

ТРАНСПОРТ

УДК 004.94 + 629.43

**А. В. Химченко, канд. техн. наук, Н. И. Мищенко, д-р техн. наук,
В. В. Коваленко, П. П. Гладкоскок**

**Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

ПОДХОДЫ К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФИКСИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА

Проведена апробация практического применения для имитационного моделирования в Simulink контактного взаимодействия трехмерных объектов аналитического и дискретного матричного методов построения моделей. Показано, что работа с моделями деталей в виде матриц является перспективной, так как позволяет автоматизировать решение задачи. Достигнуто увеличение скорости моделирования в Simulink за счет применения аппроксимирующей нейронной сети более чем в 106 раз.

Ключевые слова: имитационное моделирование, механизм фиксации штока, упругое взаимодействие деталей, применение Matlab Simulink

Введение

Автомобильная техника сегодня – это сложные технические системы, разработка и отладка которых требует больших финансовых и материальных затрат. Сегодня автомобиль уже не сильно отстает от авиации по сложности конструкции и уровню применяемых технологий. Целый ряд передовых технологий, отработываемых в авиации, находит применение и в автомобильном транспорте.

Именно поэтому интересны цифры, прозвучавшие в докладе Государственного летно-испытательного центра Министерства обороны Российской Федерации им. В. П. Чкалова (ГЛИЦ). На сегодняшний день объем работ при проектировании летательных аппаратов следующий: 5–10 % – математическое моделирование, 10–15 % – полунатурное моделирование, 75–85 % – летные испытания. К 2025 году поставлены цели достичь применения математического моделирования до 15–20 %, полунатурного моделирования – 20–30 %, а на летные испытания оставить 50–65 % [1]. Модельно-ориентированное проектирование позволяет сократить время проектирования и уменьшить финансовые затраты.

Сегодняшние тенденции в авиации – это уже и сегодняшние тенденции в автомобилестроении. Особенно при проектировании беспилотных автомобилей и разработке новых силовых установок.

В Автомобильно-дорожном институте ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» на кафедре «Автомобильный транспорт» ведутся разработки перспективных конструкций двигателей внутреннего сгорания [2]. Существенное внимание уделяется моделированию рабочего процесса и работе отдельных конструктивных элементов. В качестве инструмента, оптимального для условий проведения исследований, принято моделирование в среде Matlab и Simulink.

Достаточно часто в различных конструкциях элементов автомобиля, в том числе двигателей, встречаются фиксирующие механизмы. Это фиксаторы положения рычага коробки переключения передач, фиксаторы штока в бесшатунном двигателе с отключением цилиндров путем останова поршня, фиксаторы отключаемых клапанов газораспределительного механизма или другие подобные механизмы. Моделирование их работы связано с рядом трудностей.

Целью данного исследования был поиск технологии имитационного моделирования в Simulink контактного взаимодействия трехмерных объектов таких, как шток и палец в фиксирующем механизме остановки цилиндра бесшатунного двигателя: нахождение силы взаимодействия, точки ее приложения и направления действия с приемлемой скоростью моделирования для применения в системной модели.

Проблема имитационного моделирования механизма

Описание общих подходов к моделированию механизма отключения цилиндра приведено в [3]. Из особенностей следует отметить, что в процессе работы фиксирующего механизма шток и палец взаимно перемещаются. Шток имеет возможность перемещения вдоль оси Z и поворота относительно этой же оси. Палец, учитывая конструктивные особенности, может перемещаться вдоль оси X штока и поворачиваться относительно всех осей. Контакт деталей может осуществляться по поверхностям с разной геометрией.

Как показывает опыт, физическое твердотельное моделирование в Simulink позволяет достаточно хорошо описать различного рода связи между деталями. Однако для моделирования взаимодействия деталей, которые не находятся в постоянной кинематической связи, специальных стандартных блоков у разработчиков мало. Они описывают контакт лишь простейших геометрических фигур. Имеется дополнительная библиотека Simscape Multibody Contact Forces Library. Но ее специализация не позволяет решать ряд специфических задач. Например, трехмерную задачу фиксации штока цилиндрическим пальцем. Конечно, такие задачи, но в другой постановке, решены в САПР, предназначенных для 3D моделирования, но это или не может быть интегрировано в Simulink, или интеграция существенно затруднена.

В связи с этим были опробованы различные подходы к поиску решения.

