

СССР — МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
им. М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

Инженер ТЕНЕНБАУМ Эмиль Меерович

624,21:625,1

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
И БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Специальность 05.22.05 — Искусственные сооружения на
железнодорожном и автомобильном
транспорте

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1975

НТБ
ДНУЖТ

СССР - МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМ. М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

Инженер ТЕНЕНБАУМ Эмиль Меерович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО
СОСТАВА И БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Специальность 05.22.05 - Искусственные сооружения на
железнодорожном и автомобильном
транспорте

6761a

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Днепропетровск

1975

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

ПІД
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре "Мосты" Днепропетровского
института инженеров железнодорожного транспорта им.М.И.Калинина

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Бондарь Н.Г.;
кандидат технических наук,
доцент Ройтбурд З.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Моргаевский А.Б.;
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Кохманюк С.С.

Ведущее предприятие – научно-исследовательский институт
мостов при Ленинградском институте инженеров железнодорожного
транспорта.

Автореферат разослан "25" августа 1975 г.

Защита диссертации состоится "2" октября 1975 года в
14 часов на заседании Ученого Совета Днепропетровского института
инженеров железнодорожного транспорта)320629 ГСП, Днепропетровск
Ю, ул. Университетская 2, ДЛИИТ).

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 в двух экземплярах по адресу:
320629 ГСП, Днепропетровск Ю, ул. Университетская 2, ДЛИИТ.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент

Лебединец Л.Н.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Перспективным планом развития народного хозяйства нашей страны предусматривается дальнейшее техническое перевооружение железнодорожного транспорта, рост размеров перевозок, повышение провозной и пропускной способности железных дорог. Увеличение скоростей движения и веса поездов в значительной степени зависит от мощности и надежности железнодорожных устройств и сооружений, в том числе мостов.

Все это выдвигает в качестве одной из актуальных задач современного мостостроения исследование динамической работы пролетных строений железнодорожных мостов и их взаимодействия с подвижным составом при высоких скоростях движения. Особенно актуальной эта задача становится сейчас в связи с внедрением высокопрочных сталей, алюминиевых сплавов и других новых материалов, конструкция из которых обладает, как правило, повышенной жесткостью.

В рамках этой проблемы важное значение имеет разработка эффективных методов и приемов теоретического решения задач, связанных с исследованием причин возникновения и развития динамических процессов в системе "мост-поезд" и с изучением особенностей взаимодействия подвижного состава и пролетных строений железнодорожных мостов.

Цель работы. Целью настоящей работы является исследование колебаний системы "мост-поезд", возникающих при движении подвижного состава по пролетным строениям железнодорожных мостов, а также оценка влияния различных факторов на динамическую работу элементов рассматриваемой системы.

Общая методика исследования. Исследование базируется на теоретико-экспериментальном изучении взаимодействия подвижного состава и балочных пролетных строений мостов. На основе уравнений

НТБ
ДНУЖТ

Логгранка второго рода получены системы дифференциальных уравнений свободных колебаний пролетных строений, а также совместных колебаний пролетных строений с железнодорожной нагрузкой при движении последней по мосту. Определение частот и форм собственных колебаний пролетных строений производилось степенным методом с исчерпыванием. Исследование динамики взаимодействующей системы "мост-поезд" выполнено на основе математического моделирования движения состава по мосту с использованием при решении системы дифференциальных уравнений метода Рунге-Кутты-Танакка.

Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными. При обработке натуральных осциллограмм применялись методы корреляционного и спектрального анализа стационарных случайных процессов.

В работе использованы материалы экспериментальных исследований, выполненных в 1972 и 1974 годах кафедрой "Мосты", НИИ динамики мостов и НИИ динамики и прочности подвижного состава ДЛИТа с участием автора.

Научная новизна. Предложены новые математические модели, описывающие свободные колебания пролетных строений железнодорожных мостов и их взаимодействие с подвижным составом. Предлагаемые модели более полно отражают действительную работу элементов изучаемых систем по сравнению с используемыми в настоящее время и дают возможность получить подробную информацию о поведении элементов пролетных строений мостов и движущихся экипажей в процессе их взаимодействия.

В работе рассмотрено влияние расчетных схем экипажей, скорости движения и начальных условий подвижной нагрузки, состояния пути на мостах на процесс взаимодействия балочных мостов и подвижного состава. На основе анализа динамики элементов системы

НТБ
ДНУЖТ

"мост-поезд" вскрыты основные причины, приводящие к погрешностям в определении динамических коэффициентов для пролетных строений. Даются оценка этих ошибок и рекомендации по надежному определению динамических коэффициентов. Предложены приемы, позволяющие существенно повысить точность результатов, получаемых при спектральном анализе натуральных осциллограмм, и эффективность использования ЭЦМ.

Практическая ценность. Разработанная математическая модель и ее реализация на ЭЦМ могут быть использованы при решении ряда вопросов взаимодействия подвижного состава и пролетных строений без обширных экспериментальных исследований, требующих больших материальных затрат, а также позволяют прогнозировать динамическую работу существующих конструкций мостов при перспективных скоростях движения, оценить динамику элементов системы при взаимодействии перспективного подвижного состава с существующими и проектируемыми пролетными строениями железнодорожных мостов.

Предложенные в работе рекомендации позволяют получать надежные результаты при оценке динамической работы пролетных строений и подвижного состава при теоретическом и экспериментальном исследовании взаимодействия системы "мост-поезд".

