

СССР — МПС — ГМУЗ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

МУЗЫКИН В. А.

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ
УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВАГОНЫ,
ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
И УСКОРЕНИЙ ВАГОНОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ
СОУДАРЕНИЯ ПОЕЗДОВ

(Исследование продольных соударений упруго-пластических
одномерных систем)

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ № 433

Подвижной состав и тяга поездов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1967

НТБ
ДНУЖТ

МУЗЫКИН В. А.

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ
УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВАГОНЫ,
ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
И УСКОРЕНИЙ ВАГОНОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ
СОУДАРЕНИЯ ПОЕЗДОВ

(Исследование продольных соударений упруго-пластических
одномерных систем)

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ № 433

Подвижной состав и тяга поездов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

3082a

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор ЛАЗАРЯН В. А.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
СТРЕЛКОВ С. П.,
доктор технических наук, профессор ДАБАГЯН А. В.

Ведущее научно-исследовательское учреждение — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Автореферат разослан «21» октября 1967 г.

Защита диссертации состоится «28» ноября 1967 г. на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, 10, Университетская, 2, ауд. 386.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого совета или прислать свои отзывы о работе по адресу:

гор. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2.
Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Ученый секретарь совета


(РАДЗИХОВСКИЙ Ю. А.)

НТБ
ДНУЖТ

Важными тенденциями развития пригородного транспорта являются дальнейшее повышение скоростей движения поездов и создание облегченных конструкций подвижного состава при условии сохранения (или увеличения) степени безопасности движения. Подвижной состав для пассажирских и особенно пригородных перевозок должен проектироваться так, чтобы в аварийных случаях и, в частности, при столкновении поездов была максимально обеспечена безопасность пассажиров. Требование обеспечения безопасности движения вызывает необходимость изучать процессы, происходящие при соударении (столкновении) поездов. Исследование этих процессов целесообразнее всего проводить путем сочетания теоретических расчетов (с применением математических машин) с экспериментом.

Настоящая работа посвящена разработке методики применения электронных математических машин непрерывного действия (электронных моделей) к решению инженерных задач о переходных режимах движения одномерных упруго-пластических систем, в том числе и железнодорожных поездов. Как показали проведенные исследования, применение электронных моделей является эффективным средством решения этих задач. Методика подобных исследований была апробирована на задачах соударения одинаковых стержней и удара стержня о преграду.

В диссертации рассматривается соударение одномерных систем, представляющих собой цепочечную систему абсолютно твердых тел, соединенных податливыми безынерционными связями. При исследовании предполагается: (1) каждая масса (тело) в системе может иметь только продольные перемещения; (2) силовая характеристика связи (зависимость усилия в связи от величины и скорости ее удлинения) задана; (3) по-

датливые связи между массами могут быть как упругими, так и упруго-пластическими; при работе связи в области упругих деформаций может иметь место рассеяние энергии; (4) зона упруго-пластических деформаций связи аппроксимируется схемой Прандтля с линейным упрочнением.

При соударении поездов с достаточно большой относительной скоростью в конструкции вагонов могут возникнуть значительные пластические деформации. Один из путей, которым можно снизить их величину, является оборудование поездов специальными противоударными амортизаторами. Такие амортизаторы нашли применение в зарубежной практике. В настоящей работе проведено также исследование процессов, происходящих при соударении поездов, через противоударный амортизатор.

Помимо вышеописанной цели работы и методики ее проведения в первой главе приводится краткий обзор литературы, посвященный исследованию переходных режимов движения одномерных механических систем (в том числе и железнодорожных поездов) и исследованию ударных процессов в механических системах с учетом пластических деформаций.

Во второй главе приведены расчетные схемы и дифференциальные уравнения движения, составленные согласно расчетным схемам, для случаев: соударения двух одинаковых стержней, удара стержня о преграду и соударения двух одинаковых поездов. При составлении уравнений силы сопротивления абсолютному перемещению стержней (поездов) не учитываются.

Дифференциальное уравнение в частных производных, составленное для динамического деформирования стержня, с помощью конечных разностей (применяется метод прямых) сводится к системе разностных дифференциальных уравнений. Рассматриваются два возможных вида этой системы уравнений.