Сравнение матричного и аналитического подходов к моделированию

На этапе поиска рационального подхода к моделированию взаимодействия пальца и штока была выполнена попытка найти аналитические решения для определения пересечения поверхностей взаимодействия.

Уравнения, описывающие взаимодействующие поверхности штока и пальца достаточно просты. Это уравнения цилиндров и плоскостей. Наилучшим образом цилиндрические поверхности описываются в цилиндрических координатах, а плоскости – в декартовых. Поэтому так или иначе необходимо перейти к одной из систем координат.

В зоне фиксации пальца, имеются вырезы, выполненные цилиндрами, перпендикулярными оси пальца. Совместное решение уравнений, описывающих основной цилиндр штока и вырезающий цилиндр, дают уравнения ребер, образованных пересечением поверхностей:

$$x = \pm \frac{D_{шт}^2 \pm 2D_{шт} \sqrt{-(R_{пал} + Z_{пал} + z)(Z_{пал} - R_{пал} + z)}}{2D_{шт}}; \quad (1)$$

$$y = \pm \sqrt{\frac{2Z_{пал}z - R_{пал}^2 + Z_{пал}^2 \pm \pm D_{шт} \sqrt{(R_{пал} + Z_{пал} + z)(R_{пал} - Z_{пал} - z)} + z^2}}{2}}; \quad (2)$$

где x , y и z – координаты;

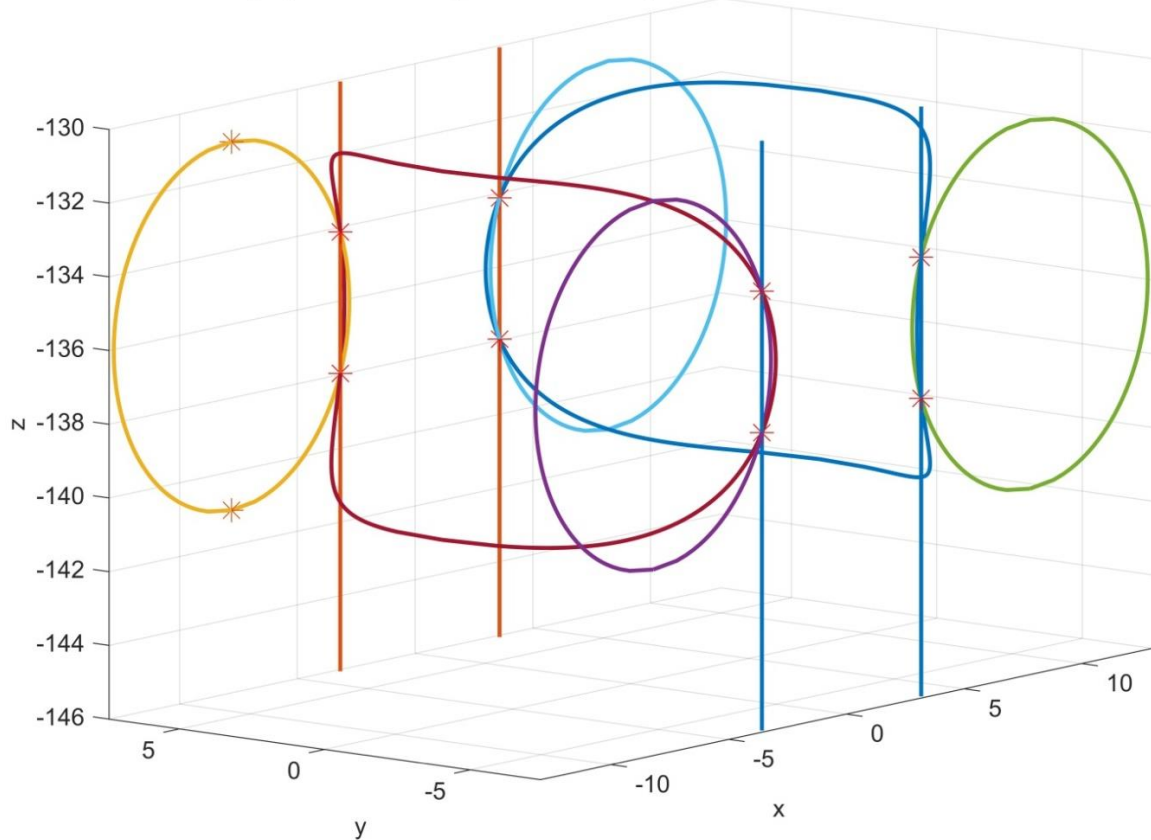
$D_{шт}$ – диаметр цилиндра штока;

$R_{пал}$, $Z_{пал}$ – радиус и координата центра цилиндрического выреза под палец.

