

# Моделирование динамики многомассовых систем в SIMULIA Simpack

Сергей Тропкин

**В статье рассматривается программный комплекс для моделирования задач динамики многомассовых многотельных систем SIMULIA Simpack. Приводится описание истории развития программного комплекса, области применения и назначения задач динамики многомассовых систем. Описываются основные компоненты программного комплекса, специализированные компоненты для моделирования задач автомобилестроения, железнодорожного транспорта, двигателестроения и др. Рассказываются о возможностях применения программного комплекса с другими продуктами SIMULIA.**

## Введение

Задачи динамики многомассовых и многотельных систем являются одним из классических направлений в области прикладной механики.

Начиная с 2018 года компания Dassault Systemes предлагает своим пользователям универсальный программный комплекс

шими мировыми производителями технических систем. В автомобильном секторе такими пользователями являются Jaguar-LandRover, Daimler, BMW, Honda и др. В отрасли железнодорожной техники — Siemens, Alstom и пр.

Как и все продукты бренда SIMULIA, программный ком-

чил широкое распространение в автомобильной отрасли, а к 2003 году стал стандартным средством для моделирования рельсового транспорта. С 2005 года в Simpack стал доступен широкий функционал для моделирования двигателей и ветряных турбин. В 2011 году был представлен новый графический интерфейс. В 2014-м компания была приобретена Dassault Systemes.

Средства анализа в Simpack в первую очередь предназначены для исследования динамических характеристик механических и мехатронных систем. Использование высокопроизводительного решателя уравнений движения позволяет осуществлять моделирование перемещений и нагрузок в механизмах в реальном масштабе времени. Это дает возможность значительно ускорить разработку сложных технических систем.

При моделировании динамики многомассовых систем MBS (Multibody Simulation) применяется более высокий уровень абстракции по сравнению с методом конечных элементов (МКЭ), что позволяет исследовать концепцию всей системы и оценить ее динамический отклик в линейной, нелинейной и частотной постановках. Затем особенности поведения могут быть сохранены и переданы в качестве входных данных в МКЭ-анализ для использования в качестве динамических нагрузок, что обеспечит понимание функционирования системы в более детализированном виде.

Моделирование динамики многомассовых систем используется для предсказания и оптимизации движения, а также на-



Сергей Тропкин, к.т.н., эксперт по продуктам SIMULIA компании ТЕСИС.

В 2007 году окончил «МАТИ» РГТУ им. К.Э. Циолковского по специальности «Динамика и прочность машин». В 2014-м защитил диссертацию в Уфимском государственном нефтяном техническом университете

гружения механических систем. Тела могут быть недеформируемыми и деформируемыми.

Механические устройства представляются в виде дискретных тел, соединенных посредством связей и «силовых» элементов. Подобное упрощение позволяет эффективно моделировать динамическое поведение систем и затрачивать небольшое количество времени на вычисления.

Метод MBS наиболее подходит для анализа механизмов, части которых претерпевают большие перемещения и повороты. Нелинейности (то есть перемещения и силы) имеют большое влияние на резонансные частоты. С помощью MBS возможно производить анализ собственных форм и частот системы и оценивать резонансные частоты, при которых возникают максимальные перемещения и нагрузки.

Также в модель для анализа в диапазоне высоких частот, где использование твердотельной



моделирования динамики многомассовых систем Simpack, входящий в линейку продуктов для численного моделирования SIMULIA.

Программный комплекс Simpack представляет собой распространенный инструмент моделирования и применяется в различных отраслях крупней-

плекс Simpack имеет богатую историю технического развития для удовлетворения нужд пользователей. Simpack появился в 1987 году как первый код для анализа динамики многомассовых систем, по умолчанию включающий в решатель возможность моделирования деформируемых тел. Он полу-

идеализации не всегда корректно, можно легко включать деформируемые тела, которые могут быть как созданы непосредственно в Simpack с помощью балочных элементов, так и импортированы из конечно-элементных расчетных комплексов.