Первому виду ставится в соответствие дискретная одномерная механическая система (расчетная схема I), которая может быть получена следующим образом. Стержень разбивается на n участков. Предполагается, что усилие вдоль каждого участка стержня остается постоянным. Масса участка стержня сосредотачивается на его концах. Таким образом, на стыке двух участков будет сосредоточена масса двух стыкующихся половин участков стержня. Связи между массами представляют

НТБ
ДНУЖТ

собой безынерционный податливый элемент, упругие и упруго-пластические свойства которого эквивалентны упругим и упруго-пластическим свойствам соответствующего участка стержня.

Второму виду системы уравнений поставлена в соответствие дискретная одномерная механическая система (расчетная схема II), полученная путем разбиения стержня на p участков и сосредотачиванием масс участков в их центре тяжести. Упругие и упруго-пластические свойства участка стержня в этом случае представлены двумя, симметрично расположенными относительно массы, податливыми элементами. Таким образом, при этой расчетной схеме сделано допущение, что усилие постоянно вдоль двух стыкующихся половин участков стержня.

Расчетные схемы I и II отличаются между собой лишь граничными условиями, количеством масс (в I расчетной схеме на одну массу больше) и месторасположением сосредоточенных масс вдоль стержня. В силу того, что сопротивление абсолютному перемещению стержня не принималось во внимание, задача соударения одинаковых стержней ставилась следующим образом: один стержень в начальный момент был неподвижен, а второй имел скорость V ; процессы соударения рассматривались только в стержне, который вначале был неподвижным, а влияние второго учитывалось соответствующими граничными и начальными условиями.

При решении задачи удара стержня о преграду считалось, что стержень в начальный момент неподвижен, а преграда движется со скоростью V . Преграда имитировалась абсолютно твердым телом, имеющим бесконечно большую массу. При написании дифференциальных уравнений для случая удара стержня о преграду согласно расчетной схеме I было принято, что удар первой массы дискретной системы, соответствующей стержню, является неупругим и, следовательно, эта масса с момента соприкосновения и до тех пор, пока усилие со стороны остальных масс отрицательно, будет двигаться вместе с преградой.

Анализ систем уравнений, описывающих соударение двух одинаковых стержней и удар стержня о преграду (согласно расчетным схемам I и II), показывает, что процессы, происходящие в стержне при накатывании на него преграды со ско-

ростью V , будут такие, как и в случае удара о него равным стержнем, но уже при удвоенной относительной скорости $2V$.

При решении задачи о соударении двух одинаковых поездов предполагалось: система во время удара не теряет устойчивости; в продольном направлении могут иметь место упруго-пластические деформации вагонов; вагоны в поездах незаторможены, поэтому силами сопротивления абсолютному движению вагонов можно пренебречь. Каждый вагон поезда заменялся одной сосредоточенной массой m_i и двумя симметрично расположенными относительно нее податливыми безынерционными элементами. Упругие и упруго-пластические свойства такого элемента эквивалентны упругим и упруго-пластическим свойствам последовательно соединенных половины конструкции вагона и поглощающего аппарата. Поглощающие аппараты, которые устанавливаются по концам каждого вагона, имеют ограниченный рабочий ход; после их закрытия энергия удара воспринимается только конструкцией вагонов. Силовая характеристика поглощающего аппарата аппроксимируется силовой характеристикой рессоры.

Расчетные схемы обычного соударения поездов и соударения поездов через противоударный амортизатор аналогичны расчетной схеме II соударения стержней и отличаются от нее более сложным видом силовых характеристик связей между массами.

Третья глава посвящена приведению систем дифференциальных уравнений движения к машинному виду. При этом рассматривается два варианта приведения.

Движение рассматриваемых в работе механических систем описывается системой уравнений вида

$$\ddot{u}_i = \frac{1}{m_i}(S_i - S_{i-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

при соответствующих граничных и начальных условиях, где:

u_i — смещение (абсолютное перемещение) i -того тела в системе;

m_i — величина массы i -того тела;

S_i и S_{i-1} — усилия, действующие на тело;

n — число дискретных масс в системе.

Опыт показывает, что приведение физических уравнений типа (1) к машинному виду и дальнейшее построение блок-

НТБ
ДНУЖТ

схемы решения удобнее делать, если физические уравнения представлены в нормальной форме Коши.

