

СЕССИЯ 5.
ОТ РАЗРОЗНЕННЫХ РАСЧЁТОВ
К ЦЕЛОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ

T-FLEX ДИНАМИКА: ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ

Алексей Просолович

Ведущий аналитик по направлению инженерного анализа, к.т.н.,
компания «Топ Системы»

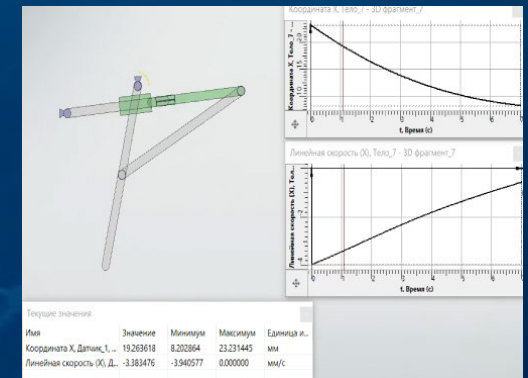
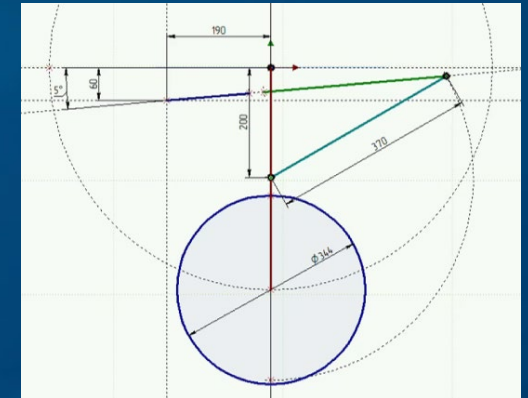
1. Проектирование механизмов в среде CAD/CAE

1. Задача синтеза
2. Задача анализа
3. Особенности проектирование в среде CAD/CAE

1. Задача синтеза

Задача синтеза - проектирование кинематической схемы и определение геометрических параметров и положений звеньев, при которых механизм будет выполнять заданное движение с требуемой точностью.

- **Геометрический синтез**
 - ✓ Задаются определённые положения звеньев или траектории движения точек механизма.
- **Кинематический синтез.**
 - ✓ Задаётся функция положения, передаточная функция (аналог скорости), или соотношения скоростей и ускорений.
- **Динамический синтез.**
 - ✓ Учитываются силы, моменты.



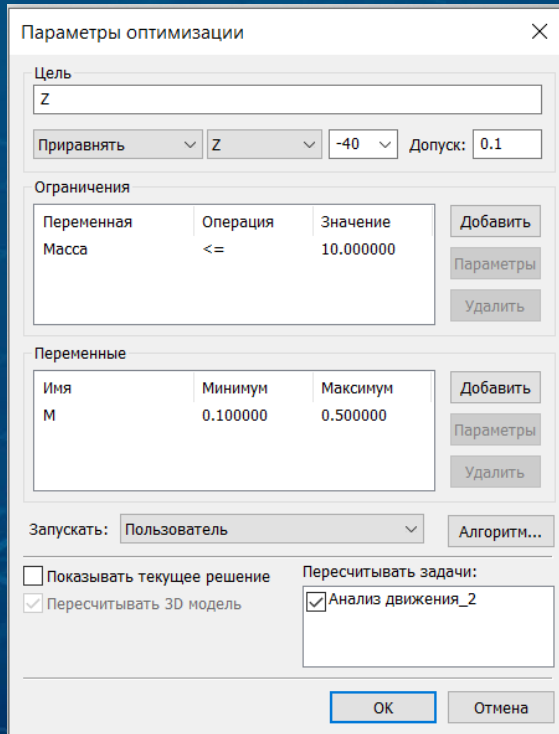
1. Задача синтеза

Особенности

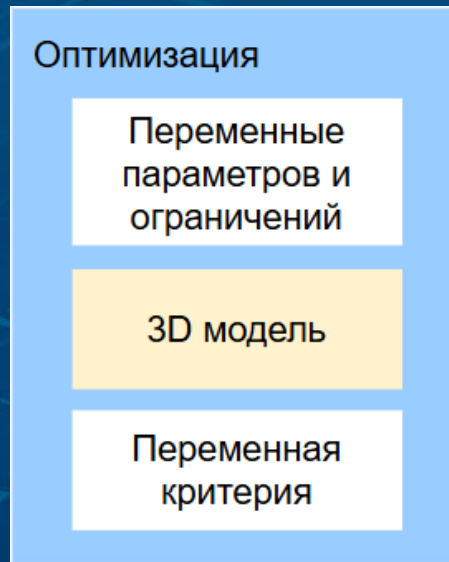
- При синтезе механизма необходимо определить такое сочетание его параметров, которое наилучшим образом удовлетворяет требуемым эксплуатационным и качественным показателям – то есть, решить **оптимизационную задачу**.
- В задаче присутствуют **ограничения**:
 - **параметрические** (например, ограничения на длины звеньев механизмов);
 - **дискретизирующие** (например, выбор размеров из стандартного ряда);
 - **функциональные** (например, условия проворачиваемости звеньев механизма, условия заклинивания кинематических пар).
- Так как синтез выполняется на начальных этапах проектирования, то используется **упрощенная геометрия**
 - «палочная» («проволочная»)
 - ограничивающие объемы (геометрические примитивы)
- **МЦИХ** задаются вручную

1. Задача синтеза

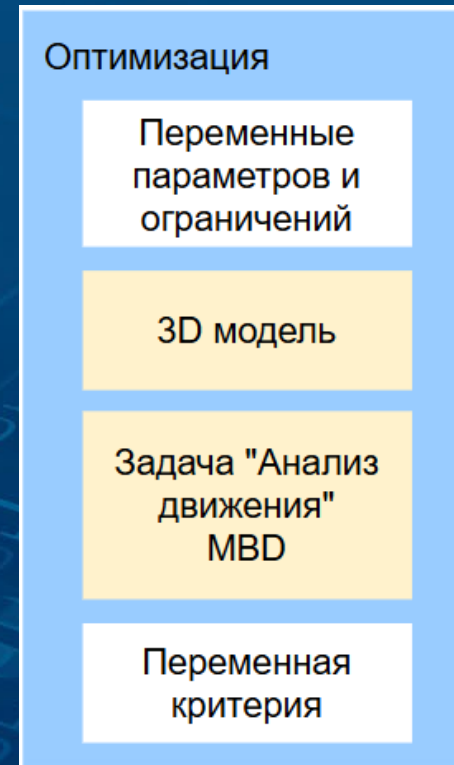
Оптимизация



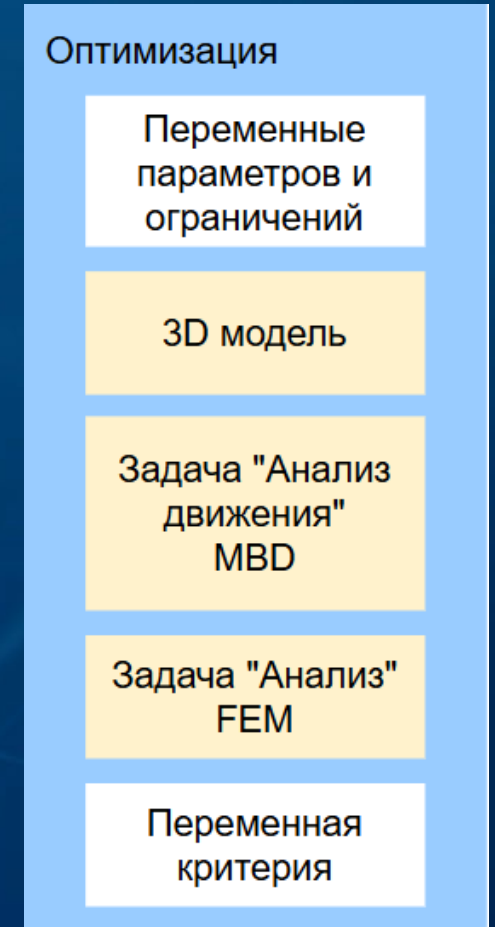
Геометрический синтез



Кинематический/динамический синтез



Оптимизация



1. Задача синтеза

Оптимизация для задачи «Анализ движения»

Параметр: крутящий момент $M = 0,1 \dots 0,5$

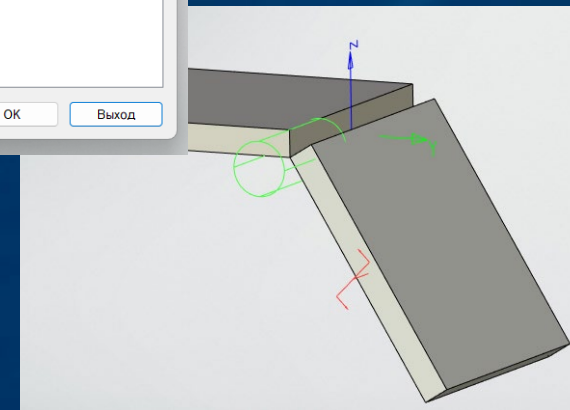
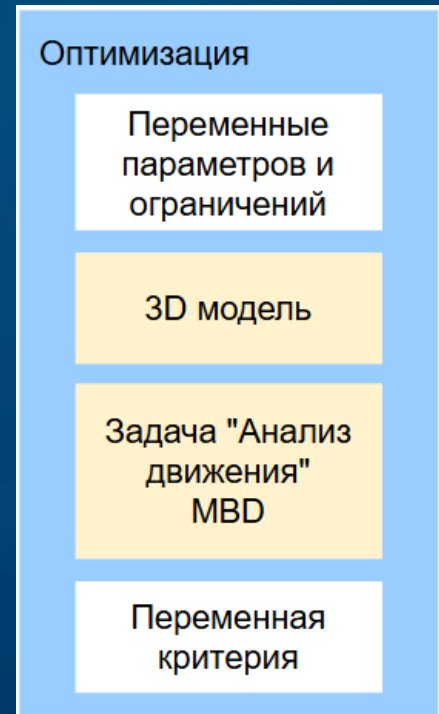
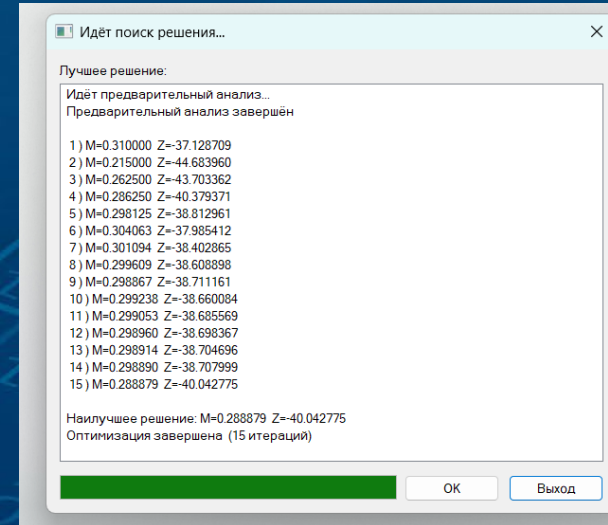
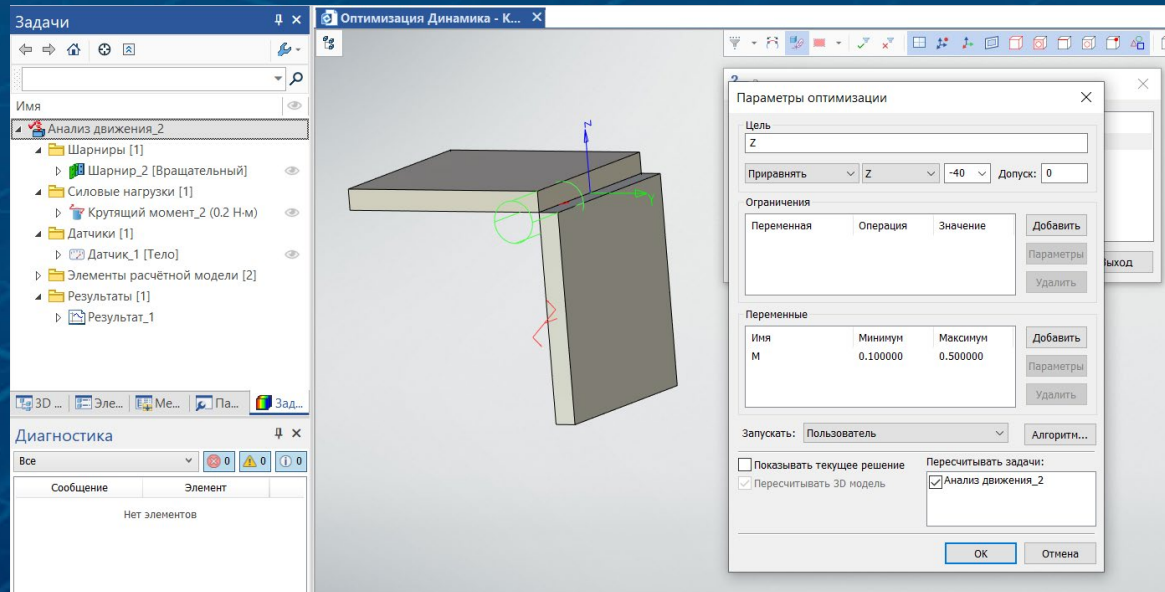
Критерий: центр тяжести $Z = 40$ мм

Пересчитывать задачи: Анализ движения

Решение:

$M = 0,288879$

$Z = 40,042775$



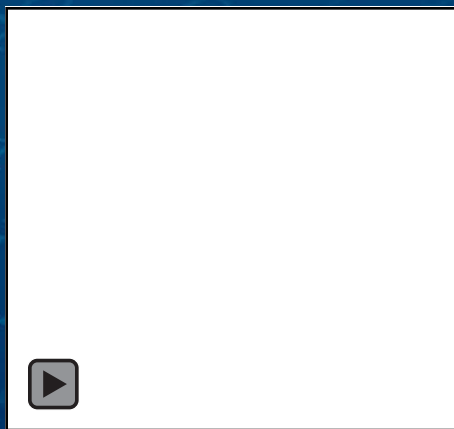
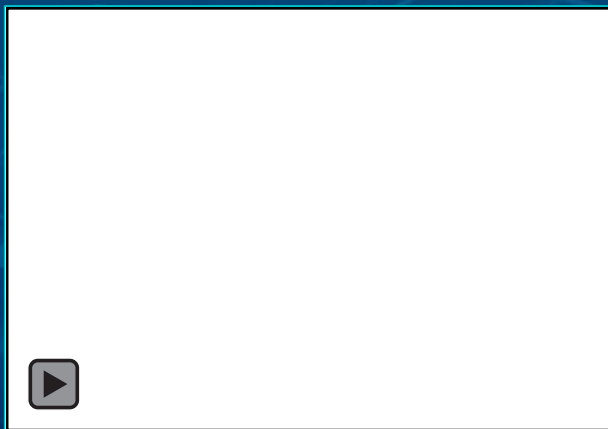
1. Задача синтеза

Геометрический синтез

- Определение размеров, положений звеньев и траекторий движения точек этих звеньев