## Основные возможности и компоненты Simpack

Программный комплекс Simpack состоит из трех основных модулей и группы дополнительного подключаемого функционала, характерного для решения специфических задач различных отраслей промышленности.

К основным модулям относятся препроцессор Simpack Pre, постпроцессор Simpack Post и решатель уравнений движения Simpack Solve.

К дополнительному функционалу относятся такие модули, как Engine — моделирование двигателей (цепи, ремни, шестерни привода, карданный и распределительные валы), Automotive — моделирование автомобильного транспорта (движение, управляемость, NVH в процессе движения, коробки передач), Rail — моделирование рельсового транспорта (комфорт, износ рельса, взаимодействие с конструкцией пути), Wind — моделирование компонентов ветряных турбин. Помимо этого, доступны такие модули, как Drivetrain, Flexible Body, Bearing, BioMotion, Dynamic Bushing, DOE, Contact, Control и NVH.

Кроме того, Simpack с помощью модуля User позволяет создавать пользовательские элементы и подпрограммы для решателя, компоненты для графического интерфейса, а также организовывать передачу данных с другими программными комплексами.

### Simpack Pre

Simpack Pre представляет собой современный интуитивно понятный графический интерфейс на основе меню, иконок и дерева модели. Работа с моделью возможна в режиме как 3D, так и 2D, позволяющим в виде схемы видеть связь между компонентами системы. Simpack Pre предоставляет доступ к обширной библиотеке элементов для моделирования и интерактивного построения моделей. Поддерживается импорт трехмерных моделей из CAD- и CAE-систем.

### Simpack Post

Simpack Post позволяет изучать и осмысливать результаты моделирования, которые

можно визуализировать в трехмерной анимированной форме, в том числе для переменных, а также в виде графиков. В постпроцессоре возможно одновременно работать с несколькими моделями, проводить математические операции над полученными данными, использовать встроенные фильтры, автоматически создавать отчеты, импортировать и экспортировать данные.

### Simpack Wizard

Одним из отличительных компонентов препроцессора Simpack Pre является модуль Simpack Wizard, с возможностями легко создавать и настраивать стандартизованные модели и процессы анализа для «режима развертывания», позволяющего специалистам выполнять специфические для компании стандартные типы анализа и легко исследовать результаты. Данный функционал основан на стандартной базе данных моделей Simpack либо на базе данных, созданной непосредственно пользователем.

## Специализированные модули Simpack

Программный комплекс Simpack включает модули, предоставляющие доступ к функционалу, специализированному для различных отраслей промышленности.

### Simpack Automotive

Данный модуль создан для предоставления доступа к инструментам, позволяющим удовлетворять специфические требования моделирования в автомобильном секторе. Модуль Automotive возможно применять для анализа

## О компании ТЕСИС

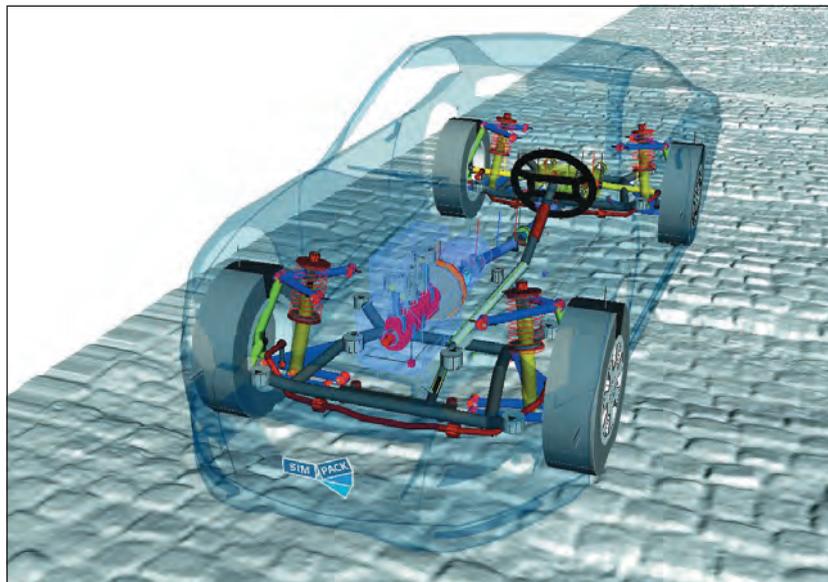
Инжиниринговая компания ТЕСИС — один из ведущих российских разработчиков и поставщиков инженерных решений для промышленных предприятий. Компания создана в 1994 году. Компания ТЕСИС является официальным дистрибьютором программных продуктов семейства SIMULIA на территории России, Белоруссии, Казахстана и Украины.

