

УДК 629.331+534.1

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩИХ СИСТЕМ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО КРИТЕРИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ

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»

Несущая система (НС) автотранспортного средства (АТС) является одной из наиболее ответственных, металлоемких и дорогостоящих элементов конструкции: жесткость и прочность, и сложность изготовления рамы может составлять около 25 — 30% стоимости всего АТС. Долговечность рамы определяет сроки капитальных ремонтов транспортного средства (ТС). От нее во многом зависит общий пробег АТС при эксплуатации. Несущая система определяет целостность АТС и воспринимает различные виды нагрузок: нагрузки, связанные с воздействием веса узлов и агрегатов, установленных на ней, а также веса пассажиров и груза, и динамические нагрузки, возникающие при движении машины по неровной дороге и при изменении режимов движения. В исключительных случаях, например при дорожно-транспортных происшествиях, несущая система воспринимает и нагрузки аварийного характера. В целом работоспособность рамы определяется ее прочностью и жесткостью при воздействии сил изгиба, кручения и динамических нагрузок АТС (толчков и ударов), возникающих в процессе эксплуатации.

Ввиду сложности конструкции несущей системы автобуса и неопределенности действующих на неё нагрузок наиболее эффективным методом оценки усталостной долговечности, а, следовательно, надежности и безопасности АТС, является расчетно-экспериментальный метод. При этом существует два подхода: натурные испытания автобуса в целом на полигонах и испытания несущей системы кузова отдельно на специальных испытательных стендах.

Натурные испытания НС автобуса в условиях эксплуатации или при имитации нагрузок в лаборатории дают возможность оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции, выявить потенциально опасные, с точки зрения сопротивления появлению трещин, места конструкции и получить для них нагрузочные режимы, необходимые для проведения расчетов и разработки режимов испытания несущих систем

на усталостную долговечность. Но эти исследования не позволяют проводить детальный анализ предельных состояний различных вариантов конструктивно-технологического испытания НС автобусов и находить оптимальный.

Использование системного подхода при обеспечении эксплуатационной, прочностной надежности, повышенного ресурса и пассивной безопасности АТС показывает, что управление функциональными характеристиками на стадиях проектирования, доводки и эксплуатации должно проводиться комплексно, с учетом особенностей процессов во всех основных подсистемах. В соответствии с современной концепцией при проведении исследований по эксплуатационной надежности кузовов автобуса должен изучаться как основной элемент системы обеспечения этих свойств. При этом расчет НС проводится для пяти основных случаев:

1. Опрокидывание АТС;
2. Наезд на препятствие передними колесами одновременно;
3. Наезд передними колесами на препятствия разного уровня;
4. Лобовое столкновение с неподвижным препятствием;
5. Боковое столкновение с АТС.

В случае наезда на препятствие передними колесами одновременно принимается, что наезд передними колесами происходит на дорожное препятствие одинаковой высоты. При этом на корпус автобуса действуют вертикально направленные силы, приложенные в районе переднего шасси и равно распределенные между колесами. В соответствии с нормами [49 CFR] значение этих нагрузок принимается равным  $F = 2,5 * P_{по}$ , где  $P_{по}$  — часть веса корпуса данного автобуса, приходящаяся на переднюю ось. Деформация корпуса в этом случае выражена в основном изгибом.

В случае наезда передними колесами на препятствия разного уровня условно принимается, что при движении автобуса в полном снаряжении одновременно происходит наезд левым передним колесом на препятствие типа бордюра высотой 6 дюймов (152 мм) и попадание переднего правого колеса в выбоину такой же глубины. При этом, хотя правое колесо оказывается полностью разгруженным, мы условно, в запас прочности, принимаем, что на корпус автобуса в районе переднего шасси от левого и правого колес действуют две вертикальные разнонаправленные, но равные по модулю силы, образующие ту же моментную пару, что и от действия силы, приходящейся только на левое колесо. Деформация корпуса в этом случае выражена в основном кручением. С этой точки зрения следует ожидать, что степень закрутки корпуса автобуса будет почти полностью идентична реальной деформации. В соответствии с принятой моделью нагружения значение действующих сил принимается равным  $F = 2,5 * P_{по} * 0,5$ .