2D-геометрия

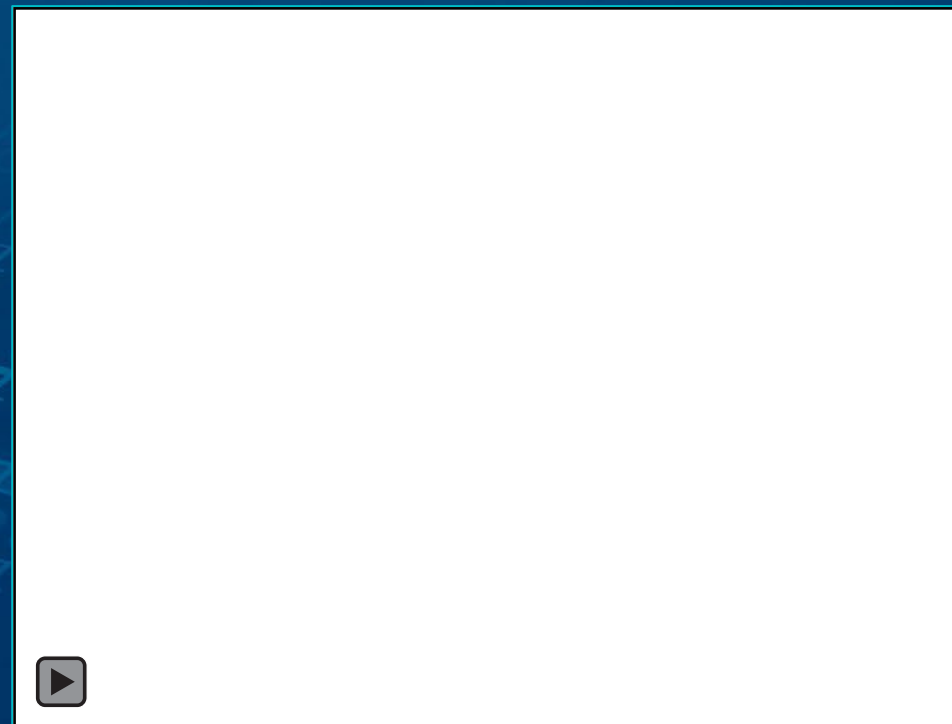
Упрощенная
3D-геометрия



Кинематический синтез

- Определение размеров, положений звеньев и траекторий движения точек этих звеньев
- Определение скоростей и ускорений звеньев и их точек

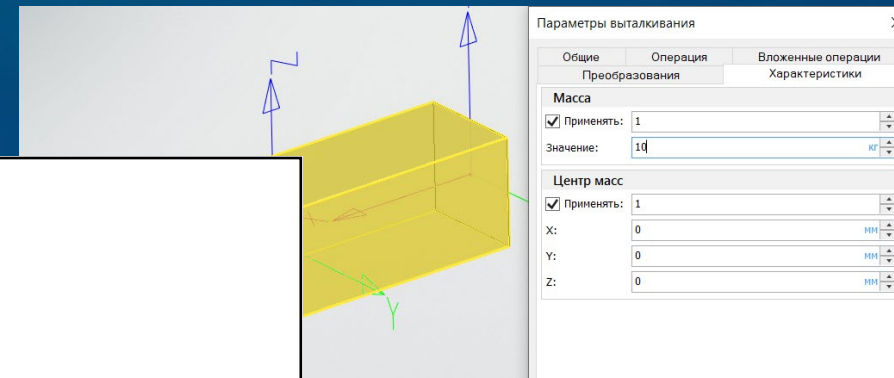
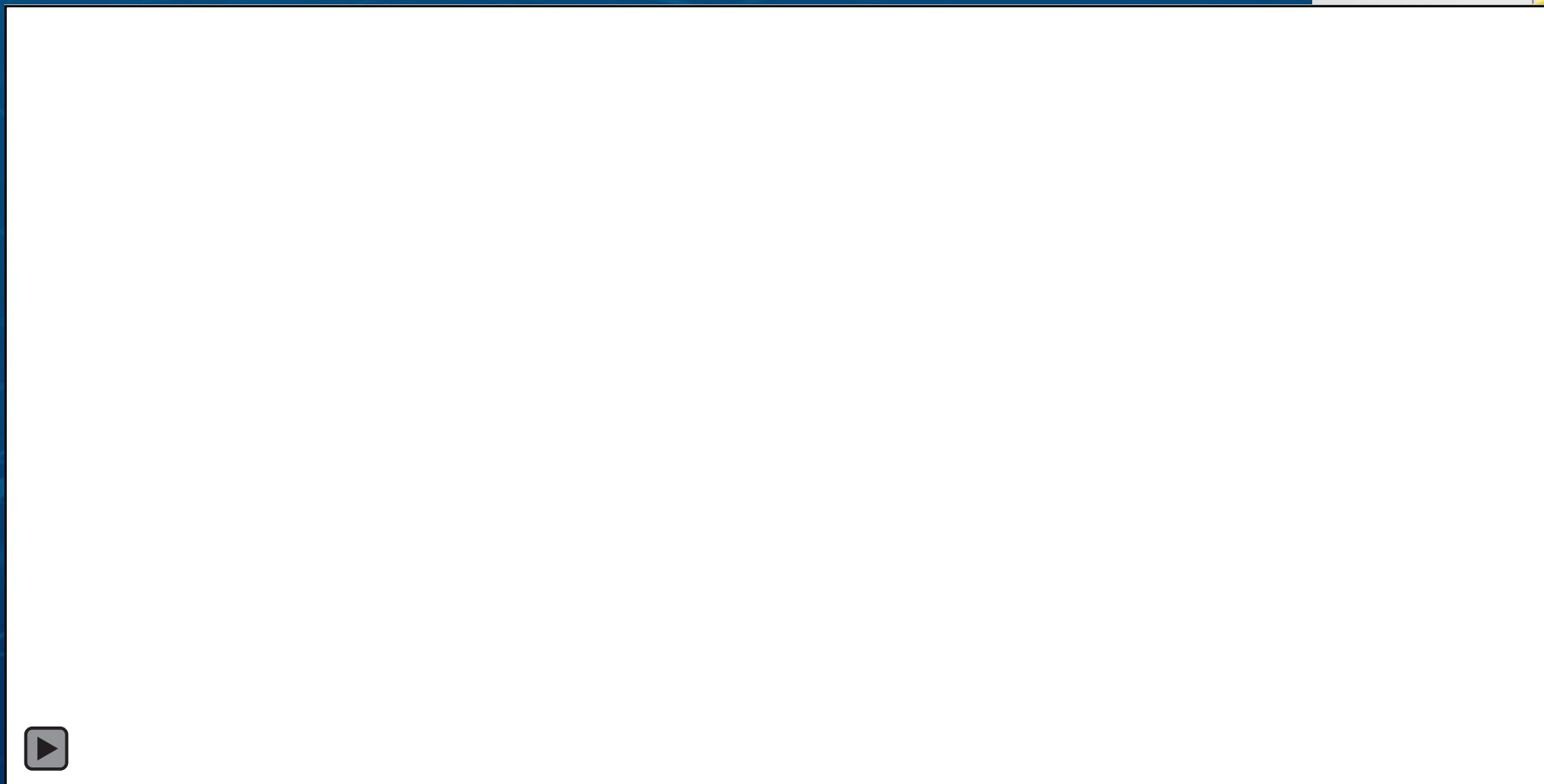
Упрощенная 3D-геометрия



1. Задача синтеза

Динамический синтез

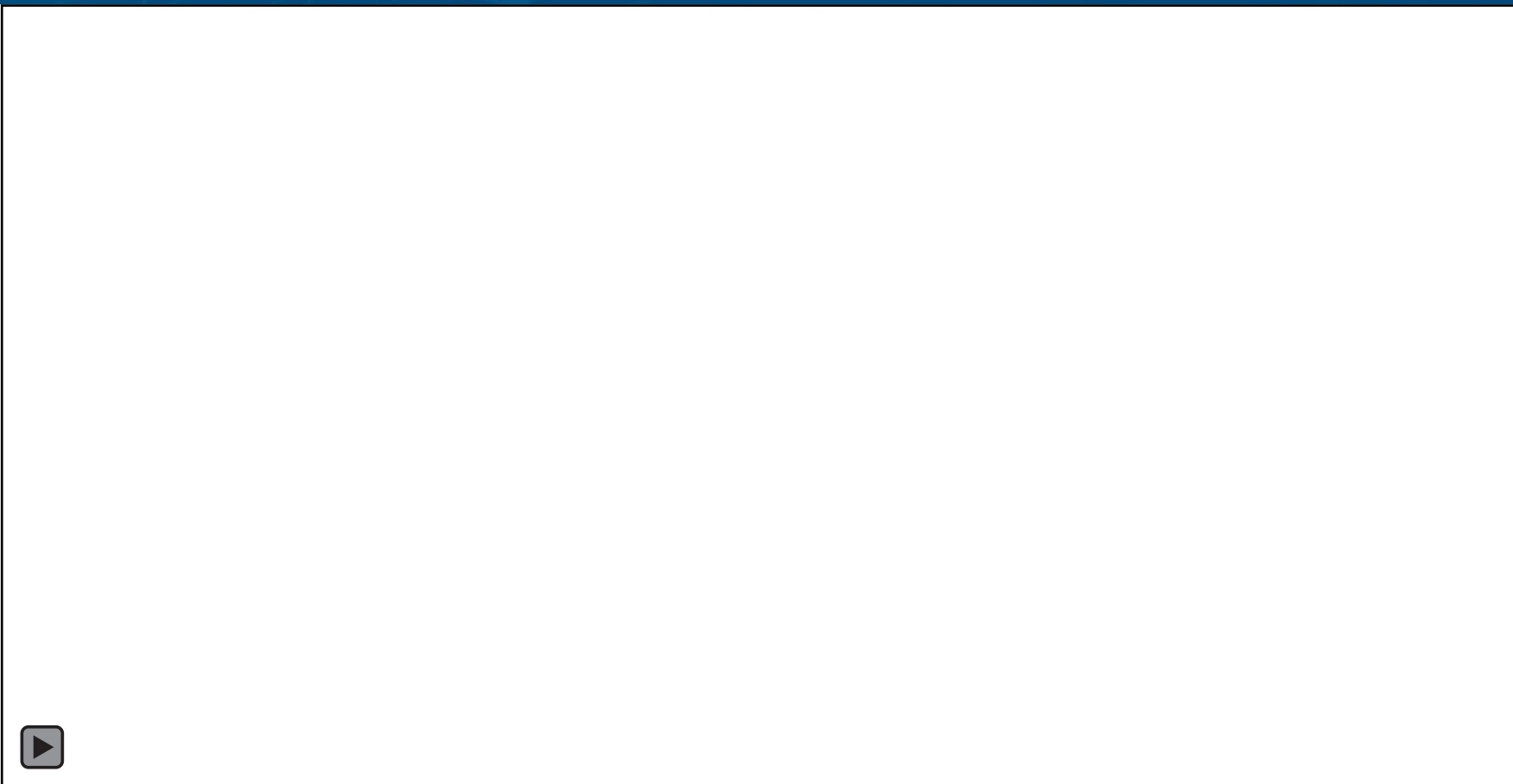
- Определение силовых параметров



2. Задача анализа

Динамический анализ

Определение кинематических и динамических характеристик движения звеньев при заданном законе движения ведущего звена.



Задача

1. Синтез кинематики
2. Анализ кинематики и динамики (упрощенная геометрия)
3. 3D-моделирование, расчёт прочности отдельных звеньев
4. Анализ кинематики и динамики (полноценная геометрия)
5. Анализ кинематики и динамики, расчет прочности и жесткости сборки

Решение

1. T-FLEX CAD, T-FLEX Динамика
2. T-FLEX Динамика
3. T-FLEX CAD T-FLEX Анализ
4. T-FLEX Динамика
5. T-FLEX CAD T-FLEX Динамика T-FLEX Анализ

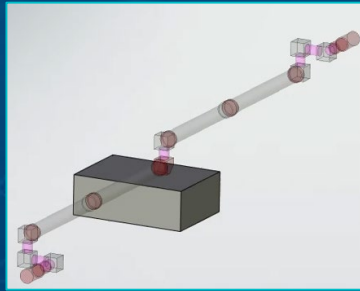
	Концептуальная модель изделия	Модели ДСЕ	Модель изделия
Электронная структура изделия			
Геометрическая модель	2D	3D детали / 3D сбор. единицы	3D сбор. единицы
Статика	+	- / +	+
Кинематика	+	- / +	+
Динамика	+	- / +	+
МКЭ	-	+ / +	+

2. Примеры расчётов

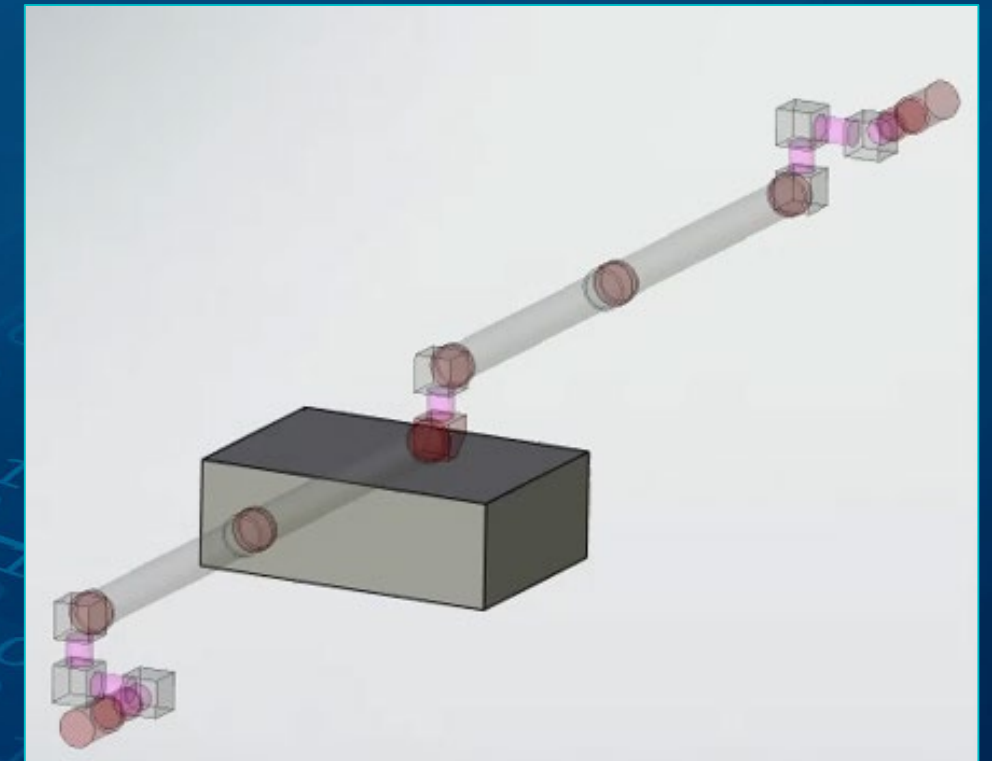
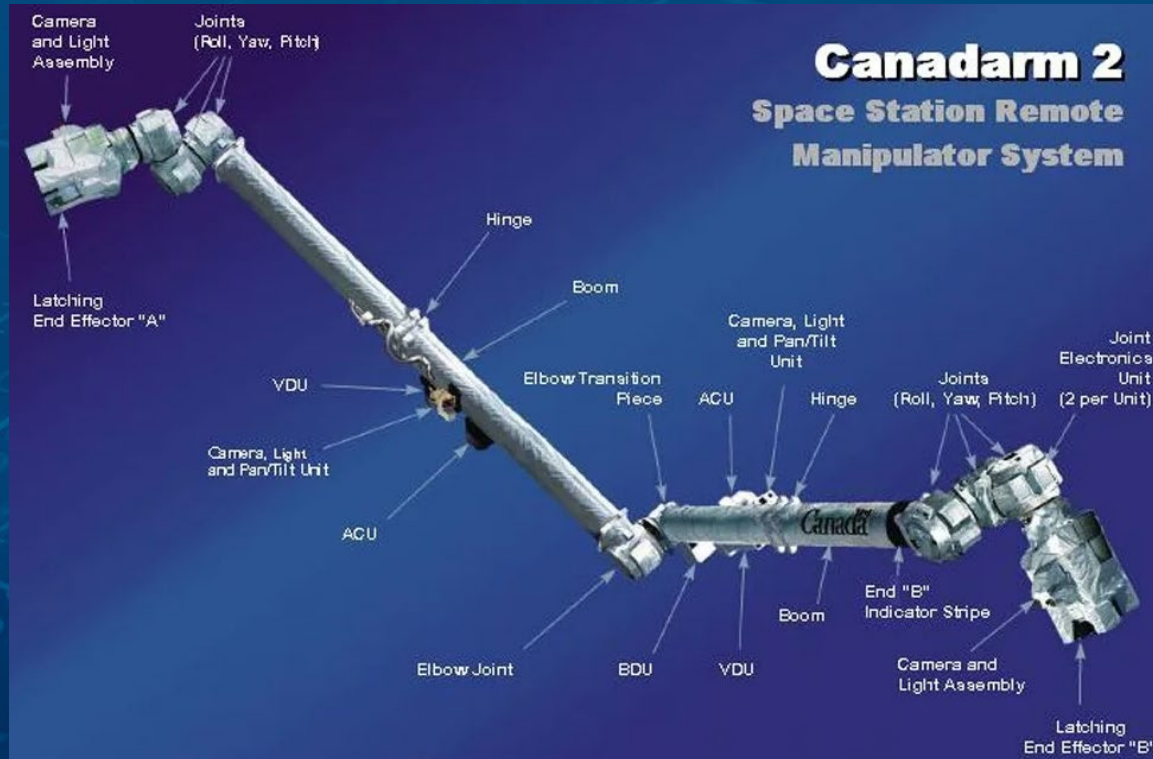
1. Задача синтеза
2. Задача анализа
3. Новые возможности

