

УДК 629.021+534.1

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ПАССАЖИРСКОГО АВТОБУСА

З.А. Годжаев, д.т.н., профессор / Ф.А. Фараджев, к.т.н., ОАО «ФииЦМ»  
Е.А. Матвеев, к.ф.-м.н. / В.С. Надеждин, инж., МГМУ «МАМИ»

Одной из основных причин выхода из строя конструкций, работающих в условиях динамического нагружения, является проявление колебаний на резонансных режимах работы. Повышенная динамическая нагруженность конструкции, в данном случае речь идет о транспортном средстве, может приводить к преждевременным поломкам узлов и агрегатов, появлению трещин усталостного характера в элементах несущей системы (рамы и т.д.) и другим явлениям. Кроме того, повышенный уровень вибрации пагубно сказывается на эксплуатационных характеристиках пассажирского автобуса, когда водитель и пассажиры испытывают дискомфорт при движении транспорта. Последний фактор влияет и на принятие решений транспортными компаниями при приобретении ими транспортных средств.

Таким образом, задача исследования вибронгруженности транспортных средств становится актуальной. В силу этого, неотъемлемой частью расчетов на прочность подобных конструкций является расчет вынужденных и собственных частот и форм колебаний.

Всё многообразие математических методов расчетной оценки прочности несущих систем транспортных средств основано на различных моделях различной степени дискретизации. Одним из наиболее удобных, широкоприменяемых и перспективных методов — это

метод конечных элементов, в основе которого лежат вариационные методы механики сплошных сред. Такой метод позволяет провести дискретизацию математической модели, избегая излишнего упрощения рассчитываемой конструкции.

Применение метода конечных элементов дает возможность провести весь комплекс инженерных расчетов динамики и прочности конструкций. В настоящей работе представлен пример использования указанного метода для решения задач о нахождении частот и форм

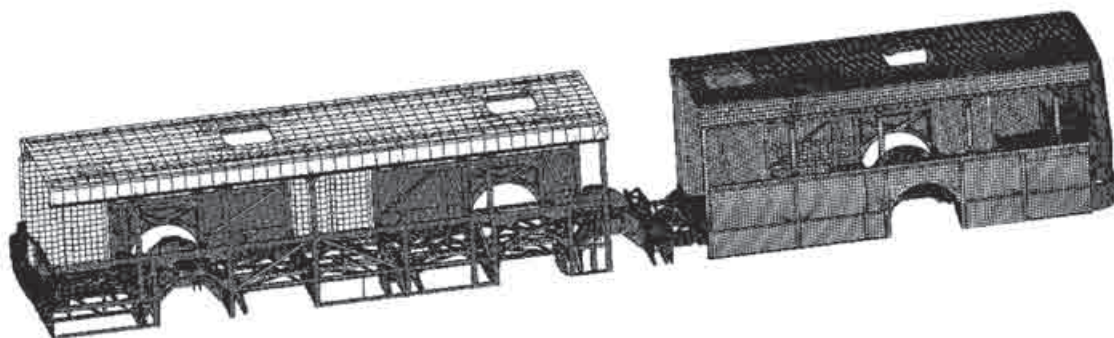
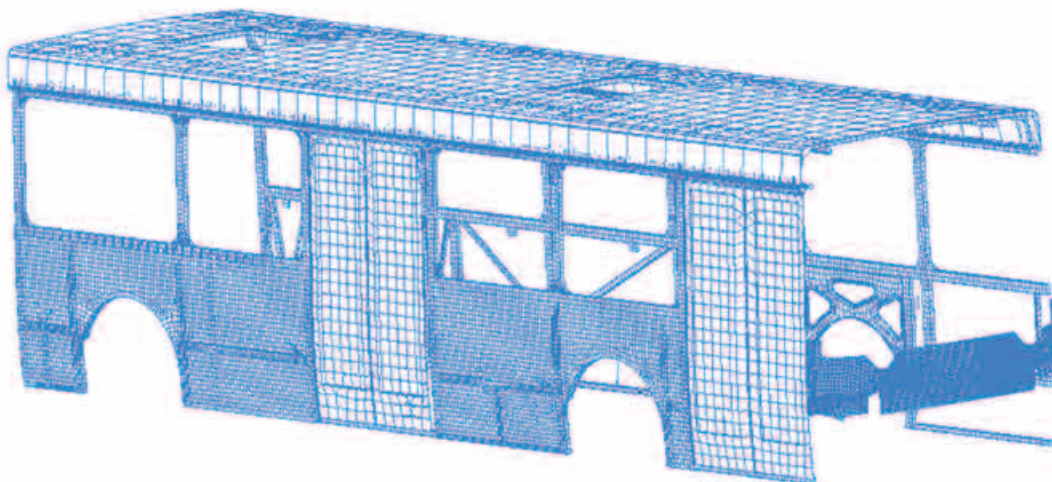
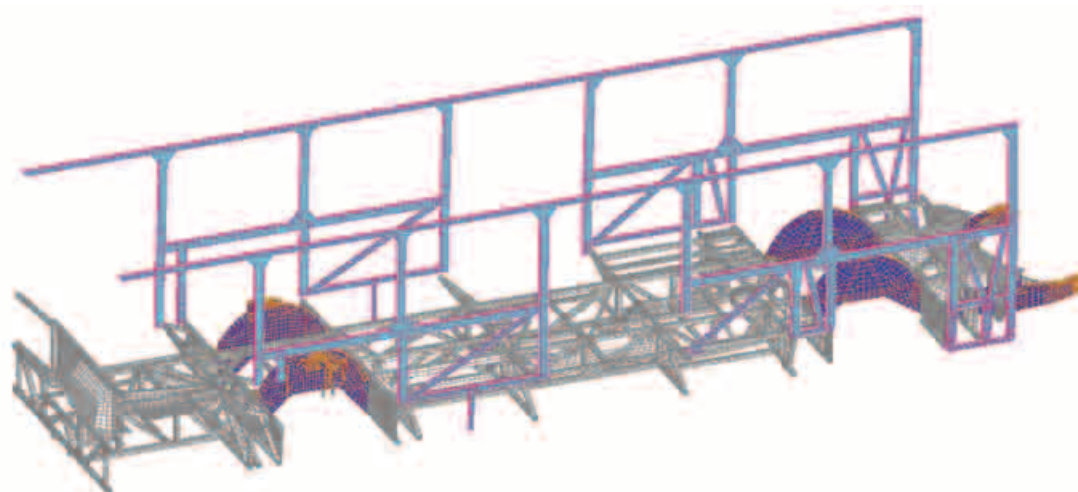


