

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

Распопов Александр Сергеевич

УДК 624.21.04

ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ
НЕРАЗРЕЗНЫХ И РАМНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

05.23.15 - Мосты, тоннели и другие строительные
сооружения на железных и автомобильных дорогах
01.02.03 - Строительная механика

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

Днепропетровск 1989

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового
Красного Знамени институте инженеров железнодорожного
транспорта имени М.И.Калинина

Научный руководитель - академик АН УССР,
доктор технических наук,
профессор Бондарь Н.Г.

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент Солдатов К.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Казакевич М.И.,
кандидат технических наук,
доцент Конашенко С.И.

Ведущая организация - Институт технической механики АН УССР

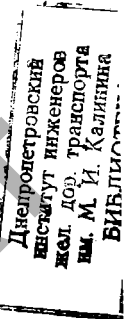
Защита диссертации состоится "24" ноября 1989 г.
в "15" часов на заседании специализированного совета
К 114.07.02 Днепропетровского института инженеров железнодо-
рого транспорта: 320700, ГСП, Дне- левск, 10,
ул. Акад.В.А.Лазаряна, 2, ДИИТ.

НТБ
ДНУЖТ

Актуальность темы. Научно-технический прогресс в транспортном и промышленном строительстве связан с массовым применением неразрезных и рамных конструкций, получивших широкое распространение в практике современного мостостроения: неразрезных пролетных строений балочных мостов, мостов комбинированных систем, многопанельных рам, ферм, балок проезжей части, виадуков, трубопроводных переходов, монорельсовых дорог и других. Обычно такие сооружения проектируются в виде регулярных и квазирегулярных систем, что связано с требованиями снижения их материалоемкости, стоимости строительства, экономии трудовых затрат и монтажного оборудования, увеличением возможностей поточного производства и архитектурно-конструктивных решений.

Практика проектирования неразрезных мостовых конструкций ставит вопрос учета их работы при сложных динамических воздействиях и требует определения широкого спектра частот и форм собственных колебаний, необходимого также при вибрационной диагностике упругих систем и идентификации различных повреждений. Хотя вопросы исследования и расчета свободных колебаний в значительной степени проработаны, однако до сегодняшнего времени отсутствует достаточная информация о частотных свойствах неразрезных регулярных и нерегулярных стержневых систем. Кроме того, существует ряд мало изученных вопросов, например, колебания неразрезных балочных систем в области кратных частот, спектральные свойства многопролетных конструкций с различными граничными условиями и жесткостью упругих закреплений и др. Существующая литература, касающаяся этих вопросов, носит преимущественно теоретический характер, в ней даются практические решения лишь отдельных задач, как правило, для неразрезных балок с небольшим количеством пролетов. Это объясняется существенными трудностями получения численных результатов при точном решении и ограниченными возможностями приближенных методов, что неоднократно отмечалось в работах многих исследователей.

В связи с этим представляется актуальным обобщающее изучение всего класса неразрезных регулярных и квазирегулярных стержневых систем для установления зависимости их динамических свойств от количества пролетов, граничных условий, жесткости упругих закреплений и других факторов с доведением результатов исследований до числовых значений. Такое исследование может существенно упростить процесс оценки динамических характеристик неразрезных конструкций.



Цель работы – разработка инженерных способов определения частот и форм свободных колебаний неразрезных мостовых конструкций с распределенными параметрами, исследование спектральных свойств таких систем, получение уравнений и графиков, пригодных для использования в проектной практике.

Основные задачи исследования:

- с помощью логических моделей получить уравнения и графики частот для регулярных балочных систем с промежуточными жесткими опорами и произвольными однородными граничными условиями, позволяющие определять частотный спектр многопролетных балок и приводимых к ним мостовых конструкций;
- получить решения для неразрезных балок с различными видами упругих закреплений и исследовать особенности спектра частот регулярных систем балок в зависимости от граничных условий, количества пролетов и жесткости упругих опор;
- исследовать возможности применения логических моделей к решению задач колебаний неразрезных и рамных мостовых конструкций;
- разработать алгоритмы и получить простые зависимости для определения частот и форм колебаний неразрезных пересекающихся балок, изучить влияние на частоты свободных колебаний различных факторов;
- провести экспериментально-теоретические исследования спектра частот и форм колебаний неразрезных пролетных строений со сквозными фермами и рамно-неразрезных путепроводов, рассмотреть вопросы выбора рациональных расчетных схем для определения динамических характеристик этих мостовых конструкций.