При изучении поведения рассматриваемых физических систем поступательное (переносное) перемещение систем необходимо исключить из рассмотрения, так как абсолютные смещения масс значительно превышают величину сжатия связей. В работе рассматриваются два варианта новых обобщенных координат:

$$q_i = u_{i+1} - u_i,$$

$$\bar{V}_i = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i,$$

либо

$$q_i = u_{i+1} - u_i$$

$$V_i = \dot{u}_i$$

где:

q_i — сжатие (удлинение) связи между массами;

\bar{V}_i — скорость деформации i -ой связи;

V_i — абсолютная скорость i -ой массы.

Система уравнений (1) при новых обобщенных координатах q_i и \bar{V}_i преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_i &= \bar{V}_i \\ \dot{\bar{V}} &= \frac{1}{m_i} S_{i-1} - \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i+1}} \right) S_i + \frac{1}{m_{i+1}} S_{i+1} \end{aligned} \right\} (2)$$

$(i=1, 2, \dots, n-1)$

Если же за обобщенные координаты взяты q_i и V_i , то система (1) преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} \dot{q} &= V_{i+1} - V_i & (i=1, 2, \dots, n-1) \\ \dot{V}_i &= \frac{1}{m_i} (S_i - S_{i-1}) & (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} (3)$$

При решении системы уравнений (2) необходимо вычислять вторые разности величин S_i , в то время как при решении системы (3) достаточно вычислять лишь первые разности.

В работе исследуется влияние погрешностей установки на модели коэффициентов уравнения вида (2) на точность получаемых результатов. Для статического режима системы показано, что при непосредственном вычислении вторых разностей

НТБ
ДНУЖТ 7

малые погрешности ($\pm 0,5\%$) установки коэффициентов вызывают ошибки в решении порядка $3 \div 15\%$. Если же вторые разности формировать из первых, то (хотя при этом будет большее число коэффициентов) ошибки установки коэффициентов величиною $\pm 0,5\%$ вызывают меньшие погрешности решения ($\sim \pm 1,3\%$). Формирование вторых разностей из первых требует почти в два раза большее число решающих усилителей. Если же используется система уравнений вида (3) (для нее необходимо формировать только первые разности), то точность решения задачи будет повышена и, кроме этого, для ее решения потребуются почти столько же усилителей, как и при обычном решении системы (2). Полученные ранее системы уравнений в работе преобразуются к виду (3). При приведении исходных уравнений к машинным используется линейная связь между физическими и машинными переменными. Блок-схема решения задачи помимо стандартных блоков содержит специальные узлы «W», которые предназначены для воспроизведения силовых характеристик связей.

Глава IV посвящена математическому описанию и электронному моделированию силовых характеристик связей. Рассматривается три вида связей, а именно: (а) связь, силовая характеристика которой аппроксимируется схемой Прандтля с линейным упрочнением; (б) связь, состоящая из последовательно включенных двух податливых элементов (имитирующих упруго-пластические свойства конструкции вагона), силовая характеристика которых описывается схемой Прандтля, и двух поглощающих аппаратов; (в) связь, в которой дополнительно к перечисленным в пункте (б) элементам последовательно включен противоударный амортизатор. Первый вид связей использовался в работе при решении задачи о соударении стержней, второй вид — при решении задачи о соударении поездов без противоударных амортизаторов. При моделировании соударения поездов через противоударный амортизатор использовались связи вида (б) и (в). Противоударный амортизатор (Г А.), устанавливаемый на головных вагонах соударяющихся поездов, наделен следующими свойствами: при усилиях в связи, меньших некоторого значения, он представляет собой очень жесткую упругую конструкцию, а при усилиях больших этого значения он, линейно упрочняясь, пластически деформируется (жесткость Г. А. в этой обла-

НТБ
ДНУЖТ

ти деформаций может быть величиной положительной, отрицательной и равной нулю); если остаточные деформации Г. А. достигли максимально возможных, то при дальнейшем увеличении усилия он опять представляет собой жесткую конструкцию.

