

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ SIMULATIONX ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

А.А.ДЖОМАРТОВ, С.У.ДЖОЛДАСБЕКОВ

*E.mail.* [ksucta@elcat.kg](mailto:ksucta@elcat.kg)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ SIMULATIONX ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

*Иште SimulationX программалык комплексин кыскача баяндап жазуу келтирилет. SimulationX программалык каражаты машина таануунун татаал, динамикалык маселелерин чечүү үчүн абдан жакшы дал келет. SimulationX программасынын жардамы менен моделдөө мисалы келтирилет.*

*В работе приводится краткое описание программного комплекса SimulationX. Программный комплекс SimulationX очень хорошо подходит для решения сложных динамических задач машиноведения. Приводится пример моделирования при помощи программы SimulationX.*

*In paper the brief description of a program complex SimulationX is resulted. The program complex SimulationX very well approaches for the decision of complex dynamic tasks of mechanical engineering. The example of modeling is resulted through the program SimulationX.*

SimulationX – это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем, который разработан и продается на коммерческой основе фирмой ITI GmbH из Дрездена с 2000 года. SimulationX является преемником программы ITI-SIM, первая версия которой появилась в 1993 году. Ученые и инженеры, работающие в промышленности и сфере образования, используют этот инструмент для разработки, моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования сложных мехатронных систем. На единой платформе программа моделирует поведение и взаимодействие различных физических объектов механики (1D и 3D), приводной техники, электрических, гидравлических, пневматических и термодинамических систем, а также магнетизма и аналоговых и цифровых систем управления. Одними из основных приложений SimulationX являются исследования в области автомобильных приводов, например, такие, как стационарный анализ силовых агрегатов.

Фирма SimulationX создана фирмой ITI GmbH, которая основана в 1990 году в Дрездене (Германия). Компания работает по всему миру через сеть филиалов и дистрибьюторов. Одним из основных направлений деятельности компании в области „Виртуальные инженерные системы“ являются разработка и продажа стандартного программного обеспечения.

Программный комплекс SimulationX поддерживает функциональность Windows и содержит предварительно подготовленные типы элементов, которые собраны в библиотеки для различных разделов физики. Эти библиотеки классифицируют модельные объекты в соответствии с их физическими свойствами и областью применения. Для создания одной модели можно использовать готовые элементы из всех библиотек, а также элементы, созданные пользователем. Например, гидравлические, пневматические и электрические приводы, а также системы управления могут быть интегрированы в одной модели вместе с элементами многотельной механики. В ходе расчета можно наблюдать и анализировать поведение системы, при этом параметры могут быть скорректированы. Практическим примером этого являются строительные машины, в которых используются гидравлические системы управления. Программный комплекс SimulationX объединяет

отдельные компоненты в единую систему, пригодную для моделирования триботехнических проблем и для анализа энергоэффективности оборудования и систем управления. В разделе „Флюидтехника“ имеется библиотека, которая предоставляет специализированные компоненты для подводной техники (подводная гидравлика, электрика и другие). С их помощью рассчитывается и анализируется динамическое поведение компонентов и систем для добычи и распределения нефти и природного газа. Другим применением являются виртуальные испытания оборудования для глубоководного бурения и сейсмографии, а также подводных конструкций и технологий.

SimulationX поддерживает язык моделирования Modelica, который используется, в частности, для создания пользователем собственных (суб-) моделей. Модели из стандартных библиотек языка Modelica и других библиотек, основанных на языке Modelica, могут быть также использованы в SimulationX.

SimulationX имеет открытые, всеобъемлющие САх интерфейсы для внешних программ различных направлений, например, CAE, CAD (SolidWorks, Pro / ENGINEER, Autodesk Inventor), CAM АСУ ТП, автоматизация оптимизации CAO (Isight, modeFRONTIER, OptiY), FEA / FEM, CFD.

Интерфейс CAE позволяет использовать SimulationX с другими инструментами CAE, такими как MSC.Adams, SIMPACK, MATLAB/Simulink, Fluent, Cadmould.

Интерфейс COM обеспечивает коммуникации между SimulationX и другими приложениями Windows для пользователей пакетных процессов, встроенного моделирования, исследования параметров или оптимизации.

Для полного структурного и системного анализа (расчеты равновесия, собственные частоты, формы колебаний, передаточные функции) в SimulationX имеются встроенные инструменты. Набор отраслевых и настраиваемых библиотек описывает все промышленные компоненты, включая их физические взаимодействия. Модульная архитектура гарантирует оптимальную функциональность, которая отвечает требованиям клиента. Функции экспорта кода, стандартные интерфейсы и импорт модели позволяют производить обмен параметрами, результатами, структурами и графикой с сопутствующими расчетными программами.

Удобный графический интерфейс позволяет строить сложные модели точно и интуитивно. Кроме того, инструмент Modelica позволяет создавать и моделировать модели для решения мультифизических задач и визуализировать результаты решения.

SimulationX объединяет подготовку модели, ее решение и постобработку в единую среду. Результаты могут быть проанализированы в режиме онлайн, параметры могут даже меняться прямо во время процесса расчета.

#### **Основные достоинства программы SimulationX:**

- Быстрое построение моделей из интуитивно-понятных объектов механики (масса, сила, момент, пружина, демпфер, трение, рычаг и т.д.), пневматики и гидравлики (пневмоцилиндр, клапан, дроссель и др.), машиностроения и электромеханики (моторы, муфты, сцепления, зубчатая и другие передачи, карданный вал, дифференциал и т.д.) и управления (датчики-измерители, управляющие сигналы и пр.).

- Три простых способа создания собственных модельных объектов (с помощью записи уравнений, модификации стандартного объекта или объединения набора объектов).

- Взаимодействие в одной модели механических, пневматических, гидравлических, электрических и электромагнитных объектов, а также управляющих сигналов.

- Графическое представление и анализ результатов – нажатием кнопки на «мышке».

- Автоматический анализ собственных частот и форм колебаний.

- Анимация построенных моделей.

- Интерфейс с MATLAB/Simulink, Modelica (Dymola), SimPack, ADAMS, C++.

**SimulationX позволяет решать следующие задачи:**

– Моделирование системы во временной и частотной областях. Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных системах или стационарное моделирование для расчета модели в периодическом состоянии (нелинейном или линейном).

– Моделирование с помощью библиотеки моделей, которые разделены по моделируемым физическим приложениям с готовыми типами стандартных элементов.

– Проведение интегрированного анализа систем, вариационные вычисления с помощью дополнительных инструментов и интерфейсов SimulationX.

### **Библиотеки SimulationX**

#### **Механические передачи**

Задачи моделирования трансмиссий обеспечиваются в SimulationX с помощью обширной коллекции библиотек. Эти библиотеки поддерживают моделирование и анализ механической трансмиссии, а также основанное на моделировании проектирование управляющих систем. Все модели легко параметризуются значениями из доступных от поставщиков компонент и параметров проекта. С использованием библиотеки Animation Bodies можно легко и быстро выполнять анимацию для элементов трансмиссии в 3D-представлении.