Научная новизна работы:

- использованы логические модели для совершенствования расчета и анализа собственных колебаний неразрезных балочных и рамных мостовых конструкций;
- с помощью логических моделей получены простые зависимости, позволяющие с большой точностью определять частотные характеристики мостовых конструкций, приводимых к расчетной схеме неразрезных регулярных балок на жестких или упругих опорах с произвольным количеством пролетов и различными граничными условиями;
- определены подспектры (области) равных частот для регулярных и квазирегулярных неразрезных балок в зависимости от граничных условий, количества пролетов и жесткости упругих опор;
- разработан алгоритм построения уравнений частот свободных

колебаний неразрезных пересекающихся балок с использованием логических моделей;

- получено точное аналитическое решение задачи о собственных колебаниях регулярной системы пересекающихся балок с распределенными параметрами и с учетом инерции вращения, деформации сдвига, статических продольных сил;

выполнен численный анализ спектра частот с оценкой влияния различных факторов, определены области кратных частот и точные границы критического соотношения жесткостей продольных и поперечных балок при их совместных колебаниях, а также при действии сжимающих сил и потере устойчивости;

- определены и исследованы параметры собственных колебаний типовых неразрезных пролетных строений со сквозными фермами, дана сравнительная оценка различных расчетных схем для динамического расчета сквозных пролетных строений и рамно-неразрезных лутепроводов, проведены сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными.

Практическое значение:

- разработанные процедуры построения уравнений частот различных балочных систем с использованием логических моделей открывают большие возможности выбора оптимальных вычислительных алгоритмов для ЭВМ и могут быть включены в системы автоматизированного расчета и проектирования (САПР) соответствующих конструкций;

- полученные результаты могут использоваться при диагностике текущего состояния эксплуатируемых сооружений и для предварительных оценок, обеспечивающих расположение частот конструкции в требуемом диапазоне, а также для совершенствования, оценки точности и пределов применимости методов расчета собственных колебаний неразрезных стержневых систем;

- полученные графики-номограммы для регулярных балочных систем с промежуточными жесткими или упругими опорами и произвольными однородными граничными условиями исключают необходимость сложных вычислений при анализе конкретных сооружений и могут быть использованы в расчетной практике проектных и научно-исследовательских организаций при проектировании и оценке динамических характеристик широкого класса неразрезных балочных и рамных мостовых конструкций с любым количеством пролетов;

- выполненное исследование и анализ различных расчетных схем неразрезных пролетных строений со сквозными фермами, балок про-

ежей части железнодорожных мостов и рамно-неразрезных путепроводов позволяет оценить степень достоверности результатов вычислений по каждой из них, а также использовать полученные данные в динамических расчетах конструкций этого типа.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением известных точных методов строительной механики и сопоставлением полученных решений с результатами, опубликованными в литературе, полученными другими методами, а также достаточной согласованностью с экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных исследований обеспечена использованием современной виброизмерительной аппаратуры, эффективными способами обработки и анализа полученной информации.

На защиту выносятся:

- методики расчета параметров собственных колебаний неразрезных и рамных мостовых конструкций с использованием логических моделей;

- результаты аналитических решений и численного анализа свободных колебаний неразрезных балочных конструкций с учетом влияния различных факторов;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований динамических характеристик неразрезных пролетных строений мостов со сквозными фермами и рамно-неразрезных путепроводов.

Внедрение результатов. Результаты исследований внедрены в практику проектирования отделом протяженных инженерных сооружений ЦНИИ проекстальконструкция отделом железнодорожных мостов Гипротрансмоста, отделом искусственных сооружений Днепрогипротранса. Документы о внедрении включены в приложение к диссертации.

Апробация работы. В полном объеме диссертационная работа докладывалась в 1989 г. на кафедре мостов и НИИ динамики мостов, кафедре строительной механики и НИИ динамики и прочности подвижного состава Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, кафедре зданий и сооружений аэропортов Киевского института инженеров гражданской авиации, проблемной научно-исследовательской лаборатории САПР института кибернетики АН УССР, на теоретическом семинаре кафедр сопротивления материалов и строительной механики, теоретической и прикладной механики, проектирования мостов Киевского автомобильно-дорожного института, на кафедре мостов Московского института инженеров железнодорожного транс-

порта.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано семь печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 221 наименование, и приложений. Диссертация содержит 247 страниц машинописного текста (из них основной текст - 156 с.), 74 рисунка и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, указывается цель проводимых исследований и содержится краткая характеристика работы.

