

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КАРКАСА КУЗОВА АВТОБУСА СРЕДСТВАМИ АРМ WINMACHINE

А.Л. Леонов

com@apm.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрен вопрос конкурентоспособности отечественных систем автоматизированного проектирования в решении задач современной инженерии. Для этой цели выполнено компьютерное моделирование каркаса кузова автобуса, а также прочностной анализ конструкции под действием статических и динамических нагрузжений. Вычисления проведены в российской системе автоматизированного проектирования АРМ WinMachine, являющейся полноценным аналогом и заменой зарубежных систем (например, Autodesk, Dassault Systems, Siemens PLM Software). Представлены общие сведения о конструкции кузовов автобусов. Описаны инструменты расчета, в том числе метод конечных элементов. Предложен алгоритм выбора конструкционных материалов. Приведены результаты расчета.

### Ключевые слова

Кузов автобуса, автобус, оптимизация конструкции, метод конечных элементов, статический расчет, динамический анализ, АРМ WinMachine, АРМ Structure3D, компьютерное моделирование, инженерный анализ

Поступила в редакцию 05.07.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

По видам пассажирских перевозок кузова автобусов подразделяют на городские, пригородные, районные (местного сообщения), междугородные, туристские, школьные и служебного пользования.

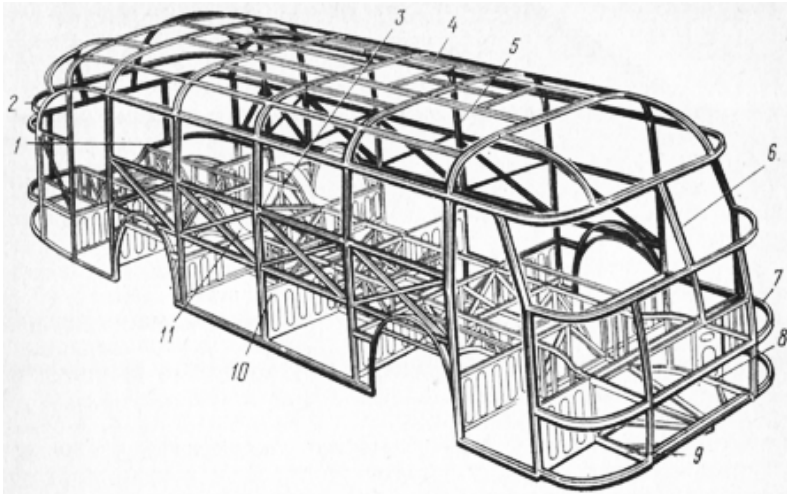
В городских автобусах, предназначенных для перевозок пассажиров в городах, применяют планировку пассажирского помещения с двумя или тремя рядами сидений и широким центральным проходом между ними. Широкие двери и расположенные около них дополнительные площадки, небольшая высота подножек и уровня пола пассажирского помещения над поверхностью дороги повышают удобства входа в автобус и выхода из него.

Пригородные автобусы, используемые для сообщения города с пригородом, изготавливают на базе городских, по сравнению с которыми они имеют большее число сидячих мест.

Автобусы районные (местного сообщения) применяют для перевозки пассажиров между небольшими городами и населенными пунктами, а также внутри последних, для служебных перевозок сотрудников предприятий и учреждений, обслуживания санаториев и курортов, маршрутных таксомоторных перевозок и т. п.

Конструктивно автобусные кузова различаются по способу соединения основных элементов — разъемные и неразъемные — и по способу изготовления профилей — гнутые профили открытого типа, прямоугольные стальные трубы,

алюминиевые профили. В зависимости от материала, из которого изготовлены кузова, они бывают стальные, алюминиевые или из алюминиевых сплавов, комбинированные (деревометаллические) и из пластических масс [1–3]. Типичный пример каркаса кузова автобуса (ЛАЗ-695Е) представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Каркас кузова автобуса ЛАЗ-695Е:

1 — поперечина буксирного прибора; 2 — каркас задней части кузова; 3 — дополнительная левая продольная балка; 4 — каркас крыши; 5 — каркас левой боковины; 6 — каркас передней части кузова; 7 — передняя обвязка основания; 8 — левая продольная балка; 9 — правая продольная балка; 10 — каркас правой боковины; 11 — правая дополнительная продольная балка

Кузова подобного рода должны удовлетворять таким критериям, как общая устойчивость конструкции, местная устойчивость отдельных ее элементов; статическая и динамическая жесткости, минимальная масса и прочность [1]. Обеспечение этих требований возможно на этапе автоматизированного проектирования [4–6].