Внедрение результатов работ. Разработанные автором алгоритмы и программы по анализу осциллограмм записей динамических процессов, полученных при экспериментальных исследованиях динамики механических систем, включены в Республиканский (ИМ АН УССР) и отраслевой (ВНИИ ТЭМ МПС) фонды алгоритмов и программ.

Методики исследования взаимодействия подвижного состава и пролетных строений железнодорожных мостов, обработки результатов экспериментальных исследований с использованием ЭЦМ и рекомендации по выбору расчетных схем экипажей при теоретических исследованиях взаимодействия системы "мост-поезд" включены в план внедрения законченных научно-исследовательских работ МПС. Внед-

НТБ
ДНУЖТ

рение осуществляется в ЦД МПС, проектных институтах и научно-исследовательских лабораториях, занимающихся исследованиями динамической работы пролетных строений железнодорожных мостов.

Апробации работы. Отдельные результаты работы докладывались на Первом всесоюзном совещании пользователей ЭВМ типа "Урал" (Тарту, 1966), на научно-техническом совещании "Статистические методы прочности в машиностроении" (Минск, 1968), на Третьей республиканской научно-технической конференции "Применение математических методов и вычислительной техники в науке и народном хозяйстве" (Киев, 1968), на первой республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников (Днепропетровск, 1969), на Симпозиуме по проблемам моделирования динамики подвижного состава (Брянск, 1973), на координационном совещании мостовиков (Ленинград, 1974) на заседаниях кафедры "Мосты" и НИИ динамики мостов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (1972-1975 гг.).

В полном объеме диссертация доложена на заседании кафедры "Мосты" ДИИТа в мае 1975г.

Публикации. Основные результаты работы освещены в 13 печатных работах.

Объем работы. Диссертационная работа объемом 191 стр. машинописного текста с 63 иллюстрациями и 17 таблицами состоит из введения, пяти глав, выводов и описки литературы. Библиография охватывает 120 наименований.

ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ РАБОТЫ

Движение подвижной нагрузки по мостам сопровождается сложными динамическими процессами, протекающими как в элементах пролетных строений мостов, так и в экипажах подвижного состава. Теоретическим и экспериментальным изучением этих процессов, вопросам разработки методики приближенного динамического расчета пролетных

НТБ
ДНУЖТ

строений и теоретическому обоснованию норм динамических коэффициентов и жесткости пролетных строений посвящено большое количество работ советских и зарубежных ученых.

В первой главе реферируемой работы дан краткий обзор этих исследований. Отмечаются классические работы А.Н.Крылова и С.П.Тимошенко, а также фундаментальные исследования В.В.Болотина, Н.Г.Бондаря, И.И.Казея, Ю.Г.Козымина, С.И.Конашенко, С.С.Кохманюка, А.Б.Моргаевского, А.П.Филиппова, Л.Фрыбы, Г.Н.Яковлева и других ученых, внесших большой вклад в развитие методов динамического расчета сооружений.

В большинстве проведенных исследований динамика системы "мост-поезд" рассматривается в постановке воздействия, при которой экипажи подвижного состава заменяются движущимися по пролетному строению одиночными силами (грузами), ототемой сил (грузов) или равномерно распределенной нагрузкой. При такой постановке не всегда удается с достаточной точностью определить показатели, характеризующие динамику пролетных строений, а динамические явления в подвижном составе вообще исключаются из рассмотрения. Для оценки условий движения железнодорожной нагрузки по мостам отдельные авторы принимают расчетные схемы экипажей, близкие к действительным конструкциям, но при этом пренебрегают колебаниями пролетного строения и рассматривают движение экипажей по неровностям профиля пути, обусловленным упругими прогибами пролетных строений.

Подобные предположения существенно абстрагируют реальные условия динамической работы системы. Исследователи приходят к выводу, что дальнейшее проникновение в природу динамических процессов, возникающих как в элементах моста, так и в экипажах поезда при его движении по искусственным сооружениям, возможно лишь в рамках задач динамического взаимодействия мостов и подвижного состава.

НТБ
ДНУЖТ

Последующие главы реферируемой работы и посвящены исследованию вертикальной динамики взаимодействующей системы "мост-поезд" применительно к наиболее распространенным на сети железных дорог СССР балочным металлическим пролетным строениям.

Во второй главе рассмотрены свободные колебания балочных металлических пролетных строений с ездой снизу проектировки "Проектстальконструкция". Учитывая конструктивную сложность рассматриваемых систем, расчетная схема пролетного строения принята в виде балочного набора, моделирующего основные элементы конструкции: главные фермы, балочную клетку (продольные и поперечные балки) и мостовое полотно проезжей части (мостовые брусья и рельсы). В случае, если главные балки выполнены в виде сквозных ферм, они заменяются эквивалентными по прогибам в середине пролета балками с шарнирным опиранием концов и с равномерно распределенной массой m , и изгибной жесткостью E, J по длине пролета.

Аналитические выражения вертикальных перемещений главной балки (y_1) продольной балки (y_2) и рельса (y_3) выбраны в виде

$$\begin{aligned} y_1 &= \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \sin \frac{k\pi x}{l}; \\ y_2 &= \beta_0 + \beta^* \left(1 - \frac{2x}{l}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k \sin \frac{k\pi x}{l}; \\ y_3 &= \gamma_0 + \gamma^* \left(1 - \frac{2x}{l}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k \sin \frac{k\pi x}{l} \end{aligned} \quad (I)$$

и соответствуют их опорным закреплениям.