В первой главе приведен обзор научной литературы и выполнен анализ существующих методов расчета собственных колебаний многопролетных стержневых систем. На основании выполненного анализа выделены основные группы методов расчета, намечено направление исследований с учетом последних достижений в области численных решений для неразрезных и рамных мостовых конструкций.

Среди актуальных задач строительной механики, посвященных расчету сложных статически неопределимых систем, значительное внимание уделяется вопросам колебаний неразрезных многопролетных балок. В этой области исследований можно выделить три направления в зависимости от вида применяемых расчетных схем и методов.

К первому направлению относятся исследования, связанные с получением точного решения для колебаний стержневых систем с действительным отражением геометрических, жесткостных и массовых характеристик реальной конструкции. Это исследования Н.И.Безухова, А.А.Белоуса, А.Ф.Смирнова, В.Г.Чудновского, А.П.Филиппова, В.А.Ивовича, В.А.Лазаряна, С.И.Конашенко, С.З.Динкевича, А.Г.Барченкова, Г.Н.Эйхе, К.И.Солдатова, Е.И.Дворникова, А.С.Дмитриева, С.Д.Лейтеса, В.Колоушека, В.Апостолова, Е.Хобста, Я.Горского, Р.Г.Джекота, Дж.Д.Гибсона, Т.Хаяшикава, Н.Ватанабе, М.Г.Фолкнера, Д.П.Хонга, К.Н.Бейпета, М.Каваками, Х.Огура и других ученых.

Работы второго направления основаны на замене реальной конструкции системой упругих элементов с конечным числом степеней свободы и последующем точном решении. Среди них следует отметить труды В.А.Игнатьева, И.М.Рабиновича, Р.Ф.Нагаева, К.Ш.Ходжаева,

А.П.Филиппова, Ю.А.Дружинина, А.А.Ксендзова, Р.Д.Сухих, Б.Н.Кутукова, В.Д.Цывильского, Р.Свитке и других авторов.

Приближенные методы расчета неразрезных систем использовали в своих исследованиях Ю.Г.Козьмин, Е.С.Сорокин, Г.М.Кадисов, А.В.Цветков, Г.Ф.Вишняков, Ф.Р.Ниточкин, Х.Абрамович, И.Елишаков, М.Гургез, К.Д.Бейли, К.Месселас, К.Солдетес, Т.Ганев, П.А.А.Лаура, У.Виттинг и другие авторы, работы которых можно отнести к третьему направлению исследований.

Для широкого класса неразрезных балочных систем анализируются прикладные возможности существующих методов, отмечаются работы по их использованию, конкретным исследованиям различных конструкций. Установлена практическая необходимость в проведении исследований, посвященных вопросам оперативного анализа свободных колебаний, изучения спектральных свойств неразрезных систем, совершенствования алгоритмов для ЭВМ.

В последнее время в работах, использующих модели стержневых систем с распределенными параметрами, все чаще применяется метод прогонки в сочетании с ассоциированными матрицами. Среди них обращают на себя внимание работы Г.Н.Эйхе, в которых для лучшей алгоритмизации вычислений привлечены понятия теории конечных автоматов. Следует отметить также разработки В.Колоушека, С.З.Динкевича, В.Новацкого, К.И.Солдатова и других авторов, основанные на использовании метода деформаций с разложением нагрузок и неизвестных в конечные тригонометрические ряды.

Указанные методы применены в настоящей работе для расчета колебаний неразрезных и рамных мостовых конструкций.

Вторая глава посвящена определению частот и форм собственных колебаний неразрезных многопролетных балок с распределенными массами и произвольными граничными условиями. Результаты всех расчетов представлены в виде таблиц и графиков, пригодных для сооружений, приводимых к расчетной схеме регулярных балок на жестких опорах. Здесь же показана возможность применения полученных номограмм для определения спектра частот неразрезных балок с периодической или кратной регулярностью, а также нерегулярных многопролетных балок.

Каждый изгибаемый элемент-стержень рассматриваемых неразрезных систем отображается логическим аналогом – девятиполосником, у которого восемь полюсов представлены четырьмя начальными (НП) и четырьмя концевыми (КП) граничными параметрами, а девятый по-

люс условно изображает "выход" — трансцендентную функцию, элемент ассоциированной матрицы, по физическому смыслу являющийся выражением частотного определителя стержня при определенных входных параметрах. В целом неразрезная балка представлена группой соединенных многополюсников (конечных тривиальных автоматов) с одинаковым количеством входов на каждом из концов, определяемых совокупностью фиксированных $[0]$ и произвольных $[1]$ граничных параметров и единственно возможным для данной системы набором комбинаций граничных условий в местах сопряжения отдельных стержней (рис.1).