1. Задача синтеза динамики

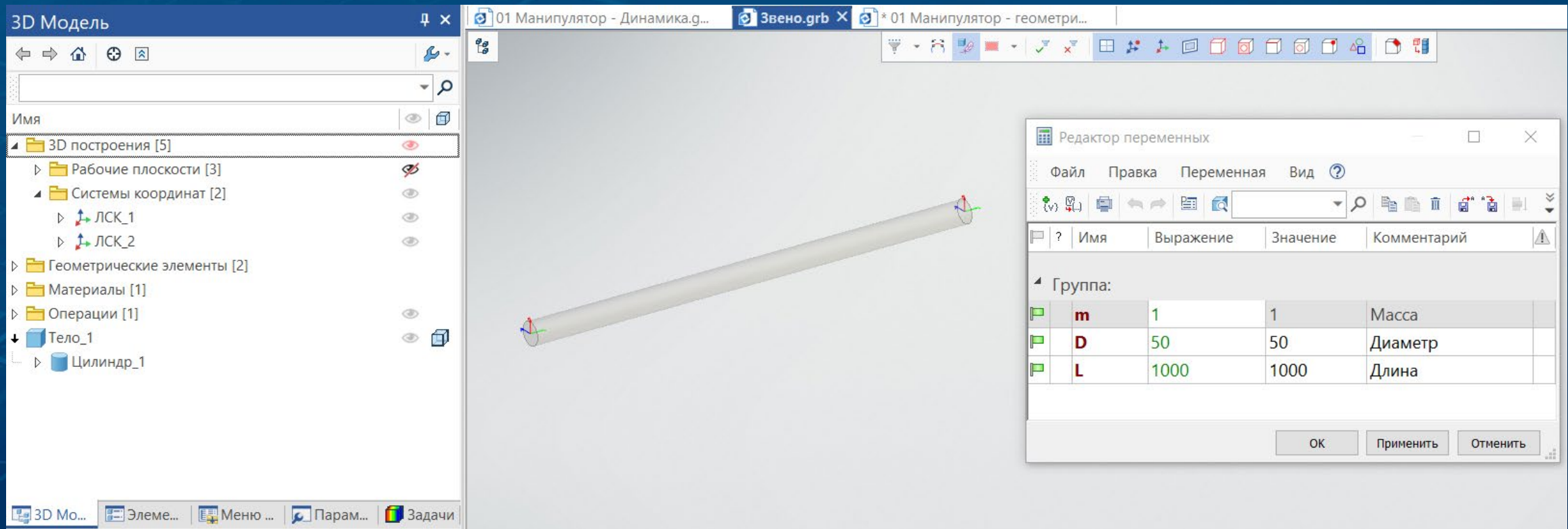
1. Механизм с открытой кинематической цепью – манипулятор.



Механизм с открытой кинематической цепью



Геометрический синтез - CAD

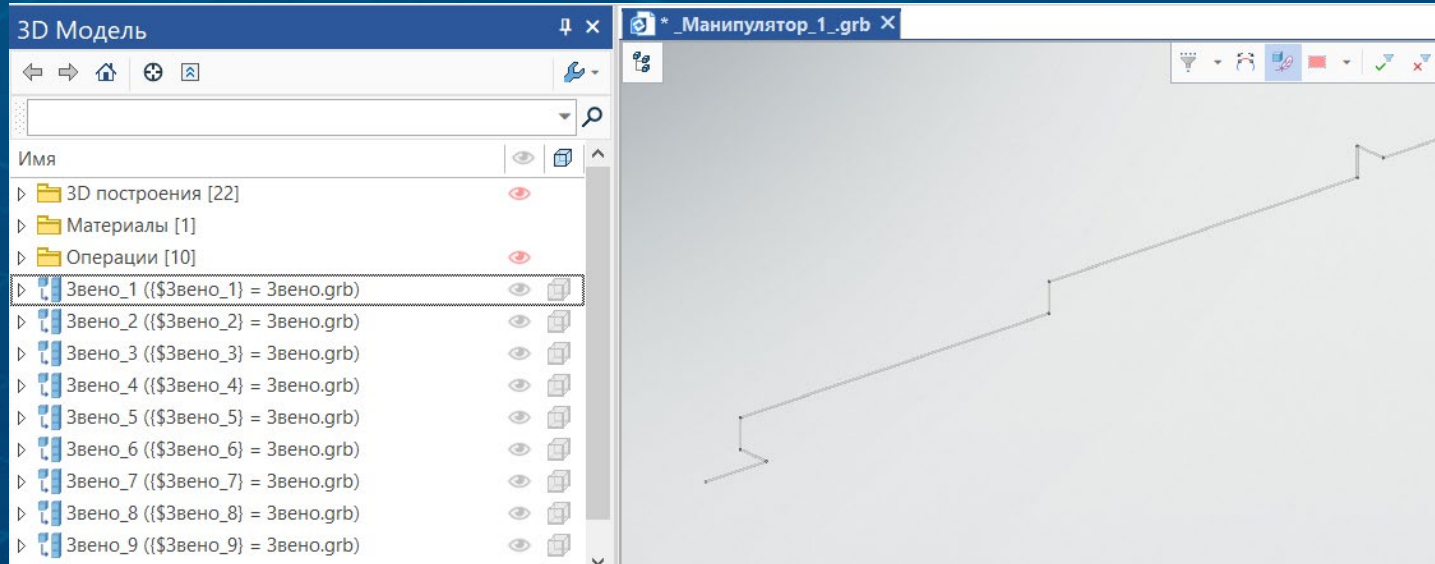


The screenshot displays the T-FLEX CAD interface. On the left, the '3D Модель' (3D Model) tree shows a hierarchy of objects, including '3D построения' (3D Constructions), 'Системы координат' (Coordinate Systems), 'Геометрические элементы' (Geometric Elements), 'Материалы' (Materials), 'Операции' (Operations), and 'Тело_1' (Body_1) which contains a 'Цилиндр_1' (Cylinder_1). The main workspace shows a 3D model of a cylinder with a coordinate system at one end. On the right, the 'Редактор переменных' (Variable Editor) window is open, showing a table of variables:

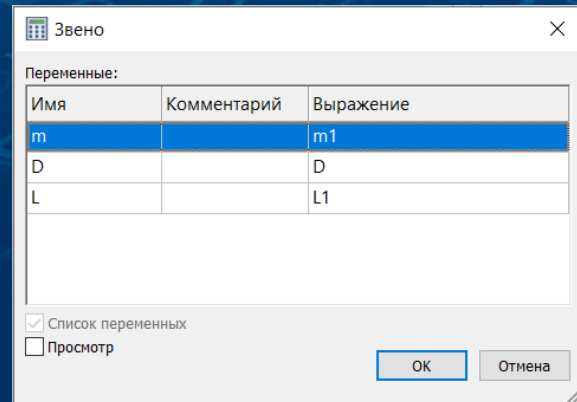
Имя	Выражение	Значение	Комментарий
m	1	1	Масса
D	50	50	Диаметр
L	1000	1000	Длина

Buttons for 'OK', 'Применить' (Apply), and 'Отменить' (Cancel) are visible at the bottom of the variable editor.

Геометрический синтез - CAD

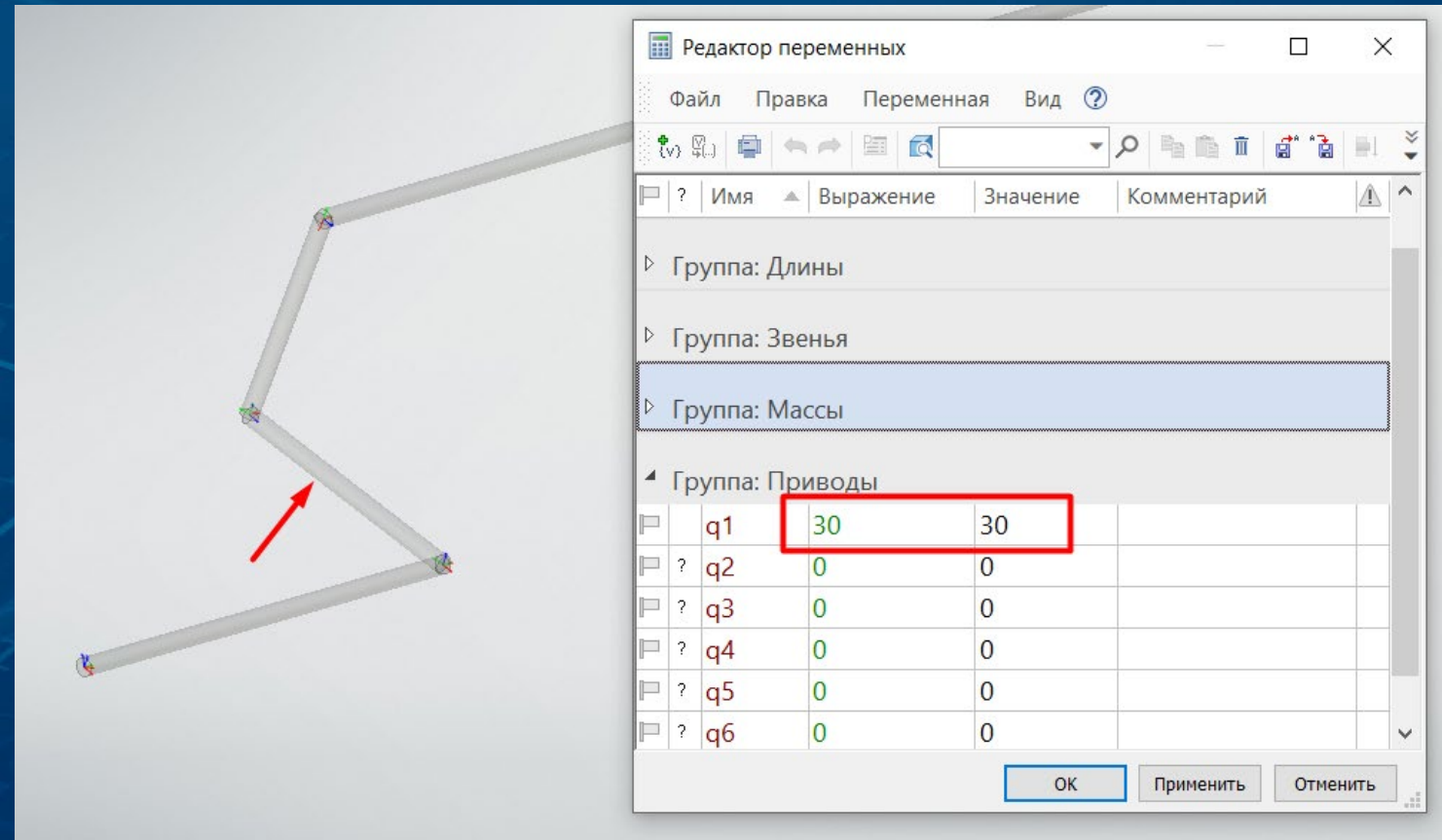
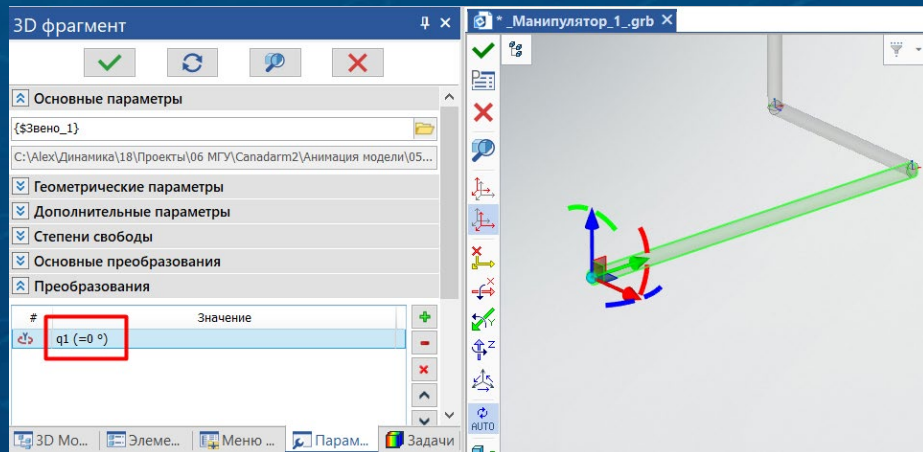


Группа: Длины	
<input type="checkbox"/>	L1
<input type="checkbox"/>	L2
<input type="checkbox"/>	L3
<input type="checkbox"/>	L4
<input type="checkbox"/>	L5
<input type="checkbox"/>	L6
<input type="checkbox"/>	L7
<input type="checkbox"/>	L8
<input type="checkbox"/>	L9