Перечисленные выше связи являются нелинейными и, кроме того, вид их силовой характеристики зависит от предыстории работы связи. Схема моделирования этих связей (узел «W») должна содержать в себе элементы аналоговой памяти. Эти схемы в работе построены по следующему принципу. Нелинейности силовой характеристики для области упругих деформаций моделируются либо коммутацией входных цепей, либо цепей обратной связи основного операционного усилителя, входящего в состав узла «W». Эти цепи составлены из омических сопротивлений и переключающих схем, выполненных на диодах. Моделирование области упруго-пластических деформаций осуществляется подключением (при определенном значении усилия в связи) в цепь обратной связи основного усилителя дополнительной цепочки, состоящей из двух последовательно включенных операционных усилителей. У одного из этих усилителей входное сопротивление и сопротивление обратной связи взяты омические, а у второго — емкостные. Ключевая схема, включающая эту дополнительную цепочку усилителей, выполнена по принципу схемы «Зона нечувствительности». При усилиях в связи меньших значения, при котором связь начинает упруго-пластически деформироваться, ключевая схема отключает дополнительную цепочку из обратной связи основного усилителя и препятствует разряду входного конденсатора усилителя этой цепочки. Такая схема позволяет в процессе решения непрерывно запоминать величину остаточной деформации связи.

В главе V изложены результаты решений поставленных задач. Содержание этой главы кратко отражено в выводах.

ВЫВОДЫ

1. В работе рассмотрены задачи: (1) соударение одинаковых упруго-пластических стержней, (2) соударение одинаковых поездов, (3) соударение одинаковых поездов через амортизатор, (4) удар стержня о преграду через амортизатор.

2. Показано, что одномерные упруго-пластические сплошные системы можно с достаточной степенью точности заменить эквивалентными дискретными упруго-пластическими системами и наоборот. При этом, в ряде случаев, можно ограничиться рассмотрением дискретной системы, состоящей из $n = 16 \div 24$ масс.

3. В работе рассмотрен вопрос влияния погрешности установки на модели коэффициентов решаемых уравнений на точность полученных результатов. Показано, что погрешности решения, обусловленные формированием разностей, будут при формировании вторых разностей из первых значительно меньшими, чем при непосредственном формировании вторых разностей.

4. Разработана более экономичная, с точки зрения количества решающих усилителей, блок-схема решения задач о движении одномерных систем; в блок-схеме сохранен принцип формирования вторых разностей из первых.

5. Дано математическое описание силовых характеристик связей, имеющих упруго-пластические области деформации, и предложен ряд схем для их моделирования.

6. Разработана блок-схема моделирования силовой характеристики связи, содержащей специальный противоударный амортизатор (Г. А.).

7. Проведена серия решений задач о соударении двух одинаковых неоднородных поездов. Решения показали:

а) при наличии поглощающих аппаратов в межвагонных связях все вагоны при соударении поездов будут иметь остаточные деформации, причем наибольшие остаточные деформации будут иметь головные вагоны (в нулевом сечении);

б) увеличение хода поглощающих аппаратов (Δ) с 70 мм до 120 мм приводит к существенному снижению ускорений, возникающих при скоростях соударения $V \leq 12$ км/ч, однако при скоростях соударения $V \geq 16$ км/ч разница между случаями $\Delta = 70$ мм и $\Delta = 120$ мм становится несущественной;

в) если в поездах убрать поглощающие аппараты ($\Delta = 0$), и при этом обеспечить межвагонные связи без зазоров, то остаточные деформации по величине будут большими, чем при $\Delta \neq 0$, но они распространяются уже только на часть поезда; ускорения, возникающие при больших скоростях соударения, будут по величине меньшими, чем в поезде с поглощающими

НТБ
ДНУЖТ

аппаратами, причем характер их изменения во времени будет более благоприятным;

г) неоднородность по массе электропоездов ($a=0,833$) несущественно сказывается на характере протекания процесса удара.

