

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Центр «Сверхзвук» МГУ

№ госрегистрации
122040600007-8

УТВЕРЖДАЮ
Проректор — начальник Управления
научной политики МГУ



А.А. Федянин

«30» декабря 2021 г.

УДК 534.2:533 534.2:532
534.2:539.2

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
Центр «Сверхзвук»
(промежуточный)

Руководитель работы –
директор Центра «Сверхзвук» МГУ
Д.В. Георгиевский

(Подпись)

Москва 2021

Ключевые слова: аэроакустика и вибрации, акустика сверхзвуковых самолетов, искусственный интеллект и безопасность полетов, дополненная реальность, звуковой удар
Ключевые слова по-английски: acoustics of supersonic aircraft, artificial intelligence and flight safety, aeroacoustics and vibrations, augmented reality, sonic boom

Реферат

В 2021 отчетном году было проведено моделирование акустического воздействия реактивного двигателя на панель хвостовой части разрабатываемого Сверхзвукового Пассажирского Самолёта (СПС). Возмущения ближнего поля истекающей из реактивного двигателя струи в поле гидродинамической нагрузки задавались по секторам в виде частотного спектра акустической нагрузки. Был разработан программный модуль, позволяющий по заданным спектрам задавать временные сигналы акустического и гидродинамического давления для соответствующих секторов панели самолёта. Построена конечно-элементная модель панели самолёта с учетом её геометрических и конструктивных особенностей. В программном комплексе Методом Конечных Элементов проведён расчет вибрационного отклика панели, позволяющий судить об уровне возникающих динамических напряжений и, следовательно, в дальнейшем о её усталостно-прочностных характеристиках. Разработан робастный непараметрический идентификатор для класса сингулярно возмущенных систем с неопределенными математическими моделями. Создан прототип, математическое и программное обеспечение для шлема виртуальной реальности со встроенной системой отслеживания взгляда. Создано решение для отслеживания направления взгляда человека с реализованным фовеальным рендерингом на основе прогнозирования. Решена задача максимизации горизонтальной координаты точки, движущейся в вертикальной плоскости под действием сил тяжести при наличии вязкого трения.

Введение

В настоящем отчёте описывается разработка программного обеспечения для передачи поля акустических нагрузок в упругую конечно-элементную модель конструкции хвостовой части СПС и проведение расчётов динамического отклика конструкции, а также информация по видам и классам тренажёрных устройств, систем подвижности и визуализации, современные требования к тренажёрным устройствам, сведения по устройству вестибулярного аппарата, предложения по повышению качества динамической и визуальной имитации, в том числе благодаря применению технологии гальванической вестибулярной имитации.

При проектировании конструкции самолета необходимо учитывать всевозможные нагрузки, которым подвергаются его элементы. Имеющаяся на данный момент практика расчетов, как правило, либо не включает вибрации конструкции под действием акустического поля, либо учитывает только линейный отклик конструкции. Однако, в ряде случаев акустическая нагрузка от струи двигателя может достигать уровня 160 дБ и выше, в таких случаях должна учитываться нелинейность колебаний конструкции при расчете панелей самолёта на усталостную прочность.

Обучение пилотов сложных транспортных средств требует использования специализированных симуляторов, которые имитируют для пилота условия приближенные к реальным. Для имитации движения зачастую используют подвижные стенды-платформы опорного типа, а также программное обеспечение, разрабатываемое под конкретную платформу. С развитием робототехники появился тренд использования многозвенных роботов-манипуляторов для создания более реальной имитации. Для более точной имитации необходимо точно знать все геометрические параметры для платформы или робота-манипулятора, однако часто датчики в механизмах платформы или роботов-манипуляторов недостаточно точны или отсутствуют вовсе. При этом геометрические параметры платформы или робота-манипулятора зачастую могут отличаться от приведённых в технической документации, а также могут изменяться со временем вследствие деформаций и из-за постоянных нагрузок. Симуляторы включают в себя системы визуализации, звука и прочие элементы, которые необходимо как можно точнее синхронизировать между собой для того, чтобы избежать ошибочного восприятия ситуации пилотом. Сейчас всё чаще при создании симулятора систему визуализации фиксируют, а изображение изменяется в соответствии с положением платформы и поданном управлении.

Основная часть

Для проведения расчётов по определению уровня динамических напряжений и усталостной прочности выбрана панель СПС, расположенная в наибольшей близости к соплам двух двигателей. Панель имеет прямоугольную форму с шириной $A = 2.453$ м и длиной $B = 3.3$ м.