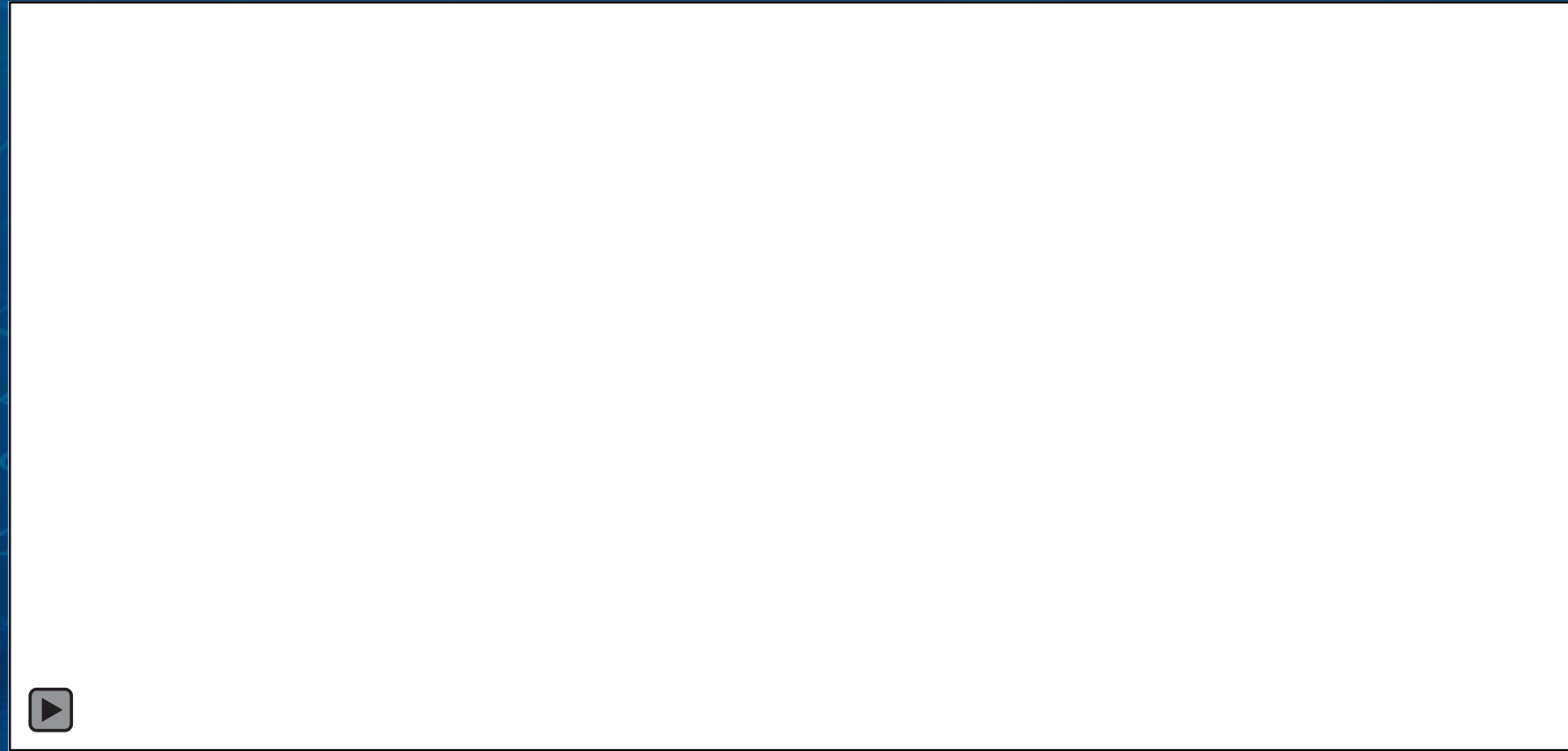
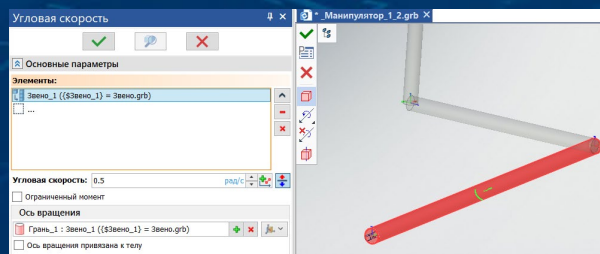
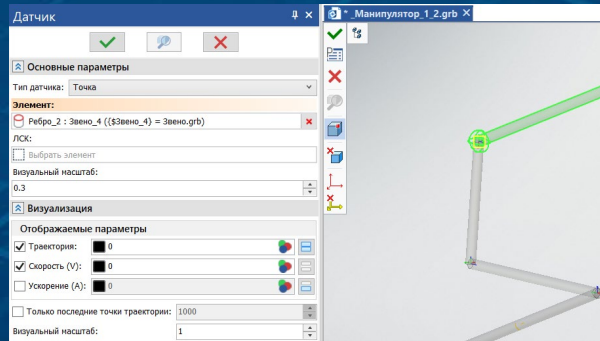
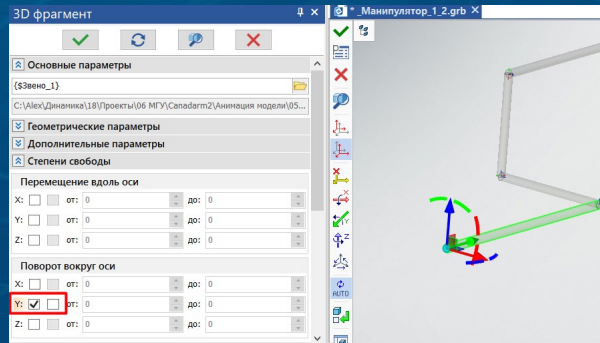


Группа: Звенья			
<input type="checkbox"/>	\$Звено_1	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_2	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_3	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_4	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_5	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_6	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_7	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_8	"Звено.grb"	Звено.grb
<input type="checkbox"/>	\$Звено_9	"Звено.grb"	Звено.grb

Геометрический синтез - CAD



Кинематический синтез – задача «Анализ движения»



T-FLEX Динамика | Примеры – задача синтеза

Пример 1. Манипулятор

Динамический синтез – задача «Анализ движения»

Редактор пер...

Файл Прав...

Имя

Группа: Мас...

П	m1
П	m2
П	m3
П	m4
П	m5
П	m6
П	m7
П	m8
П	m9

Измерить

Элементы: Звено_1 ({\$Звено_1} = Зв...)

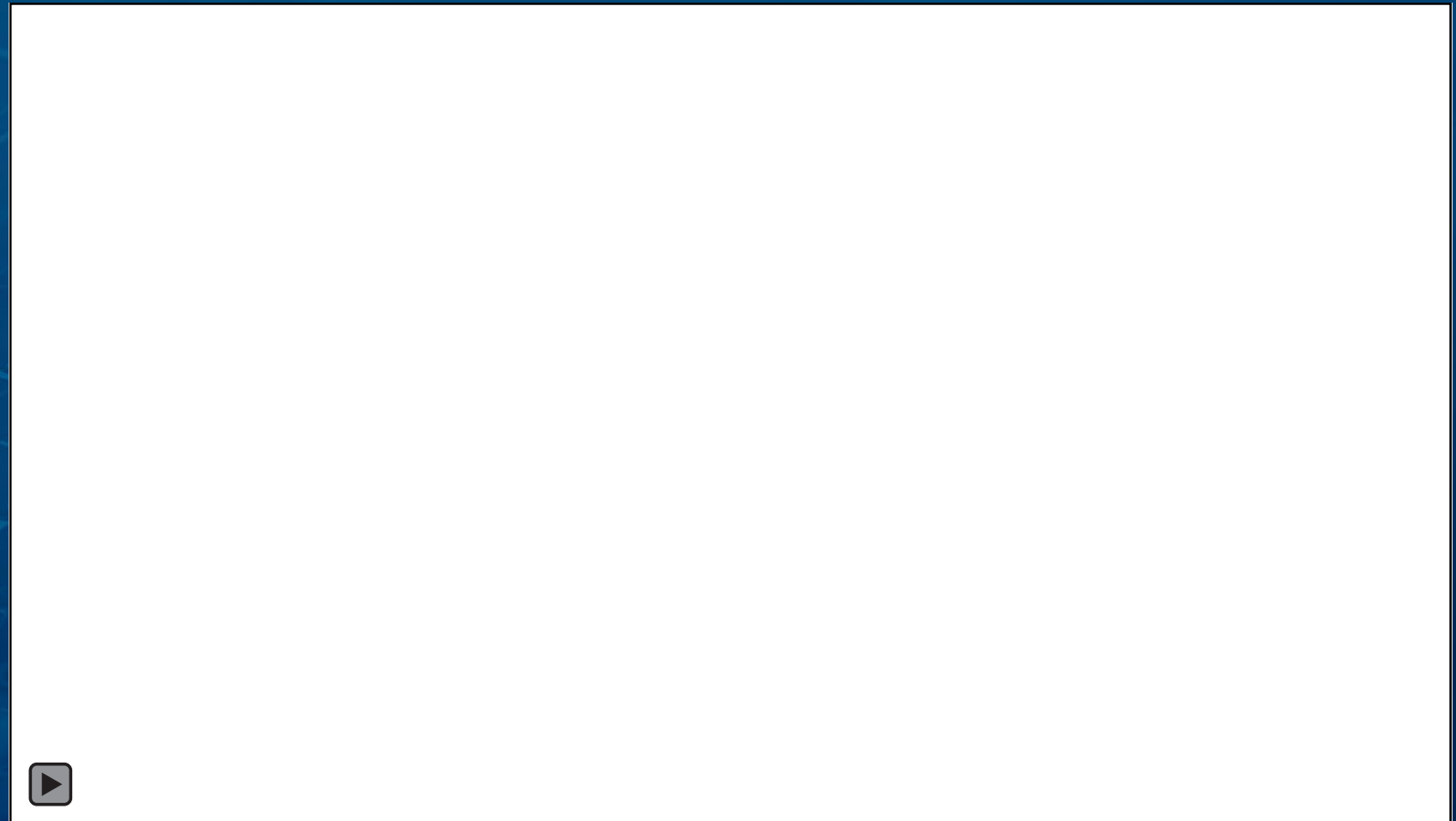
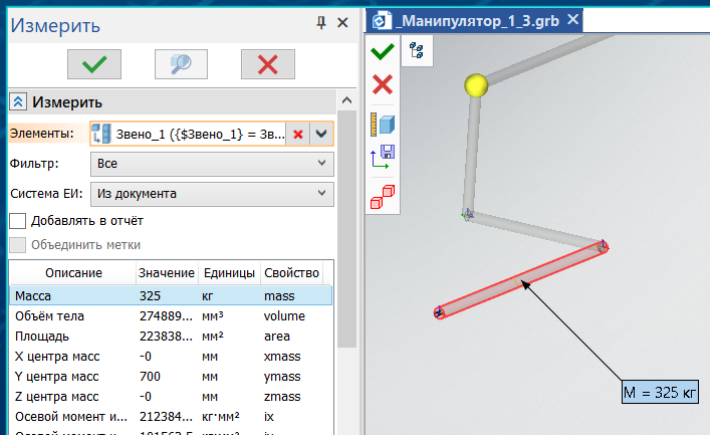
Фильтр: Все

Система ЕИ: Из документа

Добавлять в отчет

Объединить метки

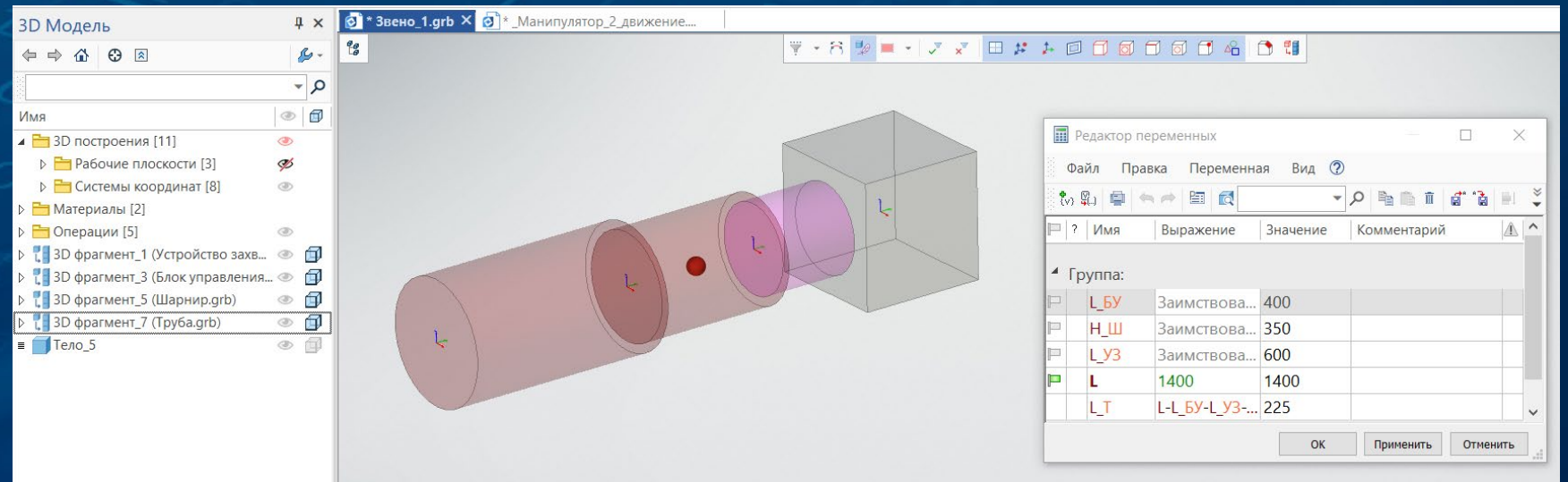
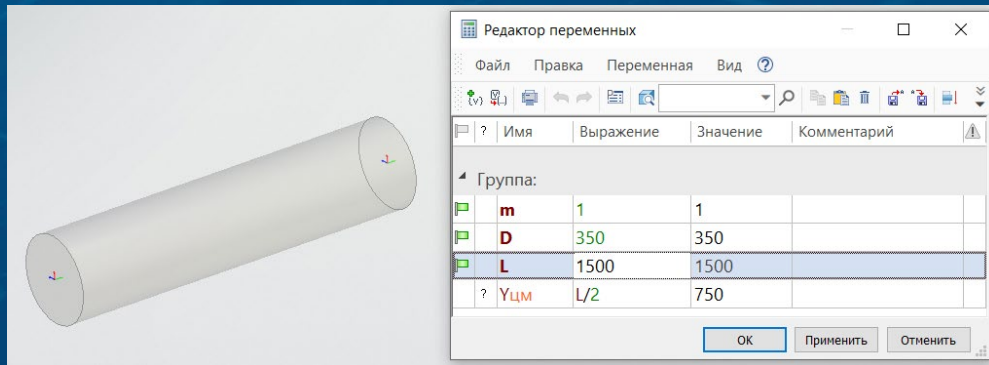
Описание	Значение	Единицы	Свойство
Масса	325	кг	mass
Объем тела	274889...	мм ³	volume
Площадь	223838...	мм ²	area
X центра масс	-0	мм	xmass
Y центра масс	700	мм	ymass
Z центра масс	-0	мм	zmass
Осевой момент и...	212384...	кг*мм ²	ix
Осевой момент и...	101562.5	кг*мм ²	iy