В связи с вышесказанным можно сделать вывод: создание современной, безопасной НС связано с большими материальными, энергетическими и временными затратами, так как для нахождения оптимальной конструкции необходимо спроектировать, изготовить и испытать большое количество различных вариантов. Следовательно, создание современных расчетных методов проектирования НС пассажирских автобусов является перспективным направлением автомобильной промышленности. Создание таких методов позволит еще на стадии проектирования рассмотреть огромное количество вариантов и выбрать из них оптимальный.

В задачах конструкционного проектирования автотранспортной техники методы поиска оптимального (рационального) варианта конструкции использовались практически всегда. Однако на ранних этапах поиски оптимальной конструкции разрабатываемого АТС носили чисто интуитивный характер и во многом зависели от квалификации конструктора и возможности качественного и оперативного проведения лабораторно-полевых испытаний разработанных опытных образцов. Поэтому процесс проектирования новых АТС и совершенствование существующих конструкций машин затягивались на многие годы.

В основном, задачи оптимального конструкционного проектирования машин носят однокритериальный характер и направлены на нахождение оптимального размера критического сечения элемента (детали) конструкции автотранспортного средства при наличии ряда ограничивающих условий как по компоновочной схеме машины, так и по нагрузочным режимам. Иначе говоря, задача конструкционной оптимизации ставится следующим образом: для заданных эксплуатационных условий и выбранных режимов движения определить оптимальное конструкционное решение. Однако, с точки зрения оценки эксплуатационных и функцио-

нальных свойств АТС, такая задача носит многокритериальный характер.

Как показал проведенный анализ работ, посвященных различным методам расчета и оптимизации основных конструктивно-технологических, функциональных и эксплуатационных параметров автобуса, количество критериев оптимизации чрезвычайно велико. Причем, в абсолютном большинстве работ решены прикладные задачи для рам несущих систем автобуса. В качестве основных критериев оптимизации используются статическая прочность, долговечность, жесткость конструкции, металлоемкость, коррозионная устойчивость, технологичность изготовления, себестоимость изготовления, устойчивость ТС, управляемость ТС и ряд других.

Как правило, эффективность тех или иных конструктивно-технологических, функциональных или эксплуатационных показателей ТС по указанным критериям определяется расчетным путем. Причем оптимизация разрабатываемой или модифицируемой системы производится, за редким исключением, по одному критерию, максимум по «свертке» трех к одному обобщенному.

Предположение о возможности сведения любой многокритериальной задачи к задаче оптимизации по обобщенному показателю сильно упрощает и в то же время искажает картину выбора. Поэтому в последнее время в ряде работ, касающихся решения задач выбора проектных решений, повторяется мысль о том, что качество практически любых технических систем наиболее адекватно описывается множеством критериев, не сводящихся к единой функции полезности. Это обусловлено тем, что технические системы, к которым относятся рамы ТС, обладают рядом специфических свойств, к которым, в первую очередь, относятся неопределенность конструктивного облика (структуры) объекта (большое количество технологических и конструктивных решений, конструкционных материалов и др.); независимость критериев (показателей) эффективности, которые иерархически связаны между собой и могут быть классифицированы по различным признакам; неполнота количественной информации, что неизбежно приводит к использованию экспертных оценок; неопределенность предпочтений ЛПР и др. Совокупность перечисленных особенностей решаемых задач создала необходимость анализа существующих многокритериальных методов и процедур выбора альтернативных вариантов объектов применительно к рамам ТС и технологий их изготовления, при несворачиваемых к одному обобщенному показателю критериях, а также разработки в диссертации процедур и программно-алгоритмического обеспечения задач многокритериального выбора, учитывающих вышеперечисленную специфику.