В зависимости от сочетания знаков «плюс» и «минус» получаем четыре уравнения, описывающих линии пересечения в четырех октантах. Аналогичные уравнения можно получить для других четырех октант.

Это пересечение только двух поверхностей, описывающих шток. Всего поверхностей пять. Но уже на этом этапе очевидно, что решением, позволяющим найти зону пересечения, будет достаточно сложная система уравнений – набор заданных кусочно-аналитических функций. В случае описания поверхности штока заранее могут быть найдены точки пересечения ребер (рисунок 1), а следовательно, и определена система уравнений. Но оперировать такими уравнениями достаточно сложно.

Графики линий пересечения поверхностей в нижней части штока



Ребра в нижней части штока

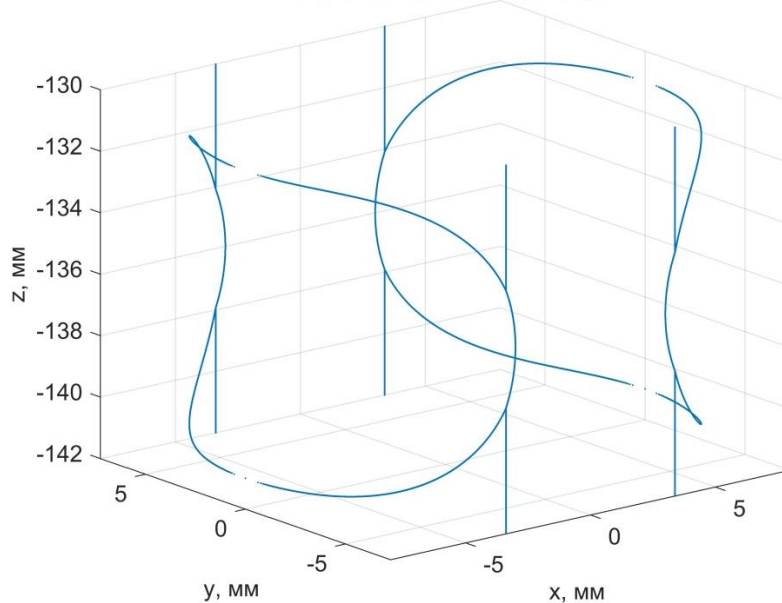


Рисунок 1 – Линии и точки пересечения поверхностей, описывающих цилиндр штока и вырезанный полуцилиндр под палец в зоне фиксации пальца

Кроме того, в зависимости от текущего перемещения пальца и угла поворота штока необходимо искать новые уравнения, описывающие дополнительные пересечения. Это усложняет процесс автоматизации вычислений и решения данной задачи, который является необходимым условием для имитационного моделирования.

В связи с этим было принято решение использовать матричный подход. Для этого изначально были созданы модели штока и пальца, которые представляют собой трехмерные матрицы координат в полярных и декартовых системах.

Графики этих матриц отображают поверхности деталей, взаимодействие между которыми возможно в процессе моделирования. В качестве примера на рисунке 2 показана поверхность штока, описанная в виде матрицы.