Перемещения мостовых брусьев ($y_{5,i}$) и поперечных балок ($y_{4,j}$) определены из условия неразрывности перемещений элементов системы в местах их взаимного пересечения

$$\begin{aligned} y_{4,j}(z) &= \frac{2}{3} (y_{2,j} - y_{1,j}) \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{\delta_j}\right) + y_{1,j}; \\ y_{5,i}(z) &= y_{5,i}(0) - \frac{\rho(\delta-c)z^2}{2E_s J_s} + \frac{\rho(z-c)^3}{6E_s J_s} - \frac{\rho(z-\delta)^3}{6E_s J_s} \end{aligned} \quad (2)$$

НТБ
ДНУЖТ

где

$$y_{3i}(0) = \frac{\beta}{\beta - \gamma} (y_{3i} - \Delta_3) - \frac{\gamma}{\beta - \gamma} (y_{2i} + \Delta_2);$$

$$\rho = \frac{1}{\beta - \gamma} [y_{3i} - y_{2i} - (\Delta_3 + \Delta_2)];$$

$$\beta = \frac{(b-c)\delta^2}{2E_s J_s} - \frac{(b-c)^3}{6E_s J_s}; \quad \gamma = \frac{(b-c)c^2}{2E_s J_s}$$

2δ - расстояние между главными фермами;

$2b$ - расстояние между продольными балками;

$2c$ - расстояние между рельсами;

Δ_1 - обжатие мостового бруса под рельсом;

Δ_2 - обжатие мостового бруса над продольной балкой.

С использованием выражений (1) и (2) были вычислены кинетическая и потенциальная энергии системы и в дальнейшем с помощью уравнений Лагранжа второго рода получена система дифференциальных уравнений свободных колебаний пролетного строения в вертикальной плоскости симметрии.

Порядок этой системы определяется количеством учитываемых форм колебаний отдельных элементов конструкции.

В качестве объектов исследований в настоящей работе выбраны пролетные строения проектировки "Проектотальконструкция" с различным расчетным пролетом.

Частоты и формы свободных колебаний пролетных строений системы ПСК с расчетным пролетом $l = 33, 44, 55$ и 66 м были получены на ЭВМ степенным методом с исчерпыванием. Задача решалась в двух приближениях. В первом приближении учитывались поступательные перемещения, поворот и два члена ряда, описывающие изгибные колебания элементов системы; а во втором - еще дополнительно четыре члена ряда.

Анализ полученных результатов показал, что значения частот, полученных в первом и втором приближениях, хорошо совпадают, а коэффициенты распределения амплитуд близки. Второе приближение

НТБ
ДНУЖТ

дает более полный спектр частот и более точные значения вышних частот колебаний.

Основная частота собственных колебаний для всех рассмотренных пролетных строений хорошо совпадает с экспериментальной. В предлагаемой постановке получена значительно более полная информация о спектре частот, чем в случае простой балки. Кроме того, принятая расчетная схема, моделирующая динамическую работу балочных пролетных строений железнодорожных мостов с проезжей частью, позволяет определять конфигурацию отдельных элементов конструкции и при рассмотрении вынужденных колебаний оценивать степень участия каждого элемента в общем процессе колебаний конструкции.

Полученные значения динамических характеристик исследуемых пролетных строений использованы в третьей главе при исследовании взаимодействия подвижного состава и пролетных строений.

Подвижная нагрузка рассматривается как поезд, состоящий из "N" экипажей, связь между которыми допускает их свободное взаимное вертикальное перемещение. Количество экипажей поезда в общем случае может быть неограниченное. Взаимодействующий состав может быть представлен в виде различных по геометрическим и динамическим характеристикам отдельных экипажей или групп экипажей. Также не накладываются ограничения на осность расчетных схем единиц подвижного состава. С целью упрощения решаемой задачи для каждого экипажа введены идеализации, которые обычно используются при исследовании динамики подвижного состава. Кузова, рамы тележек и колесные пары считаются твердыми телами. Экипаж совместно с грузом представляет собой симметричную конструкцию. Радиусы кругов катания всех колес, катящихся без проскальзываний, одинаковы. Поверхность катания колес абсолютно гладкая. Кузов опирается на тележки при помощи одинарного упруго-вязкого рессорного подвешивания.

НТБ
ДНУЖТ

Жесткость пружинных комплектов и коэффициент вязкого сопротивления демпферов для тележек данного экипажа одинаковы. Если в составе имеются экипажи с двойным подвешиванием кузова, то они заменяются экипажами с динамически эквивалентным одинарным подвешиванием. Предполагается, что поезд движется по мосту с постоянной скоростью. Мост может быть однопролетным или многопролетным, состоящим из балочных пролетных строений разрезной, неразрезной или консольной систем. Единственное условие, которое при этом требуется, - чтобы были известны частоты и формы колебаний пролетных строений, взаимодействующих с подвижным составом. Также предполагается, что продольная плоскость симметрии пути по мосту и экипажей состава совпадают. Неровности на обеих нитях рельсовой колес, которые вызваны устройством строительного подъема на мосту или другими причинами, принимаются одинаковыми, поэтому колебания исследуемой системы рассматриваются только в продольной вертикальной плоскости симметрии.