#### ***Библиотеку Power Transmission:***

***Motors / Engines.*** Библиотека Motors / Engines включает различные основные модели двигателей и моторов с различными характеристиками. Эти модели могут широко использоваться в автомобильной промышленности или машиностроении. Все типы моделей поддерживают внутреннюю инерцию и позволяют присоединять структуры подшипников. Все модели вычисляют неоднородное возбуждение трансмиссии.

***Actuating Elements.*** Библиотека Actuating Elements включает в себя элементы для моделирования переключения передач в механических или автоматизированных коробках передач. Это обеспечивается элементами Gear Selection (выбор передачи) и Detent Mechanism (фиксаторы).

***Drive Accessory.*** Библиотека Drive Accessory содержит элементы, которые упрощают моделирование трансмиссий. Для моделирования и анализа крутящего момента, который действует во вращательных массовых системах (двигатели, коробки передач или дифференциалы), может использоваться элемент Mount. Элемент Shaft Segment используется для моделирования валов.

***Couplings / Clutches.*** Библиотека Couplings / Clutches содержит множество типов моделей для представления муфт и сцеплений. Данные элементы можно легко использовать, применяя параметры элементов по умолчанию. Большие возможности параметризации элементов с учетом нелинейностей позволяют точно и очень быстро выбрать свойства модели (такие, как жесткость, демпфирование, гистерезис).

***Transmission Elements.*** Модели библиотека Transmission Elements работают с больше чем одной степенью свободы вращения, как это делается в традиционном анализе вибраций при вращении. Свойства валов и подшипников (жесткость, демпфирование, преднатяг) моделируются присоединением дополнительных элементов к соответствующим степеням свободы.

***Planetary Gears.*** Библиотека Planetary Gears содержит типы моделей для создания планетарных механизмов. Комбинация этих структур с компонентами масс и инерций коробки переключения передач дает возможность смоделировать все типы планетарных коробок передач.

***Synchronizers.*** Библиотека Synchronizers содержит типы моделей, которые позволяют пользователю моделировать синхронизаторы, используемые в механических или автоматизированных КПП.

***Combustion Engines I.*** Библиотека Combustion Engines I содержит много типов моделей для моделирования двигателя внутреннего сгорания. Эти структуры двигателя внутреннего сгорания могут использоваться как компоненты в механических передачах

или для отдельного анализа ДВС. Библиотека включает в себя типы моделей для моделирования мощности двигателя (коэффициенты Фурье, давление в цилиндре или моменты вращения), рядные цилиндры или V-образные пары цилиндров с учетом или без учета упругости и несколько полных моделей ДВС (дизель или бензиновый двигатель, с 2-мя или 4-мя цилиндрами).

**Combustion Engines II.** Библиотека Combustion Engines II содержит типы моделей для динамического расчета сгорания в цилиндрах. Кроме того, библиотека включает элемент, который может использоваться для управления двигателем. Покупка библиотеки Combustion Engines II включает все типы моделей библиотеки Combustion Engines I. Элементы обеих библиотек могут произвольно использоваться в пользовательских моделях.

### **Механика**

Используя библиотеки Mechanics, пользователь решает задачи моделирования и анализа механических систем. Элементы позволяют быстро создавать схемы с требуемой размерностью (одномерные, плоские и трехмерные). Механические системы в SimulationX собираются с помощью массовых, инерционных элементов, элементов пружина-демпфер и элементов сил. Все элементы параметризуются с физическими параметрами. Библиотеки Mechanics являются базовыми для моделирования систем Power Transmission и Fluid Power с механическими компонентами.

#### **Библиотеки Mechanics:**

**Linear Mechanics, Rotary Mechanics.** Библиотеки Linear Mechanics и Rotary Mechanics обеспечивают основные функциональные возможности для одномерной и плоской механической структуры. Возможности использовать характеристики и выражения для параметризации и концентрировать элементы в подсхемах позволяют создавать сложные механические системы, например, автомобильную трансмиссию или станки. Все элементы могут быть связаны с элементами библиотек Power Transmission или Controls.

**MBS Mechanics.** Библиотека MBS Mechanics позволяет моделировать трехмерные многотельные системы с открытыми и замкнутыми кинематическими связями. С помощью импорта CAD данных в модель могут интегрироваться тела со сложной формой. Различные элементы интерфейса гарантируют, что многотельные структуры могут быть связаны с подсхемами других физических областей (Linear Mechanics, Rotary Mechanics, Hydraulics или Controls). Трехмерная визуализация позволяет наблюдать модель синхронно во время создания, параметризации или моделирования. Модели могут применяться, например, при анализе ветряных электростанций, автомобильной трансмиссии, моделирования шасси или станков.

#### **Системы управления**

Библиотеки Controls позволяют моделировать системы управления с и без обратной связи. Используется подход, обычный для теории управления. Управляющее и исполнительное устройство могут быть смоделированы в одной модели, для каждого может использоваться свой, наиболее удобный метод. Библиотеки Controls содержат модели сигналов, а также инструмент для создания UML диаграмм состояний (Statechart Designer).

Кроме того, управляющие схемы и алгоритмы управления могут быть напрямую описаны с помощью языка Modelica®. Функциональные возможности библиотек расширены с помощью специальных моделей контроллеров, которые применимы, например, для библиотек Power Transmission.

#### **Библиотеки Controls:**

**Linear Signal Blocks.** Библиотека Linear Signal Blocks используется для описания линейных систем на основе блок-схем диаграмм. Линейные сигнальные блоки могут применяться, например, для реализации непрерывных линейных систем, таких, как аналоговые средства управления.

***Nonlinear Signal Blocks.*** Библиотека Nonlinear Signal Blocks содержит элементы для нелинейной обработки сигнала. Кроме описания преобразования сигналов и подсхем библиотека может использоваться для моделирования различных нелинейностей.

***Signal Sources.*** Библиотека Signal Sources позволяет описывать произвольные сигналы с зависимостью от времени (импульсы, периодические сигналы, произвольные законы), а также с многомерными характеристиками. Сигналы могут быть как функцией от времени, так и функциями от какого-либо одного или более значений. Кривые могут определяться вручную (с помощью таблиц или редактируемых графиков) или данными из файлов. Таким образом, библиотека также служит мощным интерфейсом для импорта данных в SimulationX.

***Special Signal Blocks.*** Библиотека Special Signal Blocks расширяет возможности SimulationX для того, чтобы моделировать нелинейные эффекты, выполнить анализ сигнала для наблюдения и обработки событий. Таким образом моделируются, например, последовательные управляющие системы и системы, которые структурно изменяются во время моделирования. Библиотека дополняет библиотеки Signal Sources, Linear Signal Blocks и Nonlinear Signal Blocks.

***Time-Discrete Signal Blocks.*** Библиотека Time-Discrete Signal Blocks создана для решения задач цифровой обработки сигналов. В частности, модели библиотеки подходят для моделирования цифровых контроллеров и фильтров. Элементы библиотеки эффективно интегрируются с непрерывными моделями. Библиотека обеспечивает необходимые интерфейсы и контроль за размером шага в алгоритме моделирования, гарантируя, что решатель обработает все выборки во время моделирования.

