициента трения, который в свою очередь зависит от скорости движения и силы нажатия и изменяется в зависимости от состояния поверхности катания бандажа колеса, степени загрязнённости рельса, а также существенно зависит от климатических условий, наибольшее значение тормозной силы является случайной величиной. Величина среднеквадратического отклонения наибольших значений тормозных сил выбиралась в соответствии со значением коэффициента неравномерности их работ, равного 1,3 (см. в книге В.М. Казаринов и др. Теоретические основы проектирования и эксплуатации автотормозов. М., "Транспорт", 1968).

При пневматическом управлении тормозами с локомотива, теоретически должно иметь место последовательное срабатывание тормозов в каждом вагоне по мере распространения волны разряда магистрали, если производится торможение поезда, или же должно иметь место последовательного отпуска тормозов по мере распространения волны заряда магистрали воздухом.

Учитывая, что чувствительность воздухораспределителей к перепаду давлений различна, в реальных условиях, как показывают результаты экспериментальных исследований, (Лазарин В.А. и др. Экспериментальные исследования усилий, возникающих в тяжеловесных грузовых поездах при торможении. Труды ДИИТа, вып. 35, Днепропетровск, 1967) оказывается, что тормозная сила в более удалённых от локомотива вагонах может возникать раньше, чем в более близких к локомотиву. Таким образом запаздывание появления тормозной силы в i -ом вагоне относительно момента прихода волны разряда является также случайной величиной. На величину случайного запаздывания в срабатывании тормозов оказывает влияние также и наличие зазоров в шарнирных соединениях рычажной передачи.

Изменение давлений в тормозных цилиндрах во времени описывается одноступенчатой или двухступенчатой функциями, изменяющимися по экспоненциальному закону

НТБ
ДНУЖТ

Во второй главе «Численные исследования переходных режимов движения при торможении сжатых поездов с использованием метода обобщённых координат» приводятся результаты численного решения задачи о торможении сжатого поезда, расчётная схема которого представлена в виде однородного по массе упруго-вязкого стержня с грузом на правом конце.

Статистические исследования проводятся методом Монте-Карло путём численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, записанных в обобщённых координатах, при случайных наборах параметров тормозных сил.

Эти исследования проводились с помощью ЭЦМ. Решение в виде сил, действующих на вагоны, отыскивалось путём суммирования ряда. Случайные значения параметров интенсивностей тормозных сил формировались в соответствии с алгоритмом, предложенным в книге Л.К. Горской «Статистические алгоритмы исследования надёжности». Приводится сравнительная оценка величин сжимающих сил, действующих на вагоны при экстренных торможениях, и их статистических параметров, полученных для поезда этого же веса, у которого внешние силы (интенсивность тормозных сил) определялись как некоторые эквивалентные возмущения, действующие в пределах элемента стержня длины Δx . Это эквивалентное возмущение аппроксимировалось экспоненциально изменяющейся во времени функцией, а число элементов принималось таким же, как и число твёрдых тел при исследовании переходных режимов движения с помощью аналоговых вычислительных машин. Выполнено упрощение аналитических выражений обобщённых сил в предположении, что средние значения статистических параметров тормозных сил принимаются кусочно постоянными в пределах элемента стержня длиной Δx_i . Статистические исследования сил проводились для поезда весом 8000 т, вагоны которого оборудованы тормозными устройствами с воздушнораспределительными вол. номер 270-005, установленными на грузовой режим, и композиционными

тормозными колодками. Композиционные колодки являются наиболее перспективными, а коэффициент их трения по стали в меньшей мере, чем для чугунных колодок, зависит от скорости движения. Поскольку за промежуток времени от начала торможения до момента времени, когда сжимающие силы на этапе нагружения достигнут наибольшего значения, коэффициент трения в зависимости от скорости движения изменится незначительно. Принято, что среднее значение наибольшей величины интенсивности тормозных сил определится скоростью, предшествующей началу торможения.

