

УДК 681.782.473:004.354.5

АВТОМАТИЗАЦИИ И
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Г.Г. ХАЧАТРЯН, С.О. СИМОНЯН, С.В. ВЕРЛИНСКИЙ

**ПРИМЕНЕНИЕ SOLIDWORKS И ANSYS В ИССЛЕДОВАНИИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ**

Изучен рынок систем CAD/CAE, используемых в настоящее время при автоматизированном проектировании. Показано, что связка SolidWorks и ANSYS является одним из лучших на рынке решений для разработки конструкций устройств, оборудования, инструментов и проведения различных видов физических расчетов.

Построена 3D-модель конструкции устройства в SolidWorks, исследованы возможности оптимизации и снижения его массогабаритных характеристик. Необходимые для моделирования данные были импортированы из SolidWorks в ANSYS через подсистему управления проектными данными (PDM – Product Data Management) с использованием формата IGES межпрограммного обмена. В ANSYS проведен динамический анализ напряженно-деформированного состояния конструкции. При помощи метода конечных элементов под воздействием вектора синусоидальных нагрузок найдены деформации модели и амплитудно-частотные характеристики в двух диапазонах частот (1...100 Гц и 100...1000 Гц), а также частоты собственных колебаний конструкции (частота резонанса).

Ключевые слова: SolidWorks, ANSYS, напряженно-деформированное состояние, динамический анализ конструкций, системы CAD и CAE, оптимизация, метод конечных элементов, облачные вычисления.

Целью данного исследования является изучение напряженно-деформированного состояния прототипа устройства компьютерного тренажера с использованием новейших версий систем автоматизированного проектирования (САПР), принадлежащих к CAD/CAE-технологиям (Computer Aided Design/Computer Aided Engineering).

Говоря о CAE, нельзя не упомянуть связку CAD/CAM/CAE. Не случайно Национальный научный фонд США (National Science Foundation, NSF) считает появление систем CAD самым значимым событием с точки зрения повышения производительности труда со времен изобретения электроэнергии.

В настоящее время в результате многочисленных слияний и поглощений произошло формирование отрасли вокруг четырех основных игроков – Autodesk, Dassault Systèmes, PTC и Siemens PLM Software [1].

Среди наиболее широко представленных на рынке систем САД выделяются программные продукты французской компании Dassault Systèmes и нижеперечисленных американских корпораций:

- AutoCAD, Inventor, Revit (Autodesk),
- SolidWorks, CATIA (Dassault Systèmes),
- Pro/Engineer, Creo (PTC),
- NX, Solid Edge (Siemens PLM Software).

Наиболее популярными из систем САЕ в основном являются программные продукты следующих американских компаний:

- ANSYS (ANSYS Inc),
- Abaqus (Dassault Systèmes),
- Nastran, Patran (MSC Software),
- NX (Siemens PLM Software),
- Algor Simulation, Moldflow (Autodesk),
- Pro/Mechanica (PTC).

При изучении возможностей применения той или иной САПР наш выбор пал на SolidWorks и ANSYS, как на одни из самых функциональных и лучших из имеющихся на рынке САПР решений по всестороннему моделированию и дальнейшему комплексному анализу механических конструкций. Вопросы применения SolidWorks и ANSYS подробно рассмотрены в [2 - 5].

Улучшение характеристик прочности конструкции устройства возможно с помощью компьютерного моделирования воздействия на него знакопеременной динамической нагрузки. Для этого необходимо создать трехмерную модель устройства в САПР и выполнить анализ прочности. 3D - модель устройства создана в SolidWorks.

Цель прочностного анализа - определить величины поверхностных деформаций, внутренних напряжений и частот собственных колебаний механической конструкции [6].

Снижение массы устройства возможно благодаря правильному выбору и расчету его деталей, а также геометрических размеров материала корпуса, исключая ухудшение основных критериев, таких как жесткость, надежность и стабильность конструкции.