**Постановка задачи.** Требуется выполнить прочностной расчет металлоконструкции каркаса кузова автобуса и определить его оптимальные параметры, используя систему автоматизированного проектирования АРМ WinMachine (подсистему АРМ Structure3D). Исходными данными для построения расчетной модели каркаса кузова автобуса (рис. 2) является его схема (рис. 3). При этом размеры всех элементов известны из их отдельных рабочих чертежей.

**Инструменты для проведения расчета.** Прочностной расчет выполнен с применением метода конечных элементов (МКЭ) [4]. Первоначально МКЭ использовали для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния конструкций, и до сих пор это направление его применения остается преобладающим. Поэтому анализ будет основан на существующих теоретических положениях этой области инженерных знаний. Но это не означает, что полученные данные будут касаться лишь напряженно-деформированного состояния конструкции. Анализ имеет общий характер, и его результаты могут быть отнесены к другим областям инженерной деятельности.

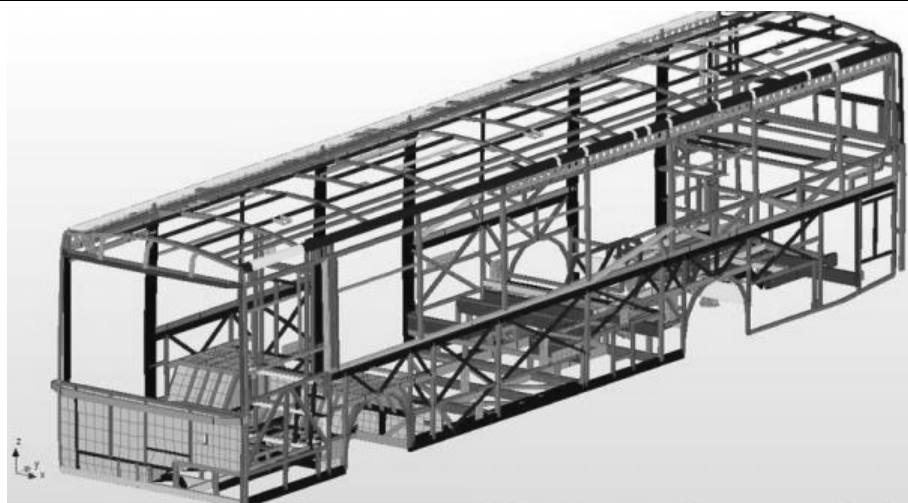


Рис. 2. Модель каркаса кузова автобуса

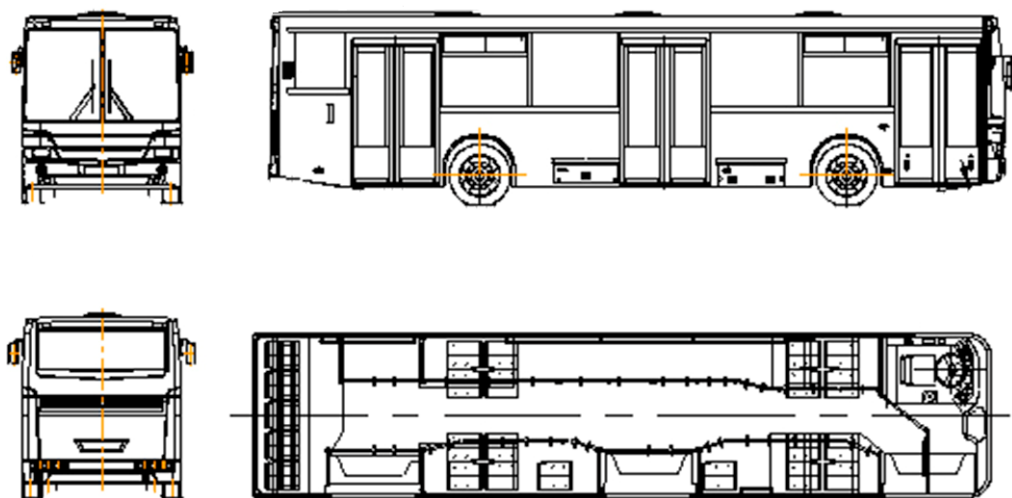


Рис. 3. Схема автобуса

В основе МКЭ лежит вариационный интегральный принцип Лагранжа. Суть этого принципа заключается в утверждении, что в системах, стесненных идеальными стационарными внутренними связями и находящихся под действием потенциальных сил, не зависящих явно от времени, из множества кинематически допустимых перемещений, соответствующих заданным условиям, те, которые удовлетворяют условиям равновесия, придают потенциальной энергии системы стационарное значение. Если начальное и конечное положения системы достаточно близки, то действие по Лагранжу имеет минимум для реального движения. В связи с этим принцип Лагранжа называют также принципом наименьшего действия в форме Лагранжа, т. е. одним из фундаментальных принципов механики.

