

СССР — МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Аспирант О. М. САВЧУК

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ,
СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ ВАГОНОВ**

Специальность № 022 «Сопроотивление материалов
и строительная механика»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Днепропетровск
1968

3526a

НТБ
ДНУЗТ

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель — член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор **В. А. Лазарян**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Е. Н. Никольский**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **А. Е. Степанов**.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения, Москва.

Автореферат разослан «*21*» *марта* 1968 г.

Защита диссертации состоится «*23*» *апреля* 1968 г.
на заседании _____ института инженеров железнодорожного транспорта, 2, ДИИТ
_____ Университет-

НТБ
ДНУЗТ

На правах рукописи

Аспирант О. М. САВЧУК

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ,
СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ ВАГОНОВ

Специальность № 022 «Сопротивление материалов
и строительная механика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1968

3526a

НТБ
ДНУЗТ

БТ 01557. Областная книжная типография
Днепропетровского областного управления по печати,
г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.
Заказ № 726-м. Тираж 200. Объем 1 п. л. Подписано к печати 27.II-68 г.

НТБ
ДНУЗТ

Проводимая в нашей стране техническая реконструкция железнодорожного транспорта требует оснащения вагонного парка новыми вагонами улучшенной конструкции, а также модернизации существующих вагонов. В связи с этим большое значение приобретают совершенствование методов расчета вагонов на прочность и применение математических машин к производству таких расчетов.

Расчет вагонных конструкций производится в основном на базе точных методов строительной механики. Обширные и глубокие работы в области развития методов расчета на прочность узлов вагонов выполнены Б. Н. Горбуновым, А. А. Уманским, А. А. Поповым, Л. А. Шадуром, Е. Н. Никольским, И. В. Урбаном и др.

В настоящее время задачи строительной механики успешно решаются как с помощью ЭЦВМ, так и с применением электронных и электрических моделирующих устройств. Разработанные нашими учеными Г. Е. Пуховым, К. К. Керопяном, Б. А. Борковским, А. Е. Степановым, В. В. Васильевым, О. Н. Токаревой и др. методы электромоделирования задач строительной механики находят широкое применение в различных отраслях строительного и машиностроительного проектирования.

В диссертации освещаются вопросы методики рационального моделирования вагонных конструкций, расчетные схемы которых приводятся к различным стержневым системам. Предлагается моделирование на основе смешанного метода, которое оказывается весьма экономичным при расчетах плоско-пространственных рам и некоторых других систем. Показана возможность моделирования стержневых систем с учетом деформаций стержней от действия продольных и поперечных сил. Рассмотрены примеры моделирования конструкций вагонов. Приведены исследования некоторых

вопросов прочности и несущей способности вагонов, выполненные с помощью электро моделирования.

В первой главе рассмотрены основные методы электрического моделирования и возможности их применения к расчетам деталей вагонов. Показано, что использование П-образных, Т-образных и мостовых схем замещения деформированных стержней во многих случаях оказывается малоэффективным в связи с необходимостью пользоваться машинно-аналитическими способами расчета. Представляет интерес работа С. А. Сенаторова по моделированию кузова четырехосного полувагона с помощью пятиполюсных схем замещения, предложенных В. М. Кондратьевым. Однако, в этом случае модель каждого изогнутого стержня содержит не менее двух квазиотрицательных сопротивлений, что делает процесс ручного уравнивания модели весьма громоздким.

Большинство конструкций вагонов, расчетные схемы которых приводятся к стержневым системам, целесообразно моделировать на основе метода перемещений с помощью альфа-аналоговых схем замещения деформированных стержней. Альфа-аналоговые модели являются наиболее простыми и экономичными квазианалогами. Процесс их уравнивания автоматизируется с помощью операционных усилителей и практически протекает мгновенно. Сходимость процесса уравнивания соответствует сходимости итерационного процесса по Некрасову. Моделирование с помощью таких квазианалогов, которое часто называют электронным, почти не уступает чисто аналоговому моделированию.

При моделировании некоторых типов рам, в частности боковых рам тележек вагонов, нами использовалась также комбинированная модель стержня, составленная из ро- и альфа-аналогов. Использование такой модели в некоторых случаях позволяло ускорить процесс ручного уравнивания квазианалоговых моделей рам.