Панель подкреплена силовым каркасом, состоящим из шпангоутов и стрингеров. Материал всех составляющих – титановый сплав ВТ6 (плотность $\rho = 4450 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, модуль Юнга $E = 115$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$).

Секции обшивки имеют ширину $a = 100$ мм, длину $b = 500$ мм и толщину $h = 1.2$ мм.

Подразделением ЦАГИ Лаборатории 2 были проведены расчёты по определению распределения акустического воздействия одного реактивного двигателя на рассматриваемую панель. Результаты расчётов переданы подразделению МГУ в виде таблицы, содержащей значения амплитуд спектра пульсаций давления (в дБ) и фаз (в радианах) для 144 равномерно распределенных точек на панели (сетка из точек 12x12). Спектр дискретизирован по 500 частотам от 6.8 Гц до 3400 Гц. Помимо акустической составляющей, было передано распределение аэродинамической составляющей нагрузки на панель СПС в аналогичном виде. Возмущения этих двух типов независимы и могут складываться линейно.

Была разработана конечно-элементная модель подкреплённой панели.

Конечно-элементная сетка состоит из ~100 000 оболочечных конечных элементов прямоугольной формы. Перемещения элементов силового каркаса кинематически связаны с перемещениями панели. По периметру все силовые элементы конструкции закрепляются (условие нулевых перемещений и вращений).

Для дальнейшего анализа и валидации был проведен линейный расчет собственных частот построенной конечно-элементной модели.

Собственные формы и частоты качественно и количественно соответствуют ожидаемому НДС конструкции.

Подразделением МГУ Лаборатории 2 была разработана методика реализации расчётов определения вибрационного отклика панели СПС на акустическую и аэродинамическую нагрузку с учётом нелинейных эффектов:

В программно-вычислительном комплексе, реализующем конечно-элементный анализ, моделируется панель конструкции хвостовой части СПС на основе заданной секции обшивки, описанной выше.

Для данной геометрии строится конечно-элементная расчетная сетка (уровень дискретизации должен быть проверен на сеточную сходимость для каждого используемого в дальнейшем типа расчёта).

Ставятся граничные условия на всех внешних узлах силового каркаса расчетной модели, соответствующие заземлению (Encastre).

Указывается вид расчёта («Step»), который будет производиться. Проводится нестационарный расчет динамической теории упругости с использованием неявной разностной схемы по времени (Dynamic implicit) с заданной нестационарной нагрузкой на данной интервале времени (1 с) с возможным учётом геометрической (и при необходимости – физической) нелинейности.

На каждый элемент конечно-элементной сетки обшивки прикладывается произвольная нагрузка в течение 1 с – необходимо для создания шаблона входного файла.

Создается входной файл для решателя («Job»), содержащий информацию о геометрии, сетке, нагрузках и граничных условиях. Данный файл используется в качестве шаблона, который модифицируется на последующих этапах.

Каждый элемент расчетной сетки попадает в область одной из 144 точек, в которой заданы на выбранном интервале времени (1 с) спектры и фазы акустических и аэродинамических пульсаций давления. На языке программирования Python 3 написана программа, которая принимает на вход созданный шаблон входного файла и интерполирует распределение нагрузок в элементах конечно-элементной сетки в соответствии с их расположением в поле пульсаций давления.

Всё поле нагрузок в 144 точках формируется как восстановленный сигнал обратным дискретным преобразованием Фурье в течение 1 с следующим образом.

Спектр сигнала пересчитывается в размерный в соответствии с параметрами задачи:

$$|P_k| = P_0 \cdot 10^{\frac{SPL_k}{20}}, \quad k = 0, \dots, N - 1$$

где значение опорного давления $P_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Па, соответствующее порогу слышимости синусоидальной звуковой волны частотой 1 кГц, SPL_k – уровень пульсации давления в дБ, N – число частот (определяется дискретизацией спектра). Аргументом комплексной амплитуды синусоидального сигнала пульсации давления (P_k), слагающей исходный сигнал, является значение фазы (ω_k) в радианах для соответствующей частоты. Таким образом получают P_k :

$$P_k = |P_k| \cdot (\cos(\omega_k) + i \cdot \sin(\omega_k))$$

Вычислив N комплексных амплитуд, применяем обратное преобразование Фурье и получаем исходный размерный сигнал пульсации давления от времени в заданной точке на панели:

$$p_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad n = 0, \dots, N-1$$

Т.к. максимальная рассматриваемая частота в спектре $f_{max} = N \cdot \Delta\nu = 3400$ Гц ($N = 500$, $\Delta\nu = 6.8$ Гц – шаг дискретизации спектра по частоте), то при восстановлении сигнала интервал дискретизации по времени должен быть не более чем $\frac{1}{2 \cdot f_{max}} = \frac{1}{6800}$ с. Впоследствии используется верхняя граница для интервала дискретизации. Сигнал планируется восстанавливать на промежутке времени $t = [0, 1]$ с, но шаг дискретизации спектра по частоте $\Delta\nu$ позволяет получить сигнал только на $t = \left[0, \frac{1}{\Delta\nu}\right] = [0, 0.147]$ с. В связи с этим, для задания нагрузки на панель СПС будет использоваться периодически продленный в 7 раз сигнал $p(t)$ ($[p(t)] = \text{Па}$) на $t = [0, 1.029]$ с.

Был разработан программный модуль восстанавливающий сигнал акустической и гидродинамической нагрузок по заданному спектру и фазе.

Далее к комплексному спектру применяется обратное дискретное преобразование Фурье. Полученная таким образом нагрузка на $T \sim 0.14$ с имеет тот же спектр, что и был предоставлен на расчет. Далее полученный сигнал копировался до формирования нагрузки на $T = 1.029$ с.

Сигнал с высокой дискретизацией (7000 отчетов в 1.029 с) записывается в текстовый файл в виде таблицы Время (с) – Значение (Па).

Согласно алгоритму проведения расчетов, были сгенерированы 144 текстовых файла, содержащих нагрузки на промежутке времени $T = [0; 1.029]$ с. Специально разработанный программный модуль считывал все эти файлы по очереди и вносил таблично заданные нагрузки для соответствующих секций во входной файл расчета.

Расчет проводился со следующими параметрами:

- Тип расчета: динамическая задача с неявной схемой интегрирования по времени (Dynamic Implicit).
- Время расчета $T = 2$ с, где первые 1.029 с задана динамическая нагрузка, затем нагрузка снимается – продолжается свободное колебание конструкции.
- Шаг расчета по времени выбирается автоматически в пределах диапазона $\left[2 \cdot 10^{-10}, \frac{1}{8000}\right]$ с, с записью физических характеристик каждые 5 шагов интегрирования. Маленький шаг обусловлен большой дискретизацией нагрузки (7000 значений нагрузки в 1.029 с).
- Геометрическая нелинейность отключена.

- Физическая нелинейность не задана.

К дискретному ряду перемещений центрального узла было применено дискретное преобразование Фурье, чтобы определить доминирующие частоты в отклике конструкции на падающее акустическое поле. Из него следует, что доминирующими являются 1-ая и 5-ая собственные моды, т.к. наибольшие значения спектра приходятся на частоты ~18 Гц и ~62 Гц.

Из проведенных расчетов следует, что при амплитуде колебания центрального узла ~4мм, напряжения по Мизесу в центральном элементе достигают уровня 50 Мпа. Если проанализировать всё поле напряжений во времени, то пиковыми значениями являются величины порядка 500 Мпа, что превышает условный предел текучести для титановых сплавов ($\sigma_{0,2} \sim 250$ Мпа). Таким образом, следует провести более детальный анализ уровня возникающих напряжений с учётом геометрической и физической нелинейности конструкции и определить местоположение наиболее подверженных деформированию участков. Учитывая высокий уровень напряжений, после этих расчётов необходимо также произвести расчёт усталостной прочности конструкции. Перечисленные работы запланированы на последующие этапы исследований НЦМУ “Сверхзвук”.

Современные гарнитуры виртуальной реальности имеют экраны с высоким разрешением, достаточным для обеспечения четкого видения даже небольших виртуальных объектов. Четкое видение обеспечивается только в центральной области сетчатки глаза человека с самой высокой плотностью световых рецепторов, при этом движение изображения со скоростью выше $4^\circ/\text{с}$ нарушает четкое видение. Для сохранения четкости зрения существует связь между вестибулярным аппаратом и глазодвигательным механизмом: в ответ на вращение головы глаза вращаются в противоположном направлении.

Задержки отслеживания движений пользователя и рассогласование между визуальной и динамической имитацией могут привести к болезни движения, чаще всего проявляющейся в виде укачивания пользователя. Методы решения этой проблемы можно разделить на несколько классов:

- 1 Прогноз реального движения пользователя для синхронизации с виртуальным,
- 2 Использование динамических платформ,
- 3 Использование гальванической вестибулярной стимуляции.

Гальваническая вестибулярная стимуляция позволяет воздействовать на выход вестибулярного аппарата и может применяться для корректировки движения глаз во время перемещений в виртуальной среде.