При исследовании предполагалось, что 1) вагоны поезда оборудованы поглощающими аппаратами типа Ш2-В или Ш1-Тм, интегральные значения жёсткости которых составляют $2200-2300 \text{ Т.м}^{-1}$, 2) законы распределения случайных величин подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Каждое новое решение, в соответствии с методом математического моделирования, осуществлялось для своего набора параметров интенсивности тормозных сил, формируемых по заданным средним и стандартам на 1-ом участке поезда.

Таким образом для случаев, когда поезд к началу торможения оказывается сжатым, расчётную схему целесообразней представлять в виде стержня, поскольку в этом случае необходимо интегрировать количество дифференциальных уравнений второго порядка во столько раз меньше, во сколько раз число обобщённых координат, описывающих движение эквивалентного стержня, меньше числа вагонов в поезде.

В результате теоретических исследований переходных режимов движения при торможениях оказалось, что наибольшие значения сжимающих сил расположены в средней части поезда, законы распределений вероятностей появления наибольших сил отличаются от нормального и являются комбинацией нескольких законов распределений. Однако, как будет показано в последующем, эти распределения можно будет представить в виде канонического разложения в ряд Грама-Шарлье. Вполне

удовлетворительное сопоставление результатов, полученных при теоретических исследованиях, с результатами экспериментальных данных позволяет сделать вывод о приемлимости такой методики к исследованиям переходных режимов при торможениях сжатых поездов. Уровни ускорений в случае, когда поезд перед началом торможения оказывается сжатым, не велики.

С целью сокращения объема электронного оборудования, необходимого для формирования напряжений - аналогов тормозных сил, проведены статистические исследования сил, действующих на вагоны при экстренных торможениях, когда тормозная сила, действующая на элемент $\Delta x_i = l' \Delta x$, (Δx - длина вагона, l' - число вагонов в пределах данной длины Δx_i) определялась как некоторая эквивалентная экспоненциально изменяющаяся во времени функция. Показатель степени нарастания эквивалентной тормозной силы определялся из условия, что эта сила, действующая в пределах элемента стержня Δx_i , достигает своего наибольшего значения за промежуток времени, в течение которого сумма тормозных сил достигает также своего наибольшего значения.

Результаты численного интегрирования, полученные с помощью ЭЦМ показали, что представление расчетной схемы поезда 16 участками эквивалентного стержня вполне допустимо. Это позволяет значительно экономить расходы машинного времени, если исследования проводятся с помощью ЭЦМ, и сократить объем электронного оборудования, если исследования проводятся с применением АМ.

В третьей главе "Электронное моделирование задачи о торможении поезда" описывается работа отдельных элементов и работа в целом электронной модели поезда, позволяющей исследовать в стохастической постановке переходные режимы движения при экстренных, полных служебных и регулируемых торможениях поездов.

При решении большого круга технических задач наряду с цифровыми вычислительными машинами с успехом используются аналоговые вычис-

лительные машины. Точность результатов, гарантируемая аналоговыми вычислительными средствами, как правило в инженерных задачах оказывается достаточной.

Если же в качестве объекта исследования принята грубая реальная система с большим разбросом параметров (примером такой системы может служить железнодорожный поезд) и необходимо получить достаточно большое число решений, то очевидным преимуществом обладают аналоговые вычислительные машины.