Исходя из введенных идеализаций и предположений, конфигурация элементов системы "мост-поезд" определяется при помощи трех групп обобщенных координат:

- z_i - вертикальное перемещение центра масс i -того экипажа состава;
- φ_i - угол поворота кузова i -того экипажа относительно главной центральной оси, перпендикулярной продольной плоскости симметрии системы;
- φ_j - обобщенная координата пролетного строения, описывающая перемещение сечения пролета по j -той форме колебаний.

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой системы получены с использованием уравнений Лагранжа второго рода.

После перехода к безразмерным параметрам и координатам эти уравнения, моделирующие вертикальные колебания взаимодействующей

системы "мост-поезд", примут вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{y}_{zi} + \frac{\omega_{ni} \xi_i}{2\alpha n_i} \sum_{u=1}^{n_i} \dot{y}_{ui}^* + \frac{\omega_{ni}^2 \pi^2}{\alpha^2 n} \sum_{u=1}^{n_i} y_{ui}^* &= \frac{\pi^2 \omega_{ni}^2}{\alpha^2} \\ \ddot{y}_{zi} + \frac{\omega_{ri} \xi_i}{2\alpha n_i \omega_{ni}} \left[\sum_{u=1}^{n_i/2} \dot{y}_{ui}^* - \sum_{\frac{n_i}{2}+1}^{n_i} \dot{y}_{ui}^* \right] + \frac{\pi^2 \omega_{ri}^2}{\alpha^2 n_i} \left[\sum_{u=1}^{n_i/2} y_{ui}^* - \sum_{\frac{n_i}{2}+1}^{n_i} y_{ui}^* \right] &= 0; \\ \ddot{y}_j + \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^{n_i} \frac{\psi_{ui}}{\eta_j^*} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \ddot{y}_{\kappa} \chi_{\kappa i u} \chi_{j i u} + \frac{2\pi}{\alpha \rho_j} \dot{y}_j + \frac{\pi^2 \omega_j^2}{\alpha^2} y_j &= \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^{n_i} (A_{j i u} - B_{j i u}) \chi_{j i u}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где

$$A_{j i u} = \frac{\pi^2 \psi_{ui} \eta_i}{\alpha^2 \rho_{i, \max}} - \frac{\delta_{i1} \omega_{ni}^2 \pi^2 W_i}{\alpha^2 n_i \eta_j^*} y_{ui}^* + \frac{\delta_{i1} \omega_{ni} \xi_i W_i}{2\alpha n_i \eta_j^*} \dot{y}_{ui}^*$$

$$B_{j i u} = \frac{\psi_{ui}}{\eta_j^*} \left[\sum_{\kappa=1}^{\infty} (\dot{y}_{\kappa} \chi'_{\kappa i u} + \mu_{\kappa} \chi''_{\kappa i u}) - \dot{y}_{c u i} + \dot{y}_{n u i} \right];$$

$$y_{ui}^* = \mu_{z i} \pm \mu_{z l} - \frac{1}{\delta_{i1}} \left[\sum_{\kappa=1}^{\infty} \mu_{\kappa} \chi_{\kappa i u} - y_{c u i} + y_{n u i} \right]$$

Обозначения, принятые в системе уравнений (3), соответствуют обозначениям работы [7].

Первые два уравнения системы соответствуют обобщенным координатам, описывающим колебания подпрыгивания и галоцирования i -того экипажа поезда. Таких пар уравнений в решаемой системе будет столько, сколько экипажей в данный момент находится на пролетном строении. Количество уравнений третьего типа, описывающих колебания пролетного строения по j -той форме, соответствует числу учитываемых форм колебаний моста.

Реализация предложенной математической модели осуществлена на ЭЦВМ "Минск-32".

Автором разработана специальная библиотека стандартных массивов, на базе которой могут быть синтезированы рабочие программы для рассмотрения взаимодействия произвольной подвижной нагрузки с балочными пролетными строениями однопролетных и многопролетных мостов. В процессе работы программы на каждом шаге интегрирования

НТБ
ДНУЖТ

печатаются значения обобщенных координат системы, их скоростей и ускорений, а также деформации рессорных комплектов экипажей расчетного поезда. Эти результаты позволяют всесторонне оценить динамическую работу элементов системы "мост-поезд".

С использованием разработанного комплекса программ исследовалось влияние выбора расчетной схемы экипажей состава на точность определения основных характеристик взаимодействия: максимального динамического коэффициента по прогибам середины пролета и максимальных деформаций рессорных комплектов экипажей. Были рассмотрены случаи идеально гладкого состояния верхнего строения пути и наличие неровностей, вызывающих резонансные колебания элементов системы. Установлено, что при движении состава по мосту, на котором путь находится в идеальном состоянии, изменение основы расчетных схем экипажей поезда не вызывает заметного изменения величин динамических коэффициентов по прогибам пролетных строений. Поэтому для их определения рекомендуются наиболее простые расчетные схемы экипажей. Однако для оценки динамических явлений в подвижном составе даже при идеальном состоянии пути упрощение расчетных схем экипажей приводит к количественному увеличению характеристик динамики экипажей. Так, например, при движении по пролетному строению $l = 33$ м со скоростью $V = 60$ км/час состава из груженных четырехосных полувагонов, выбор в качестве расчетной схемы каждого вагона эквивалентного одноосного экипажа приводит к увеличению деформаций рессорных комплектов в 1,6 раза по сравнению с эталонной четырехосной расчетной схемой.