8. При помощи электронной модели и аналитических решений исследовано влияние параметров противоударного устройства (устанавливаемого на головном вагоне одного из соударяющихся поездов) на протекание процесса соударения двух одинаковых поездов. Из исследования следует:

а) если соударяемые поезда оборудованы поглощающими аппаратами, то установкой противоударного амортизатора на головном вагоне (в нулевой связи) можно добиться только более равномерного распределения остаточных деформаций вдоль поезда; в результате можно повысить допустимую скорость соударения до ~ 25 км/ч;

б) дальнейшее повышение допустимой скорости соударения (при наличии в поездах поглощающих аппаратов) принципиально возможно лишь при условии, что противоударный амортизатор имеет величину срабатывания незначительно превышающую значение усилия, при котором поглощающие аппараты полностью исчерпывают свой ход (т. е. $S_{SA} \approx S_{an}$), однако при этом противоударный амортизатор должен иметь очень большой рабочий ход и, естественно, жесткость его должна быть близкой к нулевой ($k_A \approx 0$);

в) если поглощающие аппараты отсутствуют в поездах, то установив противоударный амортизатор с достаточно большим рабочим ходом и $k_A \approx 0$, можно (принципиально) существенно повысить допустимую скорость соударения; характер изменения ускорений вагонов в этом случае будет более благоприятным и они по величине будут меньшими, чем в случае $\Delta \neq 0$;

г) более эффективным средством по защите подвижного состава при аварийных соударениях следует считать установку противоударных амортизаторов не только на головных вагонах, но и во всех межвагонных связях.

НТБ
ДНУЖТ

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Лазарян В. А., Манашкин Л. А., Музыкин В. А. Исследование при помощи вычислительных машин непрерывного действия процессов, происходящих при соударении двух электропоездов. Труды ДИИТа, вып. 72, изд-во «Транспорт», М., 1967.

2. Итин М. Е., Манашкин Л. А., Музыкин В. А., Сокол Л. А. Опыт эксплуатации вычислительных машин непрерывного действия. Труды ДИИТа, вып. 59, изд-во «Транспорт», М., 1966.

3. Лазарян В. А., Манашкин Л. А., Музыкин В. А. Исследование соударений электропоездов при помощи электронной модели. Тезисы докладов совещания «Современные методы расчетов в машиностроении с применением электронных вычислительных машин», Харьков, 1966.

4. Белик Л. В., Лазарян В. А., Манашкин Л. А., Музыкин В. А. Исследование процессов распространения упруго-пластических волн деформаций в одномерных системах. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по распространению упругих и упруго-пластических волн, Ташкент, 1966.

5. Лазарян В. А., Манашкин Л. А., Музыкин В. А., Белик Л. В. Исследование процессов, возникающих при продольном соударении двух одномерных многомассовых систем твердых тел, связанных упруго-пластическими связями. Тезисы докладов совещания по проблеме нелинейных колебаний механических систем, Рига, 1966.

6. Лазарян В. А., Белик Л. В., Манашкин Л. А., Музыкин В. А. Численное решение задачи о переходных режимах движения одномерных многомассовых систем при помощи ЦВМ Урал-3. Тезисы докладов V Всесоюзного совещания пользователей ЭВМ типа Урал. Секция, 1, Тарту, 1966.

7. Барбас И. Г., Белик Л. В., Блохин Е. П., Каблук В. А., Лазарян В. А., Манашкин Л. А., Музыкин В. А. Разработка математических методов исследования переходных режимов движения поездов с нелинейными характеристиками упругих приборов. Тезисы докладов XVII Юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1967.

8. Манашкин Л. А., Музыкин В. А., Рыжов А. В. Моделирование задачи об ударе с учетом упруго-пластических деформаций. Тезисы докладов XVII Юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1967.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ДОКЛАДЫВАЛИСЬ:

1. На совещании «Современные методы расчетов в машиностроении с применением электронных вычислительных машин», Харьков, 1966.
2. На III Всесоюзном симпозиуме по распространению упругих и упруго-пластических волн, Ташкент, 1966.
3. На совещании по проблеме нелинейных колебаний механических систем, Рига, 1966.
4. На V Всесоюзном совещании пользователей ЭВМ типа «Урал», Тарту, 1966.
5. На XVII Юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1967.
6. На семинаре по механике ДИИТа, Днепропетровск, 1967.
7. На семинаре кафедры общей физики МГУ, Москва, 1967.

НТБ
ДНУЖТ

БТ 09871. Подписано к печати 11.X.1967 г. Бумага 60x84¹/₁₆. 1 печ. л.
Заказ № 8036. Тираж 200 экз.
Газетное издательство и типография, г. Днепропетровск, Ленинградская, 56

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