Одним из примеров успешного применения моделирования служит решение задачи о воздействии на раму четырехосного полувагона продольного усилия T , отклоненного от оси симметрии вагона на некоторый угол α . Результаты электронного моделирования с помощью альфа-аналоговых схем показали, что при $T=250 T$, $\alpha=2^\circ 15'$ величина дополнительных напряжений в хребтовой балке вблизи шкворневого узла, вызванных отклонением продольного усилия, достигает $\pm 500 \text{ кг/см}^2$. Для оценки применимости полу-

ченных результатов к случаю соударений вагонов в кривых участках пути были проведены экспериментальные исследования. Два четырехосных полувагона, загруженные с превышением грузоподъемности, соударялись в кривой радиусом 175 м, при этом на осциллограмме регистрировались скорости соударения, усилия удара в автосцепку и напряжения в хребтовой балке рамы полувагона. В табл. 1 приведены значения дополнительных изгибных напряжений в нижних волокнах консольной части хребтовой балки в сечении, удаленном на 365 мм от оси шкворневой балки рамы полувагона.

Таблица

№ опыта	Скорость [км час]	Усилие в автосцепке [Т]	Поперечная составляющая [Т]	Дополнительные напряжения [кг/см ²]		Отклонение результатов
				опытные	расчетные	
P33	2,1	66	5,1	±155	±150	3,2%
P34	5,8	186	14,3	±375	±415	9,6%
P35	6,0	225	17,3	±555	±500	11,0%
P37	3,4	150	11,5	±325	±330	1,5%

Удовлетворительное совпадение результатов моделирования и эксперимента показывает на достаточную для практических целей точность моделирования. Из рассмотренного примера следует, что наряду с другими факторами, исследованными в работах В. И. Гамирова, А. И. Речкалова, Б. Я. Тененбаума, повреждаемость шкворневых узлов вагонов в эксплуатации может быть вызвана также косым приложением ударно-тяговых усилий.

Применение электронного моделирования позволяет совершенствовать расчетные схемы и уточнять методы расчета вагонов на прочность. В практике вагоностроения прочностные расчеты часто производятся без учета тонкостенности элементов конструкции. На основе общих методов расчета стержневых тонкостенных конструкций представляется возможным составить методику их электронного моделирования.

Уравнения стесненного кручения стержня ортогональной плоско-пространственной рамы можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} B_A \\ B_B \\ L_A \\ L_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & -a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & -a_{23} \\ -a_{31} & -a_{32} & a_{33} \\ a_{31} & a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta'_A \\ \theta'_B \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_A \\ \bar{B}_B \\ \bar{L}_A \\ \bar{L}_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Обозначения усилий и перемещений, а также принятые правила знаков (при системе координат, начало которой расположено в ближайшем к наблюдателю крайнем правом узле рамы, а координатные оси направлены вдоль продольных и поперечных стержней) следующие:

B_A , и B_B — реактивные бимоменты в концевых сечениях стержня. Положительное направление бимоментов выбираем таким, чтобы для наблюдателя, смотрящего вдоль плеча бипары, ближайшая к нему пара казалась действующей по часовой стрелке.

\bar{B}_A , \bar{B}_B — то же для случая защемления концов стержня от поворотов и депланаций.

L_A , L_B — реактивные крутящие моменты, положительное направление которых выбираем таким, чтобы для наблюдателя, смотрящего вдоль координатной оси, параллельной оси стержня, момент казался действующим по часовой стрелке.

\bar{L}_A , \bar{L}_B — то же для случая защемления концов стержня от поворотов и депланаций.

θ — относительный угол закручивания стержня, положительное направление которого соответствует повороту сечений стержня вокруг центра изгиба по часовой стрелке, если смотреть с положительного направления координатной оси. При составлении модели эта величина заменяется разностью углов поворота концевых сечений стержня, правило знаков которых такое же, как у крутящих моментов. Нетрудно показать, что для продольных стержней рамы в уравнения (I) следует включить разность углов поворота начального и конечного сечений стержня, а для поперечных стержней — наоборот.