Еще одна причина возникающей болезни движения при использовании систем виртуальной реальности – снижение частоты кадров при воспроизведении плохо оптимизированной виртуальной сцены. Для увеличения частоты кадров возможно применять метод фовеального рендеринга. При фовеальном рендеринге детально рендерится только область, попадающая на центральную область зрения.

Была предложена модификация стандартного рендеринга (отрисовки сцены) для виртуальной реальности, завязанная на применении встроенного в шлем окулографа.

Применялась структура нейросетевого идентификатора, описанная в прошлых разделах, однако стандартная сигмоидальная функция активации была заменена на функцию активации Ижикевича, описываемую уравнениями:

Предложенная приближенная модель была использована в эксперименте, который собирает данные от добровольцев с использованием инструментального устройства контролируемого ускорения движения. Эти данные записывались с заранее определенной частотой, а затем вводились (в автономном режиме) в предложенный идентификатор на основе SDNN. В этом разделе подробно описаны все аспекты эксперимента.

В этой серии экспериментов использовалась вращающаяся динамическая платформа для обеспечения контролируемых вращательных движений испытуемого. Результирующая глазная реакция и динамика головы были записаны, а затем обработаны для моделирования с помощью предлагаемой SDNN.

Программное обеспечение SRanipal собирает данные, предоставляемые встроенной системой отслеживания взгляда, и выводит исходную точку обзора и вектор направления для обоих глаз с максимальной частотой 120 Гц. Система сбора данных построена на базе гарнитуры виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye. Положение гарнитуры и кватернион ее ориентации в фиксированной системе координат были получены из системы отслеживания SteamVR. Управляемое движение осуществляется с учетом эталонного пространства с 4 степенями свободы на базе динамической платформы XD-motion производства корпорации «Вымпел».

Экспериментальный процесс выглядит следующим образом. Сначала на испытуемого надевают гарнитуру и регулируют ее так, чтобы она оставалась фиксированной на голове на протяжении всего эксперимента. Затем айтрекер калибруется в соответствии с документацией и инструкциями SRanipal. После завершения процедуры калибровки испытуемому не разрешается регулировать гарнитуру. В противном случае эксперимент будет сброшен. Испытуемый сидит на динамической платформе в прямом положении. Он выполняет вращения в обе стороны вокруг вертикали по 30 секунд каждое. Чтобы еще больше избежать визуальных и звуковых сигналов о движении, на протяжении

всего эксперимента на экране гарнитуры отображается сплошной черный экран, а наушники воспроизводят статический звук.

Выбор моделей движения основан на нескольких факторах. Во-первых, горизонтальные полукружные каналы стимулируются больше, чем два других, для этого вида движения, поэтому глазная реакция также в основном горизонтальна, что позволяет сосредоточиться на одной оси. Во-вторых, платформа имеет наибольший радиус действия по этой оси вращения, что позволяет использовать более разнообразные модели движения. Последовательно на этой платформе выполняются вращения по тангажу и крену, регулируя длину ног. Однако эта регулировка происходит даже в состоянии покоя, когда не выполняется вращение, и приводит к дополнительным колебаниям платформы, вызывая паразитную реакцию глаза.

Вектор направления взгляда преобразуется из системы координат, привязанной к гарнитуры, в горизонтальный и вертикальный углы поворота глаза относительно передней оси. Данные о координатах головы отбирались с меньшей частотой, чем информация слежения за глазами, поэтому они были сглажены с помощью фильтра Гаусса. Кватернион ориентации головы был преобразован в углы Эйлера. Оставив только данные, соответствующие горизонтальным углам, вычисляли угловую скорость и линейное ускорение.

Собранные данные из двух шаблонов движения были использованы для тестирования предложенной модели SDNN. Эти две модели представляют собой 18 циклов вращения в минуту с амплитудой 25 градусов и 4,8 цикла вращения в минуту с 50 градусами. Позже они будут называться высокочастотными и низкочастотными движениями.

В рамках проекта было создано решение для отслеживания направления взгляда человека с реализованным фовеальным рендерингом на основе прогнозирования. Высокочастотный окулограф основан на видеосистеме на кристалле (System on the Crystal, SoC) собственной разработки. Структура системы соответствует проекту описанию из отчета 2020 года НЦМУ «Сверхзвук». SoC был разработан для поиска черных и белых объектов на сложном фоне с частотой до одной тысячи Гц. Система может показывать координаты, площадь и яркость точки и может удерживать до пятидесяти объектов в каждом кадре с этой частотой, что используется для определения направления взора. Окулограф позволяет с частотой до 1000 Гц распознавать даже быстрые саккадические движения глаз для фовеальной визуализации. Приведенный ранее нейроидентификатор проектируется под применение с данным высокочастотным окулографом.