Конструкция состоит из верхней части - стойки и нижней части - корпуса с подъемно-поворотным механизмом и складными ножками. В верхней стойке для передачи движения от маховичков валам используются следующие зубчатые передачи: коническая - с передаточным отношением, равным 1, и цилиндрическая - с передаточным отношением, равным 1,5. На маховички верхней стойки действуют крутящие моменты $M = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$. В нижней части

конструкции для передачи движения подъемному механизму используется коническая зубчатая пара с передаточным отношением, равным 1. На валы подъемно-поворотного механизма, приводимые в движение маховиками, действуют крутящие моменты $M = 250 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 1). При этом нижняя часть конструкции жестко закреплена.

Габаритные размеры корпуса следующие: длина – 1050 мм, ширина – 480 мм, высота – 1180 мм. Толщина материала корпуса – 3 мм.

В качестве материала корпуса используется Сталь 4, зубчатых колес – Сталь 45.

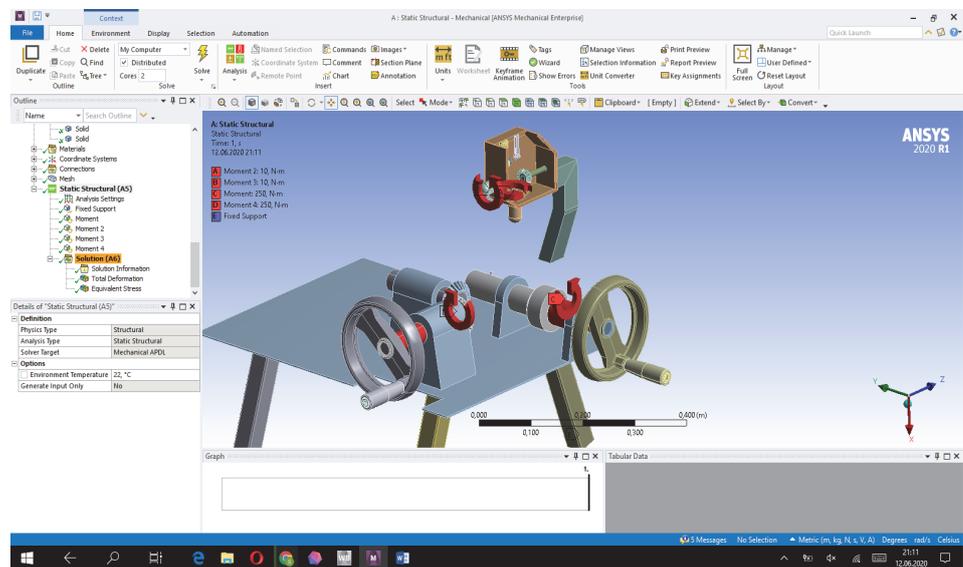


Рис. 1. Крутящие моменты, действующие на органы управления

Оптимизация параметров проводится по минимизации масс деталей конструкции – валов, подшипников и их опор, зубчатых передач:

$$\sum_{i=1}^n m_i \rightarrow \min_m .$$

С применением автоматизированной оптимизации параметров в SolidWorks была получена оптимальная конструкция, представленная на рис. 2. Однако она нерациональна с точки зрения эргономики. В результате дальнейшей проработки был получен внешний вид, представленный на рис. 3.