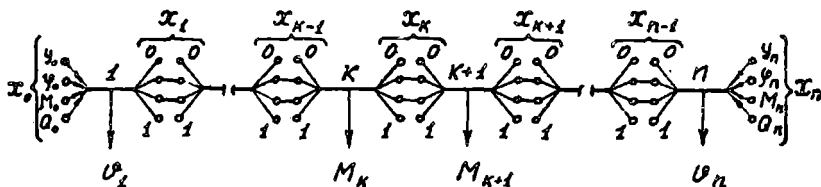


Рис.1.

Любой представленный на рис.1 логический автомат $1, 2, \dots, K, K+1, \dots, n-1, n$ при последовательном задании определенного двоичного кода входов $x_0, x_1, \dots, x_K, x_{K+1}, \dots, x_n$ вырабатывает функцию-определитель. Из набора таких функций формируются матрицы возможных состояний выхода $u_1, M_2, \dots, M_K, M_{K+1}, \dots, M_{n-1}, u_n$. Уравнение частот для прямолинейной непрерывной цепной системы имеет вид

$$u_1 \prod_{k=1}^{n-1} M_k \cdot u_n = 0, \quad (1)$$

где соответствующие матрицы u_1, M_k, u_n сформированы из элементов ассоциированных матриц каждого из n участков системы. Порядок и содержание матриц в уравнении (1) зависят от количества возможных комбинаций граничных условий и соответствующих им значений булевых функций x_k в разделяющих участки сечениях, которые связаны логическим отношением отрицания.

Для неразрезной балки на жестких опорах сформированы матрицы кодов и соответствующие им функциональные матрицы из элементов ассоциированной матрицы M обычного участка балки, записанных в порядке логического следования кодов граничных параметров.

Для регулярных и квазирегулярных систем с постоянными по длине массой μ , жесткостью EJ и равными пролетами получены функции $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$, упрощающие составление и решение частотных

уравнений. К примеру, для n -пролетной неразрезной балки, один конец которой заделан, другой - шарнирно оперт, трансцендентное уравнение частот преобразуется к виду

$$A \cdot [2BG \cdot f_2(\lambda) + (A^2 + BG) \cdot f_1(\lambda)] = 0, \quad (2)$$

где

$$f_1(\lambda) = \sum_{\kappa=2}^p C_{p-\kappa}^{\kappa} \cdot f_3(\lambda) + \frac{EJ\lambda^3}{\ell^3 A} \sum_{\kappa=2}^p C_{p-\kappa}^{\kappa} \cdot f_3(\lambda);$$

$$f_2(\lambda) = \sum_{\kappa=2}^p (C_{p-\kappa}^{\kappa} + C_{p-\kappa}^{\kappa+1}) \cdot f_3(\lambda); \quad (3)$$

$$f_3(\lambda) = \left(\frac{\ell^3}{EJ\lambda^3} A \right)^{p-\kappa} \left[\frac{\ell^2}{\lambda^2} B \cdot \frac{\ell^4}{(EJ)^2 \lambda^4} G \right]^{\kappa-m}$$

$$C_{p-\kappa}^{\kappa} = \frac{(p-1)!}{(p-\kappa)!(\kappa-1)!}; \quad p = n-2; \quad j = 1, 2, 3, \dots;$$

$m = (\kappa + 1)/2$ для нечетных κ и $m = \kappa/2$ - для κ четных,
 A, B, G - функции Прагера и Гогенемзера.

В результате вычислений получены значения корней уравнения (I) для всех возможных сочетаний однородных граничных условий для балок с числом пролетов от одного до тридцати, которые затем были обобщены для неразрезных балок с любым количеством пролетов. Анализ и систематизацию результатов вычислений наглядно отражают графики зависимости корней уравнений λ от числа пролетов и номера формы колебаний. Установлено, что возможно выделить четыре группы графиков и соответственно четыре группы сочетаний граничных условий. Показано, что отсутствие жестких связей, препятствующих вертикальным перемещениям концов неразрезной балки, приводит к появлению дополнительных форм колебаний и соответствующих им значений частот, гораздо меньших по величине, чем в основной группе спектра.

