

Александр ТРЕТЫКОВ

Ленинградский Институт Инженеров

Железнодорожного Транспорта

### СУПРЕЛЕМЕНТНИЙ ПОДХОД ПРИ РАСЧЕТЕ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ НА СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

**Резюме.** В работе представлен подход к решению задач статического и динамического нагружения конструкций вагонов, основанный на идеях метода суперэлементов, и реализуемый с помощью универсального программного комплекса.

Предложен способ задания возмущающих воздействий, прикладываемых к исследуемым конструкциям вагонов, основанный на экспериментально полученных данных - записях, виброускорений на буксах вагонов.

Постоянное увеличение массы и скорости движения поездов, применение при загрузке и разгрузке вагонов средств механизации и различных интенсификаторов в виде виброуплотнителей, рыхлителей и устройств подобного рода делает проблемы прогнозирования прочности и надежности вагонов весьма актуальной. Опыт эксплуатации вагонов показывает, что они не являются равнопрочными - отдельные узлы работают на пределе своих возможностей, а у других имеются значительные резервы по прочности. Все это подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета вагонов с целью определения их рациональных конструктивных схем и параметров. Эти методы должны позволять прогнозировать надежность вагона при детальном учете геометрических, инерционных, жесткостных и демпфирующих особенностей его конструкции и реальных условиях эксплуатации.

В последние годы в практике вагоностроения самым широким образом используется численный метод расчетов конструкций вагонов, основанный на идеях метода конечных элементов (МКЭ) и реализованный с помощью ряда программных комплексов - СПРИНТ, ЛИРА-ЕС, ЛИРА-СМ и т.д. Наряду с многими положительными достоинствами конечно-элементного подхода к исследованию статического и динамического напряжения-деформированного состояния (НДС) вагонов, он обладает и целым рядом недостатков, существенно снижающих эффективность его применения. К этим недостаткам, в первую очередь, можно отнести следующие: функциональная ограниченность - известные в настоящее время программные комплексы МКЭ ориентированы либо на выполнение статических, либо динамических расчетов; ограниченность объема оперативной памяти (ОП) ЭВМ - степень детализации исследуемых конструкций и их отдельных узлов в значительной степени определяется возможностями используемых для расчетов ЭВМ.

В данной работе предлагается использование разновидности МКЭ, получившего в специальной литературе [1,2] название метода суперэлементов (МСЭ). Общий алгоритм, реализующий методику суперэлементного расчета исследуемых конструкций вагонов представляется в виде следующих этапов:

1. Формирование систем уравнений равновесий для отдельных суперэлементов (СЭ) первого уровня иерархии расчетной схемы вагона;
2. Преобразование полученных систем путем наложения кинематических граничных условий с целью сохранения устойчивости исследуемой конструкции в целом;
3. Конденсация систем уравнений в соответствии с общей иерархией суперэлементной сборки рассматриваемой конструкции.

Дальнейший алгоритм несколько отличается в случае проведения статического и динамического расчетов. Для решения задач статического нагружения вагонных конструкций последующие этапы выглядят следующим образом:

4. Решение системы линейных алгебраических уравнений, соответствующей СЭ верхнего уровня сборки;
5. Режим обратной прогонки - определение перемещений узлов расчетной схемы для всех суперэлементов младших

6. Исследуемых конструкциях для [3];
7. Пов и изоляции напряжений напряжений и исследуемой конструкции



При решении динамических задач последующие этапы имеют вид:

4. Интегрирование системы уравнений, соответствующей СЭ верхнего уровня сборки при задании возмущений, имеющих реальные эксплуатационные воздействия на исследуемую конструкцию вагона;
5. Построение одноуровневой КЭ расчетной схемы исследуемого элемента оборудования вагона и интегрирование системы уравнений ее описывающей. При этом в качестве динамических граничных условий в узлах крепления оборудования используется информация, полученная на этапе 4;
6. Вычисление компонентов динамического НДС в исследуемых узлах элементов оборудования и статистическая обработка полученных данных с целью определения зон опасных концентраций напряжений;
7. Оценка динамического запаса прочности и ресурса работоспособности исследуемых конструкций.

Основные математические зависимости МСЭ подробно изложены в литературе [2] и здесь не приводятся.