θ'_A , θ'_B — производные углов закручивания концов стержня, которые будем считать положительными, если они соответствуют положительному приращению угла закручивания θ .

a_{ij} — коэффициенты, зависящие от геометрических параметров и изгибно-крутильных характеристик стержней.

При составлении электронной модели рамы обеспечивается реализация обычных уравнений изгиба, уравнений стес-

ненного кручения стержней (I), а также уравнений совместности деформаций и равновесия бимоментов в узлах рамы.

Приведен пример моделирования рамы пассажирской тележки из тонкостенных стержней с открытыми и замкнутыми профилями сечений. Сравнение результатов моделирования с данными аналитического расчета показало на достаточную точность моделирования.

Вторая глава посвящена вопросам моделирования литых рамных конструкций с усиленными узлами по типу боковых рам тележек грузовых вагонов. Аналитический расчет таких деталей производится методом сил. Для того, чтобы принять во внимание переменную жесткость стержней рамы, применяется особый прием построения эпюр моментов с «гашением» их по линейному закону вблизи узлов (методика предложена К. А. Сафонцевым). Этот прием соответствует способу построения эпюры фиктивной нагрузки при расчете перемещений изогнутой балки переменного сечения.

В основу методики электрического моделирования рассматриваемых литых рам положен принцип определения коэффициентов, характеризующих изменение жесткости по длине каждого стержня, таким образом, чтобы потенциальная энергия деформаций изгиба равнялась таковой при расчете рамы методом сил. Естественно, что в этом случае результаты моделирования должны соответствовать результатам аналитического расчета.

После приравнивания потенциальных энергий деформации, решения уравнений и выполнения соответствующих преобразований получены простые формулы для вычисления жесткостных коэффициентов:

$$\begin{aligned}k_{AA} &= \frac{6L}{l+2h} \left[\frac{a}{l} \left(1 + \frac{a}{l} \right) + \frac{l+h}{3l+2h} \right]; \\k_{AB} &= \frac{6L}{l+2h} \frac{L}{l} \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{l} \right) - k_{AA}; \\k_{BB} &= \frac{6L}{l+2h} \left(\frac{L}{l} \right)^2 - 2k_{AB} - k_{AA}.\end{aligned} \quad (2)$$

В формулах обозначено: L — полная длина стержня, l — длина среднего участка стержня с постоянной жесткостью, a — длина начального участка стержня с переменной жесткостью, h — высота стержня на среднем участке.

Получены также общие формулы для определения момен-

тов от внешних нагрузок, пропорционально которым задаются нагрузочные токи модели

$$\begin{aligned}\bar{M}_A &= \frac{2}{L^2} (k_{AB} \Delta_1 - k_{AA} \Delta_2) \\ \bar{M}_B &= \frac{2}{L^2} (k_{BB} \Delta_1 - k_{AB} \Delta_2).\end{aligned}\quad (3)$$

Величины Δ_1 и Δ_2 находятся из выражений

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \int_{x_1}^{x_2} M(x) x dx + \frac{h}{3} [Q_L^0 a^2 + Q_n^0 b(L-b)]; \\ \Delta_2 &= \int_{x_1}^{x_2} M(x) (L-x) dx + \frac{h}{3} [Q_L^0 a(L-a) + Q_n^0 b^2],\end{aligned}$$

где $M(x)$ — изгибающий момент от внешней нагрузки в сечении x шарнирно опертого стержня, x_1 , x_2 — координаты начала и конца среднего участка стержня с постоянной жесткостью, Q_L^0 , Q_n^0 — реакции левой и правой опор в случае шарнирно опертого стержня, b — длина концевого участка стержня с переменной жесткостью.

В результате преобразований уравнений (3) составлена таблица рабочих формул для определения внешних моментов при наиболее часто встречающихся вариантах загрузки стержней боковых рам тележек.

Все это позволяет определить параметры электронной модели боковой рамы. Если расчетная схема не содержит эксцентриситетов в узлах, то модель составляется обычным способом.