***Switches.*** Библиотека Switches используется для моделирования переключателей в схеме. Это позволяет моделировать управление, логические условия и структурные изменения системы на сигнальном уровне.

***Statechart Designer.*** Statechart Designer может облегчить моделирование сложных дискретных и систем и схем состояний. Также поддерживается моделирование физических эффектов или технических подсхем с дискретными состояниями (например, трение, гистерезис, клапаны и переключатели). Основываясь на UML Statechart, графический редактор позволяет моделировать легко и интуитивно.

### **Электротехника**

В области электротехники SimulationX позволяет моделировать электрические и магнитные явления, используя сетевые модели. Кроме того, подробные модели электродвигателей и шаговых двигателей служат для связи электрических моделей с механическими передачами.

Таким образом, сложное поведение, которое присутствует в управляемых электромеханических устройствах, легко моделируется.

### ***Библиотеки SimulationX для электротехники:***

***Electronics.*** Библиотека Electronics позволяет эффективно решать задачи в электротехнике и в электронике. Библиотека содержит идеализированные элементы и реальные компоненты. Поэтому элементы применимы для различных приложений (мехатроника, силовая электроника, коммутационная аппаратура). Специальные элементы датчика и привода эффективно интегрируют модели электроники в другие области приложений.

***Magnetics.*** Библиотека Magnetics позволяет моделировать электромагнитные приводы в терминах эквивалентных магнитных схем. С этой целью в библиотеке присутствуют сосредоточенные элементы, которые описывают приблизительное распределение магнитного потока. Структура магнитных схем соответствует реальной системе и позволяет моделировать магнитные потоки эффективно и интуитивно.

***Electric Motors.*** Используя модели библиотеки, можно эффективно решать задачи моделирования электромеханических приводов. Модели хорошо описывают физическую природу и легко параметризуются практическими значениями. В комбинации с

библиотеками Power Transmission легко моделируются как компоненты системы, так и система управления. Модели моторов применимы к различным техническим областям (двигатели машин, гибридная передача, двигатели для железнодорожного транспорта и т.д.).

**Convertors.** Библиотека Convertors содержит модели для управления двигателями библиотеки Electric Motors. Она предоставляет модели управления для синхронных и асинхронных двигателей, PWM диспетчеры и 3-фазные конверторы.

**Stepping Motors.** Библиотека содержит модели шаговых двигателей для работы в разных режимах. Шаговые двигатели управляются контроллерами, модели которых также являются частью библиотеки. Контроллеры управляются двигателями по напряжению, току, поддерживают широко-импульсную модуляцию, двухточечное управление. Модели библиотеки легко работают вместе с моделями Mechanics и Controls.

#### **Жидкости и газы**

Библиотеки Fluid Power содержат элементы для эффективного и интуитивного моделирования гидравлических и пневматических систем и компонентов. Пользователи могут создавать модели непосредственно по гидравлической или пневматической схеме. Модели собираются из таких элементов, как цилиндры, клапаны, трубы, шланги, насосы и т.д. Модели в Fluid Power содержат сильные нелинейности, такие как зависимость свойств от давления, температуры, насыщения жидкости газами, нелинейные свойства клапанов, температурные влияния и теплообмен, газирование и кавитация, а также как объемные и механические нагрузки. Для исследования однофазных или многофазных течений библиотеки Fluid Power дополняются библиотеками Thermodynamics. Модели библиотеки Fluid Power взаимодействуют с моделями от Mechanics, Power Transmission и Controls. Это позволяет моделировать сложные мультифизические системы.

#### **Библиотеку Fluid Power:**

**Hydraulics.** Библиотека Hydraulics применяется для моделирования гидравлических схем с использованием готовых компонент (таких, как клапаны) и с использованием моделей разной степени детальности. Входные параметры для каждого элемента являются настолько простыми, насколько это возможно, и близкими к используемым в соответствующих технических устройствах. В зависимости от доступных значений пользователь может выбирать между различными способами описания физических явлений. Свойства жидкости, требуемые в моделировании, вычислены, как функции давления, температуры и газовой фракции, и сохранены в полной и расширяемой пользователем базе данных.

**Pneumatics.** Используя библиотеку Pneumatics, можно эффективно решать задачи в областях пневматических приводов, погрузочно-разгрузочного оборудования, гидропневматических аккумуляторов и амортизаторов или топливных элементов и оборудования для химических процессов. Модели пневматики позволяют моделировать системы как с чистыми газами, так и со смесями. Все модели жидкости включают в себя как ламинарные, так и турбулентные потери. Более того, все пневматические сопротивления различают докритическое и критическое поведение потока. Свойства газов вычисляются как функции давления, температуры и состава смеси. Несколько различных газов и смесей могут использоваться в одной модели. Газовые свойства определяются в полной и расширяемой пользователем базе данных.

**FluidDesigner.** FluidDesigner – это удобный инструмент для создания и редактирования жидкостей, определенных пользователем. Это позволяет эффективно описывать все физические свойства жидкости (такие, как вязкость, плотность и сжимаемость), которые важны для динамического моделирования. Свойства жидкости определены как зависимости давления, температуры и насыщения газами. Используя уже существующую классификацию жидкостей, предлагаются подходящие по умолчанию свойства, что упрощает создание определенных пользователем жидкостей. Множество

разнообразных альтернативных вариантов параметризации (числа, произвольные функции, многомерные таблицы характеристик) гарантирует максимальную гибкость.

**Термодинамика.** Библиотеки Thermodynamics используются для моделирования сложных теплообменных процессов в жидкостях, газах и твердых телах. Они применяются для моделирования процессов в отопительных и охлаждающих системах, кондиционерах, тепловых двигателях и в моделировании теплообмена в других приложениях, таких, как теплообмен в компонентах автомобильной трансмиссии.

#### ***Библиотеки Thermodynamics:***

**Thermics.** Библиотека Thermics предназначена для исследования теплообмена в конструкциях, станках и оборудовании. Элементы библиотеки позволяют быстро и точно моделировать в терминах тепловых схем. Модели могут применяться как для решения стационарных задач, так и динамических. Параметризация во многом основана на геометрических данных и поддерживается с помощью большой базы данных свойств материалов. Тепловые модели в SimulationX могут легко быть связаны с механическими, электрическими, гидравлическими или пневматическими подсхемами.

**Thermo Fluid.** Элементы библиотеки Thermo Fluid позволяют моделировать стационарные и динамические системы, в которых тепло- и массоперенос имеет решающую роль. Может моделироваться ряд процессов с однофазным или двухфазным течением газов или жидкости, как и смеси газов. Предоставляется большая база свойств жидкостей. База данных включает такие жидкости, как охладители, влажный воздух, жидкости NIST, газы, смеси газов и многое другое. Вследствие того, что элементы библиотеки Thermo Fluid могут быть легко связаны с элементами других физических систем, таких как Mechanics или Controls, могут моделироваться очень сложные технические процессы.