Согласно принципу Лагранжа, в состоянии устойчивого равновесия значение потенциальной энергии системы минимально. Из вариационного принципа

Лагранжа следует, что в состоянии равновесия системы каждый из ее элементов также находится в равновесии. Принцип Лагранжа устанавливает также пропорциональную связь между силами и перемещениями элементов системы. Таким образом, из достаточно специализированного описания сущности принципа Лагранжа следуют простые, практически используемые положения.

Для расчета в среде APM Structure3D предусмотрены следующие типы конечных элементов:

- стержневые — произвольных поперечных сечений;
- двусторонние жесткие гибкие;
- оболочечные и пластинчатые;
- твердотельные объемные.

Решения для инженерного анализа включают в себя:

- анализ напряженно-деформированного состояния;
- определение коэффициентов запаса и форм потери устойчивости;
- динамический анализ, состоящий из определения частот и форм собственных колебаний и расчета вынужденных колебаний при заданном законе вынуждающей силы;
- расчет усталостной прочности при нагружении периодической переменной нагрузкой и в условиях случайного внешнего нагружения.

**Моделирование каркаса кузова автобуса.** Расчетная модель выполнена в соответствии с чертежами следующих составляющих: рамы, каркаса пола, каркаса боковин автобуса, установки подиума, передних и задних каркасов и каркаса крыши. Граничные условия для расчета (нагрузки и места установки опор) определены исходя из экспериментальных данных.

Была создана стержневая модель конструкции по частям. Далее эти части соединены для образования единой конструкции. К соответствующим узлам присоединены пластические элементы, участвующие в создании матрицы жесткости объекта. Наложены связи между составляющими модели.

Прочностной расчет металлоконструкции автобуса проведен с помощью модуля APM Structure3D, входящего в состав системы APM WinMachine [7].

Поскольку в трехмерном редакторе твердотельная модель может быть разбита только на объемные конечные элементы, количество которых в данной модели было бы чрезмерно большим, единственным вариантом проведения расчета такой конструкции является ее моделирование с использованием стержневых и пластинчатых (оболочечных) конечных элементов. После создания модели необходимо наложить связи между ее элементами [8, 9].

Алгоритм выбора материала конструкции. На рис. 4 приведена блок-схема алгоритма выбора материала конструкции.

Помимо прочностного анализа для выбранного конструктивного решения, необходимо провести серию проверочных расчетов по устойчивости и динамике. Если динамические характеристики и параметры устойчивости окажутся неудовлетворительными, то геометрические размеры объекта определяются по этим критериям.