Дифференциальные уравнения движения одномерной механической системы, представленные по способу "Первых разностей" (В.А.Лазарян и др. Исследование при помощи математических машин непрерывного действия процессов, происходящих при продольных соударениях одномерных механических систем. Труды ДИИТа, вып.72, М., Транспорт, 1967) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_i &= \frac{1}{M_i} (S_{i-\frac{1}{2}} - S_{i+\frac{1}{2}} - F_{Ti}), \\ \dot{Q}_{i+\frac{1}{2}} &= V_i - V_{i+1}, \quad i = 0, 1, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

Здесь V_i - скорость движения i -го элемента, M_i - его масса, $S_{i-\frac{1}{2}}$ и $S_{i+\frac{1}{2}}$ - силы, действующие на i -ый элемент справа и слева, F_{Ti} - суммарная тормозная сила, действующая на i -ый элемент, $Q_{i+\frac{1}{2}}$ - сжатие (растяжение) соединения между $i-\frac{1}{2}$ и $i+\frac{1}{2}$ элементами.

Электронная модель поезда собрана на базе стандартных АЭМ в соответствии с уравнениями движения одномерной механической нелинейной системы (I) при действии на неё распространяющегося возмущения со случайным уровнем и запаздыванием. Предлагаемая в данной работе специализированная электронная модель поезда состоит из следующих элементов: 1) электронная модель распространения волн в тормозной системе, которая осуществляет управление включением или отключением напряжений-аналогов тормозных сил в соответствии с заданными ско-

ростями распространения волны разрядки или зарядки магистрали воздухом, 2) блоков, формирующих напряжения-аналоги тормозных сил со случайным уровнем, 3) ячеек, моделирующих работу упруго-фрикционного поглощающего аппарата, 4) стандартных операционных усилителей и интеграторов, позволяющих получать величины скоростей движения и относительные перемещения при переходных режимах движения.

Для реализации на электронной модели процесса торможения разработано устройство, вырабатывающее напряжения-аналоги тормозных сил со случайными уровнями и запаздываниями относительно фиксированных моментов времени, определяемых моментами прихода волны разрядки или зарядки магистрали воздухом. Аппаратура позволяет проводить исследования переходных режимов движения как при остановочных, так и при регулировочных торможениях, так как обеспечивает моделирование не только появления тормозных сил, но и их спад.

Моделирование распространения фронта волны разрядки тормозной магистрали и отпуща тормозов осуществляется регистром, выполненным из стандартных по схеме триггеров с отдельными входами, связанных между собой линиями задержки, собранными из R , C цепочек. Распространению волны разрядки магистрали соответствует «волна» переходов триггеров регистра в единичное состояние. «Волна» перехода триггеров регистра в нулевое состояние соответствует распространению волны наполнения магистрали воздухом. Скорость распространения волн определяется частотой следования импульсов, задаваемых низкочастотным генератором периодических колебаний. Сигналы с выхода триггеров поступают на ячейки запаздывания, которые выполнены на базе неуправляемого переключающегося диода. Величина запаздывания управляется параметрами ячейки и постоянным напряжением случайного уровня с выхода усилителя мощности. На вход усилителя мощности подается напряжение от стандартного генератора шума. Разброс величин запаздывания в срабатывании устанавливается в соответствии с

расбросом запаздываний начала роста или спада давлений в тормозных цилиндрах. Сдвинутые по времени на случайный или детерминированный интервал времени с выходов ячеек задержки сигналы включают или отключают стандартные по схеме тиристорно-релейные ключи.

Формирование случайного уровня напряжений-аналогов тормозных сил осуществляется путём подключения на входы интеграторов конденсаторов, заряженных до случайного уровня, с помощью контактных групп реле выходных тиристорно-релейных ключей. При этом нормально ^мзакнутые контактные группы этих же ключей в цепи обратной связи размыкаются и на выходных клеммах интегратора напряжение нарастает от нуля и до наибольшего значения по экспоненциальному закону (при моделировании процессов торможений). При отпуске тормозов входные конденсаторы отключаются от интеграторов, а конденсаторы в цепи обратной связи разряжаются через резисторы, подключаемые вторыми парами контактных групп тиристорно-релейных ключей.