#### ***TIL***

TIL – это библиотека Modelica для моделирования стационарных и динамических систем жидкостей, таких как охладитель или кондиционирование воздуха. Она разработана компанией TLK-Thermo GmbH и TU Braunschweig, Institute for Thermodynamics. TIL использует основанную на языке Modelica библиотеку TIL Fluids, чтобы получить доступ к расчету свойств жидкостей REFPROP или другим базам данных жидкостей.

#### ***Interfaces***

Интерфейсы расширяют функциональные возможности библиотеки Mechanics и обеспечивают связь с другими инструментами, применяемыми при проектировании. Интерфейс Modal System позволяет интегрировать упругие тела в моделирование одномерной механики с использованием модальных методов из конечно-элементного анализа. Это позволяет подключать, например, автомобильные кузова, каркасы в модель. Для автоматизации использования данных модального анализа модальных данных конечно-элементного анализа (сейчас в Ansys(R)) применяется соответствующий фильтр импорта. CAD Import позволяет подключать в многотельную модель тела произвольной формы. Геометрия тел должна быть описана в STL-формате. Автоматически рассчитываются массовые и инерционные параметры тела. В дополнении доступен импорт полных сборок из CAD систем Autodesk Inventor® и Pro/ENGINEER®.

#### ***Интерфейсы MATLAB®/Simulink®***

В индустриальных приложениях MATLAB/Simulink часто используется для проектирования, тестирования контроллеров. Чтобы поддерживать эти приложения, SimulationX включает несколько интерфейсов, взаимодействующих с MATLAB/Simulink. Они включают экспорт моделей в Simulink, таких как C-код, импорт моделей Simulink, таких как C-код и совместное моделирование.

#### ***Пример.***

На рис. 1 показана модель одномассового осциллятора, который моделируется элементами линейной механики. Масса представлена элементом *mass1*. Введено начальное смещение 1 мм. Во время моделирования вы можете наблюдать его перемещение  $x$  (текущее положение от времени). Кроме того, перемещение можно инициализировать и наблюдать на узле *connection1*. Внутренняя сила  $F_i$  в элементе *springDamper1* является расчетной силой для системы пружина-демпфер.

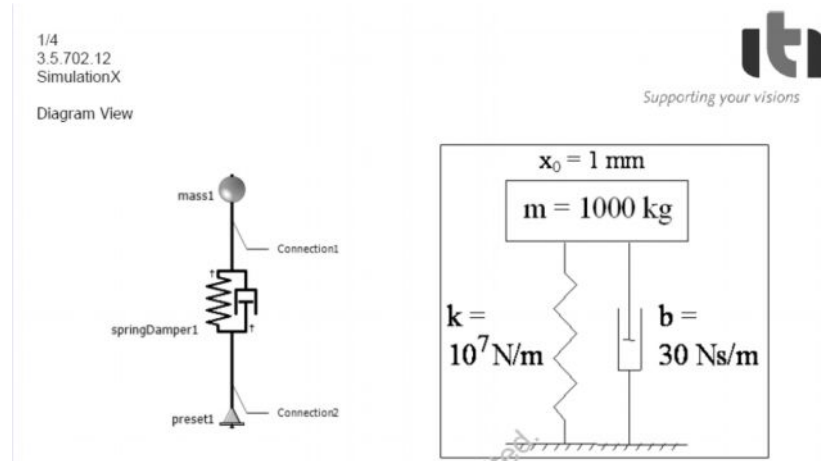


Рис. 1. Модель одномассового осциллятора

### Основные результаты моделирования

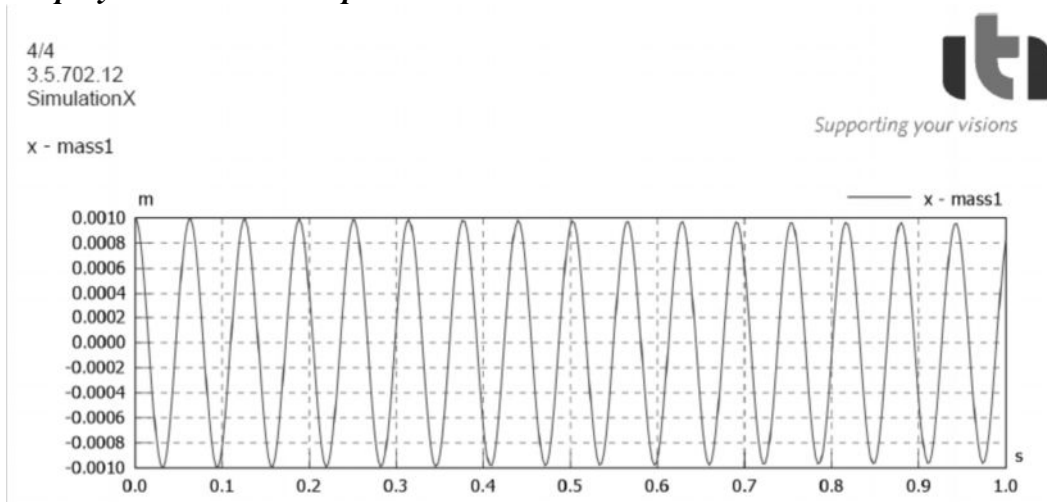


Рис. 2. Колебания массы1



mass1.x

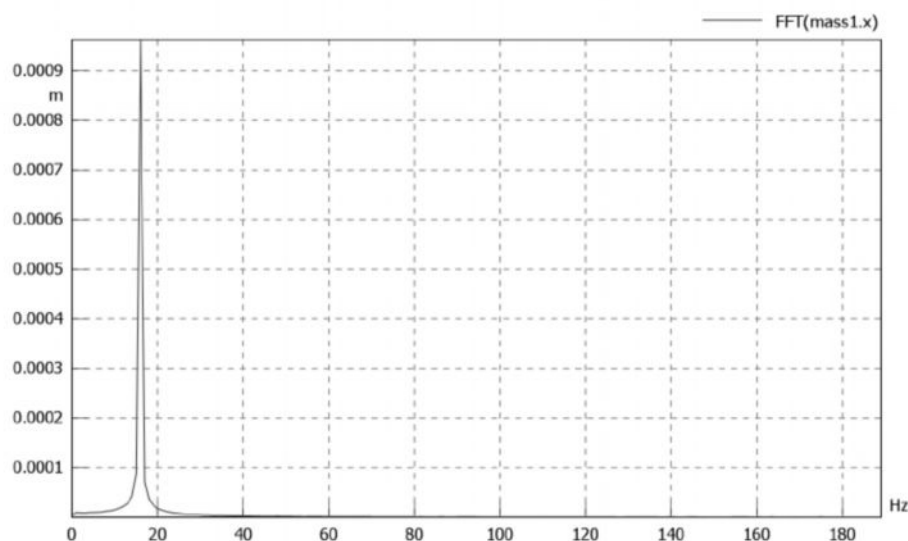


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика

### Список литературы

1. Сайт фирмы ITI GmbH (разработчик SimulationX) – <http://www.simulationx.com/>

*Иште SimulationX программалык комплексин кыскача баяндап жазуу келтирилет. SimulationX программалык каражаты машина таануунун татаал, динамикалык маселелерин чечүү үчүн абдан жакшы дал келет. SimulationX программасынын жардамы менен моделдөө мисалы келтирилет.*