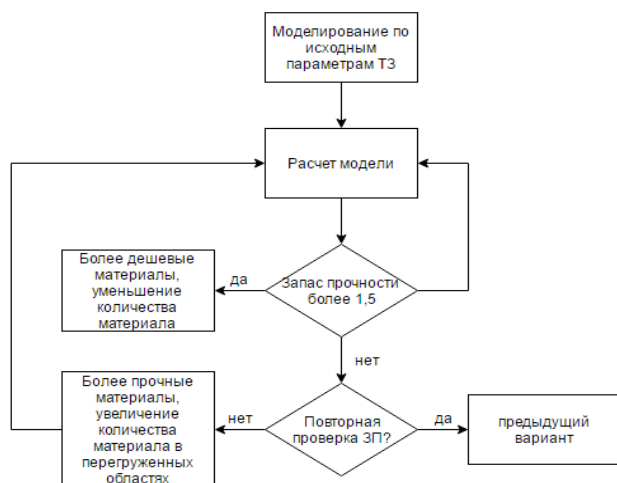
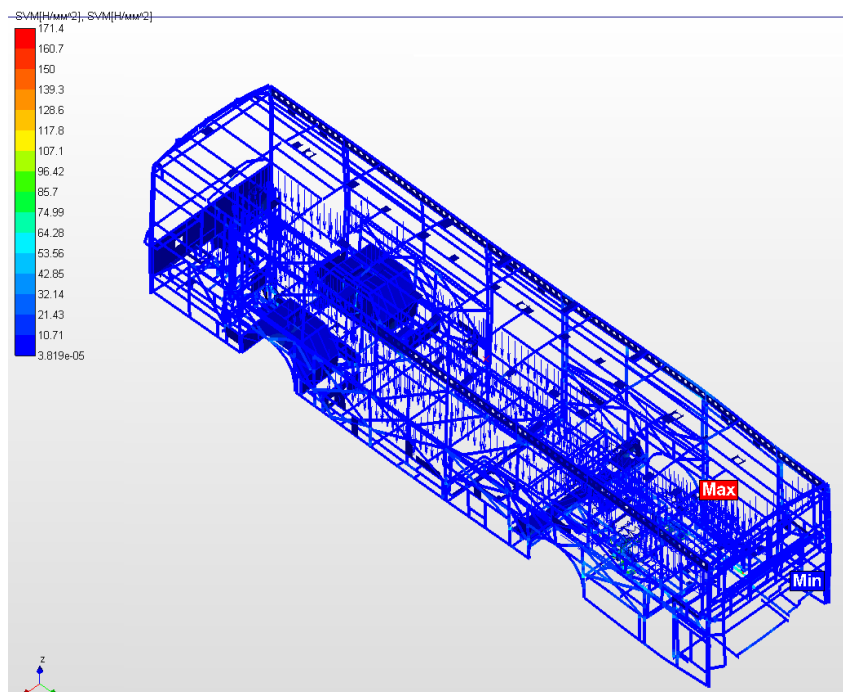


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подбора материала конструкции:

ТЗ — техническое задание; ЗП — запас прочности

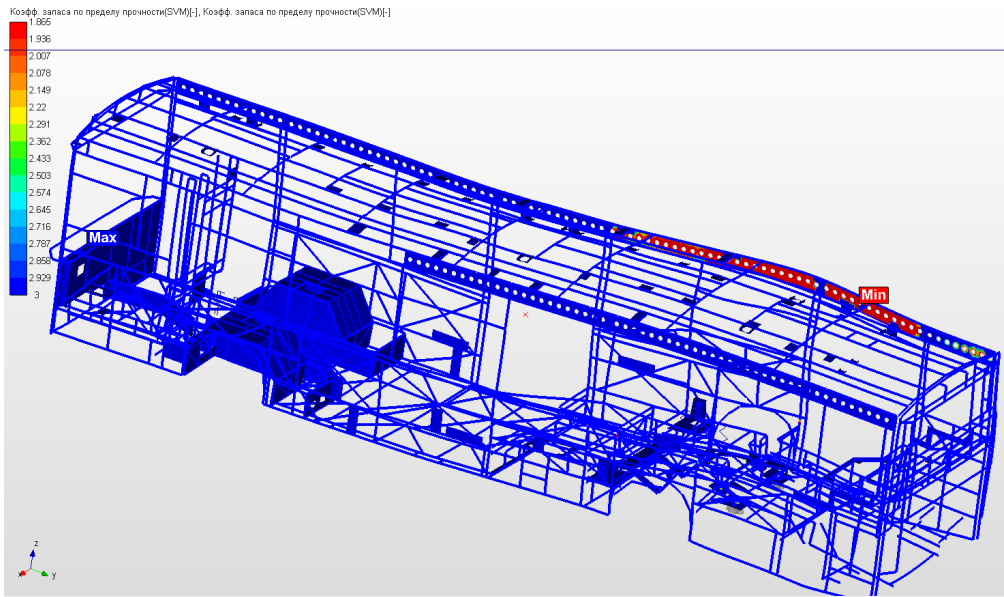
**Результаты расчета.** В результате статического расчета получены распределения перемещений, эквивалентных напряжений (рис. 5, а), коэффициентов запаса по пределу прочности (рис. 5, б) и текучести (рис. 5, в) и других параметров по каркасу кузова автобуса.