Рассмотрим задачу выбора наиболее предпочтительных (оптимальных в некотором смысле) вариантов

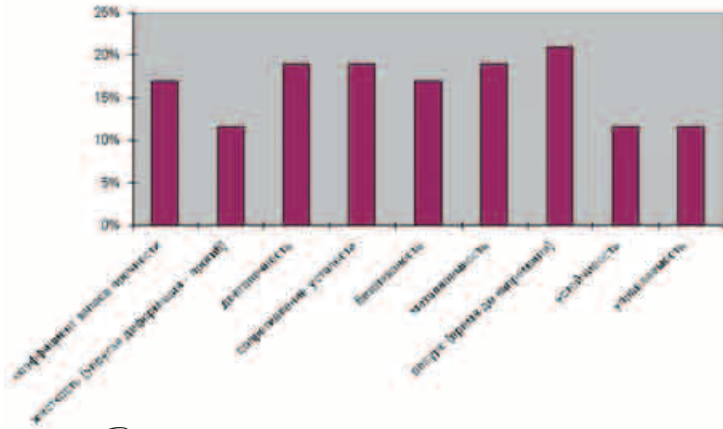


Рисунок 1. Использование критериев оптимизации

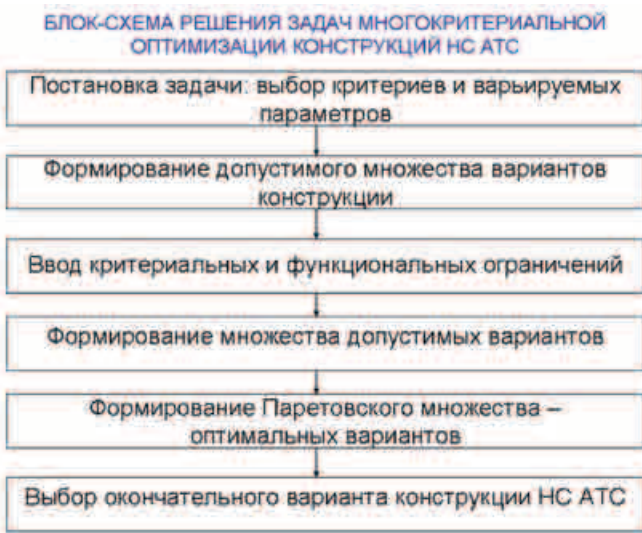


Рисунок 2. Решение задач многокритериальной оптимизации НС АТС



Рисунок 3. Формирование допустимого множества вариантов конструкции НС АТС

конструктивно-технологических решений рамы ТС в общем виде. Ее можно сформулировать следующим образом: имеется некоторая информация о способах (или средствах) реализации рамы ТС и о качестве этих способов (или средствах). Эта информация, как правило, бывает получена от экспертов-специалистов конкретного производства (в данном случае от конструкторов ТС, прочнистов, технологов и др., более узкой специализации) и может быть дополнена или уточнена, если потребуется, результатами расчетов значений альтернатив по некоторым критериям эффективности системы. Необходимо найти подмножество вариантов реализации конструктивно-технологических решений рамы ТС, оптимальной в некоторой структуре предпочтений ЛПР. Математически это записывается как:

$$\begin{bmatrix} F_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ F_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_q) \\ \dots \\ F_N(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \end{bmatrix} \rightarrow opt, \text{ где}$$

$F_1, F_2, \dots, F_N$  — критерии качества;  
 $x_1, x_2, \dots, x_k$  — варьируемые параметры.

Использование критериев оптимизации при проектировании несущих систем АТС в процентном соотношении от общего числа отражено в гистограмме на рис.1.

Решение задач многокритериальной оптимизации можно отобразить с помощью блок-схем, показанных на рис. 2 и рис. 3. Как видно, при решении задач многокритериальной оптимизации НС АТС необходимо учитывать большое число параметров, в том числе и противоречивых, отражающих все стороны производства.

Обычно в современной практике моделируются внешние воздействия на раму НС, создаваемые при движении по участку дороги определенного типа, приводящие к наиболее интенсивному накоплению усталостных повреждений. Информация о нагрузках со стороны дорожного полотна формируется при проведении компьютерного моделирования. При этом все переходные участки дорожного полотна и прочие участки, мало влияющие на накопление усталостных повреждений, из программы испытаний исключаются. Опыт испытания НС АТС ведущими автопроизводителями показывает, уровень информативности виртуальных и стендовых усталостных испытаний может достигать 85–90% уровня информативности полигонных испытаний. Дальнейшее совершенствование методов математического моделирования движения ТС по различным типам дорог и прогнозирование усталостного разрушения численными методами, в первую очередь на основе систем конечно–элементного моделирования, в перспективе позволит приблизить уровень информативности виртуальных и стендовых испытаний к 100% относительно уровня полигонных испытаний автомобильной техники.