В третьей главе сформулированы основные правила применения ассоциированных матриц к расчету свободных колебаний неразрезных балок с упругими закреплениями. Получены графические решения для неразрезных регулярных и квазирегулярных балок с упруго оседающими промежуточными опорами. Подробно анализируется спектр частот, его характерные особенности в зависимости от граничных условий, количества пролетов и жесткости упругих опор.

Результаты исследований, основанных на применении логичес-

ких моделей, использованы для учета упругих опор неразрезных многопролетных балок. Полученные матрицы имеют тот же порядок, что и матрица обычного участка балки, а также учитывают любые возможные сочетания упругих закреплений как концевых, так и промежуточных участков неразрезных балок. Применение указанных матриц исключает дополнительные решения для частей стержня в местах расположения сосредоточенных масс, упругих опор или шарниров. Например, для участка балки с упругим относительно поворота сечения закреплением матрица M_2 может быть получена из той же матрицы M прибавлением к элементам первой и пятой строк соответствующих элементов второй (IOIO) и шестой (OOII), умноженных на жесткость упругой связи φ_0 :

$$M_2 = M + \varphi_0 \cdot (M_{IOIO}^{(1)} + M_{OOII}^{(2)}) \quad (4)$$

Аналогичным образом сформированы ассоциированные матрицы для других случаев упругих закреплений. При сравнении полученных матриц с ассоциированной матрицей обычного участка балки выявлена закономерность их образования: ассоциированные матрицы участков с упругими опорами можно получить из исходной матрицы M прибавлением к строке, соответствующей участку без опоры, строки, соответствующей участку с абсолютно жесткой опорой, умноженной на жесткость упругой опоры.

Для определения форм колебаний в качестве исходной логической модели используется такое же отображение, как и для построения матричной формы уравнений частот. Неизвестные начальные параметры вычисляются по правилу Крамера способом прогонки.

Выполнен численный анализ спектра частот для неразрезных регулярных и квазирегулярных балок с различным количеством упруго оседающих промежуточных опор. Получены графические зависимости для определения спектра частот первой зоны сгущения неразрезных балок с произвольным количеством пролетов и произвольными граничными условиями. В результате вычислений показано, что изменение граничных условий приводит к появлению в зоне сгущения собственных частот нескольких подспектров (областей) равных частот. Пренебрежение наличием указанных областей может существенно изменить получаемые результаты. Установлена кратность частот различных форм колебаний при определенной критической жесткости упругих опор.

В четвертой главе разработан алгоритм построения уравнений частот свободных колебаний неразрезных пересекающихся балок с

использованием логических моделей. Решена задача для регулярной системы продольных и поперечных балок с произвольным количеством пролетов в обоих направлениях, получены основные расчетные зависимости с учетом инерции вращения, деформации сдвига и статических продольных сил.

Исследуются особенности применения точных и приближенных методов в построении частотных уравнений и получении численных решений для пересекающихся балок с распределенными параметрами и большим количеством пролетов; отмечается, что существенный вклад в развитие теории колебаний пересекающихся балок внесли Е.С.Сорокин, В.А.Игнатьев, Г.П.Арясов, О.М.Палий, В.С.Чувиковский, А.Л.Мелконян, Б.Н.Кутуков, Т.Г.Гуламов, С.М.Шашков, В.А.Троицкий, А.С.Периков, В.И.Плетнев, Я.Л.Нудельман, В.Миронович, Н.Е.Шанмугама, Т.Балендра, З.Ригби, А.Х.Нейфех, М.С.Хартл, Н.Дитхельм, Р.Свитке и другие ученые. В области мостовых конструкций аналогично балочного ростверка использовали А.Г.Барченков, Л.Г.Джейгер, Б.Бэкхт, Р.В.Раманаяя.

Рассматриваются установившиеся гармонические колебания системы пересекающихся под прямым углом n -й продольных и m -й поперечных неразрезных балок, соединенных в местах пересечений. Оси соответствующих балок параллельны между собой, лежат в одной плоскости и находятся на различных расстояниях друг от друга. Каждый из пролетов той или иной балки может иметь свою равномерно распределенную массу и погонную изгибную жесткость. Граничные условия одноименных концов балок одного направления одинаковы.

Для исследования динамических характеристик пересекающихся балок использована методика логического моделирования. С целью получения уравнений частот в цепной форме система пересекающихся балок разбивается на ряд подсистем. На рис.2 изображена логическая схема k -й подсистемы ($k = 1, 2, \dots, m-1$), которая, в свою очередь, расчленена на n блоков, состоящих из отдельных аналогов-стержней.