Моделирование нелинейной зависимости коэффициента трения от скорости движения осуществляется с помощью операционного усилителя, во входную цепь которого включен делитель с нелинейным полупроводниковым резистором. Напряжения-аналоги тормозных сил получают как результат перемножения с помощью блока произведения экспоненциально изменяющейся функции на значение напряжения-аналога коэффициента трения, зависящего от скорости движения.

При обработке результатов статистических исследований максимальных сил, действующих на вагоны при торможениях поезда использовалось аналоговое устройство, которое запоминало максимальные величины изменяющегося процесса во времени одновременно по 32 каналам. Эти величины затем считывались и фиксировались с помощью самописца на графической ленте, разделённой в масштабе на уровни определённых сил.

При статистической обработке результатов исследований строи-

лись распределения нагрузок как в различных сечениях, так и по всей выборке максимальных сил, действующих на вагон при равновероятном положении его по длине поезда.

Контроль правильности работы модели осуществлялся: 1) по сопоставлению значений параметров моделируемых тормозных сил с требуемыми величинами, 2) по параметрам силовых характеристик междувагонных соединений, 3) по сопоставлению (количественно) осциллограмм изменения усилий при экстренном торможении однородного предварительно растянутого поезда весом около 4000 Т с аналогичными осциллограммами, полученными при экспериментальных исследованиях, 4) по распределениям сил, получаемых с помощью АВМ и ЭЦМ. Так отличие по величинам средних значений сжимающих сил, получаемых с помощью АВМ и ЭЦМ составляет около 6 %, а по среднеквадратическим отклонениям — 1 %

С целью проверки приемлемости принятой при моделировании расчётной схемы поезда, а также для проверки достоверности получаемых при электронном моделировании распределений нагрузок, действующих на вагоны при различных режимах торможения (экстренные, полные служебные и регулировочные торможения), сопоставлялись распределения максимальных сжимающих сил с распределениями сил в аналогичных режимах, полученных при экспериментальных исследованиях.

Таблица

Режим тормо- жения	V_0 км, ч ⁻¹	S_{max} (т.)		b_s (т.)	
		эсп.	мод.	эсп.	мод.
ПСТ	10	95	88	30,9	28,1
	50	64,3	62,7	28,4	28,4
ЭТ	30	153	156	52,4	45,8
РТ	Раст.	44,5	42	17,2	14,3
	Сжат.	42,6	40,2	20	18,4

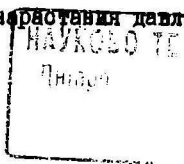
НТБ
ДНУЖТ

В таблице приведены средние значения наибольших сил, действующих на вагоны и их среднеквадратические отклонения для однородного по массе поезда весом 8000 Т, полученные при экспериментальных исследованиях и при моделировании. Результаты этих сопоставлений позволяют сделать вывод о приемлемости такой специализированной модели к исследованию переходных режимов движения поездов при различных видах торможения.

В четвертой главе "Обработка и анализ результатов" приводятся результаты исследования сил, действующих на вагоны грузовых поездов при различных режимах торможения и ситуациях, имеющих место в условиях эксплуатации. Проведены исследования влияния темпа нарастания давления в тормозных цилиндрах вагонов по мере удаления их от локомотива, статистической неоднородности поезда по массе на величины сжимающих сил при торможениях растянутых поездов.

Для выполнения расчётов на прочность элементов подвижного состава при однократных или повторяющихся нагрузках недостаточно знать только средние значения нагрузок и их среднеквадратические отклонения. Необходима ещё информация о законе распределения этих величин. Результаты исследований, полученные при электронном моделировании, удобно представить в виде канонических разложений по каким-то определённым законам распределений, а величины средних и среднеквадратических отклонений нагрузок, действующих на вагоны, в виде регрессионных зависимостей от веса поезда Q и начальной скорости движения V .