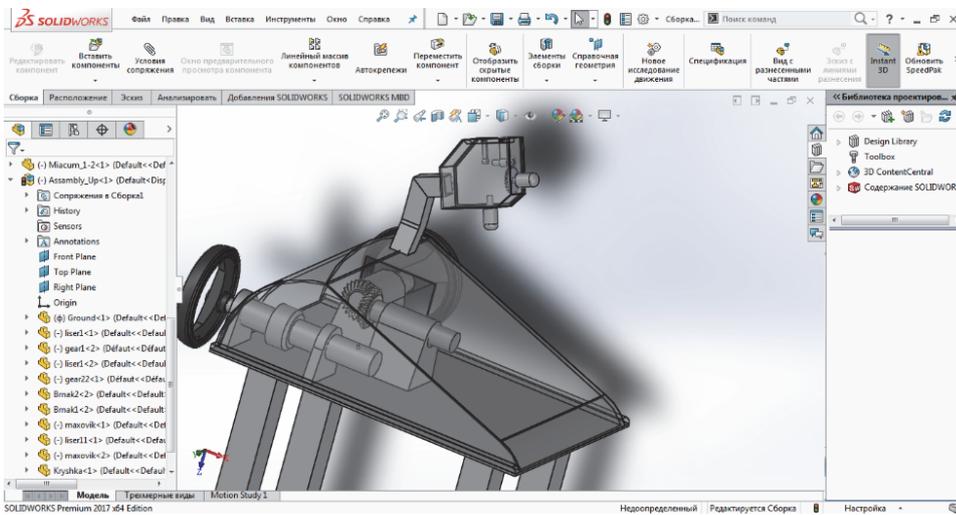


Рис. 2. Оптимизированная конструкция устройства в SolidWorks

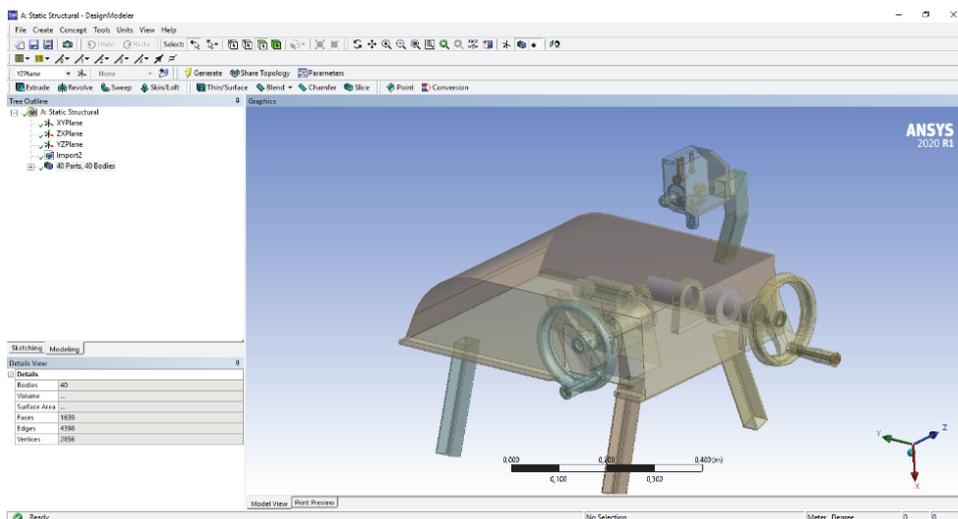


Рис. 3. Окончательная конструкция устройства, перенесенная из SolidWorks в ANSYS

В результате моделирования были получены оптимальные данные толщин основания корпуса и крышки, а также размеров и толщин складных ног. Контрольные расчеты прочности валов и зубчатых соединений производились на основе методик, изложенных в [7]. Исходным пунктом вычислений прочности валов является максимальный крутящий момент, приложенный на каждый из двух нижних маховиков, от которого зависят минимальные диаметры соответствующих валов. Все это влияет на толщину основания корпуса, а значит, и на общую массу конструкции.

Расчет диаметра вала проведен согласно [7]:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi\tau}},$$

где M - крутящий момент, $H\cdot мм$; τ - касательное напряжение, $МПа$.

В качестве целевой функции выбран диаметр вала (от которого зависит его масса). Составлена двухкритериальная нелинейная задача оптимизации:

$$\begin{aligned} d &= \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi\tau}} \rightarrow \min_{M, \tau}, \\ 15 &\leq \tau \leq 20, \\ M &> M_{max}, \end{aligned}$$

где M_{max} – максимальный крутящий момент ($6000 H\cdot мм$), который долго может развить человек при вращении двумя руками маховика диаметром $200 мм$ [8]. Результатом решения задачи оптимизации является уточненный минимальный диаметр вала $d = \varnothing 13 мм$ подъемно-поворотного механизма.

Подобными методами осуществлены оптимизация параметров других деталей конструкции - подшипников, опор, зубчатых передач, и сравнение с оптимизацией в SolidWorks.

Одним из наиболее распространенных методов анализа прочности конструкций является компьютерное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) или FEM (Finite Element Method), который предлагает численные методы решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений [9].

На рис. 4 показана полученная в ANSYS амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) конструкции при гармонической (синусоидальной) нагрузке в диапазоне частот $1...100 Гц$, а на рис. 5 - в диапазоне частот $100...1000 Гц$. Знание собственных частот необходимо для проектирования узлов во избежание возникновения колебаний на резонансной частоте во время транспортировки или эксплуатации устройства.