При наличии эксцентриситетов в узлах расчетных схем боковых рам тележек возникают перекосы стержней треугольных контуров и усложняются уравнения равновесия изгибающих моментов относительно узлов с эксцентричным соединением стержней. Электронные модели таких рам включают в себя инверторы напряжений и токов, дополнительные проводимости и источники тока, которые позволяют учесть влияние эксцентриситетов. В целом модель литой рамы с эксцентриситетами в узлах не намного сложнее модели такой рамы без эксцентриситетов. При моделировании боковой рамы, содержащей один треугольный контур с эксцентриситетом в узле (боковина тележки КВЗ-1) можно избежать

необходимости включения инверторов токов и напряжений, выбрав соответствующим образом начало отсчета поворотов узлов и перекосов стержневой рамы.

Примеры моделирования боковых рам тележек различных типов показывают хорошее соответствие результатов моделирования и аналитического расчета.

В третьей главе излагается моделирование стержневых систем на основе смешанного метода.

Сложность модели стержневой системы существенно зависит от числа независимых линейных смещений ее узлов. Это обстоятельство сильно сказывается при моделировании плоско-пространственных рам, у которых все неопорные узлы могут смещаться из плоскости рамы. Неудобным оказывается также моделирование плоских рам с учетом влияния деформаций растяжения—сжатия стержней, так как и в этом случае смещения узлов становятся независимыми друг от друга. Расчетные схемы ряда конструкций вагонов—рам пассажирских тележек, рам и кузовов вагонов и др. — приводятся к вышеупомянутому стержневому системам. Аналитический расчет таких конструкций выполняется методом сил, который очевидно является в данном случае наиболее простым и эффективным, в то время как расчет по методу перемещений оказывается сложным и громоздким. В связи с этим нами были предприняты поиски некоторых иных приемов моделирования, которые привели к разработке методики электрического моделирования на основе смешанного метода.

Сущность предлагаемого способа электрического моделирования плоско-пространственных рам и некоторых других систем состоит в том, что вместо линейных смещений узлов (или перекосов стержней) за основные неизвестные принимаются обобщенные поперечные силы $C \xi_m$, где C — постоянный для всех или группы стержней коэффициент, имеющий размерность силы, ξ_m — безразмерные величины, пропорциональные поперечным силам в стержнях. Включение в вектор неизвестных системы уравнений усилий одновременно с перемещениями позволило назвать такой способ моделированием на основе смешанного метода.

Анализ поперечных сил в стержнях плоско-пространственной рамы показал, что для определения разностей поперечных сил в любом стержне требуется столько независимых величин, сколько замкнутых контуров имеет рама. Такими независимыми величинами могут быть либо значения разнос-

тей поперечных сил в отдельных стержнях, либо линейные комбинации этих разностей. С точки зрения удобства моделирования стержневой системы по участкам лучше использовать суммы разностей поперечных сил в определенных стержнях рамы, которые будем называть обобщенными поперечными силами.

Количество обобщенных поперечных сил, которые входят в число неизвестных при моделировании плоско-пространственной рамы на основе смешанного метода, равно числу замкнутых контуров рамы, поэтому каждому контуру можно поставить в соответствие одну обобщенную силу. Эти силы определяются так, чтобы разность поперечных сил в любом стержне плоско-пространственной рамы находилась из соотношения

$$\Delta Q_{ij} = C \xi_m - C \xi_n + \Sigma Q_k, \quad (4)$$

где ΣQ_k — составляющая, зависящая от внешней нагрузки, m, n — номера областей, разграничиваемых стержнем. Если принять такую же систему координат, как при рассмотрении уравнений стесненного кручения стержня, то область m окажется расположенной дальше от координатной оси, параллельной оси стержня, а область n — ближе к координатной оси. Для стержней рамы, лежащих на осях координат, $n=0$, для остальных стержней наружного контура $m=0$.

Заменив в уравнениях плоско изогнутого стержня перекосы ψ обобщенными поперечными силами и введя коэффициенты, пропорциональные отношениям длин стержней к их погонным жесткостям

$$p = \frac{C l^2}{2 E I}$$

получим математическую модель стержня, которая положена в основу моделирования стержневых систем предлагаемым способом:

$$\begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ C \delta_{AB} \end{bmatrix} = \frac{EI}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 & p & -p \\ -1 & 1 & p & -p \\ p & p & -p^2/3 & p^2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \xi_m \\ \xi_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{M}_A \\ \tilde{M}_B \\ \Delta M^\delta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где δ_{AB} — взаимное линейное смещение концов стержня, $\tilde{M}_A, \tilde{M}_B, \Delta M^\delta$ — дополнительные составляющие от внешней нагрузки.