*В работе приводится краткое описание программного комплекса SimulationX. Программный комплекс SimulationX очень хорошо подходит для решения сложных динамических задач машиноведения. Приводится пример моделирования при помощи программы SimulationX.*

*In paper the brief description of a program complex SimulationX is resulted. The program complex SimulationX very well approaches for the decision of complex dynamic tasks of mechanical engineering. The example of modeling is resulted through the program SimulationX.*

SimulationX – это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем, который разработан и продается на коммерческой основе фирмой ITI GmbH из Дрездена с 2000 года. SimulationX является преемником программы ITI-SIM, первая версия которой появилась в 1993 году. Ученые и инженеры, работающие в промышленности и сфере образования, используют этот инструмент для разработки, моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования сложных мехатронных систем. На единой платформе программа моделирует поведение и взаимодействие различных физических объектов механики (1D и 3D), приводной техники, электрических, гидравлических, пневматических и термодинамических систем, а также магнетизма и аналоговых и цифровых систем управления. Одними из основных приложений SimulationX являются исследования в области автомобильных приводов, например, такие, как стационарный анализ силовых агрегатов.

Фирма SimulationX создана фирмой ITI GmbH, которая основана в 1990 году в Дрездене (Германия). Компания работает по всему миру через сеть филиалов и

дистрибьюторов. Одним из основных направлений деятельности компании в области „Виртуальные инженерные системы“ являются разработка и продажа стандартного программного обеспечения.

Программный комплекс SimulationX поддерживает функциональность Windows и содержит предварительно подготовленные типы элементов, которые собраны в библиотеки для различных разделов физики. Эти библиотеки классифицируют модельные объекты в соответствии с их физическими свойствами и областью применения. Для создания одной модели можно использовать готовые элементы из всех библиотек, а также элементы, созданные пользователем. Например, гидравлические, пневматические и электрические приводы, а также системы управления могут быть интегрированы в одной модели вместе с элементами многотельной механики. В ходе расчета можно наблюдать и анализировать поведение системы, при этом параметры могут быть скорректированы. Практическим примером этого являются строительные машины, в которых используются гидравлические системы управления. Программный комплекс SimulationX объединяет отдельные компоненты в единую систему, пригодную для моделирования триботехнических проблем и для анализа энергоэффективности оборудования и систем управления. В разделе „Флюидтехника“ имеется библиотека, которая предоставляет специализированные компоненты для подводной техники (подводная гидравлика, электрика и другие). С их помощью рассчитывается и анализируется динамическое поведение компонентов и систем для добычи и распределения нефти и природного газа. Другим применением являются виртуальные испытания оборудования для глубоководного бурения и сейсмографии, а также подводных конструкций и технологий.

SimulationX поддерживает язык моделирования Modelica, который используется, в частности, для создания пользователем собственных (суб-) моделей. Модели из стандартных библиотек языка Modelica и других библиотек, основанных на языке Modelica, могут быть также использованы в SimulationX.

SimulationX имеет открытые, всеобъемлющие CAx интерфейсы для внешних программ различных направлений, например, CAE, CAD (SolidWorks, Pro / ENGINEER, Autodesk Inventor), CAM ACU ТП, автоматизация оптимизации CAO (Isight, modeFRONTIER, OptiY), FEA / FEM, CFD.

Интерфейс CAE позволяет использовать SimulationX с другими инструментами CAE, такими как MSC.Adams, SIMPACK, MATLAB/Simulink, Fluent, Cadmould.

Интерфейс COM обеспечивает коммуникации между SimulationX и другими приложениями Windows для пользователей пакетных процессов, встроенного моделирования, исследования параметров или оптимизации.

Для полного структурного и системного анализа (расчеты равновесия, собственные частоты, формы колебаний, передаточные функции) в SimulationX имеются встроенные инструменты. Набор отраслевых и настраиваемых библиотек описывает все промышленные компоненты, включая их физические взаимодействия. Модульная архитектура гарантирует оптимальную функциональность, которая отвечает требованиям клиента. Функции экспорта кода, стандартные интерфейсы и импорт модели позволяют производить обмен параметрами, результатами, структурами и графикой с сопутствующими расчетными программами.

Удобный графический интерфейс позволяет строить сложные модели точно и интуитивно. Кроме того, инструмент Modelica позволяет создавать и моделировать модели для решения мультифизических задач и визуализировать результаты решения.

SimulationX объединяет подготовку модели, ее решение и постобработку в единую среду. Результаты могут быть проанализированы в режиме онлайн, параметры могут даже меняться прямо во время процесса расчета.

#### **Основные достоинства программы SimulationX:**

– Быстрое построение моделей из интуитивно-понятных объектов механики (масса, сила, момент, пружина, демпфер, трение, рычаг и т.д.), пневматики и гидравлики

(пневмоцилиндр, клапан, дроссель и др.), машиностроения и электромеханики (моторы, муфты, сцепления, зубчатая и другие передачи, карданный вал, дифференциал и т.д.) и управления (датчики-измерители, управляющие сигналы и пр.).

- Три простых способа создания собственных модельных объектов (с помощью записи уравнений, модификации стандартного объекта или объединения набора объектов).

- Взаимодействие в одной модели механических, пневматических, гидравлических, электрических и электромагнитных объектов, а также управляющих сигналов.

- Графическое представление и анализ результатов – нажатием кнопки на «мышке».

- Автоматический анализ собственных частот и форм колебаний.

- Анимация построенных моделей.

- Интерфейс с MATLAB/Simulink, Modelica (Dymola), SimPack, ADAMS, C++.

#### **SimulationX позволяет решать следующие задачи:**

- Моделирование системы во временной и частотной областях. Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных системах или стационарное моделирование для расчета модели в периодическом состоянии (нелинейном или линейном).

- Моделирование с помощью библиотеки моделей, которые разделены по моделируемым физическим приложениям с готовыми типами стандартных элементов.

- Проведение интегрированного анализа систем, вариационные вычисления с помощью дополнительных инструментов и интерфейсов SimulationX.

#### **Библиотеки SimulationX**

##### **Механические передачи**

Задачи моделирования трансмиссий обеспечиваются в SimulationX с помощью обширной коллекции библиотек. Эти библиотеки поддерживают моделирование и анализ механической трансмиссии, а также основанное на моделировании проектирование управляющих систем. Все модели легко параметризуются значениями из доступных от поставщиков компонент и параметров проекта. С использованием библиотеки Animation Bodies можно легко и быстро выполнять анимацию для элементов трансмиссии в 3D-представлении.