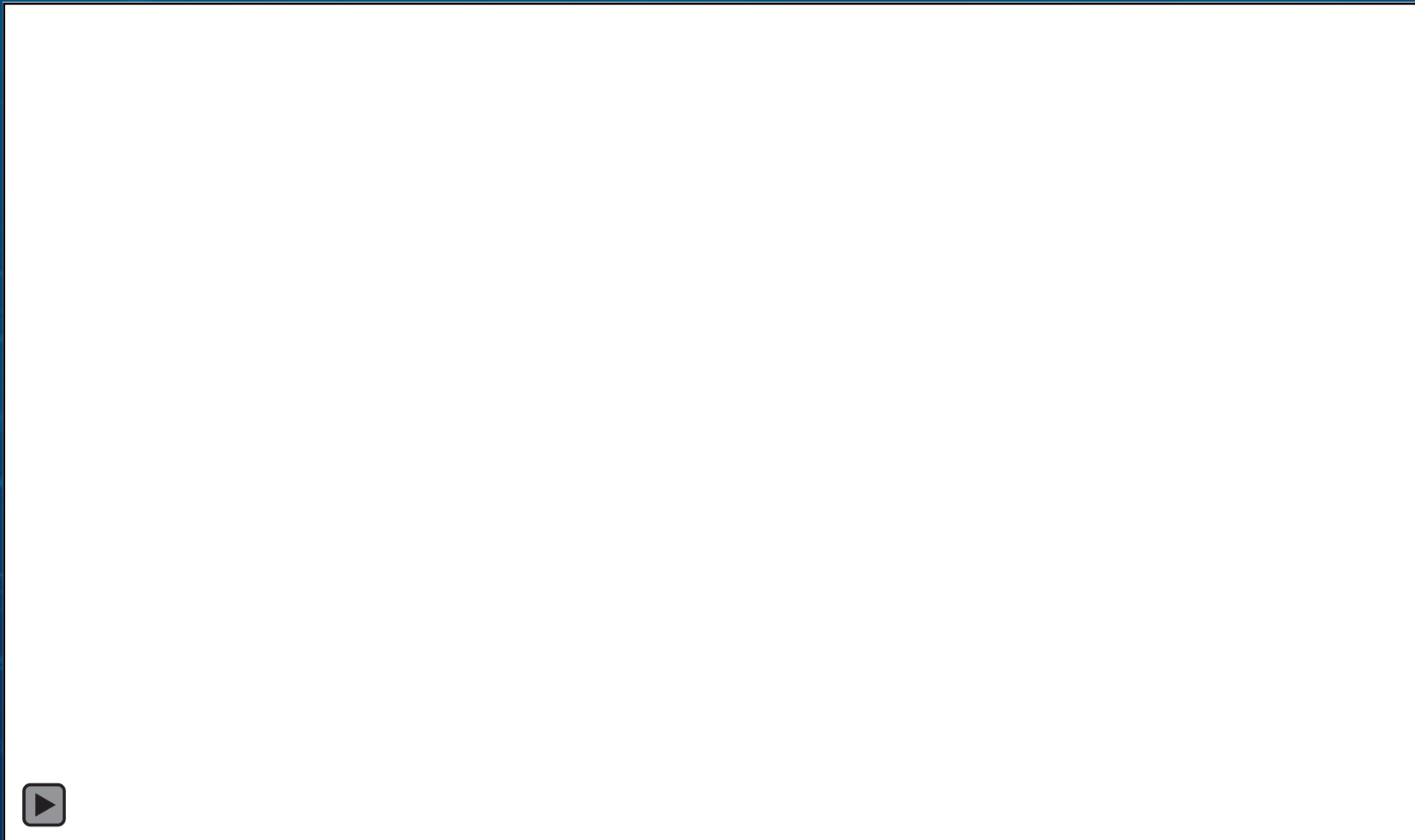
T-FLEX Динамика | Примеры – задача синтеза

Пример 1. Манипулятор

Динамический синтез – ограничивающие объемы

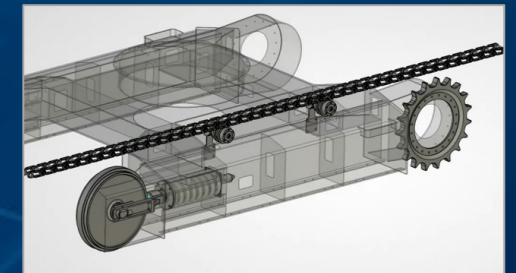
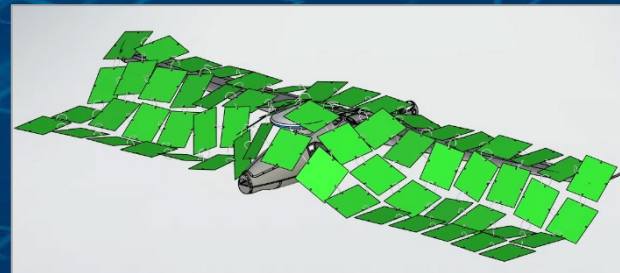
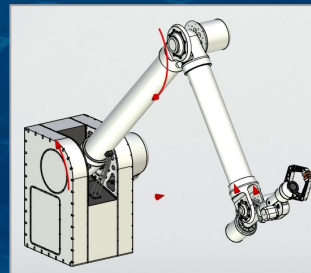
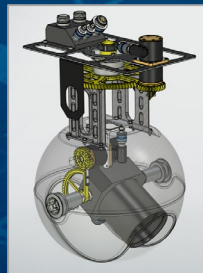
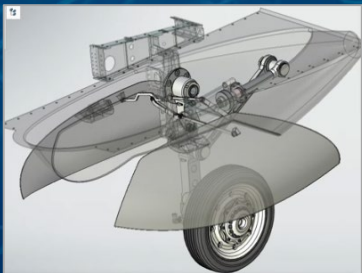


Динамический синтез – ограничивающие объемы - анализ столкновений

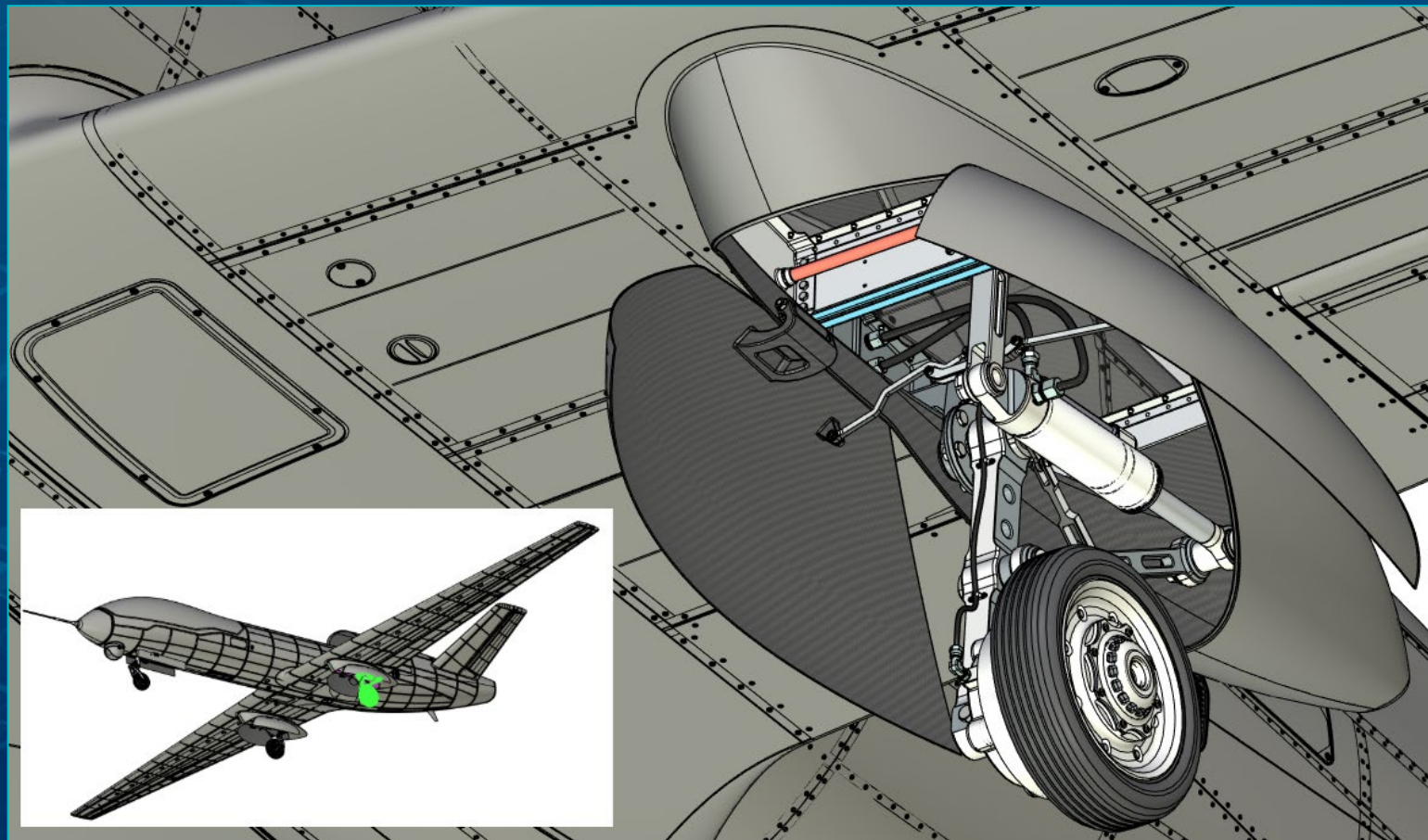


2. Задачи анализа динамики

1. Пространственный рычажный механизм – основная стойка шасси БПЛА.
2. Зубчатый механизм – узел камеры БПЛА.
3. Механизм с открытой кинематической цепью – манипулятор.
4. Свободное движение с учётом контактов – маскировочная сетка.
5. Свободное движение с учётом контактов и шарниров – гусеница.

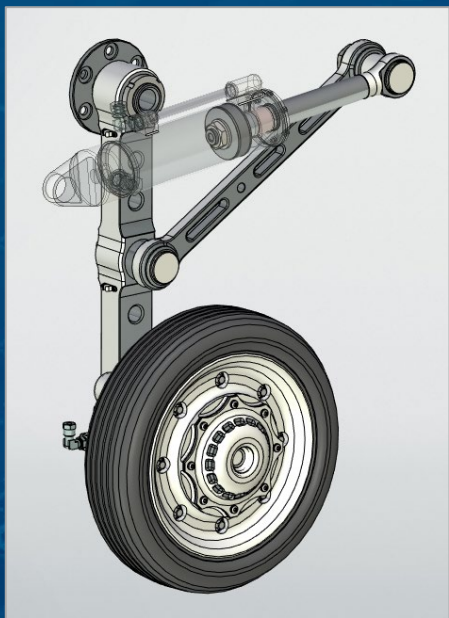


Основная стойка шасси БПЛА

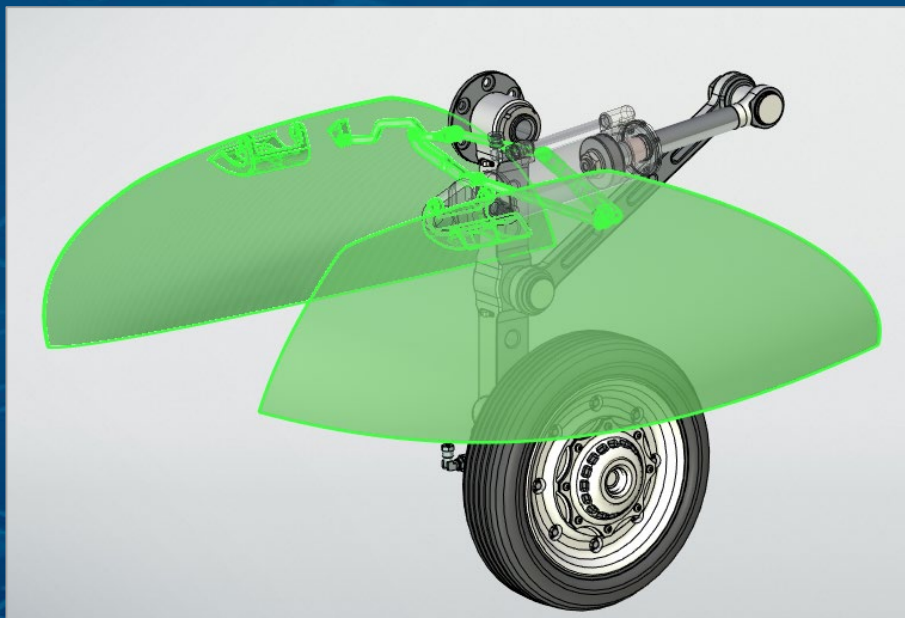


Пример 1. Пространственный рычажный механизм

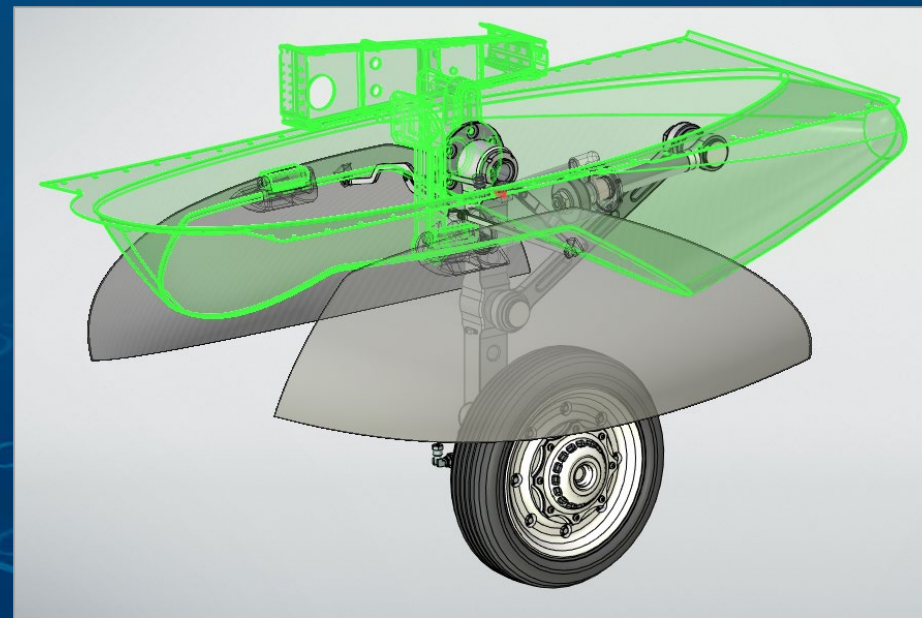
Подготовка сборочной модели для задачи «Анализ движения»