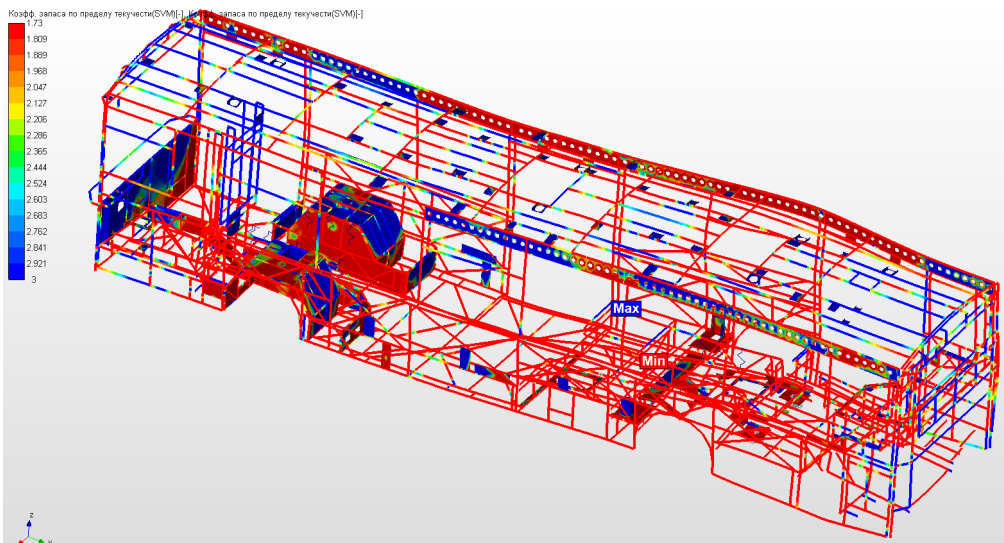
а

Рис. 5. Распределения параметров по каркасу кузова автобуса:

а — эквивалентных напряжений, Н/мм<sup>2</sup>



б



в

**Рис. 5.** Распределения параметров по каркасу кузова автобуса:

б — коэффициента запаса по пределу прочности;

в — коэффициента запаса по пределу текучести

Исходя из результатов статического анализа для данных нагрузок, можно судить о соответствии конструкции нормативам. Например, данная конструкция должна иметь коэффициент запаса по пределу текучести меньше единицы. Здесь это условие соблюдено.

Далее была рассчитана и задана динамическая нагрузка, имитирующая движение автобуса по неровной дороге. Проведен расчет частот собственных

колебаний, чтобы затем с их помощью учесть резонансные явления (рис. 6). Перед началом динамического расчета обычно вычисляют коэффициент запаса устойчивости, который в нашем случае превышает 8, что соответствует полной устойчивости конструкции.

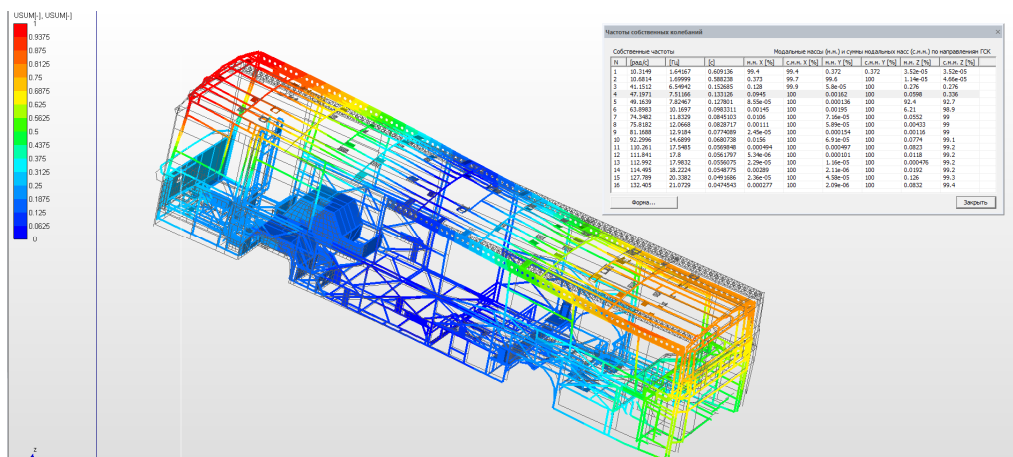


Рис. 6. Форма колебаний для четвертой собственной частоты

После динамического расчета имеется возможность получить анимацию как напряжений, так и изменений нагрузок, коэффициентов запаса и пр. Для удовлетворения нормативным требованиям по этим данным можно судить о поведении конструкции в критических ситуациях и корректировать ее параметры.

Стали Ст3ПС и 09Г2СД обладают рациональными характеристиками и могут быть использованы для конструкции каркаса кузова автобуса [10]. Стоимость, прочность и текучесть в данном случае являются оптимальными.