Анализ моделирования в ANSYS показал, что в диапазоне частот $1...100 Гц$ деформация конструкции в верхней части стойки достигает на частоте $30,7 Гц$ значения $13,2 мм$. Тот же анализ в диапазоне частот $100...1000 Гц$ зафиксировал максимальную деформацию конструкции на левом участке днища корпуса, достигнув на частоте $109 Гц$ значения $10,59 мм$ (рис. 6).

Особый интерес представляют колебания в диапазоне частот $20...80 Гц$. Здесь верхняя частота $80 Гц$ определяется антропометрическими свойствами организма человека, а именно - частоты сокращения мышц рук оператора

находятся в полосе 30...80 Гц [6]. Колебания с частотой ниже 30 Гц могут возникнуть во время транспортировки устройства на автомобиле.

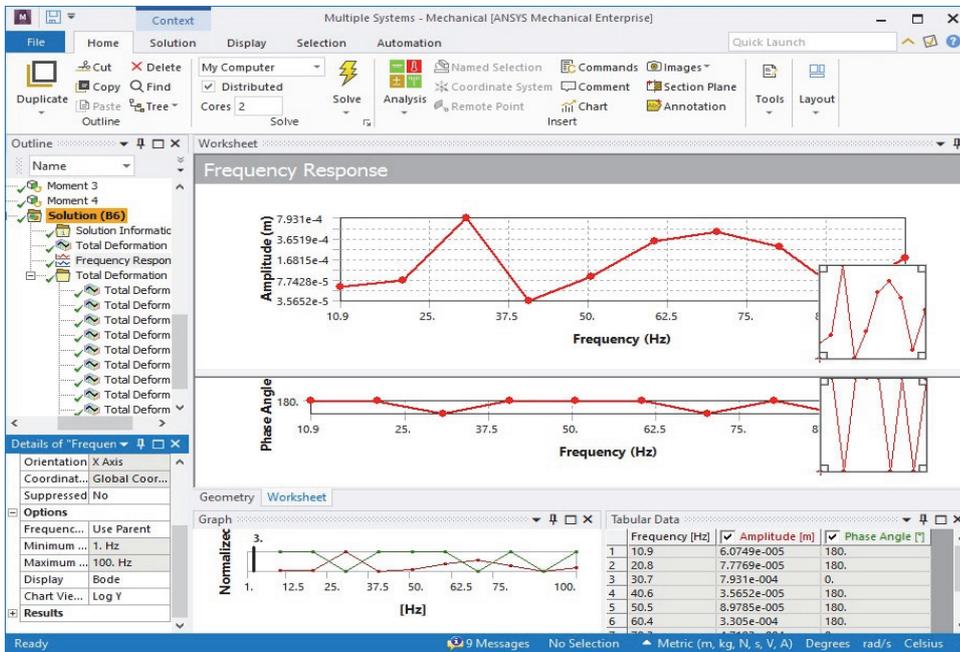


Рис. 4. АЧХ устройства в диапазоне частот 1...100 Гц

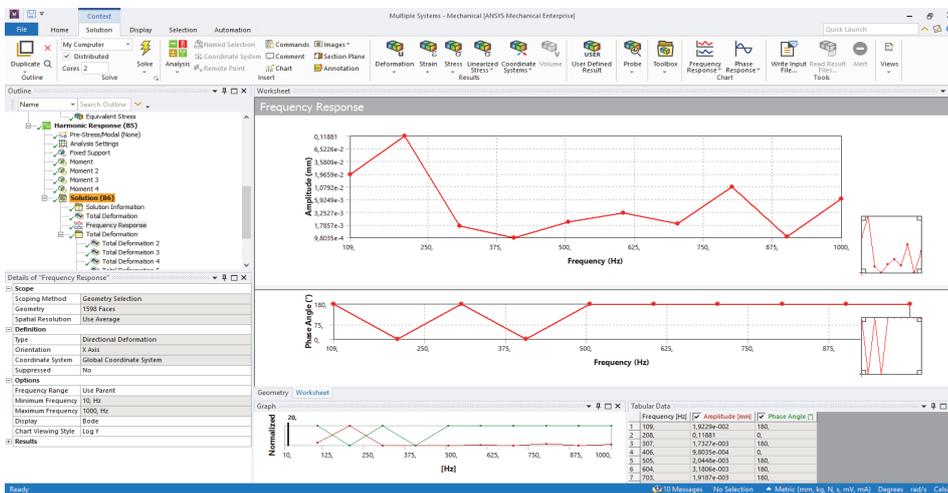


Рис. 5. АЧХ устройства в диапазоне частот 100...1000 Гц

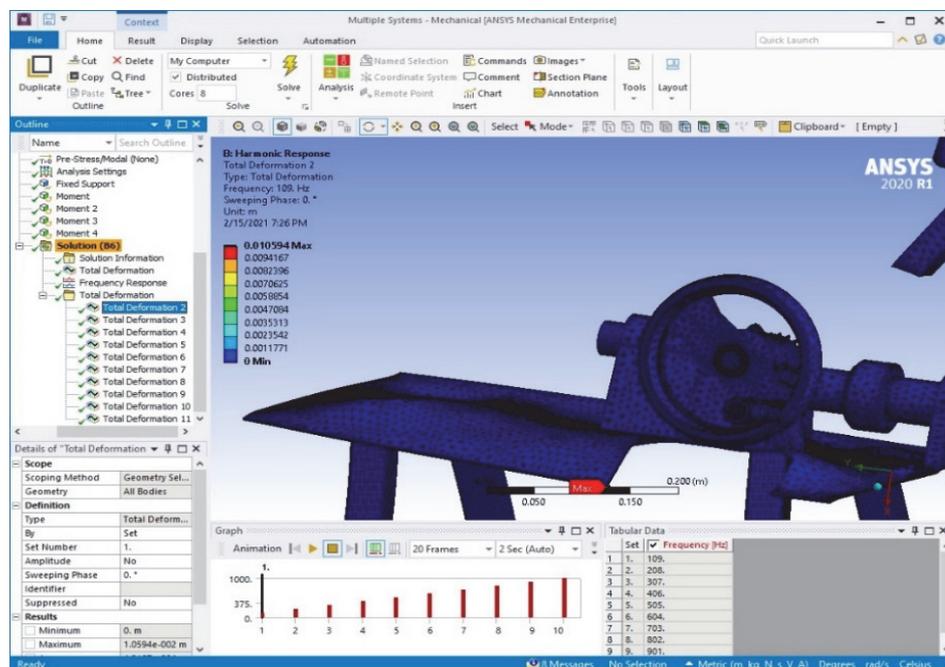


Рис. 6. Деформации конструкции на частоте 109 Гц