Компания обладает штатом высококвалифицированных специалистов, прошедших обучение по работе и поддержке программного комплекса Simpack и предоставляет полный спектр сопутствующих услуг, таких как внедрение, консалтинг и техническая поддержка пользователей.

пассажирских автомобилей и автобусов, грузовых автомобилей, гоночных автомобилей (Formula 1, Formula Student), наземной тяжелой техники, персональных транспортных средств (мотоциклов). Моделирование возможно как на уровне компонентов, так и на уровне анализа всей системы.

Модуль предназначен для моделирования управляемости транспортного средства, вибронгруженности, комфортности и анализа возникающих шумов (NVH). Также модуль позволяет реализовать совместно Simpack Realtime модели типа Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL) и Model-in-the-Loop (MiL).

Simpack Automotive позволяет создавать модели динамического поведения дорожных машин и включает встроенные модели дорожных покрытий и прочих возбудителей.



В модуле доступен функционал «управляющих элементов» для моделирования поведения водителя.

Главной особенностью модуля является наличие параметризованных подконструкций различных компонентов автомобиля (подвесок, рулевых реек, коробок передач и др.).

В модуле доступен набор моделей шин, таких как «Волшебная формула Пасейки», HSRI, TMeasy, а также интерфейсы для специализированных программ моделирования шин, таких как MF-Tyre, MF-SWIFT, CDTire и FTire/core.

### Simpack Drivetrain

Simpack Drivetrain позволяет производить трехмерный динамический анализ трансмиссий для определения резонансных частот, стохастического и переходного откликов, а также исследовать причины шумов в трансмиссии, в частности свиста и треска в зубчатых зацеплениях шестерен. Simpact имеет мощный функционал для моделирования зубчатых передач, в том числе при высокочастотных воздействиях, различные модели подшипников, а кроме того, позволяет включать в анализ деформируемые тела как в линейной, так и в нелинейной постановке.