Основной механизм

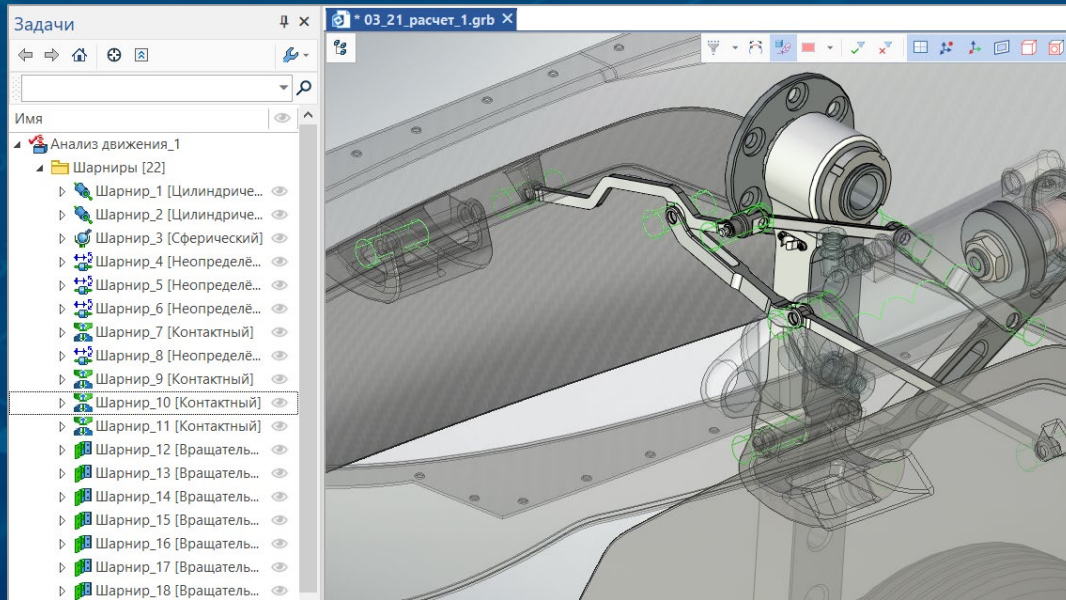


Механизм щитков

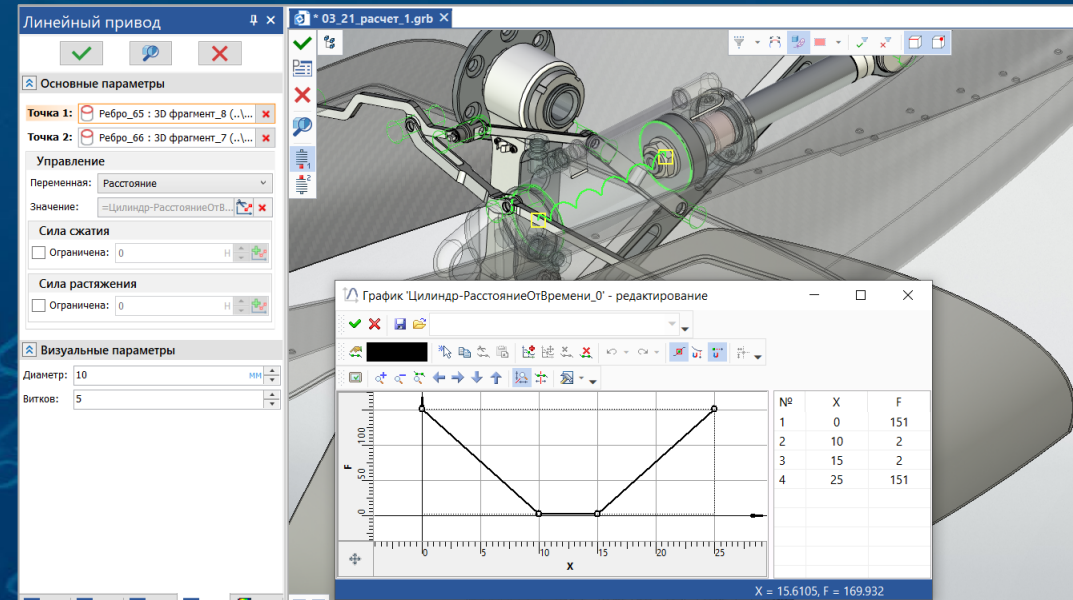


Базовые детали для механизма

Различные виды шарниров

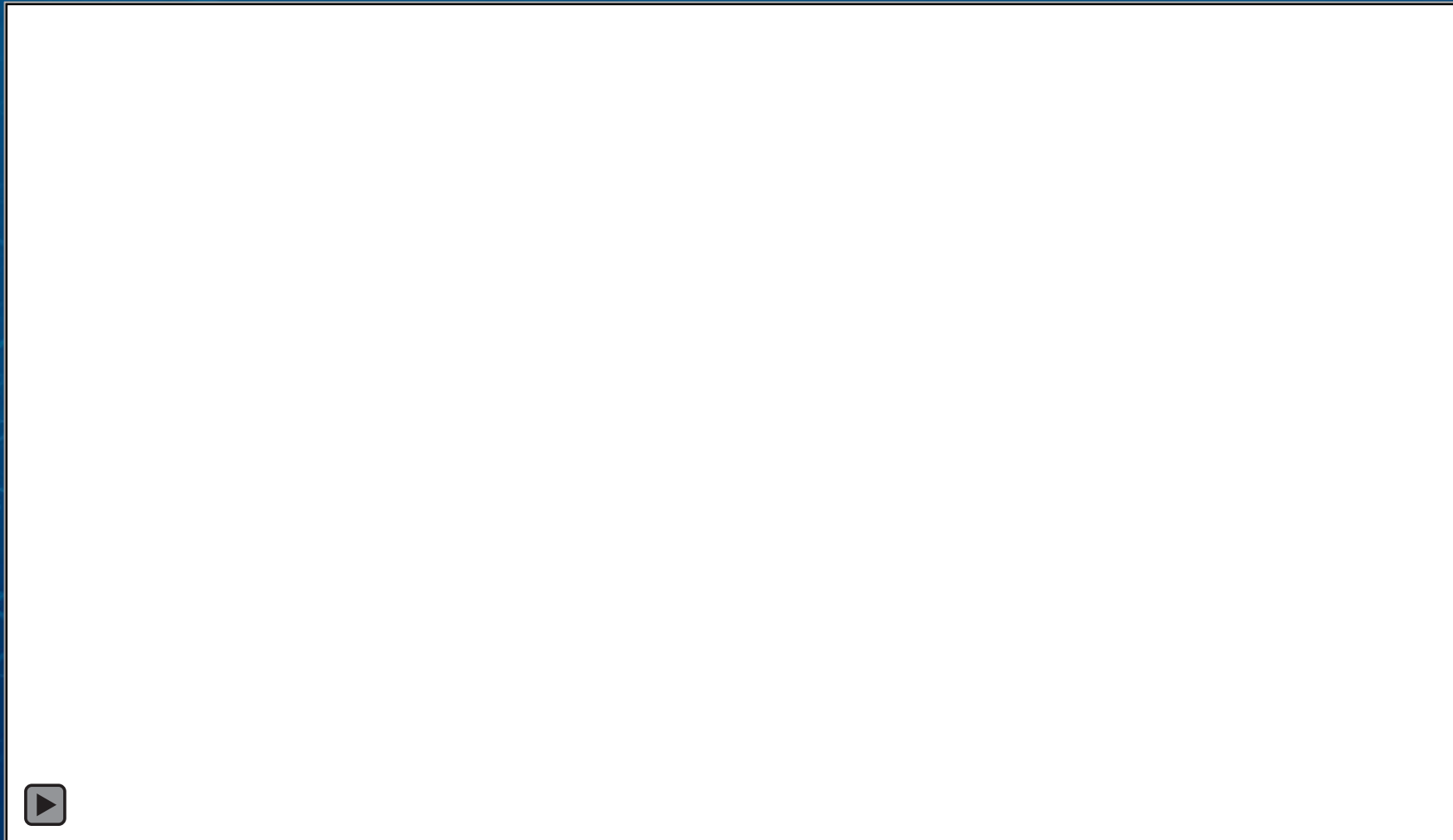


Задание нагружения «Линейный привод» с использованием графика



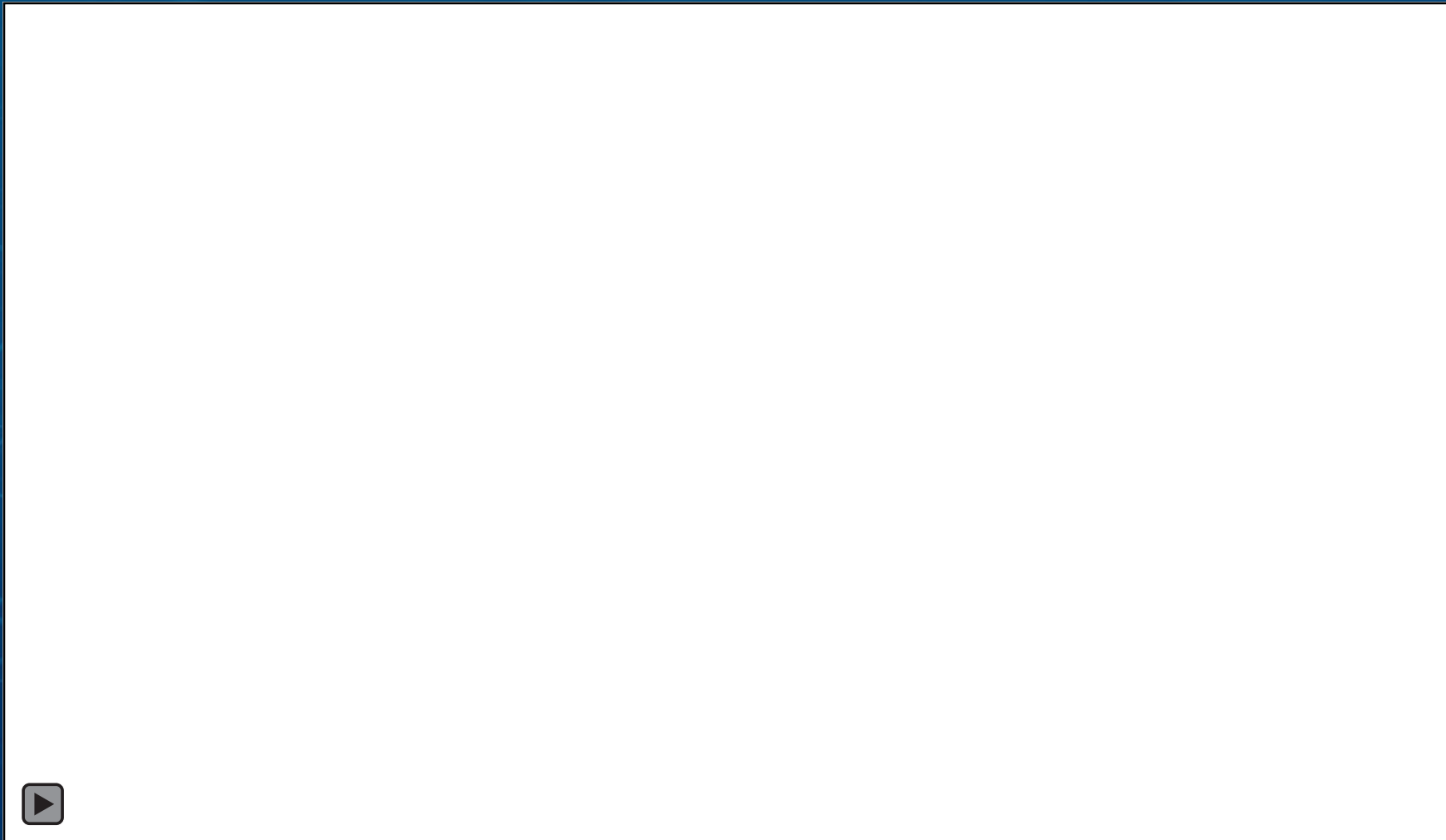
Пример 1. Пространственный рычажный механизм

Кинематические результаты моделирования



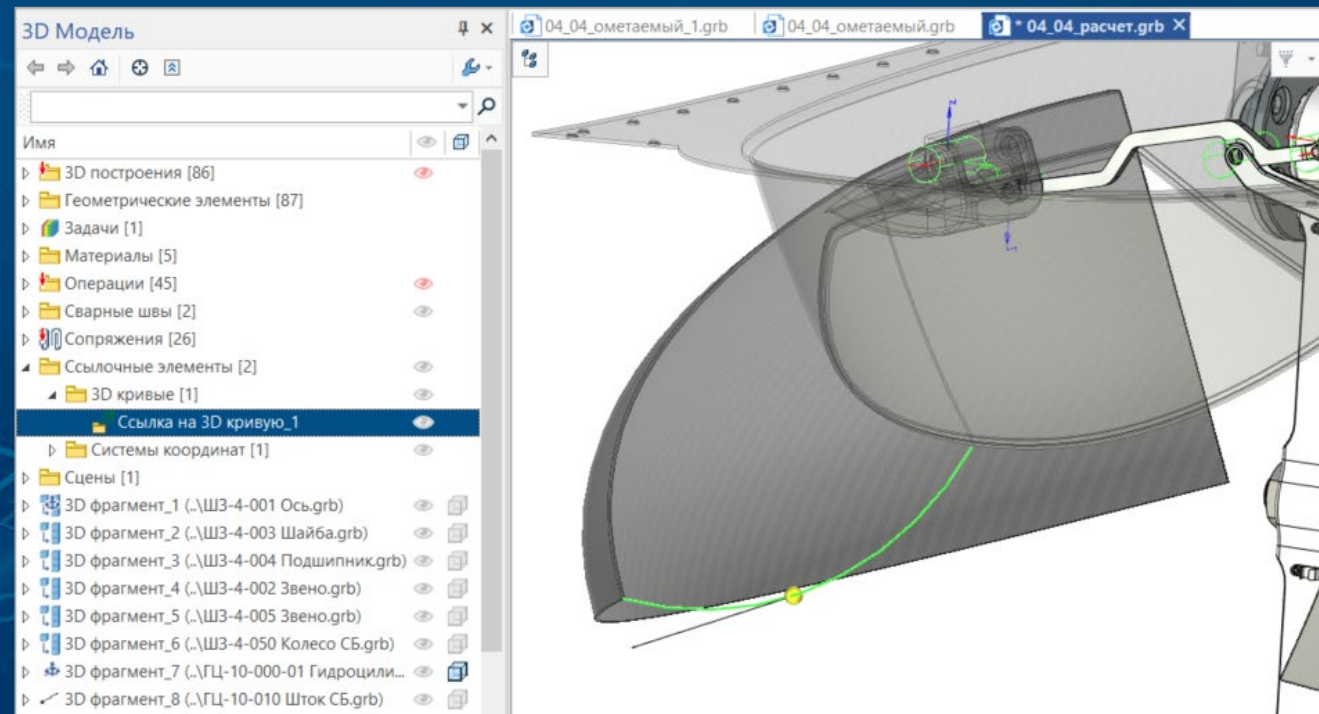
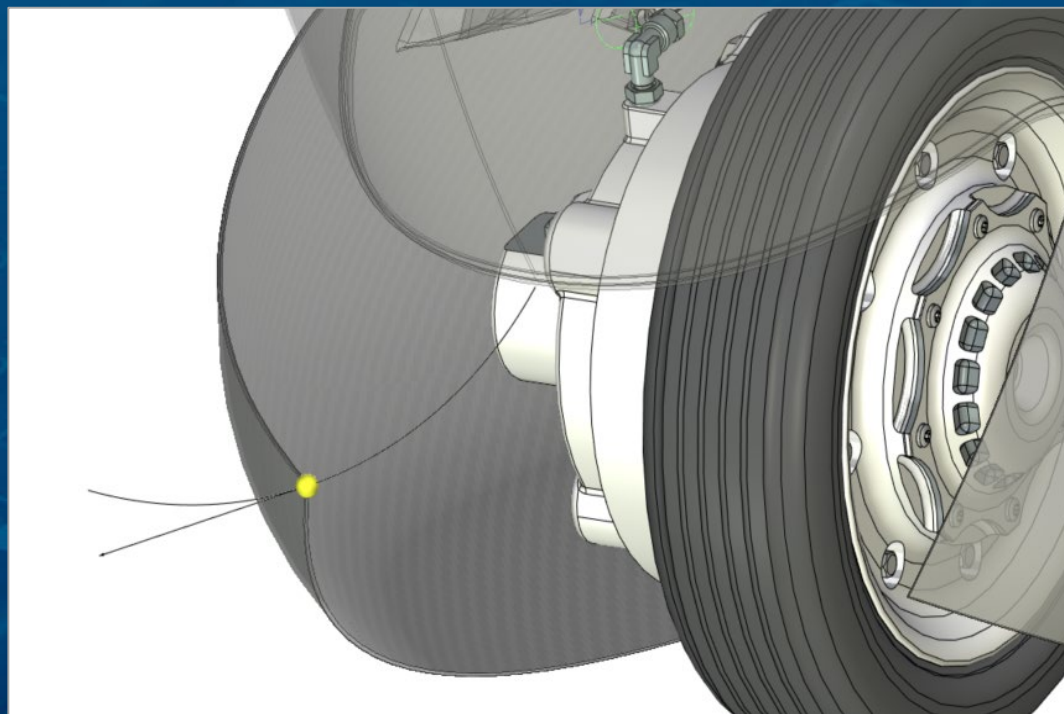
Пример 1. Пространственный рычажный механизм