Известно, что ускорения, возникающие в структурных элементах автомобиля, являются функцией возбужденных колебаний и амплитуды неровностей автодорожной поверхности. Частоты колебаний в кабине и кузове легковых и грузовых автомобилей с рычажно-пружинной и пневмогидравлической подвесками попадают в диапазон 1,5...22 Гц [10, 11], что в нашем случае ниже резонансной частоты конструкции устройства (30,7 Гц).

Вышеупомянутый анализ напряженно-деформированного состояния проведен с помощью компьютера следующей конфигурации: ЦП - Core i7 3621QM 2.1 ГГц (8 ядер), ОЗУ - 8 Гб, VGA - 1 Гб. Общее затраченное машинное время составило 15909 с (около 4,5 ч), что вызвало необходимость продолжить исследование при помощи более мощного компьютера с применением облачных сервисов.

Облачные вычисления выполнены с использованием облачной модели обслуживания PaaS (Platform-as-a-Service) компании Instigate на сервере следующей конфигурации (рис. 7): ЦП - AMD Ryzen 3800X 3,9 ГГц (8 ядер), ОЗУ - 32 Гб DDR 4, VGA - Geforce GT710B 2 Гб, SSD - 500 Гб.

Результаты расчетов следующие:

- количество узлов, полученных МКЭ, - 493864;

- общее количество элементов - 258558;
- количество решенных дифференциальных уравнений - 1479504.