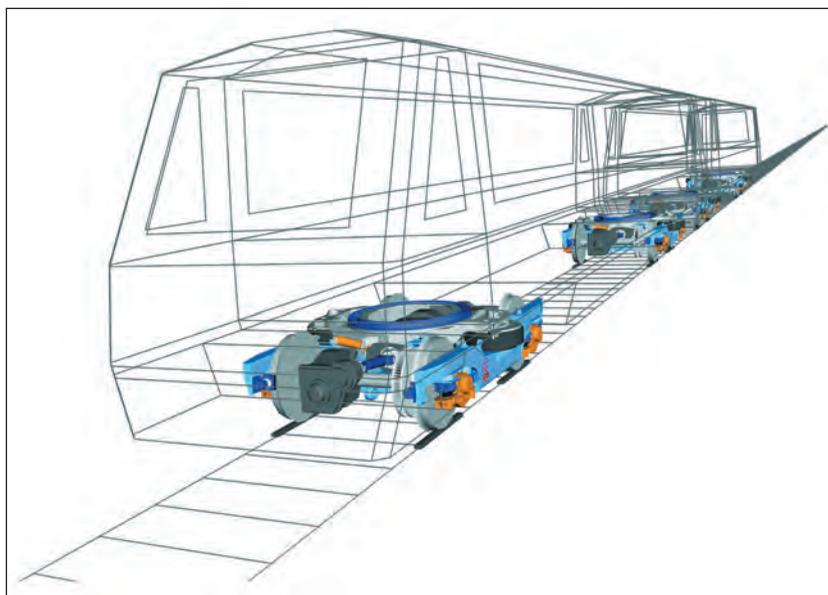
### Simpack Engine

Данный модуль предназначен для полного анализа динамики двигателя и включает множество инструментов, в том числе инструменты моделирования динамики механизмов газораспределения, коленвала, опережения зажигания, системы привода агрегатов (цепной, ременной), поршневой группы и модели гидродинамических подшипников.

При моделировании возможно учитывать потери мощности от локального трения. Также возможно производить анализ типа NVH с помощью деформируемых тел в качестве подконструкций.

### Simpack Rail

Simpack Rail имеет долгую историю применения при проектировании рельсового транспорта и считается одним из промышленных стандартов. С помощью данного модуля можно моделировать рельсовый транспорт множества классов — от трамваев до высокоскоростных поездов, систем транспортировки материалов и аттракционов типа американских горок. Возможно выполнение



моделирования сил, действующих на колеса и рельсы, сход с рельса, износ профиля колеса, производить оценку пассажирского комфорта. Средства позволяют легко моделировать составы из множества вагонов, а также точно оценивать взаимодействие колеса с рельсом.

К основным особенностям модуля можно отнести возможность моделирования пути — как жесткого, так и упругого, и его нарушений (с помощью модуля FlexTrack), наличие базы данных типовых профилей рельсов и колес, с возможностью импорта профилей из натурных измерений и нормативных документов; различные профили рельса, которые изменяют свою форму в процессе моделирования и позволяют моделировать стрелки и переезды с учетом износа профиля рельса; элементы для легкого моделирования колесных пар, осей либо непосредственно колес, овализации колес, изменения коэффициентов трения при смазке, динамика трансмиссии и тормозных систем; точные, реалистичные и быстрые стандартные методы контактного анализа колеса с рельсом, позволяющие моделировать как соударения, так и подъем колеса при сходе с рельса; специальные элементы для моделирования подвесок.

### Simpack Wind

Данный модуль применяется для всестороннего моделирования динамического поведения ветряных турбин с учетом резонансных явлений, а также моделирования экстремальных событий, таких как резкий

порыв ветра, падение электрического напряжения, удары и аварийная остановка. Для моделирования доступны элементы типа карданных узлов, детальные модели шестерней, а также гибкие валы.

### Simpack Realtime

Данный модуль позволяет быстро, точно и достоверно в реальном времени моделировать динамическое поведение целых систем с учетом деформируемых тел и детализованного поведения «силовых» элементов.

Решатель Simpact поддерживает параллельные вычисления, что позволяет использовать детальные модели автомобилей, имеющие несколько сотен степеней свободы. Параметры модели Simpact можно менять непосредственно в реальном времени.

Данный модуль позволяет реализовывать модели типа Driver-in-the-Loop (DiL) и Hardware-in-the-loop (HiL).

### Междисциплинарные задачи в Simpact

Поведение компонентов системы может отличаться в зависимости от окружающих условий. Поэтому для точного определения нагрузок, действующих на систему, важно моделировать систему целиком. Часто подобное моделирование включает не только механические компоненты.

Аэродинамика, гидродинамика, деформируемые тела, силовая электроника, системы управления — всё это следует учитывать при моделировании систем. При этом необходимо иметь возможность управлять

уровнем точности для каждого вида расчетов, чтобы более подробно анализировать специфические аспекты поведения систем.

Для построения подобных моделей требуется целое портфолио программного обеспечения.