Величины $C\delta$ являются слагаемыми уравнений неразрывности деформаций контуров рамы. Такие уравнения составляются для каждого контура и имеют вид

$$C\delta_{AB} + C\delta_{BD} - C\delta_{AC} - C\delta_{CD} = 0. \quad (6)$$

В электрической модели плоско-пространственной рамы на основе смешанного метода реализуются уравнения (5), (6), а также уравнения совместности поворотов концевых сечений стержней и уравнения равновесия изгибающих моментов в узлах рамы. Такая модель по сравнению с моделью на основе метода перемещений содержит на 30—40% меньше операционных усилителей и проводимостей, что достигнуто исключением из вектора неизвестных линейных смещений узлов рамы.

При необходимости моделировать стержни переменной жесткости в матрицу коэффициентов уравнений (5) вводятся соответствующие изменения.

Использование моделирования на основе смешанного метода позволяет производить расчеты ортогональных стержневых систем, принимая во внимание деформации растяжения—сжатия и сдвига стержней. Так как поперечные силы в стойках и ригелях плоских ортогональных рам независимы друг от друга, то в этом случае в каждый замкнутый контур рамы задается по две обобщенных поперечных силы:

$C\xi_i$ — для моделирования изгиба стоек и растяжения—сжатия ригелей,

$C\eta_i$ — для моделирования изгиба ригелей и растяжения—сжатия стоек рамы.

Математическая модель каждого стержня рамы имеет вид (5), причем коэффициенты первых двух строк и столбцов оказываются независимыми от дополнительно учитываемых деформаций растяжения и сдвига. Два последние коэффициента матрицы уравнений (5) становятся равны $\frac{p^2}{3} \left(1 + \frac{4}{r}\right)$,

где $r = \frac{I^2 GF}{3kEI}$ коэффициент, учитывающий деформации

сдвига. Уравнения неразрывности деформаций стоек и ригелей рамы составляются в виде

$$C\delta_{AB} - C\delta_{CD} + \sum A_i \xi_i = 0, \quad (7)$$

где $A = \frac{C^2 I}{EF}$ — коэффициент, учитывающий деформации растяжения—сжатия стержней.

В остальном методика моделирования остается такой же, как и при моделировании плоско-пространственных рам. В конкретных случаях моделирования конструкций вагонов с учетом деформаций растяжения—сжатия и сдвига часто может оказаться достаточным введение в каждый замкнутый контур по одной обобщенной неизвестной силе, что значительно упрощает модели таких конструкций.

При моделировании на основе смешанного метода можно делить отдельные стержни рамы на произвольные участки и моделировать их в отдельности, реализуя соответствующие граничные условия по концам участков стержня. Количество дополнительно вводимых неизвестных равно при этом числу условно введенных узлов при делении стержня на участки. Оказывается также возможным с помощью электрического моделирования стержня ступенчато-переменной жесткости по участкам определять жесткостные коэффициенты и усилия от внешних нагрузок для случая жестко заземленных концов стержня.

Для электронного моделирования стержневых систем на основе смешанного метода удобно пользоваться квазианалоговыми моделями линейных алгебраических объектов. При использовании альфа-аналогов модель может оказаться неустойчивой. Однако с помощью элементарного матричного преобразования, которое в конечном итоге сводится к набору дополнительной цепи, дублирующей часть электрической схемы модели, нам удавалось во всех конкретных случаях решения задач добиться устойчивости модели из альфа-аналогов. Это позволило построить альфа-аналоговую схему замещения изогнутого стержня, которую можно реализовать путем несложного изменения схемы блока БМС-А модели ЭМСС-8, отнюдь не исключая возможности решения на таком блоке задач с применением обычных методов моделирования. Устойчивые модели стержневых систем, построенные на основе смешанного метода, можно также получить, используя ро-аналоговые, сигма-аналоговые и другие квазианалоговые схемы, для которых доказана абсолютная устойчивость.

В четвертой главе рассматриваются вопросы применения электронного моделирования для расчетов по определению несущей способности вагонов.