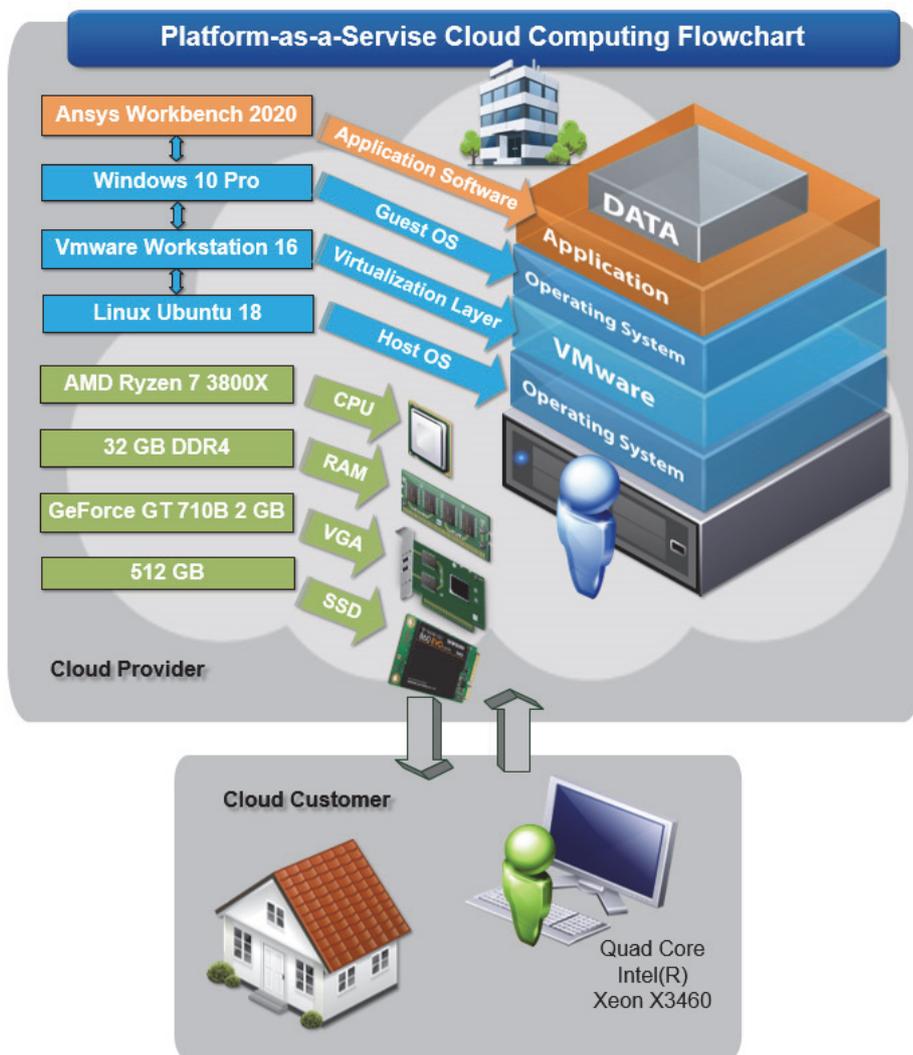


Рис. 7. Диаграмма проведенных облачных вычислений

График процессорного времени, затраченного на локальные и облачные вычисления, приведен на рис. 8, а расчетная производительность операций с плавающей запятой решателя дифференциальных уравнений ANSYS - на рис. 9.