Как показано в теоретических и экспериментальных работах, характер протекания процесса в поезде существенно зависит как от состояния поезда к моменту начала торможения, так и от изменения давления в тормозных цилиндрах во времени в зависимости от места расположения их вдоль по длине поезда. Специальные испытания по отработке тормозных устройств показали, что наименьших значений усилий можно добиться, если темп нарастания давления в тормозных цилиндрах будет



увеличиваться по мере удаления от локомотива при пневматическом управлении тормозами. Подобного типа характеристики были получены для воздухораспределителей условный номер 270-002 с ускорителями разрядки магистрали. В результате сопоставления максимальных сжимающих сил, полученных при экстренных торможениях предварительно растянутых поездов, вагоны которых оборудованы воздухораспределителями условный номер 270-002 с ускорителями разрядки и воздухораспределителями усл. номер 270-005 оказалось, что в первом случае уровни сил, действующих на вагоны, меньше. Это получается потому, что в случае, когда темп нарастания давления в тормозных цилиндрах вагонов увеличивается по мере удаления от локомотива (аналогичным образом будут изменяться и тормозные силы), к моменту интенсивного нарастания тормозных сил поезд оказывается частично сжатым, что приводит к снижению уровня сил в автоцепках.

При исследовании статистических параметров и распределений нагрузок, действующих на вагоны при торможениях поездов, представляет интерес выяснить влияние неоднородности поезда по массе на эти параметры. В детерминированной постановке при исследованиях этих режимов было показано, что при неблагоприятных условиях неоднородность по массе приводит к увеличению сжимающих сил до 30 %.

Исследования сил, возникающих в статистически неоднородных по массе поездах показали, что средние значения наибольших сил практически совпадают со средними значениями сил, имевшими место в однородных по массе поездах. Наибольшие значения сил на уровне $S_{max} = \bar{S}_{max} + 3\sigma$, в статистически неоднородных поездах на 12 % выше, чем в однородных поездах. Это позволяет распространить результаты исследований, проведенных для однородных по массе поездов, на статистически неоднородные поезда. При проведении исследований использовались распределения масс вагонов, полученных Л.Н.Никольским и его учениками.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что

для определения статистических характеристик сил, действующих на вагоны при различных видах торможения поездов весом 2000–8000 Т и движущихся со скоростями 10–50 км.ч⁻¹, можно ограничиться линейной статистической моделью зависимости сил от веса и начальной скорости движения. Ошибки при определении сил по линейной статистической модели соизмеримы с ошибками измерений. Коэффициенты уравнений регрессий для двухфакторной модели, которые определены по полному факторному эксперименту (под экспериментом здесь подразумевается достаточно представительная выборка, состоящая из 50–100 решений) позволяют определять величины средних и среднеквадратических отклонений максимальных сжимающих сил, действующих на вагоны поезда при торможениях. При апробировании получаемых регрессионных зависимостей были определены величины средних и среднеквадратических отклонений максимальных сжимающих сил, действующих на вагоны поезда весом 3300 Т и движущегося с начальной скоростью перед началом экстренного торможения 10 км.ч⁻¹. Результаты этих исследований не использовали при определении регрессионных зависимостей. Сопоставлением статистических характеристик сил с аналогичными величинами, полученными с помощью АВМ оказалось, что погрешность для средних значений составляет 10 % и для среднеквадратических отклонений 3,4 % . Таким образом с помощью полученных в работе регрессионных зависимостей можно определять уровни средних значений нагрузок, действующих на вагоны и их среднеквадратические отклонения для поездов выше указанного веса .

В литературе, посвященной вопросу оценки надежности инженерных конструкций и сооружений показано, что очень удобным при построении функции неразрушимости оказывается нормальный закон распределения вероятностей. Как показали результаты исследований, оказывается возможным представить полученные распределения нагрузок в виде канонических разложений (разложение в ряд Грама-Шарлье) по производным нормального закона. Анализ получаемых распределений как по получаемым

распределениям, так и по величинам остаточных дисперсий показал, что наилучшее приближение получается, если ограничиться суммированием полиномов Эрмита до четвертого порядка включительно.