Рисунок 1. Общий вид конечно-элементной модели двухсекционного автобуса



*Рисунок 2.* Передний вагон рассматриваемого автобуса



*Рисунок 3.* Конечно-элементная модель несущей системы переднего вагона

собственных колебаний несущей системы переднего вагона пассажирского автобуса «Московит».

Общий вид конечно-элементной модели автобуса представлен на рис. 1. Дискретизация проводилась с использованием «оболочечных» четырёхузловых конечных элементов первого порядка аппроксимации, имеющих все шесть степеней свободы в узле. Место сцепки переднего и заднего вагонов моделировалось с использованием балочных конечных элементов с соответствующей жесткостью.

Полученная модель содержит более 3,6 миллиона степеней свободы, поэтому для расчёта на обычных персональных компьютерах не пригодна. Связано это с тем, в первую очередь, что расчётное время даже при определении напряжённо-деформированного состояния при статическом нагружении или при расчёте частот собственных колебаний исчисляется неделями. В условиях, когда время от проектирования до изготовления опытного образца и, тем более, до передачи чертежей для запуска в серийное производство ограничено жесткими техническими условиями или требованиями современного рынка, затягивать со сроками проектирования иногда просто недопустимо.

Кроме того, при выявлении на этапе проектирования «слабых мест» с точки зрения прочности в конструкции требуется проведение дополнительных трудоёмких расчётов, оптимизации и т.д.

Для решения такой задачи требуется использование расчётных кластерных систем. Однако, далеко не каждое предприятие имеет их в наличии, а использование услуг сторонних организаций не всегда экономически целесообразно.

Для сокращения расчётного времени подобных конструкций в последнее время используется суперэлементный подход. В этом случае отдельные компоненты модели (рамы, стойки, кунги, двери и т.д.) представляются в виде суперэлементов с заданными характеристиками, получаемых в ходе численных (или натурных) экспериментов.