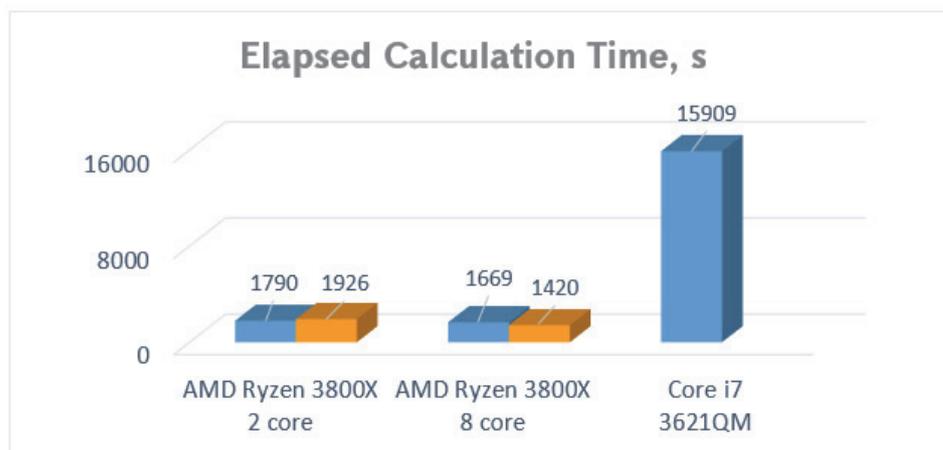


Рис. 8. Процессорное время, затраченное на вычисления в ANSYS

Сравнительные графики производительности процессоров Core i7 3621QM и AMD Ryzen 3800X построены в 2- и 8-ядерном режимах работы последнего.

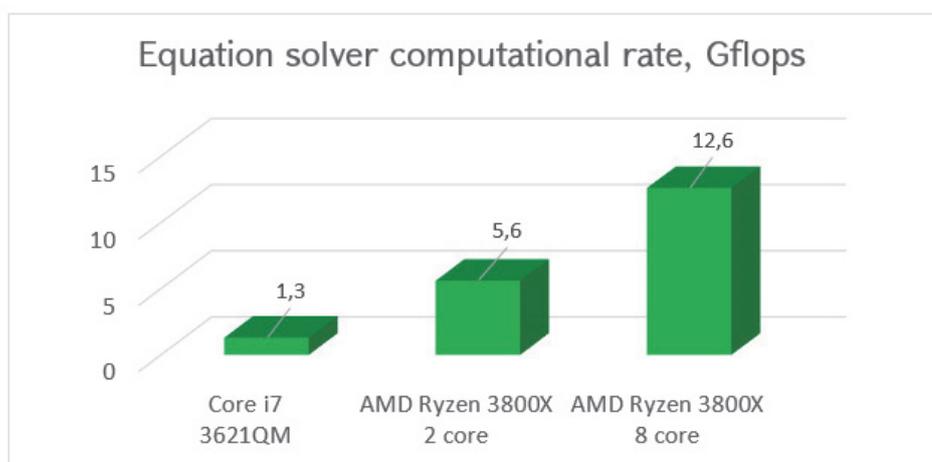


Рис. 9. Расчетная производительность операций с плавающей запятой решателя дифференциальных уравнений ANSYS (64-битный режим)

Заключение

Моделирование в ANSYS показало, что:

- частота собственных колебаний конструкции равна 30,7 Гц, что вынудило для нейтрализации возможного негативного воздействия (при ее перевозке в кузове автомобиля) предусмотреть соответствующее конструктивное решение с жестким закреплением верхней стойки;

- максимальная деформация конструкции при динамической синусоидальной нагрузке в диапазоне частот 100...1000 Гц зафиксирована на левом участке днища корпуса, достигнув значения 10,59 мм на частоте 109 Гц, что свидетельствует о необходимости увеличения толщины материала днища (сталь марки Ст. 4) и перерасчета или добавления ребер жесткости под днищем;

- при моделировании напряженно-деформированного состояния в ходе облачных вычислений получена экономия времени в 8...11 раз по сравнению с локальными вычислениями.

Выявлено, что перевозка конструкции транспортными средствами не вызовет проблем, так как собственные колебания кабины и кузова автомобиля приходятся на диапазон частот 1,5...22 Гц, что ниже резонансной частоты (30,7 Гц) конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерный инжиниринг: Учеб. пособие/ **А.И. Боровков** и др. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - 93 с. <https://fea.ru/news/3046>.
2. **Аведьян А.** SolidWorks - САПР промышленного масштаба. <https://sapr.ru/article/6786>.
3. **Planchard D.C.** Engineering Design with SOLIDWORKS 2018.-SDC Publications, 2018.- 890 p.
4. **Lombard M.** Mastering SolidWorks.-John Wiley & Sons, Inc. 2019. - 1210 p.
5. **Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S.** Engineering Analysis with ANSYS Software.- Elsevier Ltd., 2006.-456 p.
6. **Федорцев Р.В., Фуфаев А.В., Болотин А.А.** Моделирование и оптимизация портативного прибора наблюдения посредством анализа жесткости его конструкции в среде САПР PRO/ENGINEER//Приборы и методы измерений.- 2013.- N1 (6).- С.52-59.
7. Проектирование механических передач/ **С.А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С. Козинцов** и др.-5-е изд., перераб и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - 560 с.
8. **Долин П.А.** Справочник по технике безопасности.-5-е изд., перераб и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. - 800 с.
9. **Бате К.Ю.** Метод конечных элементов.- М.: Физматлит, 2010. - 1024 с.
10. **Войтенко В.А.** Математическое моделирование упругой подвески автомобиля// Электротехнические и компьютерные системы. -2013.- №10 (86). -С. 33-40.
11. **Поляков Ю.А.** Динамический анализ комплексных виброзащитных систем транспортных средств: Дис. ...д.т.н.- М., 2019.- 478 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 27.02.2021.