**Выводы.** Проведен анализ конструкции каркаса автобуса с использованием конечно-элементной модели, созданной в программном комплексе АРМ WinMachine.

С помощью итерационного алгоритма расчета прочности и устойчивости каркаса автобуса подобраны оптимальные конструкционные материалы.

## Литература

- [1] Александров М.П. *Подъемно-транспортные машины*. Москва, Машиностроение, 1984, 336 с.
- [2] Ряховский О.А., ред. *Детали машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 465 с.
- [3] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Москва, Машиностроение, 1985, 224 с.
- [4] Дунаев П.Ф. *Конструирование узлов и деталей машин*. Москва, Издательский центр «Академия», 2004, 496 с.
- [5] Решетов Д.Н., ред. *Машины и стенды для испытания деталей*. Москва, Машиностроение, 1979, 343 с.

- [6] Захаров М.Н. *Прочностная надежность оборудования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 123 с.
- [7] Замрий А.А. *Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure3D*. Москва, АПМ, 2010, 376 с.
- [8] Зинкевич О., Чанг И. *Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред*. Москва, Недра, 1974, 238 с.
- [9] Шелофаст В.В. *Основы проектирования машин*. Москва, АПМ, 2005, 471 с.
- [10] Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Ерофеев В.К., Устинова А.А. *Конструкционные стали и сплавы*. Санкт-Петербург, Политехника, 2013, 440 с.

**Леонов Артемий Леонидович** — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — В.В. Шелофаст, д-р техн. наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.



## SIMULATION AND ENGINEERING ANALYSIS OF A BUS BODY FRAMEWORK DESIGN BY MEANS OF APM WINMACHINE

A.L. Leonov

com@apm.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*The article deals with the question whether Russian computer-aided design systems are competitive when solving contemporary engineering problems. Investigating this meant creating a computer simulation of a bus body framework and performing a strength analysis of the design as subjected to static and dynamic loads. We ran our simulations using APM WinMachine, a Russian computer-aided design system, which is a fully fledged counterpart to non-Russian software packages (such as Autodesk, Dassault Systems, Siemens PLM Software), capable of replacing them. The article presents the basics of bus body design. We describe the tools we used for computations, including the finite element method. We suggest an algorithm for selecting structural materials. The article also presents the results of our computations.*

### Keywords

*Bus body, bus, design optimisation, finite element method, static analysis, dynamic analysis, APM WinMachine, APM Structure3D, computer simulation, engineering analysis*

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

---

### References

- [1] Aleksandrov M.P. Pod'emno-transportnye mashiny [Handling machinery]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984, 336 p.
- [2] Ryakhovskiy O.A., ed. Detali mashin [Machinery parts]. Moscow, Bauman Press, 2014, 465 p.
- [3] Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detaley mashin i konstruksiy na prochnost' i dolgovechnost' [Strength and life duration calculation of machinery parts and constructions]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 224 p.
- [4] Dunaev P.F. Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin [Engineering of machine components and parts]. Moscow, "Akademiya" Publ. center, 2004, 496 p.
- [5] Reshetov D.N., ed. Mashiny i stendy dlya ispytaniya detaley [Machines and benches for parts testing]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979, 343 p.
- [6] Zakharov M.N. Prochnostnaya nadezhnost' oborudovaniya [Strength reliability of the equipment]. Moscow, Bauman Press, 2011, 123 p.
- [7] Zamriy A.A. Proektirovaniye i raschet metodom konechnykh elementov v srede APM Structure3D [Engineering and calculation by finite element method in APM Structure3D]. Moscow, APM publ., 2010, 376 p.
- [8] Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. The finite element method in continuum and structural mechanics. New York, McGraw-Hill 1967, 272 p. (Russ. ed.: Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i v mekhanike sploshnykh sred. Moscow, Nedra publ., 1974, 238 p.).
- [9] Shelofast V.V. Osnovy proektirovaniya mashin [Fundamentals of machine designing]. Moscow, APM publ., 2005, 471 p.
- [10] Vorob'yeva G.A., Skladnova E.E., Erofeev V.K., Ustinova A.A. Konstruksionnye stali i splavy [Construction steels and alloys]. Sankt-Peterburg, Politekhnik publ., 2013, 440 p.

**Leonov A.L.** — graduate student, Department of Machine Design Foundations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.V. Shelofast, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Machine Design Foundations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.