Автором работы предложен способ задания возмущающих воздействий, прикладываемых к исследуемым конструкциям вагонов, основанный на экспериментально полученных данных — записях виброускорений на буксах вагона. Такой подход позволяет учитывать вклад высокочастотных составляющих в общую картину динамического поведения исследуемых вагонных конструкций и проводить анализ их динамической нагруженности в широком частотном диапазоне. В соответствии с этим подходом основное каноническое уравнение равновесия МСЭ

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (I)$$

было преобразовано с помощью введения неинерциальной системы координат, связанной с движущимся экипажем. Перемещения в ко-





Для реализации изложенного алгоритма расчета конструкций вагонов на статические и динамические нагрузки был разработан программный продукт СУПЕР, включающий в себя программные комплексы - *INSUP*, СУПЕР-С и СУПЕР-Д.

Программный комплекс *INSUP* [4] служит для автоматизированной подготовки исходных данных для проведения статических и динамических расчетов конструкций вагонов на основе использования технических и программных средств машинной графики САПР и реализован на СМ ЭВМ. Он осуществляет визуальный контроль подготовленных исходных данных на графической станции типа ЭП СМ и получение твердых копий расчетных схем на графопостроителях ЭВМ серий СМ и ЕС, создание, хранение и ведение базы данных СЭ расчетных схем конструкций вагонов, а также перекодировку подготовленных исходных данных в формат ЕС ЭВМ.

Программный комплекс СУПЕР-С [5] используется для проведения статических расчетов конструкций вагонов, заключающихся в оценке НДС в исследуемых узлах вагона, локализации зон концентрации напряжений и оценке прочности вагона при действии нормативных нагрузок, определяемых в [3].

Программный комплекс СУПЕР-Д [6] реализует динамические расчеты конструкций вагонов при задании гармонических и случайных возмущений со стороны рельсового пути и ходовых частей вагона и позволяет определять собственные частоты и собственные вектора, перемещения, скорости и ускорения отдельных узлов конструкции вагона, динамические усилия и напряжения в них.

Комплексы СУПЕР-С и СУПЕР-Д функционируют под управлением операционных систем *MFT 4.1* и *MVT 6.1*, язык программирования - ФОРТРАН-IV. В них реализованы концепции типовых суперэлементов [2] и метод "зеркального отображения" [7], что позволяет при суперэлементной сборке сложных пространственных конструкций вагонов значительно (до 50-60%) снизить общий объем подготовки исходных данных для расчета и сократить время решения задачи на ЭВМ в среднем на 15%.

При использовании МКЭ и МСЭ проблема экономии оперативной памяти ЭВМ (даже в ущерб времени на решение задачи) приобретает первостепенное значение, поэтому в данных комплексах реализована оверлейная структура программы, что достигается разбиением всей программы на отдельные логические части (сегменты), каждый из которых компонуется из одной или нескольких программных единиц. Эти сегменты загружаются на один и тот же участок оперативной памяти ЭВМ, последовательно замещая друг друга. На рис. 2 приведена оверлейная структура программного комплекса СУПЕР-Д.

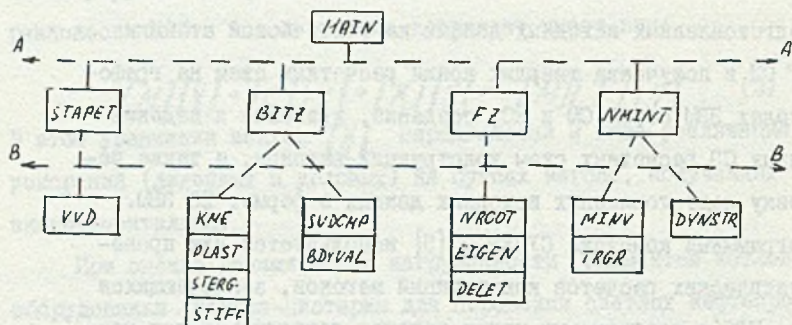


Рис. 2

Все модули программных комплексов были оттранслированы с помощью оптимизирующего транслятора языка ФОРТРАН-IV и в виде загрузочных модулей хранились на носителях внешней памяти ЭВМ (магнитные диски). Использование оптимизирующего транслятора позволило уменьшить время счета в среднем на 20% при одновременном снижении требуемого объема оперативной памяти ЭВМ на 3-5%.