Еще более значительными получаются погрешности, когда учитываются неровности верхнего строения пути на мосту. В резонансных режимах колебаний системы использование одноосной расчетной схемы для экипажей состава приводит к увеличению динамического коэффициента по прогибам середины пролета на 27%, а деформация

НИИ
ДНУЖТ

рессор - в 1,8 раза по сравнению с эталонными результатами. Следовательно, для получения надежных количественных результатов при теоретических исследованиях взаимодействия системы "мост-поезд" в расчетных схемах отдельных экипажей состава необходимо брать столько осей, сколько имеет реальный экипаж.

В работе проведено исследование влияния на вертикальную динамику элементов систем "мост-одиночный экипаж" и "мост-поезд" следующих возмущающих факторов: скорости движения и начальных условий подвижной нагрузки, состояния верхнего строения пути на мосту и строительного подъема. По результатам произведенных расчетов построены графики изменения максимальных значений динамических коэффициентов по прогибам середины пролета в зависимости от скорости движения для диапазона 50 - 250 км/час. Выявлены качественные особенности взаимодействия при различных скоростях движения нагрузки, связанные с соотношением фаз свободных и вынужденных колебаний пролетного строения в моменты достижения максимального значения прогиба, с многоосностью экипажей, синфазность колебаний подрессоренных масс и начальными условиями для отдельных экипажей поезда.

Под начальными условиями для экипажей в работе понимаются значения обобщенных координат, описывающих положение кузова, в момент входа экипажа на пролетное строение. При изучении влияния колебаний подрессоренных частей подвижной нагрузки показано, что возможны такие сочетания параметров элементов системы и скорости движения состава, при которых развиваются синфазные колебания отдельных экипажей. Такие режимы развиваются при движении однородного поезда, экипажи которого имеют одинаковые ненулевые начальные условия. Скорость при этом должна быть такой, чтобы период возмущения от входа каждого последующего экипажа совпадал с периодом колебаний подпрыгивания кузова. Для четырехосных полу-

НТБ
ДНУЖТ

вагонов на тележках ЦНИИ-УЗ-0, например, эта скорость соответствует 95-100 км/час. Синфазные колебания экипажей поезда, состоящего из груженных четырехосных полувагонов, наблюдаются также при наличии на верхнем строении пути на мосту регулярных неровностей с длиной, кратной полной длине экипажа. Динамика пролетного строения при этом существенно выше, чем при других параметрах неровностей. Так, при длине неровности 6,95 м, амплитуде 0,01 м и резонансных скоростях движения поезда $V = 50$ км/час (частота возмущения близка к частоте колебаний кузова экипажей) и $V = 130$ км/час (частота возмущения совпадает с частотой колебаний пролетного строения $l = 55$ м) максимальные значения динамического коэффициента по прогибам середины пролета достигают величин 1,26 и 1,17 соответственно. При длине неровности 8,65 м динамический коэффициент по прогибам середины пролета не превосходит 1,05 во всем рассмотренном диапазоне скоростей, несмотря на то, что деформации рессорных комплектов в этом случае достигают значений 0,39 Δ_m и против 0,19 Δ_m и при $l_n = 6,95$ м.

Таким образом, синфазность колебаний отдельных экипажей поезда является одним из наиболее неблагоприятных режимов для пролетного строения. Условия возникновения и развития таких колебаний необходимо учитывать при разработке новых типов подвижного состава и новых конструкций пролетных строений.

В работе получены зависимости максимальных значений динамического коэффициента пролетного строения и деформаций рессор экипажей от параметров неровностей верхнего строения пути.

Показатели, характеризующие динамическую работу пролетных строений и подвижного состава, практически линейно зависят от глубины неровности. Зависимость этих же величин от длины неровности является более сложной и определяется суперпозицией ряда причин. Оказывается, что для подвижной нагрузки наиболее неблагоприятными

НТБ
ДНУЖТ

являются неровности верхнего строения пути с длинами, кратными базе экипажа. Для пролетного строения - неровности с длиной, равной половине полной длины экипажа. При рассмотрении движения четырехосного полувагона на тележках ЦНИИ-ХЗ-0 - наиболее распространенного на сеть железных дорог СССР - наибольшая динамика элементов системы развивается при следующих длинах неровностей: 8,65 м, 4,32 м, ... и 6,95 м. Сопоставление перечисленных длин с принятой в пролетных строениях проектировки ПСК длиной панели 5,5 м показывает, что длина эта выбрана весьма удачно с точки зрения уменьшения динамических эффектов, связанных с неровностью подрельсового основания и остаточных деформаций в балочной клетке.

При изучении влияния строительного подъема на взаимодействие - системе системы "мост-поезд" рассматривалось движение со скоростью $V = 100$ км/час по пролетному строению $l = 55$ м однородного поезда, состоящего из десяти четырехосных полувагонов. Уравнение кривой строительного подъема принято в виде параболы

$$y_{c,n} = 4 \lambda \epsilon (1 - \epsilon)$$

Были проведены расчеты динамических характеристик взаимодействия при различных начальных условиях для экипажей поезда, различным состоянии верхнего строения пути. При этом варьировалась стрела λ строительного подъема. Показано, что строительный подъем на однопролетных мостах не устраняет основных причин, вызывающих динамику пролетных строений и подвижного состава. Поэтому с точки зрения динамической работы элементов рассмотренных систем, устройством строительного подъема не является необходимым.