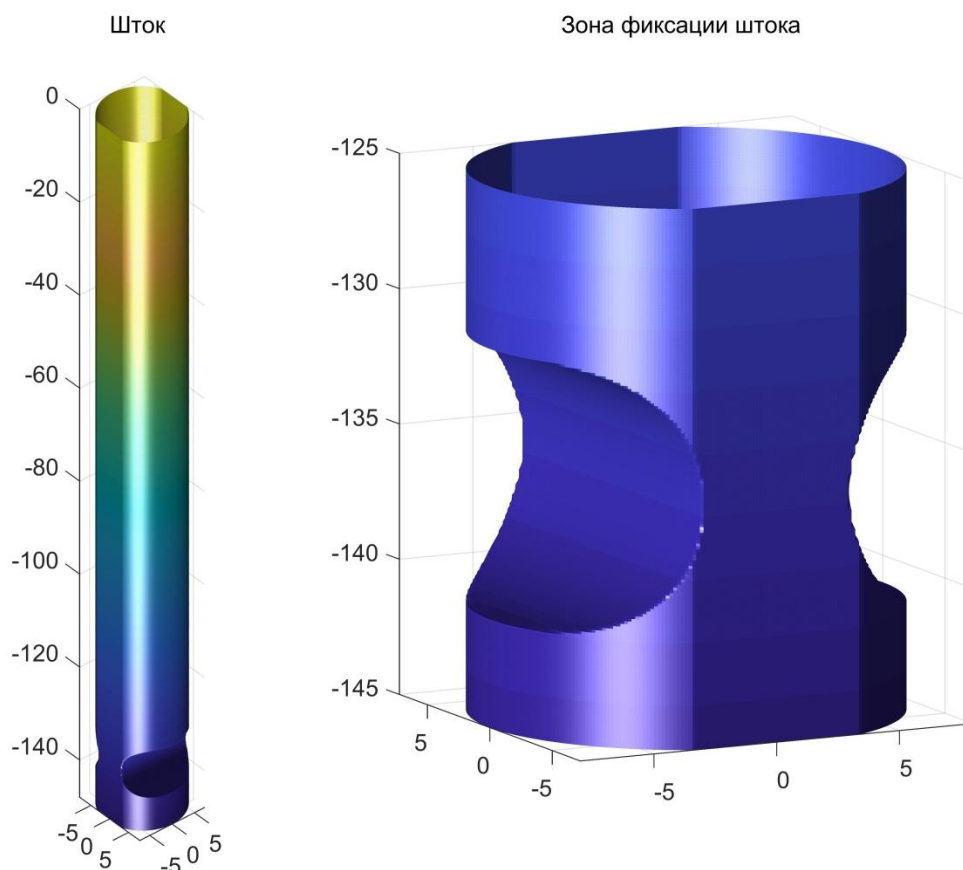


Рисунок 2 – Поверхности штока, описанные в виде матрицы

Модели взаимодействующих деталей готовятся один раз и могут иметь различный размер, в зависимости от требований к ним. Размер может быть определен в зависимости от:

- требований к точности моделирования;
- требований ко времени моделирования;
- располагаемыми вычислительными ресурсами: объемом оперативной памяти, возможностью объединения компьютеров в вычислительный пул.

Сравнение положения точек взаимодействующих деталей относительно оси штока позволяет достаточно легко и точно определить наличие и зону этого взаимодействия.

Кроме того, аналитически несложно осуществляется поворот деталей и их перемещение. Поворот, например, выполняется с помощью матричных операций умножением модели на матрицу поворота.

Матричный подход позволяет получить модели поверхностей в заданный момент времени. Фактически аналитическая геометрия позволяет описать положение точки поверх-

ности с помощью поворота локальной системы координат и перемещение центра координат заданной детали в новую точку пространства.

Указанные преимущества определили выбор матричного подхода к моделированию. В дальнейшем работа велась с матричными моделями взаимодействующих деталей.

Поиск взаимного положения и пересечения поверхностей пальца и штока

Задача поиска взаимного положения пальца и штока фактически является задачей преобразования координат точек поверхности деталей в динамике.

При имитационном моделировании в Simulink блоки измерений позволяют получить данные о повороте системы координат и перемещении интересующих точек. Таким образом, задача сводится к определению новых координат поверхности детали с учетом поворота и перемещения локальной системы координат.

Разберем математическую модель и технологию получения матрицы, описывающей положение поверхностей деталей в конкретный момент времени. В качестве исходных данных рассматриваем известные координаты начала локальной системы координат пальца и углы ее поворота относительно соответствующих координатных осей.

Поворот локальной системы координат и, соответственно, поворот точек может быть описан с помощью матрицы поворота в трехмерном пространстве [4, 5]. Любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных осей, например вокруг осей Декартовых координат. Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота на угол α в трехмерном Декартовом пространстве с неподвижной системой координат [6]:

$$M_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, M_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, M_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

С помощью преобразования координат были получены текущие значения точек в матрицах поверхности штока $A_{шт}$ и поверхности пальца $A_{п}$:

$$A_{шт} = A_{шт0} \times M_x(\alpha_x) \times M_y(\alpha_y) \times M_z(\alpha_z); \quad (4)$$

$$A_{п} = A_{п0} \times M_x(\alpha_x) \times M_y(\alpha_y) \times M_z(\alpha_z), \quad (5)$$

где $A_{шт0}$, $A_{п0}$ – матрицы поверхностей штока и пальца в локальных системах координат.