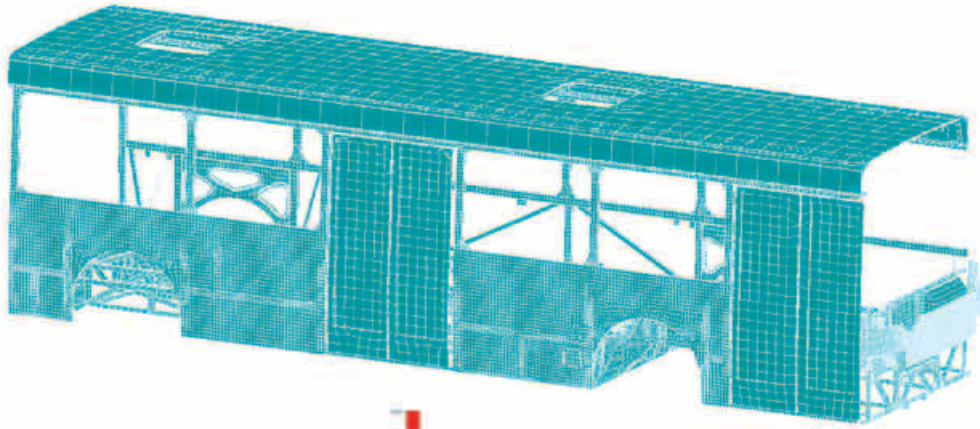


Рисунок 4. Конечно-элементная модель переднего вагона пассажирского автобуса

Опираясь на опыт ведущих производителей автотранспортной (мобильной) техники, можно считать доказанной возможность переноса большей части процесса усталостных испытаний в лабораторные условия, полигонным испытаниям при этом отводится роль контрольных. Подобное совершенствование программы испытаний является актуальной задачей, так как позволяет сократить сроки подготовки новой техники к производству без потери качества, повышая тем самым экономическую отдачу от ее создания, а также на порядок увеличивая количество исследуемых вариантов.

Примеры расчетов конечно-элементной модели с помощью программного комплекса «Nastran» показаны на рис. 4–рис. 8. Конечно-элементная модель пассажирского автобуса разделялась на 600 тыс. оболочечных элементов с 4 узлами и 6 степенями свободы, тип элемента в «Nastran» — PSHELL. В итоге была получена система из более чем 3,6 млн. уравнений. Решение такой задачи было возможно лишь с помощью кластера.

Расчет на долговечность при линейном напряженном состоянии и кривой усталости, имеющей горизонтальный участок, проводился на основе следующей корректированной линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений для кривой усталости с горизонтальной правой ветвью

$$\sum_{i=1}^{i=y} \bar{n}_i / \bar{N}_i = a_p, \text{ где}$$

$$a_p = \sigma_{amax} \zeta - 0,5 (\sigma_{-1})_D / \sigma_{amax} - 0,5 (\sigma_{-1})_D \text{ при}$$

$$a_p^3 > 0, 1 \zeta = \sum_{i=1} \sigma_{ai} / \sigma_{amax} t_i, t_i = v_{ib} / v_b^*$$

Подставляя  $\bar{N}_i$  и  $n_i = v_{ib} \lambda$  в уравнение (1), получим

$$\sum \lambda v_{ib} \sigma_{ai}^m / (\sigma_{-1})_D^m N_0 = a_p. \quad (1)$$

Отсюда следует формула для расчета усталостной долговечности, выраженная числом блоков до появления усталостной трещины

$$\lambda_k = a_p (\sigma_{-1})_D^m N_0 / \sum \sigma_{ai}^m v_{ib}$$

Предел выносливости деталей натуральных размеров  $(\sigma_{-1})_D$  обычно в 2...6 раз меньше предела выносливо-