Вопросам спектрального анализа натуральных осциллограмм, записанных при экспериментальных исследованиях и разработке некоторых практических рекомендаций посвящена четвертая глава реформируемой работы.

Спектральная плотность $S(\omega)$ стационарного случайного про-

НТБ
ДНУЖТ

цесса представлена Косинус-преобразованием Фурье корреляционной функции $R(\tau)$.

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\tau} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (4)$$

Этот интеграл является, как известно, осциллирующим. Для повышения точности вычисления интеграла (4) в работе используется аппроксимация на элементарных интервалах независимого от ω множителя $R(\tau)$ подинтегральной функции с помощью интерполяционного полинома. После подстановки выражения полинома в (4) и интегрирования получаем формулу для вычисления осциллирующего интеграла (4). В главе 4 получена формула для определения значений спектральной плотности $S(\omega)$ при аппроксимации корреляционной функции анализируемого процесса рядом дуг парабол второй степени.

6761a

По расположению пиков на графике спектральной плотности можно определять значения частот гармонических составляющих процесса, а по ординатам пиков - их усредненные амплитуды. Если составляющие разнесены по частотам, то параметры гармоник определяются сравнительно точно. Наличие в процессе компонент с близкими частотами приводит к существенным погрешностям при амплитудно-частотном анализе. Эти погрешности обусловлены эффектом распределения энергии отдельной гармоники на близлежащие частоты из-за конечности длины исследуемой реализации. В работе построены графики и номограммы, позволяющие значительно уточнить частоты и амплитуды компонент при наличии гармоник с близкими частотами.

Опыт спектрального анализа натуральных осциллограмм показал, что мощность реальных процессов распределяется по частотам как правило неравномерно. Участки частот, на которых сосредоточена практически вся энергия исследуемых процессов, занимает иногда менее 15% анализируемого диапазона. Время спектрального анализа таких процессов можно существенно сократить, если вычислять $S(\omega)$ лишь на этих участках.

Для определения интервалов частот, на которых мощность составляющих процесса превышает некоторую заданную долю от общей энергии процесса, в работе предлагается предварительно с большим шагом $\Delta\omega$, вычислять ряд значений интеграла $\mathcal{J}(\omega)$ от нормированной спектральной плотности. Если на отдельных участках приращение значения $\mathcal{J}(\omega)$ не превосходит некоторой величины ε , то на этом интервале нет необходимости проводить подробный спектральный анализ. Применение описанного приема позволило в 2-3 раза сократить время обработки на ЭЦМ натуральных осциллограмм, записанных при динамических испытаниях.

Разработанная методика анализа осциллограмм широко использовалась при обработке результатов экспериментальных исследований взаимодействия подвижного состава и пролетных строений железнодорожного моста. Натурные испытания проведены в 1972 и 1974 годах. НИЛ динамики мостов и НИЛ динамики и прочности подвижного состава ДИИТа с участием автора.

Методика проведения и основные результаты экспериментальных исследований описаны в пятой главе работы. В качестве испытательной нагрузки использовались специально сформированные составы, состоящие из локомотива, загруженных на полную грузоподъемность четырехосных полувагонов и вагона-лаборатории № 54 ДИИТа, оборудованного регистрирующей аппаратурой.

Программой испытаний предусматривалось одновременная запись динамических процессов на подвижном составе и на пролетных строениях моста. На подвижном составе измерялись деформация ресорных комплектов, вертикальные и горизонтальные рамные давления на каждую ось полувагона, вертикальные ускорения кузова экипажей и ряд других величин. На пролетных строениях регистрировались вертикальные прогибы главных ферм, продольных, поперечных балок

и рельса в середине и четвертях пролета, горизонтальные колебания пролетных строений в уровнях верхних и нижних поясов; напряжения в элементах главных ферм и проезжей части, а также в рельсах

Испитания проводились при различных скоростях движения опытных поездов, начиная от "проползания" (5 км/час) и кончая максимальными возможными по условиям безопасности движения (100 км/час).

При движении состава со скоростями до 70 км/час динамические коэффициенты по прогибам середины ферм пролетных строений не превышают расчетных. Их величина находится в пределах 1,08-1,12. При последующем возрастании скорости движения поезда наблюдается заметное увеличение прогибов пролетных строений и при $V = 95-100$ км/час процесс вибраций имеет явно выраженный резонансный характер. В отдельных опытах динамические коэффициенты достигают величины 1,25, что больше предусмотренных действующими нормативными документами.

С целью более полного анализа полученных результатов в работе произведен спектральный анализ вибраций пролетных строений и вертикальных рамных давлений на колеса экипажей поезда при различных скоростях его движения. Изучение эволюции этих спектров с изменением скорости движения состава, сопоставление энергетических спектров в различных сечениях конструкции между собой и со спектрами процессов в подвижном составе позволило установить основные факторы динамического воздействия, определить доминирующие виды колебаний и собственные частоты системы.