В дальнейшем выполнялись следующие действия. Модели деталей для удобства анализа и преобразования зоны пересечения были переведены в полярные координаты. Учитывая то, что зона пересечения не может быть вне наибольшего диаметра штока, из матрицы, описывающей поверхность пальца, были отброшены точки, имеющие длину радиус-вектора больше, чем диаметр штока.

Модель штока также была ограничена по высоте так, чтобы все точки лежали между соответствующими координатами пальца.

Последовательными проверками максимальных и минимальных значений координат z , ρ и φ была достигнута минимизация размеров матриц.

Далее проводилось сравнение координат точек и были оставлены только те части матриц, которые соответствуют условию пересечения поверхностей:

$$\begin{cases} z_{п} = z_{шт}; \\ \varphi_{п} = \varphi_{шт}; \\ \rho_{п} \leq \rho_{шт}, \end{cases} \quad (6)$$

где индексами «п» и «шт» обозначены соответствующие координаты пальца и штока в полярной системе координат.

Определение силы взаимодействия пальца и штока

При взаимодействии двух твердых поверхностей в зоне соприкосновения возникают, как правило, силы трения и упругости. Силы упругости направлены перпендикулярно опорной поверхности, а силы трения по касательной в точке соприкосновения.

На основании информации о координатах поверхностей возможно определение зоны пересечения поверхностей, то есть деформации. Знания об упругих деформациях могут позволить получить значение силы, действующей при взаимодействии пальца и штока.

Для моделирования поверхностного взаимодействия пальца и штока необходимо определить: точку взаимодействия – точку приложения равнодействующей сил упругой деформации деталей; величину силы и ее направление. При наличии нормальной составляющей силы взаимодействия найти силу трения не будет представлять сложности. Для определения силы упругости, как правило, используется закон Гука ($E = \sigma/\epsilon$), описывающий взаимосвязь между относительной линейной деформацией ϵ и напряжением σ .

Применение метода конечных элементов, несмотря на его широкие возможности вплоть до оптимизации топологии детали из условия равнопрочности отдельных элементов [7], при имитационном моделировании сложной технической системы пока нецелесообразно, так как существенно увеличивает время вычислений. Это при имитационном моделировании работы двигателя становится неприемлемо.

Процесс моделирования взаимодействия деталей является дискретным. Это означает, что не всегда удастся определить момент соприкосновения деталей. Наиболее вероятно, что в процессе имитации система определит положение деталей до соприкосновения, а в следующий момент модельного времени, с учетом динамики взаимодействующих деталей и шага времени моделирования, их поверхности пересекутся. В этот момент необходимо определить возможную глубину деформации и возникшую при этом силу упругости. Даже в случае определения момента соприкосновения сила в этот момент не действует и поверхности начнут пересекаться на следующем шаге.

С одной стороны, деформации деталей нельзя считать абсолютно линейными, так как происходит их объемная деформация. С другой стороны, закон Гука дает достаточную точность при инженерных расчетах и работает не только при линейных перемещениях, но и при наличии касательных напряжений. Это прекрасно иллюстрирует применимость закона Гука к цилиндрическим пружинам.

Учитывая вышесказанное, задачу определения силы упругого взаимодействия можно свести к задаче определения зависимости линейной относительной деформации ϵ деталей и определения площади поверхности соприкосновения S при деформации. То есть равнодействующая сила из закона Гука

$$F = \oint \sigma dS = E \oint \epsilon dS . \quad (7)$$

В сравнении с методом конечных элементов описанный подход, очевидно, будет менее точным и приведет к некоторым погрешностям, но позволит гораздо точнее определить силу и направление взаимодействия в сравнении с плоским рассмотрением задачи.

С некоторой допустимой погрешностью можно считать направлением действия равнодействующей силы упругости направление из точки приложения перпендикулярно оси пальца, так как реальное соприкосновение не приводит к существенной деформации, а нормальная сила действует перпендикулярно опорной поверхности.

Таким образом, направление действия силы упругости может быть легко найдено после определения точки приложения силы.

Учитывая физическое понятие центра тяжести (центра масс), равнодействующая сила будет приложена в центре масс площади средней поверхности деформации, для которой относительная деформация выполняет роль плотности силы.