Идея применения в расчётной практике суперэлементов состоит в следующем. Рассматриваемая громоздкая конструкция расчленяется на более простые подконструкции, которые и являются суперэлементами. Каждый из выделенных суперэлементов в процессе расчёта обрабатывается отдельно от остальных. Те узлы, которые принадлежат границам суперэлементов, вклю-

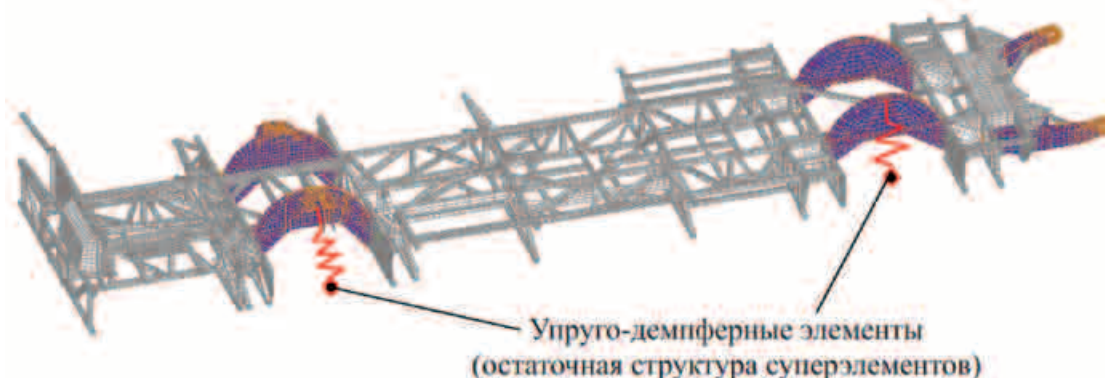


Рисунок 4. Суперэлемент и остаточная структура

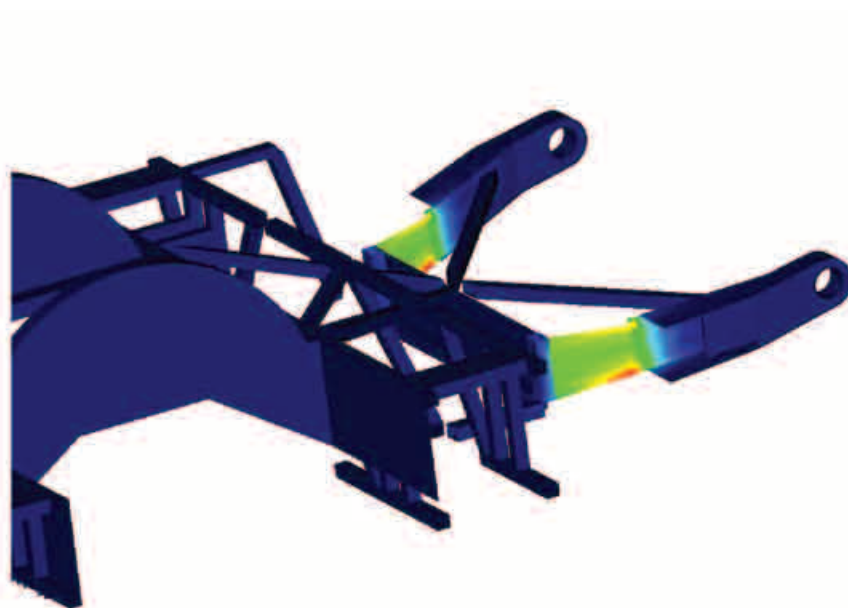


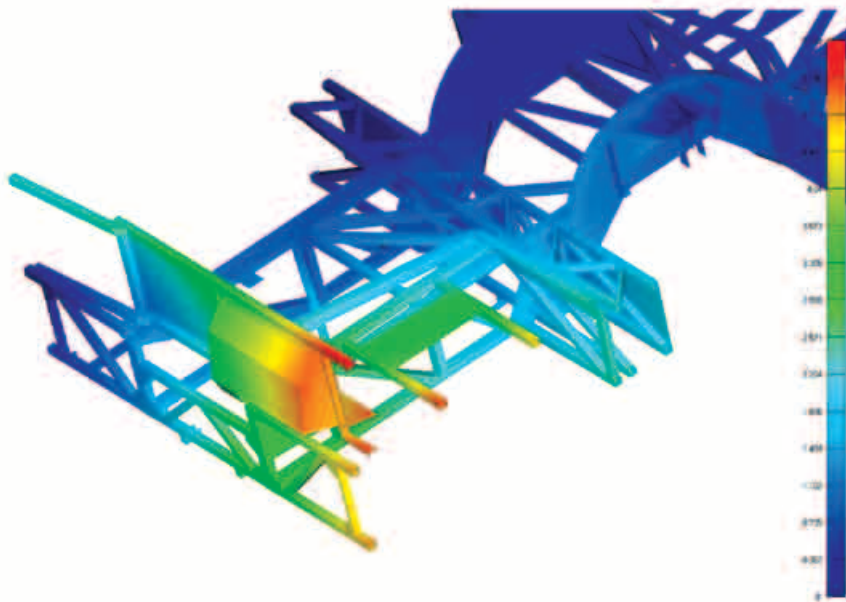
Рисунок 5. Распределение относительных эквивалентных напряжений для собственной частоты колебаний 1.8 Гц

чаются в «остаточную» структуру, — так называемый нулевой суперэлемент. В уравнениях, описывающих нулевой суперэлемент полностью учитываются матрицы жёсткости, масс и демпфирования суперэлементов, сопряжённых с граничными узлами.

Очевидно, что применение такого подхода имеет ряд преимуществ. Использование суперэлементов позволяет решать задачи большой размерности, существенно сокращая временные затраты на выполнение задач оптимизации конструкции с перебором различных вариантов нагружения, граничных условий и т.д. Кроме того, появляется возможность отдавать на решение часть задач специализированным организациям (аутсорсинг). Конечно, такой метод не лишен и недостатков. В частности, при применении подхода к задачам небольшой размерности расчётчикам приходится затрачивать

дополнительное время на создание суперэлементов. Кроме того, сами суперэлементы в рассматриваемых задачах являются линейными. Следует отметить, что использование суперэлементов предполагает наличие достаточной квалификации инженера, широты инженерного кругозора, чувства «физики» исследуемой проблемы и т.д. Однако указанные недостатки полностью компенсируются получаемыми результатами расчётов и их применением.

Различают два основных подхода к редуцированию суперэлементов — метод статического редуцирования и метод динамического. Рассмотрение математического аппарата не входит в круг поставленных задач, он достаточно подробно рассмотрен в различной отечественной и зарубежной специальной литературе. В рассматриваемой задаче о нахождении частот собственных