Հ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ս.Վ. ՎԵՐԼԻՆՍԿԻ

**SOLIDWORKS-Ի ԵՎ ANSYS-Ի ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐԻ
ԼԱՐՎԱԾԱՂԵՖՈՐՄԱՑՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ**

Ուսումնասիրվել է ներկայումս օգտագործվող CAD/CAE համակարգերի շուկան: Ցույց է տրվել, որ SolidWorks-ը և Ansys-ը հանդիսանում են շուկայում լավագույն լուծումներից մեկը սարքերի, սարքավորումների, գործիքների կոնստրուկցիաների նախագծման և տարբեր տեսակի ֆիզիկական հաշվարկների իրականացման համար:

Կառուցվել է սարքի կոնստրուկցիայի 3D մոդելը SolidWorks-ում, ուսումնասիրել են օպտիմալացման և նրա զանգվածագաբարիտային բնութագրերը նվազեցնելու հնարավորությունները: Մոդելավորման համար անհրաժեշտ տվյալները SolidWorks-ից փոխանցվել են ANSYS տվյալների կառավարման ենթահամակարգի (PDM - Product Data Management) միջոցով՝ օգտագործելով միջօրագրային փոխանակման IGES ձևաչափը: ANSYS-ում իրականացվել է կոնստրուկցիայի լարվածադեֆորմացված վիճակի դինամիկ վերլուծություն: Վերջավոր տարրերի մեթոդով (ՎՏՄ) սինուսոիդալ բեռնվածությունների վեկտորի ազդեցության տակ հայտնաբերվել են մոդելի դեֆորմացիաները և ամպլիտուդահաճախականային բնութագրերը (ԱՀԲ) երկու տիրույթներում (1...100 Հց և 100...1000 Հց), ինչպես նաև կոնստրուկցիայի սեփական տատանումների հաճախականությունները (ռեզոնանսի հաճախականությունը):

Առանգրային բառեր. SolidWorks, ANSYS, լարվածադեֆորմացված վիճակ, կոնստրուկցիաների դինամիկ վերլուծություն, CAD և CAE համակարգեր, օպտիմալացում, վերջավոր տարրերի մեթոդ, ամպլային հաշվարկներ:

H.G. KHACHATRYAN, S.H. SIMONYAN, S.V. VERLINSKY

**APPLICATION OF SOLIDWORKS AND ANSYS IN THE RESEARCH OF
THE STRESS-STRAIN STATE OF CONSTRUCTIONS**

The market of CAD/CAE systems currently in use has been studied. It is shown that the combination of SolidWorks and ANSYS is one of the best solutions on the market for the development of device designs, equipment, tools and various types of physical calculations.

A 3D model of the device design in SolidWorks is built, and the possibilities of optimization and reduction of its mass and size characteristics are investigated. The data required for modeling was transferred from SolidWorks to ANSYS via the Project Data Management (PDM) subsystem, using the IGES interprogram exchange format. The dynamic analysis of the stress-strain state of the structure is carried out in ANSYS. Using the Finite Element Method (FEM) under the influence of the vector of sinusoidal loads, the deformations of the model and its amplitude-frequency characteristics in two frequency ranges (1...100 Hz and 100...1000 Hz), as well as the natural oscillation frequency of the device (the resonance frequency) are found.

Keywords: SolidWorks, ANSYS, stress-strain state, dynamic structural analysis, CAD and CAE systems, optimization, Finite Element Method, cloud computing.