Тестовая сцена была построена на движке Unreal Engine 4.26. чтобы показать возможности увеличения частоты кадров в сцене с 21,8 миллионами полигонов.

Значительная часть от общего числа полигонов была обеспечена объектами растительности и объектами, непосредственно преобразованными из системы CAD. Рабочее устройство: ноутбук с Intel Core i9-9880H 2,3 ГГц, 32 ГБ и Nvidia GeForce RTX 2080. Вывод осуществлялся с частотой 60 Гц и разрешением 2880x1440.

Было проведено двенадцать тестов, каждый из которых состоял из 20 минут пребывания пользователя в шлеме виртуальной реальности с полным разрешением и в режиме с фовеальным рендерингом. В режиме полного разрешения, сцена отображалась с разрешением 2880x1440 пикселей; в режиме фовеального рендеринга, базовое разрешение 960x480 пикселей, которое было увеличено с помощью Nvidia Deep Learning Super Sampling (DLSS). В фовеальном режиме был применен рендеринг с полным разрешением по кругу под углом 10 угловых градусов.

Тесты показывают увеличение производительности более чем на 50% и значительно больший процент времени, когда обеспечивается комфортная частота кадров 60 Гц. Среднеквадратичная ошибка прогноза для положения глаз была близка к нулю, но варьировалась среди пользователей и зависела от скорости движения головы.

Алгоритмы динамической имитации включают в себя две фазы: фазу имитации движения и фазу возврата в исходное рабочее состояние, когда стенд находится близко к границе рабочей области. При выполнении первой фазы стенд должен реализовывать такое движение, чтобы угловые ускорения, действующие на человека, и вектор перегрузки, действующий на центр масс человека на стенде, полностью совпадали с реальными, либо, если нет возможности, то чтобы совпадало направление векторов. При реализации второй фазы стенд должен выполнять возврат в центр рабочей области с допороговыми значениями ускорений, но наиболее быстрым образом. В обоих случаях мы имеем задачу о переводе стенда из одного положения в другое при наличии ограничений на развиваемые скорости, ускорения и моменты сил. Данную задачу можно назвать обобщением задачи о брахистохроне.

Была рассмотрена задача динамической имитации на стенде на базе промышленного робота-манипулятора, а также решение одного из обобщений задачи о брахистохроне. Будет представлено решение задачи о движении материальной точки в однородном поле силы тяжести по кривой, расположенной в вертикальной плоскости, при наличии ограничений на кривизну траектории. Необходимо выбрать форму кривой так, чтобы время спуска было минимальным. Решение задачи получено методами оптимального управления, рассмотрены случаи реализации регулярного и особого управления, изучен вопрос их сопряжения, числа переключений между участками регулярного и особого управления.

Заключение

В рамках поставленной задачи проведен анализ вибрационного отклика панели СПС на акустическую нагрузку, создаваемую реактивным двигателем. Для анализа выбрана панель СПС, ближайшая к выходному соплу двигателя. Задано переменное, дискретизированное по площади панели поле нагрузок в виде восстановленных сигналов по наборам спектра и фазы акустической и гидродинамической нагрузок. Расчетная конечно-элементная модель построена с учетом конструктивных и геометрических особенностей панели. Расчет проведен Методом Конечных Элементов (МКЭ). Полученные распределения перемещений и напряжений позволяют судить о высоком уровне динамических напряжений, вызванных акустической нагрузкой.

Рассмотрены этапы алгоритма динамической имитации вектора перегрузки на стенде типа промышленного робота. Найдены области, в которых движение может осуществляться в рамках принятых ограничений на поле ускорений движения чувствительной массы. Решена задача идентификации для нелинейной динамической системы непрерывного времени при наличии выпуклых ограничений на состояние, зависящих от времени. Для указанного класса систем был предложен идентификатор на основе дифференциальных нейросетей, а именно однослойной нейросети с изменяющимися во времени весовыми матрицами. Для получения дифференциальных законов изменения весовых матриц была исследована устойчивость системы в отклонениях методами функций Ляпунова. В рамках проекта было создано решение для отслеживания направления взгляда человека с реализованным фовеальным рендерингом на основе прогнозирования. Была рассмотрена задача динамической имитации на стенде на базе промышленного робота-манипулятора, а также решение одного из обобщений задачи о брахистохроне.