Для получения матричного набора детерминантных функций отдельных стержней составлены таблицы переходов, соответствующие каждому состоянию подсистемы. Определены правила формирования элементов ассоциированных матриц в зависимости от вида закрепления контурных блоков, а также логические условия, связывающие коды граничных параметров смежных подсистем. Осуществлен переход к регулярной системе пересекающихся балок с использованием функ-

ций (3). Разработана кодированная матрица возможных состояний отображающей логической схемы, которая имеет тот же порядок что и матрица обычного участка балки, и позволяет определить оптимальную последовательность перебора кодов граничных параметров подсистем.

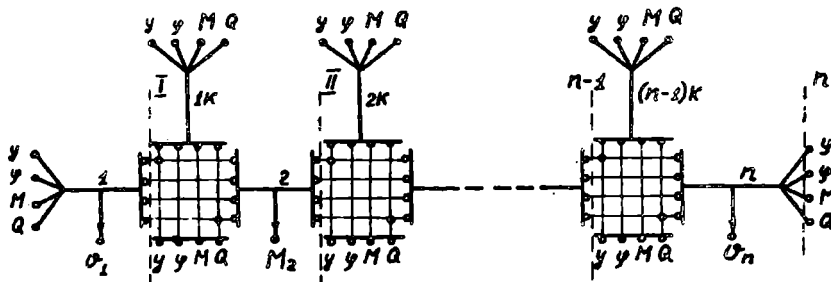


Рис. 2.

Методом деформаций с использованием конечных тригонометрических рядов получено также точное аналитическое решение задачи в замкнутой форме для регулярной системы пересекающихся балок с распределенными параметрами и с учетом инерции вращения, деформации сдвига, статических продольных сил

$$\frac{1}{f_{ii}} A(d_{ii}) - \frac{1}{k_{ii}} B(a_{ii}) + C_{ij} \left[\frac{1}{f_{ij}} A(d_{ij}) - \frac{1}{k_{ij}} B(a_{ij}) \right] = 0, \quad (5)$$

где

$$A(d_{se}) = \frac{sh d_{se}}{ch d_{se} - \cos \beta_e}; \quad B(a_{se}) = \frac{\sin a_{se}}{\cos a_{se} - \cos \beta_e};$$

$$C_{ij} = \frac{J_1 l_2^3 (k_{ii} a_{ii} + f_{ii} d_{ii})}{J_2 l_1^3 (k_{ij} a_{ij} + f_{ij} d_{ij})}; \quad \beta_e = \frac{\pi}{u} e;$$

$s = 1$, $u = m$, $e = i$, $i = 1, 2, 3, \dots, m-1$ для продольных балок; $s = 2$, $u = n$, $e = j$, $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$ для поперечных балок; a_{se} , d_{se} , k_{se} , f_{se} - параметры, учитывающие влияние перечисленных выше факторов.

Получены решения для системы многослойных пересекающихся балок (пакет балок) одинаковыми граничными условиями, связанных между собой в узловых точках линейно-упругими безынерционными связями, для пересекающихся балок на сплошном упругом основании и других частных случаев данной расчетной схемы. Получены также

простые выражения для определения собственных форм колебаний, расчета вертикальных перемещений в середине каждого из пролетов.

Выполнен численный анализ спектра частот пересекающихся балок, дана оценка влияния на величины частот свободных колебаний инерции вращения, деформации сдвига, продольных сил и количества балок каждого из направлений, найдены условия, при которых учет перечисленных факторов существенно влияет на значения собственных частот колебаний. Для пересекающихся многопролетных балок получены графики, устраняющие необходимость большого количества предварительных вычислений. Показано что для определения высших частот можно использовать более простые зависимости без существенных поправок к значениям искомых величин.

Исследованы области равных частот по различным формам колебаний пересекающихся балок. Определены границы каждой такой области в зависимости от соотношения жесткостей продольных и поперечных балок, распределенных масс, длин и количества пролетов. Аналогичные задачи решены для пересекающихся балок при действии сжимающих сил и при потере устойчивости.

Пятая глава содержит вопросы, связанные с определением параметров свободных колебаний неразрезных пролетных строений мостов со сквозными фермами и рамно-неразрезных путепроводов. По всем приведенным мостовым конструкциям производится сравнение полученных решений с результатами расчетов другими методами или экспериментальными данными.