При построении интегрального распределения нагрузок, действующих на вагоны при торможениях поездов весом 3000-8000 т и движущихся с произвольными начальными скоростями движения были использованы регрессионные зависимости для средних значений максимальных сжимающих сил и их среднеквадратических отклонений, а также вероятности начальных скоростей торможения.

Выводы

1. Предложенная в данной работе методика статистических исследований переходных режимов движения позволяет определять статистические параметры и распределения нагрузок, действующих на вагоны при торможениях поездов.

2. Разработана и изготовлена электронная аппаратура, используемая при исследованиях статистических параметров с помощью электронного моделирования.

3. Величины средних значений сил, действующих на вагоны при торможениях, можно оценивать по детерминированным параметрам.

4. Статистическая неоднородность поезда по массе не существенно влияет на средние значения сил. Поэтому для оценки средних значений сил, действующих на вагоны в статистически неоднородном по массе поезде, можно воспользоваться результатами, полученными для однородного поезда.

5. Получены распределения и статистические параметры сил, действующих на вагоны при экстренных и полных служебных торможениях. Построены регрессионные зависимости параметров распределений от веса поезда и скорости его движения. Эти зависимости позволяют определять распределения сил, имеющих место при любом заданном двумерном распределении вероятностей ситуаций, определяемых весом поезда и скоростью

движения. Определены распределения сил для существующих в настоящее время условий эксплуатации.

6. Существующие и проектируемые воздухораспределители должны обеспечивать увеличение темпа нарастания давления в тормозных цилиндрах по мере удаления вагона в поезде от локомотива.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

1. Лазарян В.А., Манашкин Л.А., Юрченко А.В., Ратнер Э.С., Ханян М.С., Бондарев А.М. Применение электричного моделирования к исследованию случайных нестационарных колебаний вагонов в поезде при продольных ударах. Труды БИГМ, вып.26, Брянск, 1974 .
2. Манашкин Л.А., Бондарев А.М. О статистических исследованиях переходных режимов движения при торможении сжатых поездов. Труды ДИИТа, вып. 169/21, Днепропетровск, 1975 .
3. Манашкин Л.А., Бондарев А.М. Электронное моделирование сил при статистических исследованиях переходных режимов движения поездов. Труды ДИИТа, вып.182/22, Днепропетровск, 1976 .
4. Манашкин Л.А., Бондарев А.М., Кедри М.М. Исследования с помощью АЭМ статистических характеристик продольных сил, действующих на вагоны при экстренных и полных служебных торможениях. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 329/76 .
5. Манашкин Л.А., Бондарев А.М. Исследования статистических характеристик сжимающих сил, действующих на вагоны при экстренных торможениях сжатых поездов. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 328/76 .
6. Манашкин Л.А., Бондарев А.М., Маслеева Л.Г. К вопросу об упрощении математической модели некоторых одномерных механических систем. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 397/76.
7. Манашкин Л.А., Бондарев А.М. Статистические характеристики сил, действующих на вагоны при экстренных и полных служебных торможениях. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 396/76 .

НТБ
ДНУЖТ

Материалы диссертации доложены :

1. На научно-технических конференциях Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина, Днепропетровск, 1973, 1974 .

2. На симпозиуме «Проблемы моделирования динамики подвижного состава», Брянск, 1973 .

3. На республиканском научном семинаре «Вычислительная техника, автоматическое управление и регулирование», Днепропетровск, 1975 .

4. На семинарах по механике Днепропетровского отделения Института механики и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина, Днепропетровск, 1975, 1976 .

БТ 67039, 23 ноября 1976.

Заказ 13853, Тираж-100.

Размножено на ротационном при Днепропетровской городской типографии № 3 областного управления по делам полиграфии, издательства и книжной торговле. 320002. Днепропетровск-2, ул. Фрунзе № 6.

Сканировала Камьянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