Динамические результаты моделирования



Пример 1. Пространственный рычажный механизм

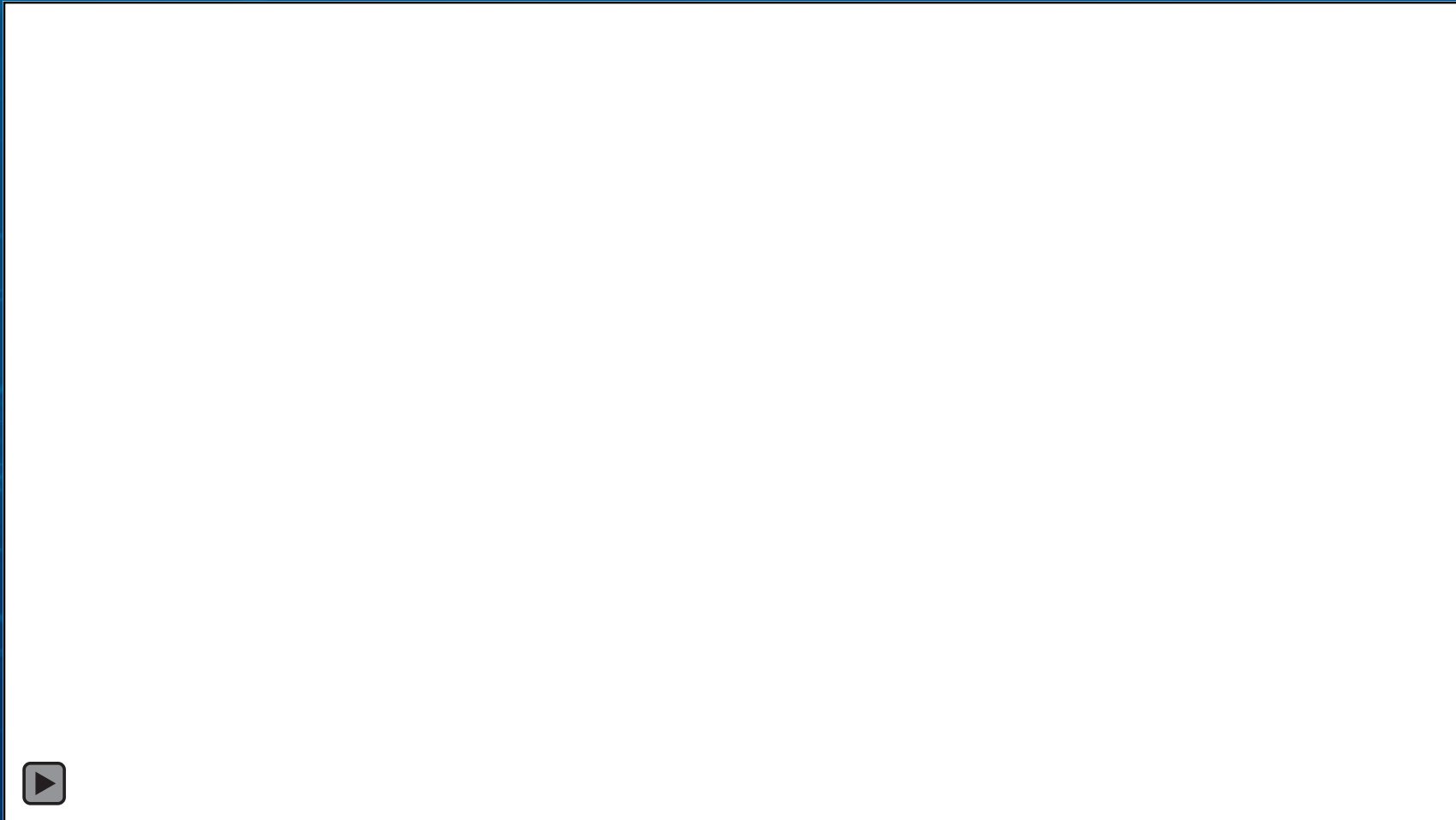
3D кривая, построенная по траектории



T-FLEX Динамика | Примеры – задача анализа

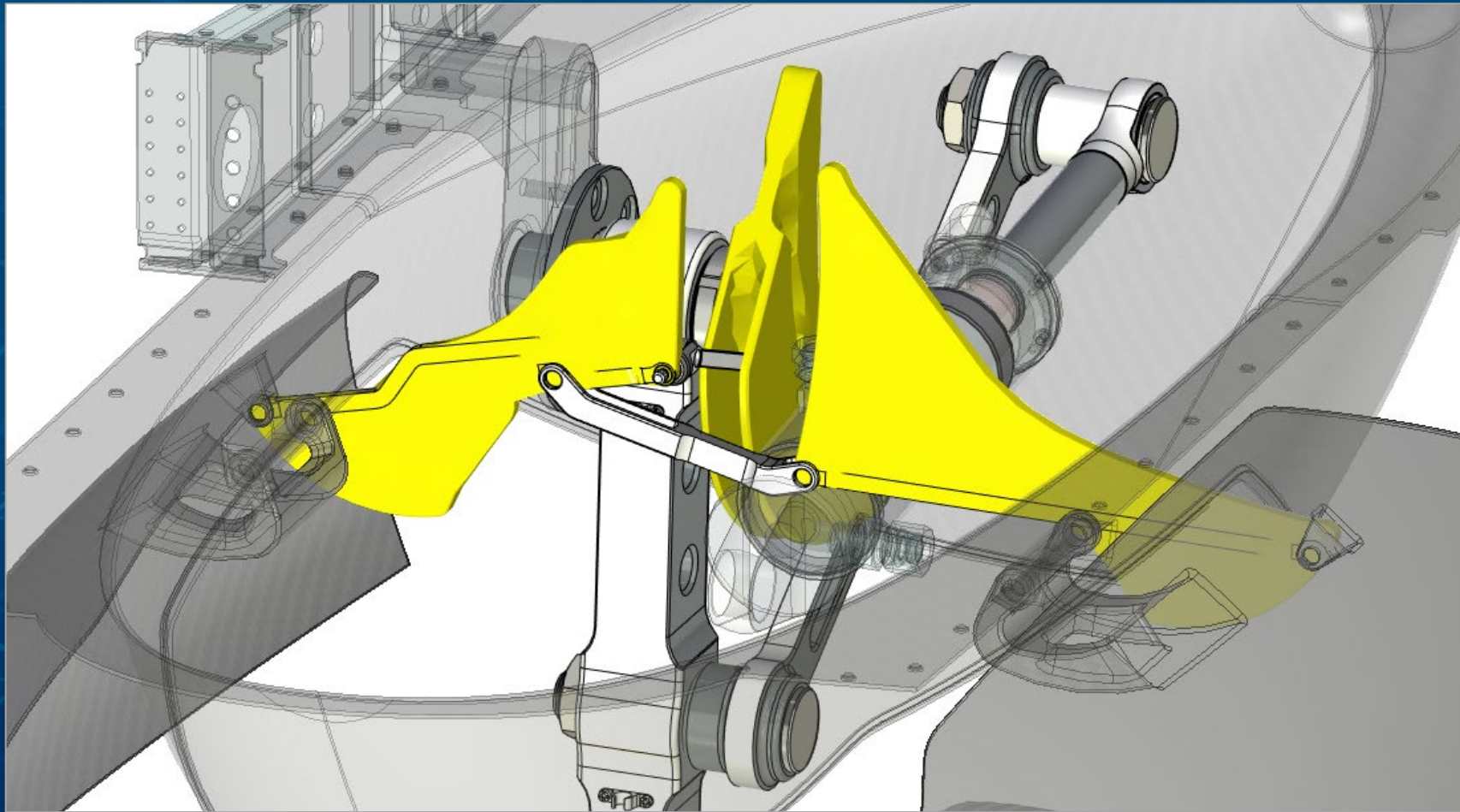
Пример 1. Пространственный рычажный механизм

Ометаемые объёмы звеньев механизма щитков



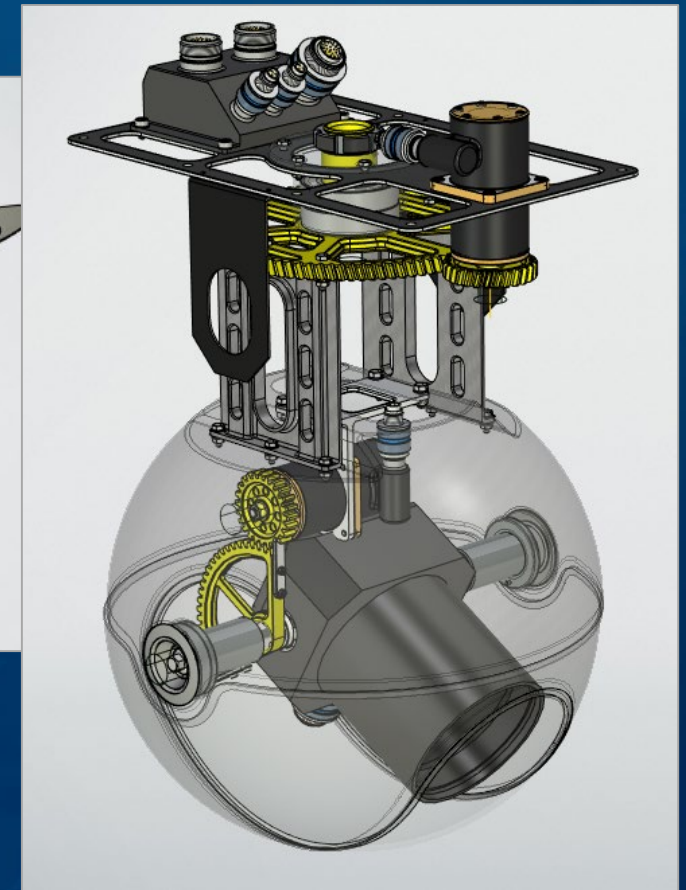
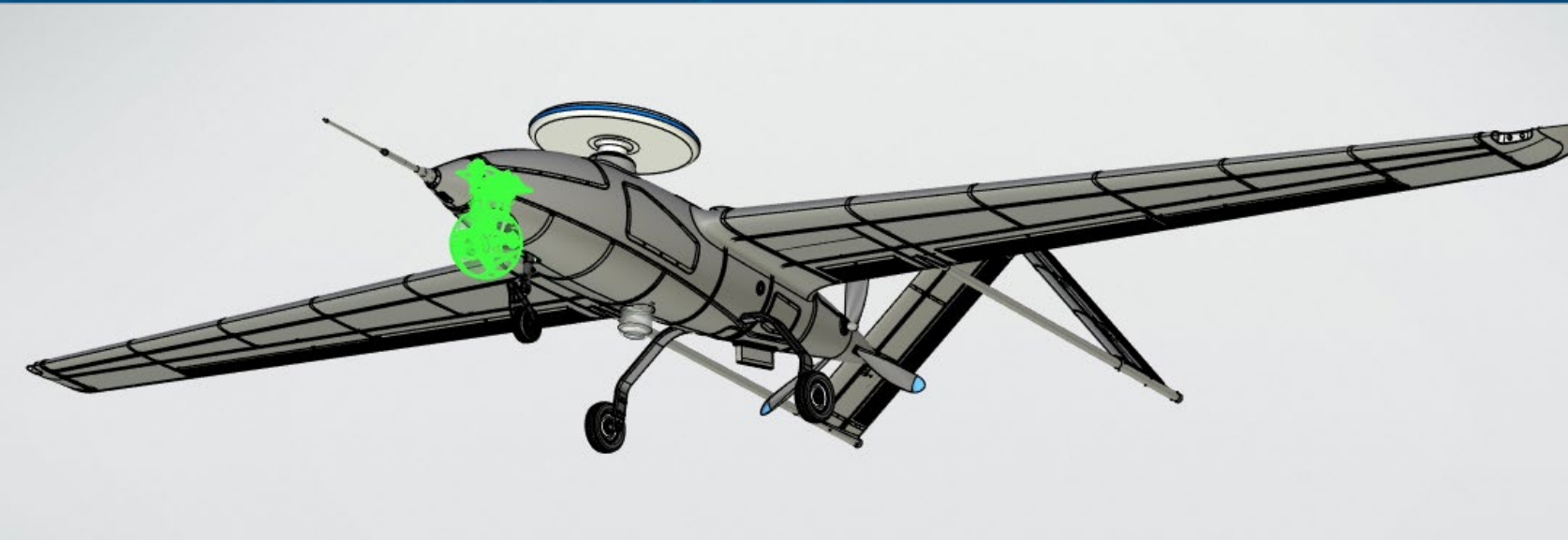
Пример 1. Пространственный рычажный механизм

Ометаемые объёмы звеньев механизма щитков



Пример 2. Зубчатый механизм

Узел камеры БПЛА



T-FLEX Динамика | Примеры – задача анализа

Пример 2. Зубчатый механизм

Нагружение «Вращение» по графику

Сопряжение

Параметры сопряжения

Первый элемент:
3D фрагмент_9: Ребро_105 [Нормаль к п...]

Второй элемент:
3D фрагмент_83: Грань_19 [Ось поверх...]

Совпадение
 Параллельность
 Перпендикулярность
 Касание
 Соосность
 Расстояние: [] : []
 Угол: [] : []
 Соединение
- Передача
 Колёса (угловые скорости)
Отношение: 21 : 60
 Учитывать линейные скорости
 Винт (колесо - рейка)
Шаг на 1 оборот: []
 Отношение линейных скоростей
Значение: []

Ограниченный момент

Ось вращения
Грань_19 : 3D фрагмент_83 (...)
 Ось вращения привязана к телу

Анализ движения_1

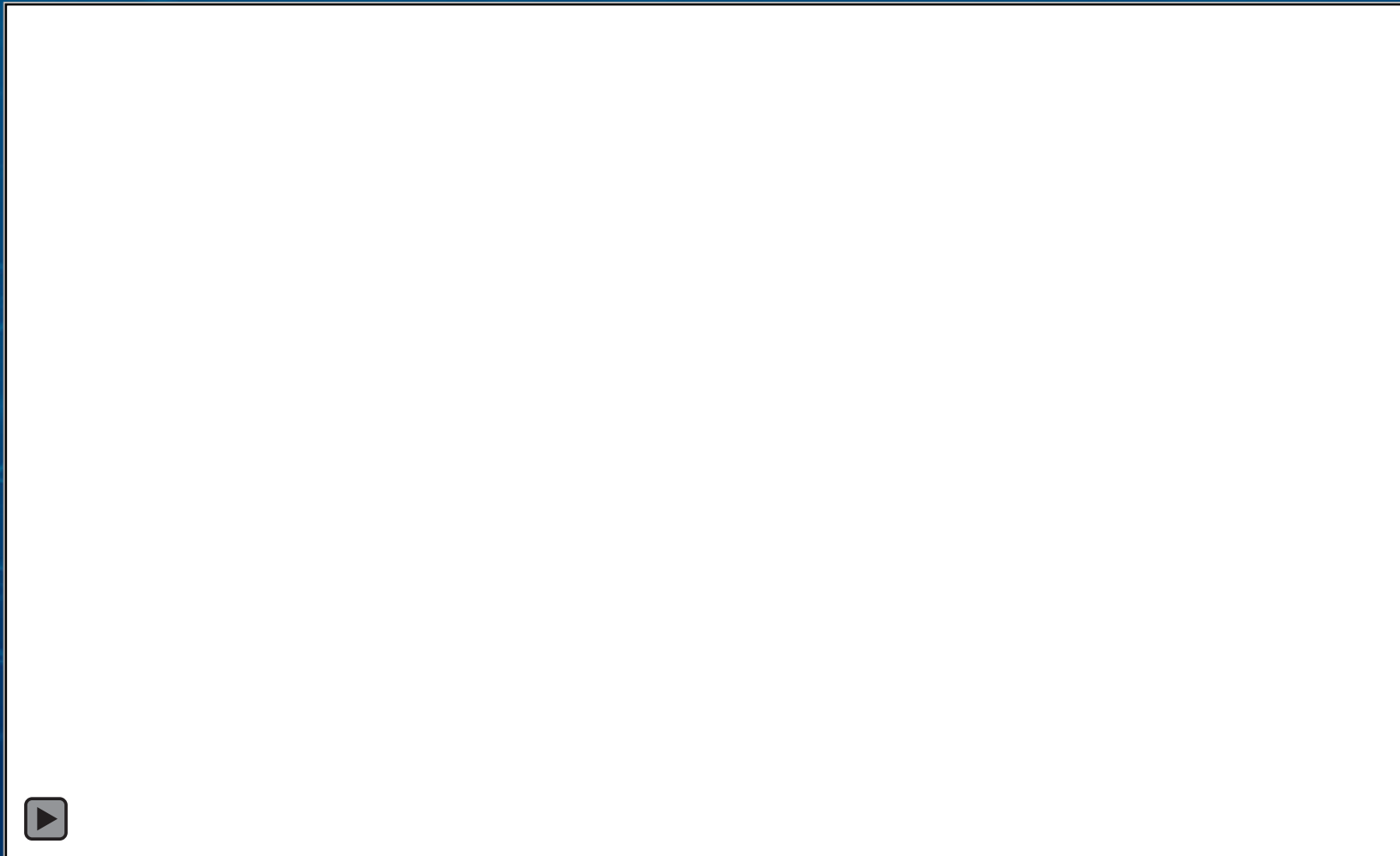
- Шарниры [6]
 - Шарнир_7 [Неопределённый]
 - 3D фрагмент_3 (...)
 - 3D фрагмент_5 (...)
 - Сопряжение_143 [Колёса (уг...)]
 - Шарнир_8 [Неопределённый]
 - Шарнир_9 [Вращательный]
 - Шарнир_10 [Вращательный]
 - Шарнир_11 [Вращательный]
 - Шарнир_12 [Вращательный]