Наличие декартовых координат точек средней поверхности деформации позволяет определить ее центр масс исходя из общего выражения

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}, \quad (8)$$

где \vec{r}_c – радиус-вектор центра масс;

\vec{r}_i – радиус-вектор i -й точки системы;

m_i – масса i -й точки.

Закон Гука в дискретной форме дает возможность определить взаимосвязь равнодействующей силы упругости и ее элементарных составляющих

$$F_i = E \varepsilon_i S_i \Rightarrow F = \sum_i F_i = E \sum_i \varepsilon_i S_i. \quad (9)$$

Таким образом, исходя из моментов сил относительно начала координат, получаем, аналогично нахождению центра масс, значение радиус-вектора, направленного к точке приложения равнодействующей силы:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i F_i \vec{r}_i}{F} = \frac{\sum_i \varepsilon_i S_i \vec{r}_i}{\sum_i \varepsilon_i S_i}. \quad (10)$$

Здесь $\varepsilon_i S_i$ представляет собой массу m_i каждой i -й точки поверхности.

Задача поиска направления действия равнодействующей силы решается, как поиск пересечения прямых в пространстве при наличии известных точек и направляющих векторов. Ее постановка в общем виде достаточно известна. Особенностью программного обеспечения Matlab является возможность постановки задачи в общем виде и получение численного результата. Это и использовалось при моделировании.

В результате реализации данного подхода были получены функции и скрипты Matlab, позволяющие определять:

- зону пересечения деталей;
- точки, принадлежащие средней поверхности деформации (рисунок 3);
- точку приложения и направление действия равнодействующей силы;
- величину равнодействующей силы.

Реализация имитационной модели и оценка скорости моделирования

При написании скриптов Matlab и выборе функций, применяемых при решении задачи, особое внимание уделялось скорости поиска результатов. В связи с этим некоторые функции были отброшены, а поиск решения выполнялся по более сложным, но быстрым алгоритмам. Simulink позволяет включать в модели блоки, представляющие собой функции Matlab, или написанные подпрограммы на C, так называемые S функции. Программа в виде скрипта Matlab для поиска силы взаимодействия может быть реализована в Simulink в виде S функции второго уровня. Для оценки возможности применения такого решения был создан блок в Simulink, на котором реализована простейшая модель. Она применялась для оценки времени имитационного моделирования.