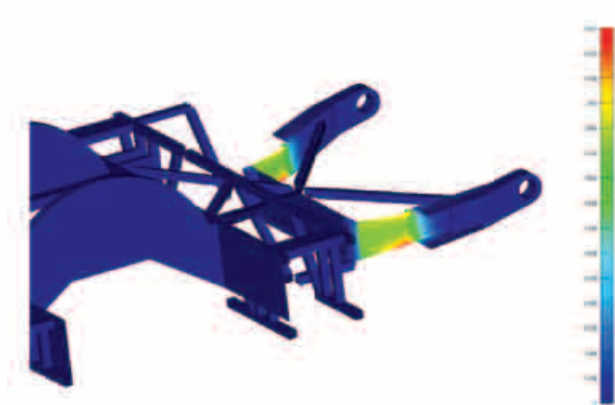


Рисунок 5. Напряжения в несущей системе при частоте собственных колебаний  $f=1,8$  Гц

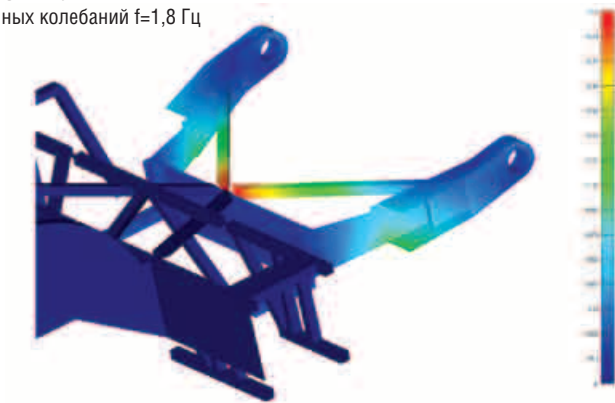


Рисунок 6. Деформации в несущей системе при частоте собственных колебаний  $f=9,6$  Гц

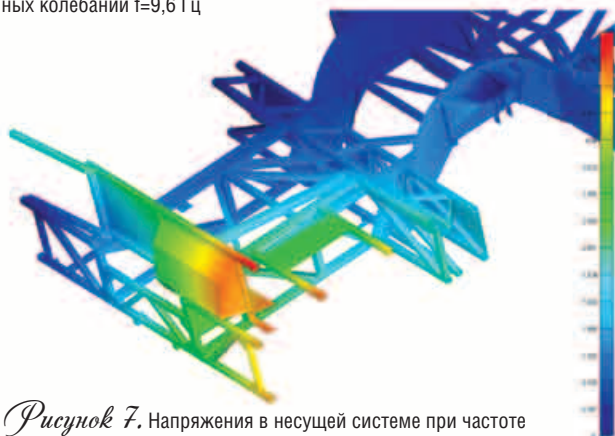


Рисунок 7. Напряжения в несущей системе при частоте собственных колебаний  $f=11,4$  Гц

Таблица 1. Характеристики сопротивления усталости альтернативных вариантов сталей

Материал	$f$ , Гц	$R_\sigma$	$\sigma_{-1}$	$N_G$	$m$
Ст.20	10	-1	155	$3 \cdot 10^6$	13,8
Ст.45	6,67	-1	222	$7,5 \cdot 10^6$	8,52
09Г2	-	-1	252	$4,5 \cdot 10^6$	3,66
30ХГСА	-	-1	630	$8 \cdot 10^5$	6,51

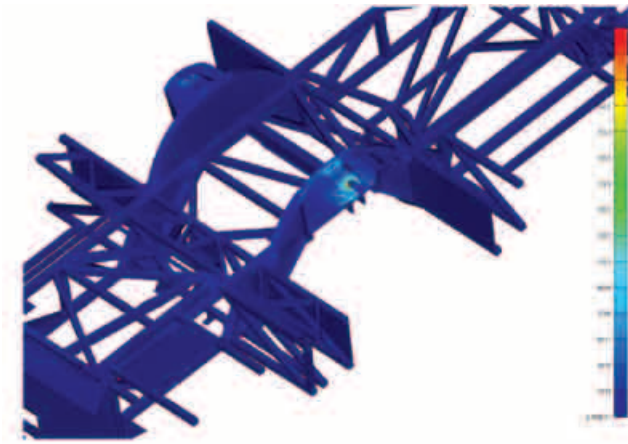


Рисунок 8. Деформации в несущей системе при частоте собственных колебаний  $f=11,4$  Гц