При разработке программных комплексов СУПЕР-С и СУПЕР-Д была соблюдена полная совместимость по системе исходных данных для расчета, что позволяет одну и ту же информацию (описание геометрии конструкции и т.д.) использовать как для проведения статических расчетов, так и для динамического анализа исследуемой конструкции.

Программный комплекс СУПЕР имеет следующие основные характеристики:

1. Максимальный порядок системы уравнений равновесия конструкции - 10000;



2. Требуемый объем оперативной памяти ЭМ – 650 КБайт;
3. Максимальный объем внешней памяти ЭМ на магнитных дисках – до 16 МБайт;
4. Количество уровней суперэлементной сборки – до 5;
5. Общее число СЭ всех уровней – до 500;
6. Максимальное число граничных узлов СЭ – 50;
7. Общее время решения – до 350 мин. (ЭМ ЕС-1033).

При использовании программного комплекса СУПЕР был решен целый ряд прикладных задач – оценка прочности узла заделки стойки кузова полувагона, кузовов зерновоза модели 15-736, сочлененного трамвайного вагона; проведено исследование динамической нагруженности элементов вспомогательного и тормозного оборудования цистерны модели 15-1443. Полученные расчетным путем результаты имели хорошее согласование с результатами экспериментальных исследований.

#### ВЫВОДЫ

1. Обоснована актуальность применения МСЭ для проведения статических и динамических расчетов конструкции вагонов.
2. Разработан алгоритм, реализующий методику суперэлементного расчета исследуемых конструкций.
3. Предложен способ задания возмущающих воздействий в СЭ расчетных схемах вагонов, основанный на использовании экспериментально получаемых реализаций виброускорений на брусках вагона.
4. Разработан универсальный программный комплекс, позволяющий оценивать статическую прочность исследуемых вагонных конструкций и динамическую их нагруженность, приведены его основные параметры и характеристики.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975, 541 с.
- [2] В.А. Постнов. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. - Л.: Судостроение, 1979, - 288 с.
- [3] Нормы для расчета и проектирования механической части новых и модернизованных вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных). - М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983, - 260 с.
- [4] Соколов М.М., Третьяков А.В., Белоградцев А.В., Мясоедова Е.А. Разработка программного обеспечения автоматизации графических работ технико-экономических и прочностных расчетов конструкций вагонов. Отчет НИР., Л., ЛИИЖТ, 1988 г.
- [5] Бороненко Ю.П., Битюцкий А.А., Третьяков А.В., Петров О.Н. Комплекс программ для статических расчетов конструкций вагонов с применением метода суперэлементов (СУПЕР-С). - В сб. Алгоритмы и программы. - М.: ВНИИЦ, вып. 2, 1986, - 54 с.
- [6] Бороненко Ю.П., Битюцкий А.А., Сорокин Г.Е., Третьяков А.В. Комплекс программ для динамических расчетов конструкций вагонов с применением метода суперэлементов (СУПЕР-Д). Рег. № ВНИИЦ 50860000076.
- [7] Битюцкий А.А., Третьяков А.В. Эффективный метод построения суперэлементных расчетных схем. Сб. ЦНИИТЭИ тяжелого машиностроения. М.: ЦНИИТЭИ ТМ, серия Б, вып. 3, 1986, с. 4-6.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Eugeniusz Świtoński

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1990

SUPERELEMENTOWE PODEJSCIE PRZY OBLICZENIACH KONSTRUKCJI WAGONÓW  
OD OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH

S t r e z z e n i e

W pracy przedstawiono teoretyczne podejście do rozwiązania zadania związanego ze statycznym i dynamicznym obciążeniem konstrukcji wagonu, którego podstawą jest metoda superelementów. Do rozwiązania tego zadania wykorzystano ETO. Przedstawiono i omówiono również algorytm obliczeń konstrukcji wagonu wykorzystujący dane eksperymentalne.

SUPER-ELEMENT APPROACH TO THE CALCULATION OF CAR STRUCTURES  
FOR STATIC AND DINAMIC LOADS

S u m m a r y

There have been presented general approach to the solution of static and dynamic tasks of car structure loading based on ideas of super-element method released by means of general purpose program complex.