Точки поверхностей, лежащие в зоне пересечения деталей

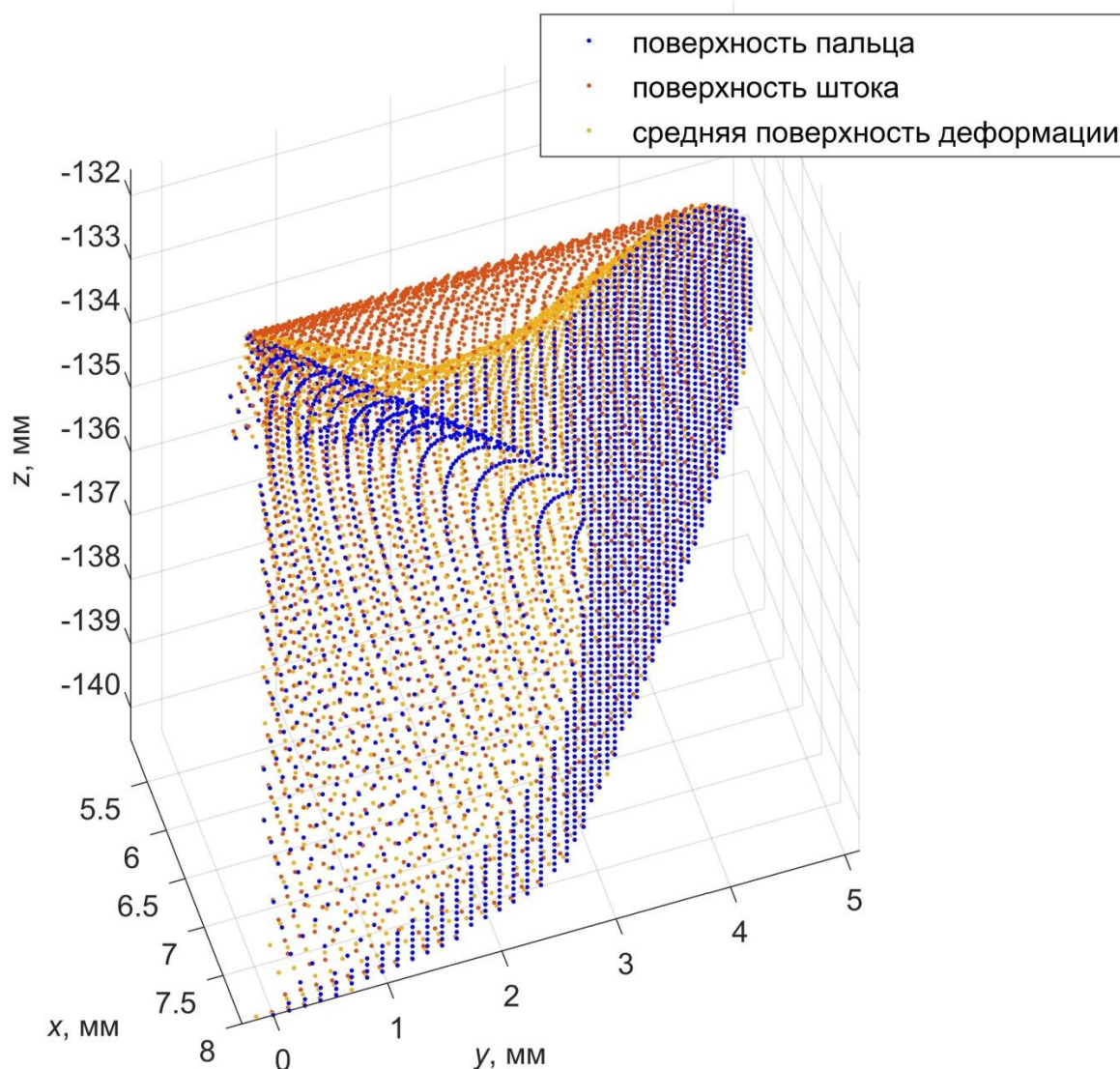


Рисунок 3 – Зона деформации и поверхности при взаимодействии деталей

Следует отметить, что время имитационного моделирования является критичным. Встраивание в сложную системную модель не должно приводить к существенной задержке в ее работе. Тестирование модели на разных исходных данных показало следующие результаты:

- 1) время поиска результата существенно зависит от исходных данных;
- 2) максимальное время работы скрипта составляло 17 секунд;
- 3) время работы модели с S функцией второго уровня увеличилось более чем в 2 раза и составило около 40 секунд.

Такой результат нельзя было считать удовлетворительным. Так как при моделировании шаги модельного времени могут быть достаточно малы и в отдельных случаях составляют сотые доли секунды. Такое время расчета одной точки может привести к увеличению времени моделирования в 1000 раз.

Опираясь на опыт работы с нейронными сетями, было принято решение проверить возможность обучения нейронной сети и тестирования на модели с аппроксимирующей нейронной сетью. Подготовка данных для нейронной сети позволила отладить работу алгоритма в некоторых частных случаях. Однако она заняла существенное время. Также достаточно большое время занимает обучение нейронной сети. Но в целом это компенсируется

повышением производительности. Так, модель нейронной сети из 200 нейронов затратила всего 13 секунд на расчет 10 000 000 точек модельного времени, то есть на один расчет затрачено 1,3 мкс. При этом очевидно существенное увеличение скорости моделирования с помощью нейронной сети, как двойника более сложной и медленной модели. Это увеличение может достигать 10^6 раз и более.

В данном конкретном случае выбор был сделан в пользу предварительной подготовки данных и обучения нейронной сети.

Заключение

В результате проведенной работы была отлажена технология создания модели для имитации трехмерного контактного упругого взаимодействия отдельных деталей механизмов, которые не находятся в постоянном контактом взаимодействии.

В основу моделирования положено получение 3D моделей в виде трехмерной матрицы, состоящей из точек, описывающих взаимодействующие поверхности, и определение пересечения этих поверхностей в динамике. Показано, что полученные скрипты для определения силы взаимодействия и точки ее приложения могут быть реализованы в виде S функции и встроены в имитационную модель Simulink, построенную в Simscape Multibody.

На основе результатов расчетов может быть обучена нейронная сеть. Применение нейронной сети существенно снижает время имитационного моделирования.

Работа является частью работ, направленных на исследование и разработку нового нетрадиционного двигателя для легкового автомобиля. Полученные результаты позволяют решить ряд проблем с построением имитационных моделей механизмов, применяемых в автомобилях, двигателях и других агрегатах, а также их систем управления.