##### ***Библиотека Power Transmission:***

***Motors / Engines.*** Библиотека Motors / Engines включает различные основные модели двигателей и моторов с различными характеристиками. Эти модели могут широко использоваться в автомобильной индустрии или машиностроении. Все типы моделей поддерживают внутреннюю инерцию и позволяют присоединять структуры подшипников. Все модели вычисляют неоднородное возбуждение трансмиссии.

***Actuating Elements.*** Библиотека Actuating Elements включает в себя элементы для моделирования переключения передач в механических или автоматизированных коробках передач. Это обеспечивается элементами Gear Selection (выбор передачи) и Detent Mechanism (фиксаторы).

***Drive Accessory.*** Библиотека Drive Accessory содержит элементы, которые упрощают моделирование трансмиссий. Для моделирования и анализа крутящего момента, который действует во вращательных массовых системах (двигатели, коробки передач или дифференциалы), может использоваться элемент Mount. Элемент Shaft Segment используется для моделирования валов.

***Couplings / Clutches.*** Библиотека Couplings / Clutches содержит множество типов моделей для представления муфт и сцеплений. Данные элементы можно легко использовать, применяя параметры элементов по умолчанию. Большие возможности параметризации элементов с учетом нелинейностей позволяют точно и очень быстро выбрать свойства модели (такие, как жесткость, демпфирование, гистерезис).

***Transmission Elements.*** Модели библиотеки Transmission Elements работают с больше чем одной степенью свободы вращения, как это делается в традиционном анализе

вибраций при вращении. Свойства валов и подшипников (жесткость, демпфирование, преднатяг) моделируются присоединением дополнительных элементов к соответствующим степеням свободы.

***Planetary Gears.*** Библиотека Planetary Gears содержит типы моделей для создания планетарных механизмов. Комбинация этих структур с компонентами масс и инерций коробки переключения передач дает возможность смоделировать все типы планетарных коробок передач.

***Synchronizers.*** Библиотека Synchronizers содержит типы моделей, которые позволяют пользователю моделировать синхронизаторы, используемые в механических или автоматизированных КПП.

***Combustion Engines I.*** Библиотека Combustion Engines I содержит много типов моделей для моделирования двигателя внутреннего сгорания. Эти структуры двигателя внутреннего сгорания могут использоваться как компоненты в механических передачах или для отдельного анализа ДВС. Библиотека включает в себя типы моделей для моделирования мощности двигателя (коэффициенты Фурье, давление в цилиндре или моменты вращения), рядные цилиндры или V-образные пары цилиндров с учетом или без учета упругости и несколько полных моделей ДВС (дизель или бензиновый двигатель, с 2-мя или 4-мя цилиндрами).

***Combustion Engines II.*** Библиотека Combustion Engines II содержит типы моделей для динамического расчета сгорания в цилиндрах. Кроме того, библиотека включает элемент, который может использоваться для управления двигателем. Покупка библиотеки Combustion Engines II включает все типы моделей библиотеки Combustion Engines I. Элементы обеих библиотек могут произвольно использоваться в пользовательских моделях.

### **Механика**

Используя библиотеки Mechanics, пользователь решает задачи моделирования и анализа механических систем. Элементы позволяют быстро создавать схемы с требуемой размерностью (одномерные, плоские и трехмерные). Механические системы в SimulationX собираются с помощью массовых, инерционных элементов, элементов пружина-демпфер и элементов сил. Все элементы параметризуются с физическими параметрами. Библиотеки Mechanics являются базовыми для моделирования систем Power Transmission и Fluid Power с механическими компонентами.

#### ***Библиотеки Mechanics:***

***Linear Mechanics, Rotary Mechanics.*** Библиотеки Linear Mechanics и Rotary Mechanics обеспечивают основные функциональные возможности для одномерной и плоской механической структуры. Возможности использовать характеристики и выражения для параметризации и концентрировать элементы в подсхемах позволяют создавать сложные механические системы, например, автомобильную трансмиссию или станки. Все элементы могут быть связаны с элементами библиотек Power Transmission или Controls.

***MBS Mechanics.*** Библиотека MBS Mechanics позволяет моделировать трехмерные многотельные системы с открытыми и замкнутыми кинематическими связями. С помощью импорта CAD данных в модель могут интегрироваться тела со сложной формой. Различные элементы интерфейса гарантируют, что многотельные структуры могут быть связаны с подсхемами других физических областей (Linear Mechanics, Rotary Mechanics, Hydraulics или Controls). Трехмерная визуализация позволяет наблюдать модель синхронно во время создания, параметризации или моделирования. Модели могут применяться, например, при анализе ветряных электростанций, автомобильной трансмиссии, моделирования шасси или станков.

### **Системы управления**

Библиотеки Controls позволяют моделировать системы управления с и без обратной связи. Используется подход, обычный для теории управления. Управляющее и

исполнительное устройство могут быть смоделированы в одной модели, для каждого может использоваться свой, наиболее удобный метод. Библиотеки Controls содержат модели сигналов, а также инструмент для создания UML диаграмм состояний (Statechart Designer).

Кроме того, управляющие схемы и алгоритмы управления могут быть напрямую описаны с помощью языка Modelica®. Функциональные возможности библиотек расширены с помощью специальных моделей контроллеров, которые применимы, например, для библиотек Power Transmission.

#### ***Библиотеки Controls:***

***Linear Signal Blocks.*** Библиотека Linear Signal Blocks используется для описания линейных систем на основе блок-схем диаграмм. Линейные сигнальные блоки могут применяться, например, для реализации непрерывных линейных систем, таких, как аналоговые средства управления.

***Nonlinear Signal Blocks.*** Библиотека Nonlinear Signal Blocks содержит элементы для нелинейной обработки сигнала. Кроме описания преобразования сигналов и подсхем библиотека может использоваться для моделирования различных нелинейностей.

***Signal Sources.*** Библиотека Signal Sources позволяет описывать произвольные сигналы с зависимостью от времени (импульсы, периодические сигналы, произвольные законы), а также с многомерными характеристиками. Сигналы могут быть как функцией от времени, так и функциями от какого-либо одного или более значений. Кривые могут определяться вручную (с помощью таблиц или редактируемых графиков) или данными из файлов. Таким образом, библиотека также служит мощным интерфейсом для импорта данных в SimulationX.

***Special Signal Blocks.*** Библиотека Special Signal Blocks расширяет возможности SimulationX для того, чтобы моделировать нелинейные эффекты, выполнить анализ сигнала для наблюдения и обработки событий. Таким образом моделируются, например, последовательные управляющие системы и системы, которые структурно изменяются во время моделирования. Библиотека дополняет библиотеки Signal Sources, Linear Signal Blocks и Nonlinear Signal Blocks.

***Time-Discrete Signal Blocks.*** Библиотека Time-Discrete Signal Blocks создана для решения задач цифровой обработки сигналов. В частности, модели библиотеки подходят для моделирования цифровых контроллеров и фильтров. Элементы библиотеки эффективно интегрируются с непрерывными моделями. Библиотека обеспечивает необходимые интерфейсы и контроль за размером шага в алгоритме моделирования, гарантируя, что решатель обработает все выборки во время моделирования.