Программный комплекс Simpack хорошо подходит для объединения различного программного обеспечения в единую модель. После создания модели поведения системы и ее анализа появляется возможность выполнять расчеты типа DoE и производить параметрическую оптимизацию, чтобы улучшить свойства спроектированной системы. Высокоскоростной решатель позволяет проводить подобные исследования очень быстро: множество запусков решателя для оптимизационных задач не требует много расчетного времени.

В рамках бренда SIMULIA доступен целый ряд инструментов, которые совместно с Simpack позволяют решать данные задачи. Simpack интегрирован с другими продуктами брендов SIMULIA и CATIA, что позволяет как выполнять частные задачи междисциплинарных расчетов, так и моделировать поведение всей системы в совокупности.

### Связь Simpack и Abaqus

Simpack позволяет осуществлять совместное моделирование с универсальным конечно-элементным комплексом Abaqus Unified FEA. Существует два метода проведения совместных расчетов.

Первый метод заключается в модальном редуцировании МКЭ-модели для импорта в Simpack, который позволяет производить моделирование малых отклонений деформируемых тел, а также выводить данные о напряжениях непосредственно в Simpack Post.

Второй метод подразумевает совместное моделирование между Simpack и Abaqus и позволяет оценивать большие деформации в теле, пластические деформации, а также учитывать нелинейное поведение материала.

### Связь Simpack и Isight

Возможно управление Simpack с помощью программного комплекса Isight. Данный комплекс работает как «программный робот», позволяя автоматизировать передачу данных между различными программными комплексами, сохранять в качестве шаблонов для последующего использования созданные цепочки и производить оценку пространства решения, исследовать стоха-

стические процессы, выполнять операции параметрической оптимизации с помощью набора высокоэффективных алгоритмов, а также эффективно обрабатывать полученную информацию.

### Связь Simpack и Tosca

Возможно выполнение топологической оптимизации геометрической модели конструкции с помощью программного комплекса Tosca. Решение строится по следующему сценарию: в Simpack импортируется деформируемое тело, производится анализ его поведения. Затем вычисленные нагрузки передаются в Tosca для выполнения топологической оптимизации. Геометрическая модель с измененными инерционными характеристиками передается обратно в Simpack.

### Связь Simpack и fe-safe

Возможно выполнение расчетов совместно с программным комплексом по оценке усталостной прочности fe-safe. Simpack используется для вычисления нагрузок на компоненты системы и учета историй нагружения конструкции.

### Связь Simpack и CATIA

Импорт трехмерных CAD-моделей CATIA позволяет получать массовые и инерционные характеристики деталей. Также CAD-модели

используются для визуализации контактных поверхностей.

### Связь Simpack и CATIA Systems (Dymola)

Связь между Simpack и Dymola позволяет моделировать мехатронные системы, генераторы, силовую электронику и системы управления.

### Заклучение

Таким образом, SIMULIA Simpack является мощным современным программным комплексом для моделирования динамического поведения сложных систем, позволяющим учитывать множество аспектов их поведения, в том числе за счет возможности работы с другими программами численного моделирования.

Использование моделирования динамического поведения многотельных и многомассовых систем позволяет избежать критических ошибок уже на ранних этапах концептуального проектирования и таким образом снизить стоимость разработки изделий и уменьшить число создаваемых физических прототипов. Возможности эффективного проведения оптимизации за счет высокой скорости выполнения расчетов позволяют повышать эффективность и конкурентоспособность создаваемых конструкций. ➤

**ТЕСИС**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
– В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

- 3D TransVidia** – трансляция и проверка качества 3D моделей
- SIMULIA Abaqus** – прочность
- FlowVision** – гидродинамика
- DEFORM** – обработка металлов давлением
- AutoForm** – листовая штамповка

[www.thesis.com.ru](http://www.thesis.com.ru)   [www.flowvision.ru](http://www.flowvision.ru)  
Тел/Факс: (495) 612 – 4422, 612 – 4262  
E-mail: [info@thesis.com.ru](mailto:info@thesis.com.ru)