Большое развитие контейнерных перевозок в стране вызвало необходимость проектирования и постройки удлиненных платформ с увеличенной площадью пола. В 1967 г. ВНИИ вагоностроения (Кременчугский филиал) и ДИИТом прове-

дены исследования по определению допускаемых нагрузок на элементы четырехосной удлиненной платформы. Основная часть прочностных расчетов выполнена нами с помощью электронного моделирования.

Составлены модели участков переменной жесткости хребтовой и боковой продольной балки платформы, на которых определены коэффициенты изменения жесткости, а также реактивные моменты от различных вариантов приложения внешних нагрузок. Полученные данные использованы для построения модели рамы платформы.

Электронная модель рамы составлена на основе смешанного метода для расчета на вертикальные симметричные нагрузки. Модель включает в себя 17 операционных усилителей, работающих в режиме уравнивания квазианалогов, а также инвертирования знаков напряжений и токов. При моделировании такой задачи обычным способом потребовалось бы не менее 25 усилителей и гораздо больше проводимостей для моделирования коэффициентов уравнений.

Чтобы оценить погрешности моделирования, был выполнен контрольный расчет рамы при одном из вариантов приложения внешней нагрузки. Погрешности моделирования сравнительно с данными аналитического расчета по отношению к наибольшему изгибающему моменту не превысили 1,5% (наибольшей погрешность в области малых величин изгибающих моментов составила 6,1%).

С помощью электронного моделирования произведен расчет рамы платформы при 35-и вариантах приложения внешних нагрузок.

Выполнено также моделирование поперечной доски платформы, как неразрезной балки на четырех жестких и четырех упруго смещающихся опорах. На модели определены изгибающие моменты в сечениях доски при 16-и вариантах приложения внешних нагрузок.

По данным моделирования конструктивных элементов четырехосной удлиненной платформы построены таблицы и графики, позволившие определить величины допускаемых нагрузок на платформу. В результате исследования оказалось возможным рекомендовать облегчение тары вагона на 600 кг а также значительное расширение ассортимента грузов, допускаемых к перевозкам на такой платформе. Годовой экономический эффект от внедрения данных рекомендаций составит 160 руб. на каждую платформу.

В работе рассмотрены некоторые вопросы выбора целесо-

образных схем размещения грузов в шестиосных полувагонах. На электронной модели проведены расчеты рамы полувагона при различных схемах погрузки изделий металлопродукции. Результаты моделирования сравнивались с данными статических испытаний шестиосного полувагона. Сравнение показало достаточную согласованность результатов испытаний и моделирования (отклонения в большинстве случаев не превышали 20%), что показывает на эффективность применения моделирования при выборе схем погрузок различных грузов в вагоны.

ВЫВОДЫ:

1. Методы электрического моделирования стержневых систем могут эффективно использоваться для выполнения прочностных расчетов конструкций вагонов. Целесообразность применения различных моделирующих устройств и методов моделирования для расчета основных узлов и деталей вагонов показана в табл. 2. Расчет рам тележек и рам вагонов на нагрузки, действующие в их плоскости (варианты №№ 1, 2, 3, 4, 8) целесообразно производить на электронных моделях с применением обычных методов моделирования. При расчете этих деталей на нагрузки, перпендикулярные плоскости расчетной схемы (вар. №№ 5, 6) более удобно пользоваться моделированием на основе смешанного метода. Моделирование конструктивных элементов кузовов вагонов, расчетные схемы которых представляют собой стержневые системы (вар. №№ 10, 12), а также неразрезные балки на жестких и упруго податливых опорах (вар. № 13), можно производить и на основе метода перемещений, и на основе смешанного метода. Если при расчете конструкций необходимо учитывать деформации растяжения—сжатия и сдвига (вар. №№ 7, 14, 15), то следует применить моделирование на основе смешанного метода. Естественно, приведенные в табл. 2 варианты не охватывают все многообразие расчетных схем конструкций вагонов, которые могут быть рассчитаны с помощью электрического моделирования.

2. Предложенная в работе методика моделирования стержневых систем на основе смешанного метода позволяет значительно упростить моделирование плоско-пространственных рам, составлять модели стержневых систем по участкам, а также принимать во внимание деформации растяжения—сжатия и сдвига при моделировании стержневых систем.