*Рисунок 6.* Распределение относительных перемещений в передней части рамы автобуса при частоте собственных колебаний 11.4 Гц

колебаний и соответствующих форм применяется метод статического редуцирования.

Объектом исследования является несущая система переднего вагона (рис. 2).

Конечно-элементная модель несущей системы представлена на рис. 3. В качестве граничных условий рассматривается запрет перемещений по всем степеням свободы в местах соприкосновения рамы с «землёй». Колёса не моделируются, а заменяются упругими элементами с жесткостями, соответствующими реальным колесам с учетом шин.

Представленная конструкция — рамная с различными конфигурациями профиля поперечного сечения, материал — сталь. На примере рассматриваемого объекта апробируется суперэлементный подход. Упруго-демпферные элементы, которыми моделируются колеса автобуса входят в остаточную структуру суперэлемента (рис. 4). Для создания суперэлемента используется метод статического редуцирования.

При решении задачи на нахождение собственных значений использовался метод Ланцоша. Для решения подобной задачи без редуцирования суперэлемента временные затраты на обычном персональном компьютере составили несколько часов. При применении суперэлемента — около 20 минут.

По результатам расчёта в частотном диапазоне до 12 Гц включительно выявлены наиболее опасные места с точки зрения вибронапряжённости, подтверждаемые опытом эксплуатации подобных конструкций. На рис. 5 представлено распределение относительных напряжений (эквивалентные напряжения по Мизесу) для частоты собственных колебаний  $f = 1.8$  Гц.

На рис. 6 показано распределение относительных перемещений для передней части рамной конструкции при частоте колебаний  $f = 11.4$  Гц.

Результаты расчётов частот и форм собственных колебаний, полученные при применении суперэлементного подхода и без такового, практически не отличаются. Различие состоит в экономии расчётного времени.