сти гладкого лабораторного образца. Для оценки этой разницы вводятся коэффициенты, учитывающие концентрацию напряжений, масштабный фактор, качество обработки поверхности, эксплуатационные факторы (влияние коррозии, температуры, частоты изменения нагрузки и т.д.), технологические методы поверхностного упрочнения деталей, химико-термические методы (азотирование, цементация, циатирование) и др.

Значение предела выносливости натуральных деталей определяется, согласно ГОСТ 25.504-82, путем введения поправочных коэффициентов.

$$(\sigma_{-1})_д = (K_1/K) \sigma_{-1}, K = (K_\sigma / K_{d\sigma} + 1/K_{F\sigma} - 1) 1/K_v K_A.$$

Здесь  $K_1$  — коэффициент, учитывающий снижение механических свойств с увеличением размера заготовки,  $K_\sigma$ ,  $K_{d\sigma}$ ,  $K_{F\sigma}$ ,  $K_v$ ,  $K_A$  — коэффициенты, характеризующие влияние на концентрацию напряжений, масштабного фактора, качество поверхности, эксплуатационных факторов, поверхностного упрочнения деталей, химико-термических обработок деталей.

Для пределов выносливости влияние металлургического фактора оценивается коэффициентом  $K_1$ : для легированных сталей  $K_1 = 1 - 0,2 \lg(d/7,5)$  при  $d \leq 150$  мм,  $K_1 = 1$  при  $d > 150$  мм для углеродистых сталей  $K_1 = 1$ .

Проведем приближенную оценку долговечности рамы автобуса «Московит», выполненной из различных материалов: Ст. 20, Ст. 45, 09Г2С и 30ХГСА, характеристики сопротивления усталости которых представлены в табл. 1.

В результате заключения сделаем несколько важных с практической точки зрения выводов:

1. Применяемые математические методы, алгоритмы и программные средства, в том числе метод конечных элементов «Nastran», многокритериальная оптимизация «Парето-оптимальность» и др., позволяют эффективно и достоверно решать задачи проектирования НС АТС, при наличии многих критериев качества, в том числе противоречивых, и варьируемых параметров.

2. Основными критериями оптимизации конструктивного облика и технологии изготовления НС являются: прочность, надежность, долговечность, жесткость, металлоемкость, технологичность изготовления, себестоимость и др. Задача оптимизации (выбора) заключалась в нахождении парето-оптимального множества (не уступающих друг другу по совокупности критериев) среди более 500 допустимых вариантов конструкций. Уровни значимости критериев принимались разными.

3. Выделение фрагмента конструкции, критического с точки зрения НДС, осуществляется на основании предложенной в настоящей работе методики. Пространственная расчетная модель выделенного фрагмента секции рамы построена с использованием конечных элементов оболочечного типа, 1-го порядка аппроксимации. Каждый элемент имеет 4 узла и 6 степеней свободы. Тип элемента — PSHELL (NASTRAN). Общее число степеней свободы — более 3,6 млн. При расчете НДС конструкции применен суперэлементный подход с использованием метода статического редуцирования, позволяющий существенно сократить более чем на порядок затраты машинного времени.

4. Запас прочности согласно проведенным расчетам составляет 2,67. Применяемая упрощенная методика позволила учесть взаимодействие рассматриваемого фрагмента НС с сопряженными частями конструкции. Критерии оценки НДС НС рассчитывались для четырех наиболее характерных конструкций НС АТС («Икарус-435», ЗИЛ-32501, НефАЗ-5299 и Volvo B12B) и четырех конструкционных марок сталей (Ст. 20, Ст. 45, 09Г2С и 30ХГСА). В итоге выбран аналог НС, изготовленный из конструкционного материала — Ст.20.