***Switches.*** Библиотека Switches используется для моделирования переключателей в схеме. Это позволяет моделировать управление, логические условия и структурные изменения системы на сигнальном уровне.

***Statechart Designer.*** Statechart Designer может облегчить моделирование сложных дискретных и систем и схем состояний. Также поддерживается моделирование физических эффектов или технических подсхем с дискретными состояниями (например, трение, гистерезис, клапаны и переключатели). Основываясь на UML Statechart, графический редактор позволяет моделировать легко и интуитивно.

#### ***Электротехника***

В области электротехники SimulationX позволяет моделировать электрические и магнитные явления, используя сетевые модели. Кроме того, подробные модели электродвигателей и шаговых двигателей служат для связи электрических моделей с механическими передачами.

Таким образом, сложное поведение, которое присутствует в управляемых электромеханических устройствах, легко моделируется.

#### ***Библиотеки SimulationX для электротехники:***

**Electronics.** Библиотека Electronics позволяет эффективно решать задачи в электротехнике и в электронике. Библиотека содержит идеализированные элементы и реальные компоненты. Поэтому элементы применимы для различных приложений (мехатроника, силовая электроника, коммутационная аппаратура). Специальные элементы датчика и привода эффективно интегрируют модели электроники в другие области приложений.

**Magnetics.** Библиотека Magnetics позволяет моделировать электромагнитные приводы в терминах эквивалентных магнитных схем. С этой целью в библиотеке присутствуют сосредоточенные элементы, которые описывают приблизительное распределение магнитного потока. Структура магнитных схем соответствует реальной системе и позволяет моделировать магнитные потоки эффективно и интуитивно.

**Electric Motors.** Используя модели библиотеки, можно эффективно решать задачи моделирования электромеханических приводов. Модели хорошо описывают физическую природу и легко параметризуются практическими значениями. В комбинации с библиотеками Power Transmission легко моделируются как компоненты системы, так и система управления. Модели моторов применимы к различным техническим областям (двигатели машин, гибридная передача, двигатели для железнодорожного транспорта и т.д.).

**Convertors.** Библиотека Convertors содержит модели для управления двигателями библиотеки Electric Motors. Она предоставляет модели управления для синхронных и асинхронных двигателей, PWM диспетчеры и 3-фазные конверторы.

**Stepping Motors.** Библиотека содержит модели шаговых двигателей для работы в разных режимах. Шаговые двигатели управляются контроллерами, модели которых также являются частью библиотеки. Контроллеры управляются двигателями по напряжению, току, поддерживают широко-импульсную модуляцию, двухточечное управление. Модели библиотеки легко работают вместе с моделями Mechanics и Controls.

#### **Жидкости и газы**

Библиотеки Fluid Power содержат элементы для эффективного и интуитивного моделирования гидравлических и пневматических систем и компонентов. Пользователи могут создавать модели непосредственно по гидравлической или пневматической схеме. Модели собираются из таких элементов, как цилиндры, клапаны, трубы, шланги, насосы и т.д. Модели в Fluid Power содержат сильные нелинейности, такие как зависимость свойств от давления, температуры, насыщения жидкости газами, нелинейные свойства клапанов, температурные влияния и теплообмен, газирование и кавитация, а также как объемные и механические нагрузки. Для исследования однофазных или многофазных течений библиотеки Fluid Power дополняются библиотеками Thermodynamics. Модели библиотеки Fluid Power взаимодействуют с моделями от Mechanics, Power Transmission и Controls. Это позволяет моделировать сложные мультифизические системы.

#### **Библиотеку Fluid Power:**

**Hydraulics.** Библиотека Hydraulics применяется для моделирования гидравлических схем с использованием готовых компонент (таких, как клапаны) и с использованием моделей разной степени детальности. Входные параметры для каждого элемента являются настолько простыми, насколько это возможно, и близкими к используемым в соответствующих технических устройствах. В зависимости от доступных значений пользователь может выбирать между различными способами описания физических явлений. Свойства жидкости, требуемые в моделировании, вычислены, как функции давления, температуры и газовой фракции, и сохранены в полной и расширяемой пользователем базе данных.

**Pneumatics.** Используя библиотеку Pneumatics, можно эффективно решать задачи в областях пневматических приводов, погрузочно-разгрузочного оборудования, гидропневматических аккумуляторов и амортизаторов или топливных элементов и оборудования для химических процессов. Модели пневматики позволяют моделировать

системы как с чистыми газами, так и со смесями. Все модели жидкости включают в себя как ламинарные, так и турбулентные потери. Более того, все пневматические сопротивления различают докритическое и критическое поведение потока. Свойства газов вычисляются как функции давления, температуры и состава смеси. Несколько различных газов и смесей могут использоваться в одной модели. Газовые свойства определяются в полной и расширяемой пользователем базе данных.

**FluidDesigner.** FluidDesigner – это удобный инструмент для создания и редактирования жидкостей, определенных пользователем. Это позволяет эффективно описывать все физические свойства жидкости (такие, как вязкость, плотность и сжимаемость), которые важны для динамического моделирования. Свойства жидкости определены как зависимости давления, температуры и насыщения газами. Используя уже существующую классификацию жидкостей, предлагаются подходящие по умолчанию свойства, что упрощает создание определенных пользователем жидкостей. Множество разнообразных альтернативных вариантов параметризации (числа, произвольные функции, многомерные таблицы характеристик) гарантирует максимальную гибкость.

**Термодинамика.** Библиотеки Thermodynamics используются для моделирования сложных теплообменных процессов в жидкостях, газах и твердых телах. Они применяются для моделирования процессов в отопительных и охлаждающих системах, кондиционерах, тепловых двигателях и в моделировании теплообмена в других приложениях, таких, как теплообмен в компонентах автомобильной трансмиссии.

#### **Библиотеки Thermodynamics:**

**Thermics.** Библиотека Thermics предназначена для исследования теплообмена в конструкциях, станках и оборудовании. Элементы библиотеки позволяют быстро и точно моделировать в терминах тепловых схем. Модели могут применяться как для решения стационарных задач, так и динамических. Параметризация во многом основана на геометрических данных и поддерживается с помощью большой базы данных свойств материалов. Тепловые модели в SimulationX могут легко быть связаны с механическими, электрическими, гидравлическими или пневматическими подсхемами.

**Thermo Fluid.** Элементы библиотеки Thermo Fluid позволяют моделировать стационарные и динамические системы, в которых тепло- и массоперенос имеет решающую роль. Может моделироваться ряд процессов с однофазным или двухфазным течением газов или жидкости, как и смеси газов. Предоставляется большая база свойств жидкостей. База данных включает такие жидкости, как охладители, влажный воздух, жидкости NIST, газы, смеси газов и многое другое. Вследствие того, что элементы библиотеки Thermo Fluid могут быть легко связаны с элементами других физических систем, таких как Mechanics или Controls, могут моделироваться очень сложные технические процессы.