Исследована возможность представления сквозных пролетных строений в виде систем эквивалентных неразрезных балок. Уравнения частот колебаний получены с использованием логических моделей и методом деформаций. Для каждой отдельной конструкции проведен анализ влияния количества пролетов, граничных условий, распределения масс, продольных сил, деформации сдвига, инерции вращения, жесткости упругих связей. Полученные результаты сравниваются с известными упрощенными моделями, а также с расчетами методом конечных элементов. Рассмотрены варианты замены главной фермы одной или двумя эквивалентными балками, связанными с продольной балкой упругим слесом. Отмечается существенное влияние деформации решетки главных ферм на собственные частоты и соотношения амплитуд по всем формам колебаний независимо от выбранной расчетной схемы. Предложены простые приближенные зависимости для расчетов высших частот колебаний пролетных строений со сквозными фермами. В ка-

честве примера выполнены практические расчеты мостовых ферм с пролетами, равными 88 и 109,52 м.

Определены параметры и исследованы особенности пространственных колебаний металлических неразрезных пролетных строений с ездой понизу со сварными элементами и монтажными соединениями на высокопрочных болтах. Рассмотрены несколько расчетных схем, моделирующих плоские вертикальные, горизонтальные или пространственные колебания. Расчеты выполнены методом конечных элементов на ЭВМ ЕС 1050. Рассматриваются пути упрощения расчетных схем за счет пренебрежения влиянием второстепенных факторов. Подробно анализируются пространственные формы колебаний и соответствующие им значения частот для различных расчетных схем. Показана возможность применения эквивалентных систем неразрезных балок в расчетах двух- и трехпролетных строений мостов со сквозными фермами.

Для проверки теоретических результатов проведены экспериментальные исследования пространственных колебаний на железнодорожном мосту, имеющем пролетное строение неразрезной системы $L = (10 + 132 + 110)$ м. Получено удовлетворительное совпадение теоретических значений собственных частот колебаний с данными испытаний.

Выполнен анализ динамической работы балок проезжей части пролетных строений со сквозными фермами. При этом для расчета параметров собственных колебаний балок проезжей части железнодорожных мостов использованы результаты исследований неразрезных пересекающихся балок. Выполнены расчеты для трех реальных объектов с пролетными строениями $L = 55$ м; $L = 82,5$ м; $L = (110 + 132 + 110)$ м.

Показана высокая эффективность применения логических моделей в расчетах свободных изгибных колебаний рамных систем. Путем анализа отображающей логической схемы (рис. 3) определены общий вид и содержание ассоциированных матриц в уравнении (I).

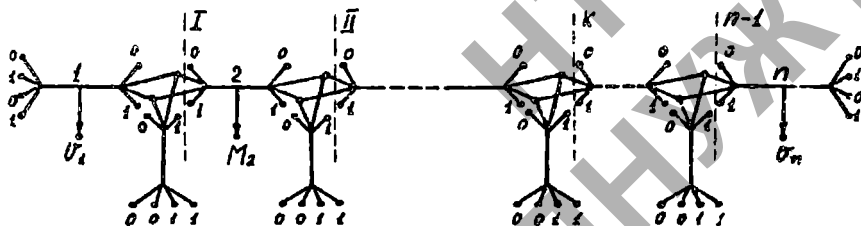


Рис. 3.

Определена последовательность изменения элементов матриц σ_A, M_A, σ_A в зависимости от граничных параметров ригеля и стоек рамы. Для регулярных и квазирегулярных рамных систем приведены трансцендентные частотные уравнения, в которых количество пролетов представлено как отдельный параметр. Путем предельного перехода получено выражение для неразрезной регулярной балки на жестких опорах относительно вертикальных перемещений и упругих относительно поворота опорных сечений. Построен универсальный график-номограмма изменения значений частотного параметра λ по формам колебаний i в зависимости от количества пролетов n и изменений относительной жесткости упругих опор C' от нуля до бесконечности.

Приводятся результаты расчетов двух реальных мостов равно-неразрезной системы пролетами (16,9 + 20,0 + 16,9) м и (20,3 + 22,5 + 3 + 20,3) м. Вычисления проводились по трем расчетным схемам – рама с распределенными параметрами, неразрезная балка с упругими опорами, рама с дискретными массами. Анализируется спектр частот, отмечаются преимущества и недостатки каждой расчетной схемы.

В заключении сформулированы результаты и выводы диссертационной работы, основанными из которых являются следующие.