Анализ полученных спектров прогибов элементов пролетных строений показал, что в исследуемых процессах имеются составляющие с частотой, не зависящей от скорости движения нагрузки, и гармоники, частота которых меняется пропорционально скорости движения состава. К первой группе относятся компоненты с частотами 2,1-2,3 и 3,6-3,8 гц. Эти частоты практически совпадают соответ-

НТБ
ДНУЖТ

ственно с частотой колебаний подпрыгивания экипажа и частотой собственных колебаний пролетного строения.

Следует отметить, что по уровню энергии гармоника колебаний пролетного строения с частотой 2,1 - 2,3 гц является одной из основных составляющих спектра. Энергия колебаний моста с частотой 3,6-3,8 гц невелика. Лишь при скорости 72 км/час доля энергии этой составляющей становится довольно значительной. Можно предположить, что данный факт вызван неравномерностью проезжей части пролетного строения, так называемым "балочным эффектом", поскольку именно при скорости 72 км/час частота возмущения колебаний (длина панели 5,5 м) близка к частоте колебаний пролетного строения.

Из составляющих, частота которых меняется с изменением скорости движения нагрузки, доминирует гармоника, соответствующая времени прохождения расстояния 14 м (полная длина полувагона). Эти колебания, повидимому, обусловлены периодическим изменением положения нагрузки на мосту, что приводит к изменению статического давления на пролетное строение. Такого рода реакция пролетного строения может быть вызвана и влиянием изолированных неровностей верхнего строения пути. При скорости $V = 95$ км/час частота этой составляющей близка к частоте подпрыгивания экипажей, что и объясняет наблюдаемые в эксперименте колебания резонансного характера.

При проведении экспериментальных работ производилась регистрация динамических процессов в экипажах при движении поезда не только по мосту, но и на подходах к нему. Такая информация позволяла сопоставить поведение подвижного состава на этих участках. Как показал анализ, при скоростях движения до 70 км/час энергетические спектры вертикальных рамных давлений на колеса

экипажей поезда при его движении на подходах и на мосту качественно близки. При увеличении скорости движения состава по мосту на графиках $S(\omega)$ появляется максимум по частоте, равной частоте колебаний конструкции. Доля мощности этих колебаний при $V = 100$ км/час становится весьма значительной. Это позволяет заключить, что динамика пролетных строений при высоких скоростях движения нагрузки оказывает существенное влияние на величину вертикальных сил, действующих в элементах конструкции экипажей.

Результаты экспериментов позволили также оценить корректность и точность математической модели, принятой в работе для исследования процесса взаимодействия системы "мост-поезд". Сопоставление натуральных осциллограмм с теоретическими кривыми прогибов середины пролета для различных опытных поездов и скоростей их движения показало, что общая конфигурация этих кривых совпадает, основные закономерности, наблюдаемые в эксперименте, проявляются и при теоретическом рассмотрении взаимодействия; использование в качестве эквивалентного возмущения начального перемещения кузова на $2\Delta_{cm}$ приводит к удовлетворительному совпадению максимального динамического коэффициента, полученного теоретически и экспериментально. Все это позволяет утверждать, что выбранная математическая модель вполне удовлетворительно отражает реальные процессы, происходящие при взаимодействии подвижного состава и пролетных строений.

На основе теоретических и экспериментальных исследований установлены основные причины, приводящие к погрешностям в определении динамического коэффициента для пролетного строения. Погрешности эти обусловлены неучетом следующих фактов:

- несовпадение статического положения равновесия пролетного строения со средней линией, относительно которой происходят его

колебания;

- периодичность изменения реакции системы в результате различного положения статической составляющей нагрузки.

В ряде случаев указанные обстоятельства могут привести к существенным погрешностям в оценке динамического воздействия подвижной нагрузки, особенно для мостов малых пролетов. Так, для пролетов $l = 10$ м ошибки, связанные с изменением прогиба середины пролета из-за различного положения нагрузки, находятся в пределах от 15% (оплотка тепловозов ТЭ-9) до 60% (состав из восьмиосных полувагонов).

Поэтому для правильной оценки динамической работы элементов пролетных строений необходимо иметь достоверные данные о максимальной величине реакции системы на статическую нагрузку.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены параметры собственных колебаний пролетных строений со сквозными фермами с ездой понизу проектировки "Проект-стальконструкция". Использование в качестве расчетной схемы балочного набора, моделирующего основные элементы пролетного строения, позволило получить более полный спектр частот, а также оценить степень участия элементов проезжей части в динамической работе пролетного строения.

2. Разработана математическая модель взаимодействия подвижного состава и пролетных строений. Составлен комплекс программ для ЭВМ "Минск-32", реализующий моделирование вертикальных колебаний системы "мост-поезд". Предлагаемая математическая модель и программное обеспечение позволяют решать широкий класс задач по исследованию взаимодействия пролетных строений различных конструкций и подвижной нагрузки (поезда), состоящей из различных по гео-

НТБ
ДНУЖТ

метрическим и динамическим характеристикам экипажей с упруго-вязким рессорным подвешиванием.

3. Показано, что использование упрощенных расчетных схем экипажей поезда в ряде случаев приводит к существенным погрешностям в определении основных характеристик взаимодействия рассматриваемой системы.

4. Исследовано влияние скорости движения поезда, начальных условий его экипажей, неровностей верхнего строения пути на мосту и строительного подъема на процесс взаимодействия. Установлено, что в диапазоне скоростей 50-300 км/час и нулевых начальных условиях не развивается значительные колебания элементов рассмотренных систем. Определены параметры неровностей пути на мосту, сочетания начальных условий и скорости, при которых возникают резонансные режимы в системе.