Таблица 2

№ варианта	Конструкции вагонов	Характер приложения нагрузок	Электронное моделирование на машинах ЭМСС-7 ЭМС-7М	Электронное моделирование	
				на основе метода перемещений	на основе смешанного метода
1	Рамы тележек грузовых вагонов без эксцентриситетов в узлах	Вертикальные симметричные нагрузки	ПР	Ц	—
2	То же, с эксцентриситетами в узлах	Вертикальные нагрузки	—	Ц	—
3	Рамы тележек пассажирских и рефрижераторных вагонов, расчетные схемы не содержат вспомогательных тормозных балок	Горизонтальные нагрузки	Ц	Ц	—
4	То же, в расчетную схему могут быть включены вспомогательные тормозные балки	Горизонтальные нагрузки	ПР	Ц	—
5		Вертикальные нагрузки	МЭ	ПР	Ц
6		Вертикальные нагрузки	МЭ	ПР	Ц
7	Рамы грузовых вагонов	Продольные нагрузки	—	—	Ц
8		Горизонтальная составляющая продольного усилия	Ц	Ц	—
9	Рамы пассажирских вагонов (рамы на сплошном упругом основании)	Вертикальные нагрузки	—	Ц	—
10	Каркас боковой стены кузова	От распора сыпучих грузов	МЭ	Ц	Ц
11	Поперечное сечение кузова вагона	От распора сыпучих грузов	ПР	Ц	—
12	Рама вагона с боковой фермой	Вертикальные нагрузки	МЭ	Ц	Ц
13	Элементы кузова по типу неразрезных балок на жестких и упруго податливых опорах	Вертикальные нагрузки	ПР	Ц	Ц
14	Кузов пассажирского вагона (на первом этапе расчета)	Вертикальные нагрузки	—	—	Ц
15		Продольные нагрузки	—	—	Ц

Обозначения: «Ц» моделирование целесообразно,

«ПР» моделирование приемлемо,

«МЭ» — моделирование мало эффективно,

— методика не разработана, либо моделирование нецелесообразно.

3. Применение электрического моделирования позволяет не только снизить трудоемкость, но и повысить качество расчета конструкций вагонов путем более полного рассмотрения действующих нагрузок, совершенствования расчетных схем, учета тонкостенности стержней и др.

4. Электрическое моделирование может быть эффективно использовано при сравнении и оценке различных вариантов конструкции, анализе несущей способности вагонов, разработке конструктивных мероприятий по модернизации подвижного состава, а также при решении других вопросов, связанных с многократными расчетами на прочность.

5. Рассмотренные в работе приемы моделирования могут быть применены к расчетам узлов и деталей других видов подвижного состава, а также различных машиностроительных конструкций.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. Савчук О. М. Электрическое моделирование некоторых стержневых систем с помощью квазианалоговых моделей. Труды ДИИТа, вып. 50, Днепропетровск, 1964.

2. Савчук О. М. Расчет бокови тележек вагонов методом перемещений с учетом переменной жесткости стержней. Труды ДИИТа, вып. 59, М., Транспорт, 1966.

3. Лазарян В. А., Савчук О. М. Расчет конструкций вагонов методами электрического и электронного моделирования. Сб. «Применение электронно-цифровых вычислительных машин в транспортном машиностроении». М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967.

4. Коротеев И. М., Львов А. А., Савчук О. М. Результаты исследований напряженного состояния рам и кузовов шестиярусных полувагонов при перевозке металлопродукции. Труды ДИИТа, вып. 68, М. Транспорт, 1967.

Кроме того, отдельные результаты диссертационной работы доложены:

на совещании по некоторым проблемам динамики сооружений и машин, Днепропетровск, ноябрь 1964;

на всесоюзном отраслевом совещании по вагоностроению, Рига, июнь 1965;

на совещании по применению ЭЦВМ в транспортном машиностроении, Калинин, март 1967;

на семинаре по моделированию задач механики института Кибернетики АН УССР, Киев, февраль 1968;

на семинарах по механике Днепропетровского института инженеров транспорта, 1964, 1965, 1968.