#### **TIL**

TIL – это библиотека Modelica для моделирования стационарных и динамических систем жидкостей, таких как охладитель или кондиционирование воздуха. Она разработана компанией TLK-Thermo GmbH и TU Braunschweig, Institute for Thermodynamics. TIL использует основанную на языке Modelica библиотеку TIL Fluids, чтобы получить доступ к расчету свойств жидкостей REFPROP или другим базам данных жидкостей.

#### **Interfaces**

Интерфейсы расширяют функциональные возможности библиотеки Mechanics и обеспечивают связь с другими инструментами, применяемыми при проектировании. Интерфейс Modal System позволяет интегрировать упругие тела в моделирование одномерной механики с использованием модальных методов из конечно-элементного анализа. Это позволяет подключать, например, автомобильные кузова, каркасы в модель. Для автоматизации использования данных модального анализа модальных данных

конечно-элементного анализа (сейчас в Ansys(R)) применяется соответствующий фильтр импорта. CAD Import позволяет подключать в многотельную модель тела произвольной формы. Геометрия тел должна быть описана в STL-формате. Автоматически рассчитываются массовые и инерционные параметры тела. В дополнении доступен импорт полных сборок из CAD систем Autodesk Inventor® и Pro/ENGINEER®.

### **Интерфейсы MATLAB®/Simulink®**

В индустриальных приложениях MATLAB/Simulink часто используется для проектирования, тестирования контроллеров. Чтобы поддерживать эти приложения, SimulationX включает несколько интерфейсов, взаимодействующих с MATLAB/Simulink. Они включают экспорт моделей в Simulink, таких как C-код, импорт моделей Simulink, таких как C-код и совместное моделирование.

### **Пример.**

На рис. 1 показана модель одномассового осциллятора, который моделируется элементами линейной механики. Масса представлена элементом mass1. Введено начальное смещение 1 мм. Во время моделирования вы можете наблюдать его перемещение  $x$  (текущее положение от времени). Кроме того, перемещение можно инициализировать и наблюдать на узле *connection1*. Внутренняя сила  $F_i$  в элементе *springDamper1* является расчетной силой для системы пружина-демпфер.

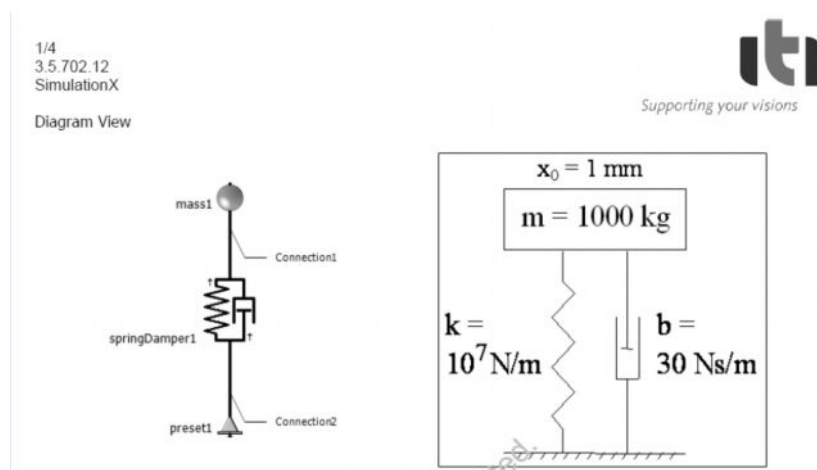


Рис. 1. Модель одномассового осциллятора

### **Основные результаты моделирования**

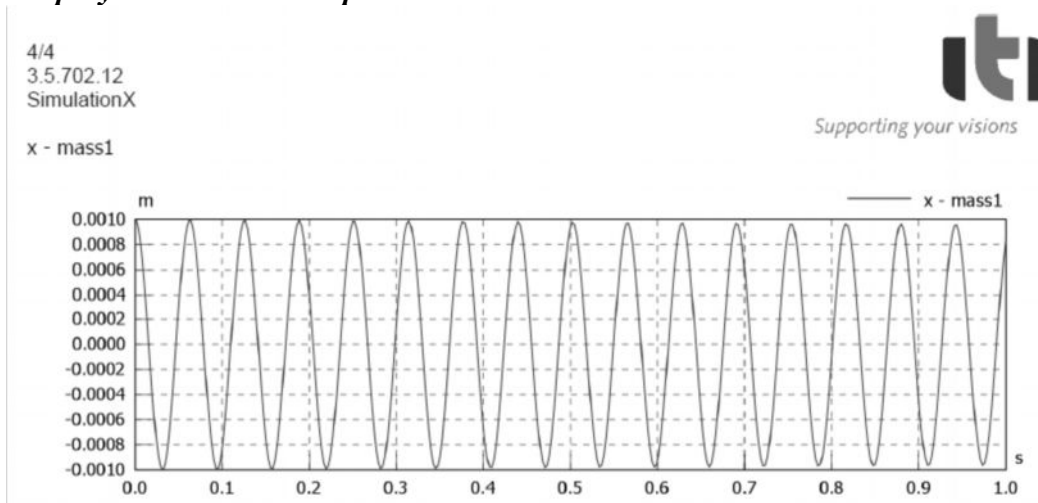


Рис. 2. Колебания массы 1



mass1.x

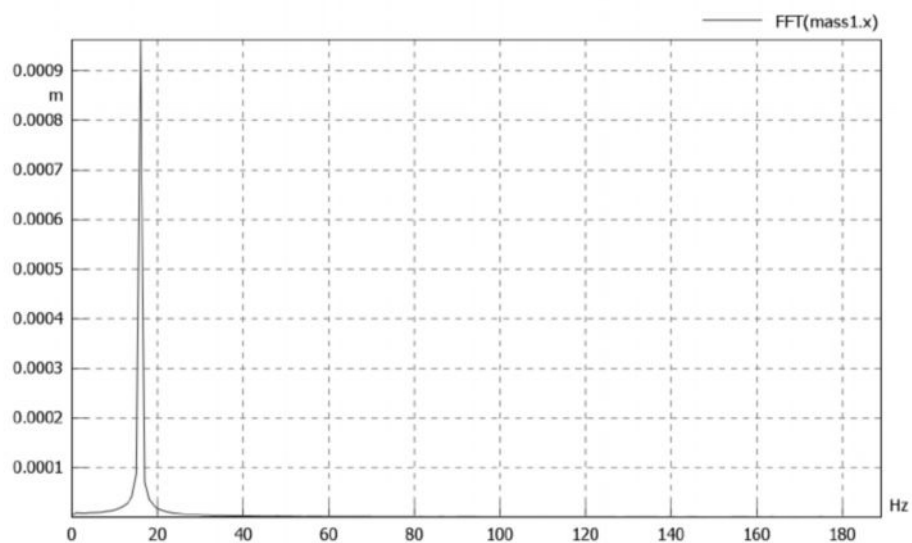


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика  
**Список литературы**

1. Сайт фирмы ITI GmbH (разработчик SimulationX) – <http://www.simulationx.com/>