Список литературы

1. Зимин, В. М. Речь на открытии конференции / В. М. Зимин. – Текст : электронный // Международная научно-практическая конференция «Технология разработки и отладки сложных технических систем». – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 27–28.03.2019. – URL: <https://youtu.be/KRbffaamIM>.
2. Новый бесшатунный двигатель для автомобиля / Н. И. Мищенко, А. В. Химченко, Ю. В. Юрченко [и др.]. – Текст : электронный // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : материалы международной научно-технической конференции, 31 января 2019 г. – Москва : МАДИ, 2019. – С. 383–396. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37540779_49514748.pdf.
3. Химченко, А. В. Имитационное моделирование работы механизма отключения цилиндра в двигателе с кривошипно-кулисным механизмом / А. В. Химченко, И. И. Мищенко. – Текст : электронный // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : материалы международной научно-технической конференции, 31 января 2019 г. – Москва : МАДИ, 2019. – С. 410–422. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37540777_61835915.pdf.
4. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / Г. Корн, Т. Корн ; [перевод И. Г. Арамановича и др.]. – 6-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 832 с. – ISBN 5-8114-0485-9.
5. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – 10-е изд., стер. – Москва : Наука, 1973. – 872 с.
6. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – Москва : ГИФМЛ, 1961. – 825 с.
7. Чирский, С. П. Результаты проверки адекватности метода топологической оптимизации деталей поршневых двигателей / С. П. Чирский, Л. Л. Мягков. – Текст : электронный // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : материалы международной научно-технической конференции, 31 января 2019 г. – Москва : МАДИ, 2019. – С. 445–454. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37540783_67253549.pdf.

А. В. Химченко, Н. И. Мищенко, В. В. Коваленко, П. П. Гладкоскок
Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка
Подходы к имитационному моделированию взаимодействия элементов
фиксирующего механизма

Проведена апробация практического применения для имитационного моделирования в Simulink контактного взаимодействия трехмерных объектов аналитического и дискретного матричного методов построения моделей. Определены подходы и зависимости для определения упругой силы взаимодействия поверхностей и нахождения ее точек приложения и направления. Показано, что работа с моделями деталей в виде матриц является перспективной, так как позволяет автоматизировать решение задачи. Для сокращения времени имитационного моделирования сложных технических систем перспективным является применение аппроксимирующей нейронной сети, как двойника более сложной и медленной модели. Показано, что увеличение скорости моделирования в Simulink может достигать 10⁶ раз и более. Полученные результаты будут использованы для построения имитационных моделей механизмов, применяемых в автомобилях, двигателях и других агрегатах, а также в их системах управления.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕХАНИЗМ ФИКСАЦИИ ШТОКА, УПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕТАЛЕЙ, ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB SIMULINK

A. V. Khimchenko, N. I. Mishchenko, V. V. Kovalenko, P. P. Gladkoskok
Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Approaches to Simulation Modelling of Elements Interaction of the Fixing Mechanism

In Simulink the testing of the practical application for simulation modelling of contact interaction of three-dimensional objects of analytical and discrete matrix methods to construct models is carried out. The approaches and dependencies to determine the elastic force of surface interaction and find its points of application and direction are determined. It is shown that work with part models in the form of matrices is a perspective one, since it allows you to automate the solution of the problem. It is perspective to use an approximating neural network as a twin of more complex and slow model to reduce the simulation modelling time of complex technical systems. It is shown that the increase in simulation speed in Simulink can reach 10⁶ times or more. The results obtained will be used to build simulation models of mechanisms applied in automobiles, engines and other units, as well as in their control systems.

SIMULATION MODELLING, ROD FIXING MECHANISM, ELASTIC INTERACTION OF PARTS, MATLAB SIMULINK APPLICATION

Сведения об авторах:

А. В. Химченко

SPIN-код: 4568-1757
 Телефон: +38 (0624) 55-24-06
 Эл. почта: hiav@adidonntu.ru

Н. И. Мищенко

SPIN-код: 6604-8459
 Телефон: +38 (0624) 55-05-05

В. В. Коваленко

Эл. почта: hiav@adidonntu.ru

П. П. Гладкоскок

Эл. почта: hiav@adidonntu.ru

Статья поступила 24.03.2020

© А. В. Химченко, Н. И. Мищенко, В. В. Коваленко, П. П. Гладкоскок, 2020
 Рецензент: В. Л. Николаенко, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»