1. Исследованы возможности применения логических моделей и разработаны методики для выполнения практических расчетов собственных колебаний неразрезных балочных и рамных мостовых конструкций.

2. С помощью логических моделей получены компактные матричные уравнения частот и построены графики-номограммы для мостовых конструкций, приводимых к расчетной схеме неразрезных регулярных балок на жестких или упругих опорах с произвольным количеством пролетов и различными граничными условиями. Полученные зависимости использованы для определения частот свободных колебаний нерегулярных (частично нерегулярных, бирегулярных и т.д.) систем.

3. Изучено влияние граничных условий, количества пролетов и жесткости упругих опор на спектр частот неразрезных регулярных и квазирегулярных балок. Показано, что изменение граничных условий приводит к появлению в зоне сгущения собственных частот несклещенных подспектров (областей) равных частот. Установлена кратность частот различных форм колебаний при определенной критической жесткости упругих опор.

4. Разработан алгоритм построения уравнений частот свободных

колебаний неразрезных пересекающихся балок с использованием логических моделей. Получено точное аналитическое решение задачи для регулярной системы пересекающихся балок с распределенными параметрами и с учетом инерции вращения, деформации сдвига, статических продольных сил. Аналогичные решения получены также для пересекающихся балок на сплошном упругом основании и для других частных случаев этой расчетной схемы.

5. Проведен детальный анализ спектра частот пересекающихся балок с оценкой влияния различных факторов, найдены условия, при которых это влияние будет существенным. Определены области кратных частот и точные границы критического соотношения жесткостей продольных и поперечных балок, выполнен также анализ колебаний и устойчивости пересекающихся балок при действии сжимающих сил.

6. Определены параметры и исследованы особенности собственных пространственных колебаний неразрезных пролетных строений мостов со сквозными фермами, дана сравнительная оценка различных расчетных схем для динамического расчета сквозных пролетных строений и равно-неразрезных путепроводов, отмечена удовлетворительная согласованность полученных в работе теоретических и экспериментальных данных.

7. Выполнен численный анализ и сделаны сравнения с расчетом другими методами по десяти исследуемым объектам. Применение результатов теоретических разработок к определению параметров собственных колебаний реальных мостовых конструкций позволило упростить их динамический расчет, а также сделать выводы о достаточной высокой точности и эффективности предлагаемых методик.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Распопов А.С., Эйхе Г.Н. Применение ассоциированных матриц к расчету свободных колебаний неразрезных балок с упругими закреплениями / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1988. 19 с: ил. Библиогр.: 7 назв. Деп. в ВИНТИ 8.12.88, №6701-В88.

2. Распопов А.С., Эйхе Г.Н. Уравнения и графики частот свободных колебаний неразрезных регулярных балок с произвольными граничными условиями / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1988. 20 с: ил. Библиогр.: 6 назв. Деп. в ВИНТИ 8.12.88, №6702-В88.

3. Ройтбурд З.Г., Распопов А.С. Параметры свободных пространственных колебаний типовых неразрезных пролетных строений со сквозными фермами // Вопросы статике и динамики мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1987. С.63-69.

4. Ройтбурд З.Г., Распопов А.С., Ходоровский А.М. Исследование пространственных свободных колебаний неразрезных пролетных строений со сквозными фермами // Вопросы статике и динамики мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1987. С.70-77.

5. Солдатов К.И., Распопов А.С. Об одном подходе к определению параметров свободных вертикальных колебаний пролетных строений со сквозными фермами // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1989. С.54-66.

6. Распопов А.С., Солдатов К.И. Свободные колебания неразрезных ферм железнодорожных мостов // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1989. С.47-53.

7. Распопов А.С., Солдатов К.И. Об одной модели динамического расчета балок проезжей части железнодорожных мостов // Вопросы теории колебаний, статической и динамической работы и грузоподъемности мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1988. С.39-45.

А. Распопов

Распопов Александр Сергеевич

Логические модели в задачах динамики
неразрезных и рамных мостовых конструкций

05.23.15 – Мосты, тоннели и другие строительные
сооружения на железных и автомобильных дорогах
01.02.03 – Строительная механика

Подписано к печати 10.10.89. БТ № 70242

Формат 60 x 84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Ротапринт. Усл.печ.л.1,1. Уч.-изд.л.1,0. Тираж 100 экз.
Заказ № 1197. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа
320/00, ГСП, Днепропетровск, 10, ул.Акад.В.А.Лазаряна, 2

НТБ
ДНУЖТ