Показано, что с точки зрения динамической работы элементов системы "мост-поезд" устройство строительного подъема на однопроезжных мостах не является необходимым.

5. Разработана методика спектрального анализа стационарных случайных процессов, которая позволяет получать с помощью ЭВМ оценки основных статистических характеристик исследуемого процесса, выделять гармонические составляющие (в том числе и с близкими частотами), определять с достаточной точностью частоты и амплитуды этих гармоник. Предложен также прием ускоренного спектрального анализа случайного процесса.

6. Произведен спектральный анализ различных процессов, записанных на подвижном составе и на пролетных строениях при экспериментальном исследовании взаимодействия опытных поездов и пролетных строений. Предполагаемая методика анализа позволила определить доминирующие виды колебаний и собственные частоты системы,

НТБ
ДНУЖТ

а также в ряде случаев установить причины, вызывающие динамику изучаемых конструкций и оценить их вклад в общий процесс колебаний.

7. Вскрыты и проанализированы источники погрешностей при определении динамического коэффициента пролетных строений. Произведена оценка их влияния, даются рекомендации по корректному определению динамического коэффициента конструкции.

8. Результаты цифрового моделирования процесса взаимодействия системы "мост-поезд" при задании эквивалентных начальных условий достаточно хорошо количественно и качественно согласуются с результатами натуральных экспериментов. Это позволяет утверждать, что используемая в работе математическая модель достаточно полно отражает реальные процессы взаимодействия.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ушкалов В.Ф., Тененбаум Э.М. Определение частот колебаний вагонов по экспериментальным записям, полученным при динамических испытаниях. Вопросы динамики подвижного состава и применения математических машин. Труды ДИИТа, вып.55 "Транспорт". М.,1965.

2. Лазарян В.А., Ушкалов В.Ф., Тененбаум Э.М. К вопросу об определении с помощью ЭЦВМ частот и амплитуд гармонических составляющих колебательных процессов, записанных при испытаниях железнодорожных экипажей. Вопросы динамики подвижного состава и применения математических машин. Труды ДИИТа, вып.72. "Транспорт". М.,1967.

3. Лазарян В.А., Ушкалов В.Ф., Тененбаум Э.М. Определение параметров гармонических компонент процесса с близкими частотами по оценке спектральной плотности. Вопросы динамики подвижного

НТБ
ДНУЖТ

состава и применения математических машин. Труды ДИИТа, вып. 76. "Транспорт". М., 1968.

4. Лазарян В.А., Ушкалов В.Ф., Тененбаум Э.М., Стельмах В.К. Выделение скрытых периодичностей из случайных процессов, записанных при испытаниях подвижного состава, с применением интеграла спектральной плотности. Вестник ВНИИЖТа № 3, 1968.

5. Радаиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М., Шкловский Б.Е. Свободные вертикальные колебания балочных железнодорожных пролетных строений. Вопросы теории колебаний и динамики мостов, вып. 150. Днепропетровск, 1973.

6. Радаиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. Взаимодействие одиночного экипажа с балочным пролетным строением. Вопросы теории колебаний и динамики мостов. Вып. 150. Днепропетровск, 1973.

7. Радаиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. Взаимодействие подвижного состава с балочным пролетным строением железнодорожного моста. Вопросы теории колебаний и динамики мостов. Вып. 150. Днепропетровск, 1973.

8. Бондарь Н.Г., Радаиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. Моделирование взаимодействия подвижного состава с пролетными строениями железнодорожных мостов. Динамика подвижного состава железных дорог. Труды Брянского ин-та тяжел. машиностроения, в № 26. Брянск, 1974.

9. Осипов А.М., Радаиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. К вопросу о строительном подъеме на однопролетных мостах. Динамика мостов и теория колебаний. Труды ДИИТа, вып. 157, Днепропетровск, 1975.

10. Захаров В.Н., Ройтбурд Э.Г., Солдатов К.И., Тарасенко В.Л., Тененбаум Э.М. Экспериментное исследование взаимодействия пролет-

НТБ
ДНУЖТ

ных строений и подвижного состава. Динамика мостов и теория колебаний. Труды ДИИТа, вып.157. Днепропетровск,1975.

11. Бондарь Н.Г., Радзиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. К вопросу об определении динамического коэффициента пролетных строений мостов. Вопросы теории колебаний и динамики мостов. Труды ДИИТа, вып.165/19. Днепропетровск,1975.

12. Ройтбурд Э.Г., Радзиховский Ю.А., Солдатов К.И., Тененбаум Э.М. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия пролетных строений с подвижным составом. Вопросы теории колебаний и динамики мостов. Труды ДИИТа, вып.165/19. Днепропетровск,1975.

13. Радзиховский Ю.А., Ройтбурд Э.Г., Тененбаум Э.М. К вопросу о выборе расчетных схем экипажей поезда при исследовании взаимодействия системы "мост-поезд". Вопросы теории колебаний и динамики мостов. Труды ДИИТа, вып.165/19. Днепропетровск,1975.

Размножено на роталпринте при городокой
типографии М Э, ул.Фрунзе,6
Заказ 9076, тираж 150
Бг.31812 разрешается к печати
17.УД.75 г.