График 'График 2' - редактирование

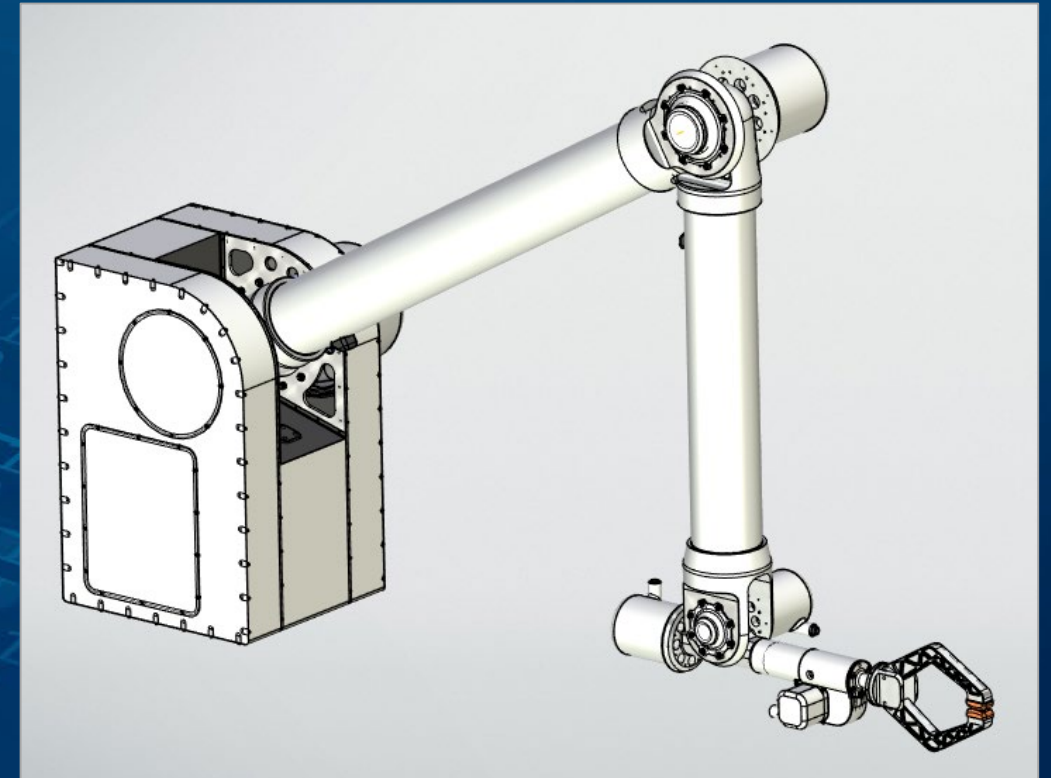
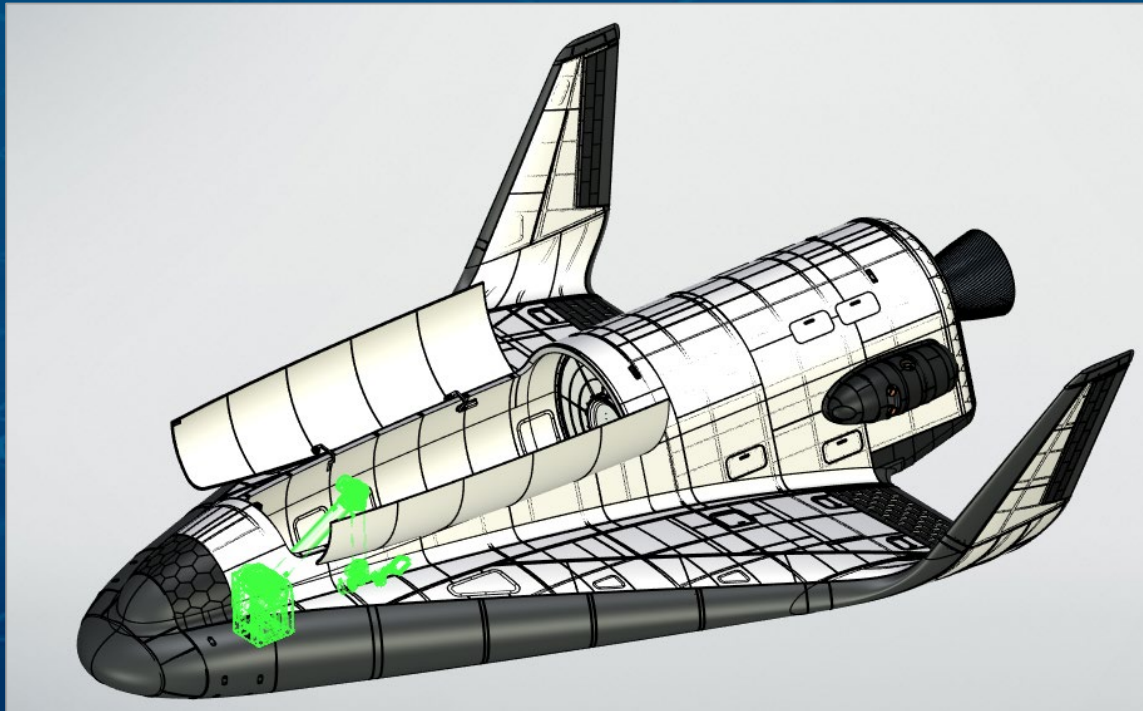
№	c	F
1	0	0
2	1	-0.1
3	10	-0.1
4	13	0.1
5	21	0.1
6	21.1	0
7	28	0
8	29	-0.1
9	35	-0.1
10	37	0.1
11	43	0.1

Полиния, узлов: 13
c = -13.4737, F = -0.0765254

Результаты моделирования в контексте сборки



Манипулятор



Пример 3. Механизм с открытой кинематической цепью

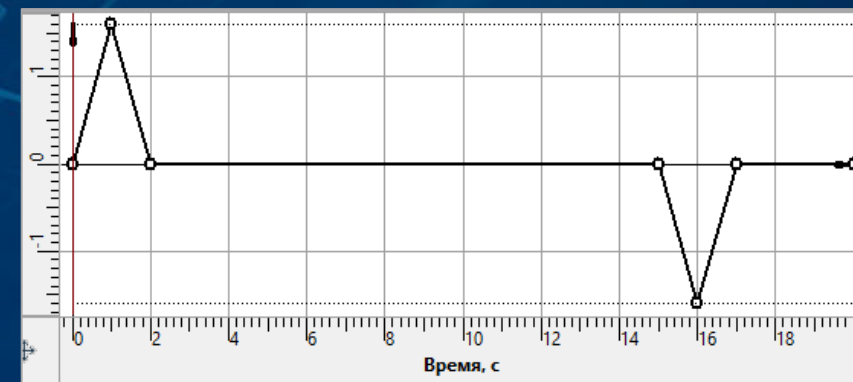
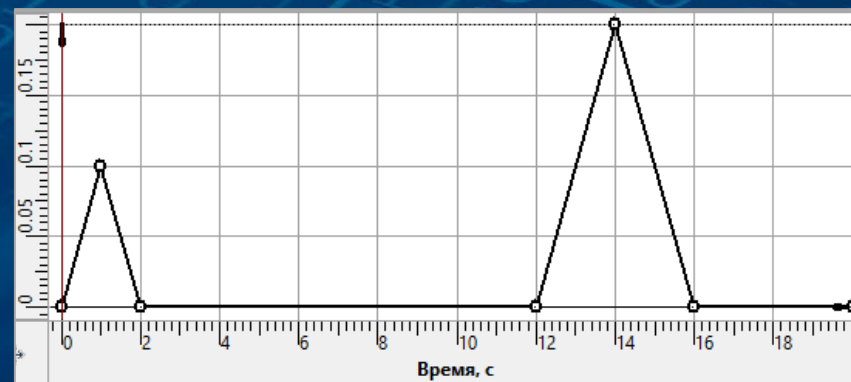
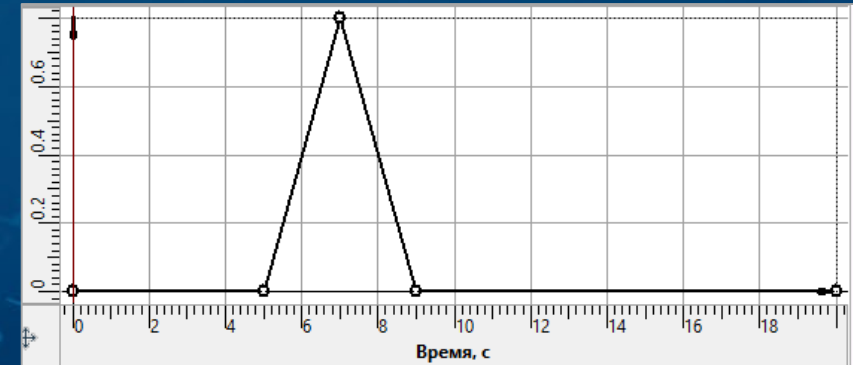
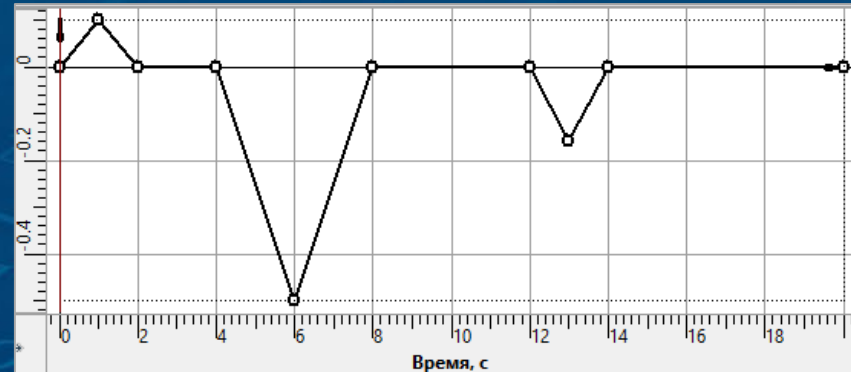
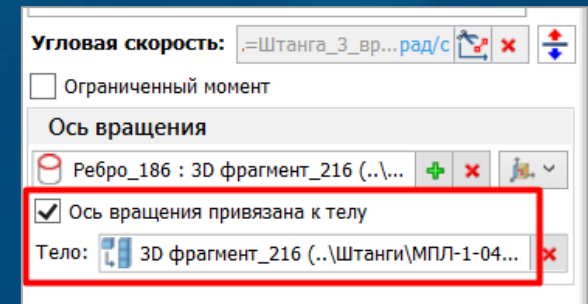
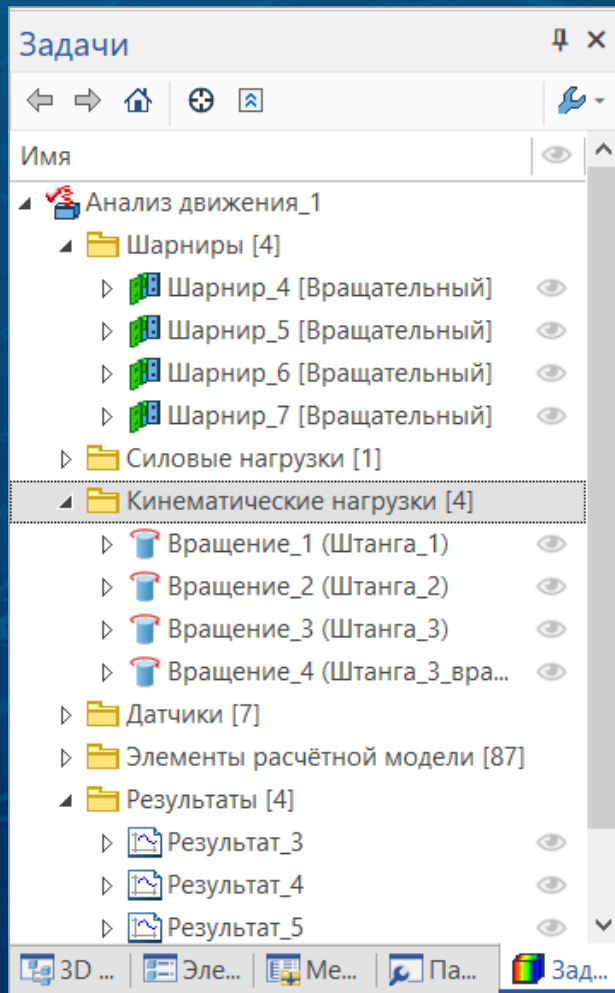
Шарниры

The screenshot displays the T-FLEX Dynamics software interface for a dynamic analysis of a robotic arm mechanism. The main 3D view shows a white robotic arm assembly with a green highlight on a joint. The interface includes several windows:

- 3D фрагмент:** A window on the left showing the 3D model and its parameters. It includes sections for "Основные параметры" (Basic parameters), "Геометрические параметры" (Geometric parameters), "Дополнительные параметры" (Additional parameters), and "Степени свободы" (Degrees of freedom). Under "Степени свободы", the "Повернуть вокруг оси" (Rotate around axis) section has the Y-axis rotation checked.
- Задачи (Tasks):** A central window listing the analysis tasks. It shows a folder "Анализ движения_1" (Motion analysis_1) containing:
 - Шарниры [4] (Joints [4]): Шарнир_4 [Вращательный] (Revolute joint), Шарнир_5 [Вращательный] (Revolute joint), Шарнир_6 [Вращательный] (Revolute joint), Шарнир_7 [Вращательный] (Revolute joint).
 - Силовые нагрузки [1] (Force loads [1])
 - Кинематические нагрузки [4] (Kinematic loads [4])
 - Датчики [7] (Sensors [7])
 - Элементы расчётной модели [...]
 - Результаты [4] (Results [4])
- 3D View:** The main window on the right shows the 3D model of the robotic arm assembly, including the base, the main arm, and the end effector.

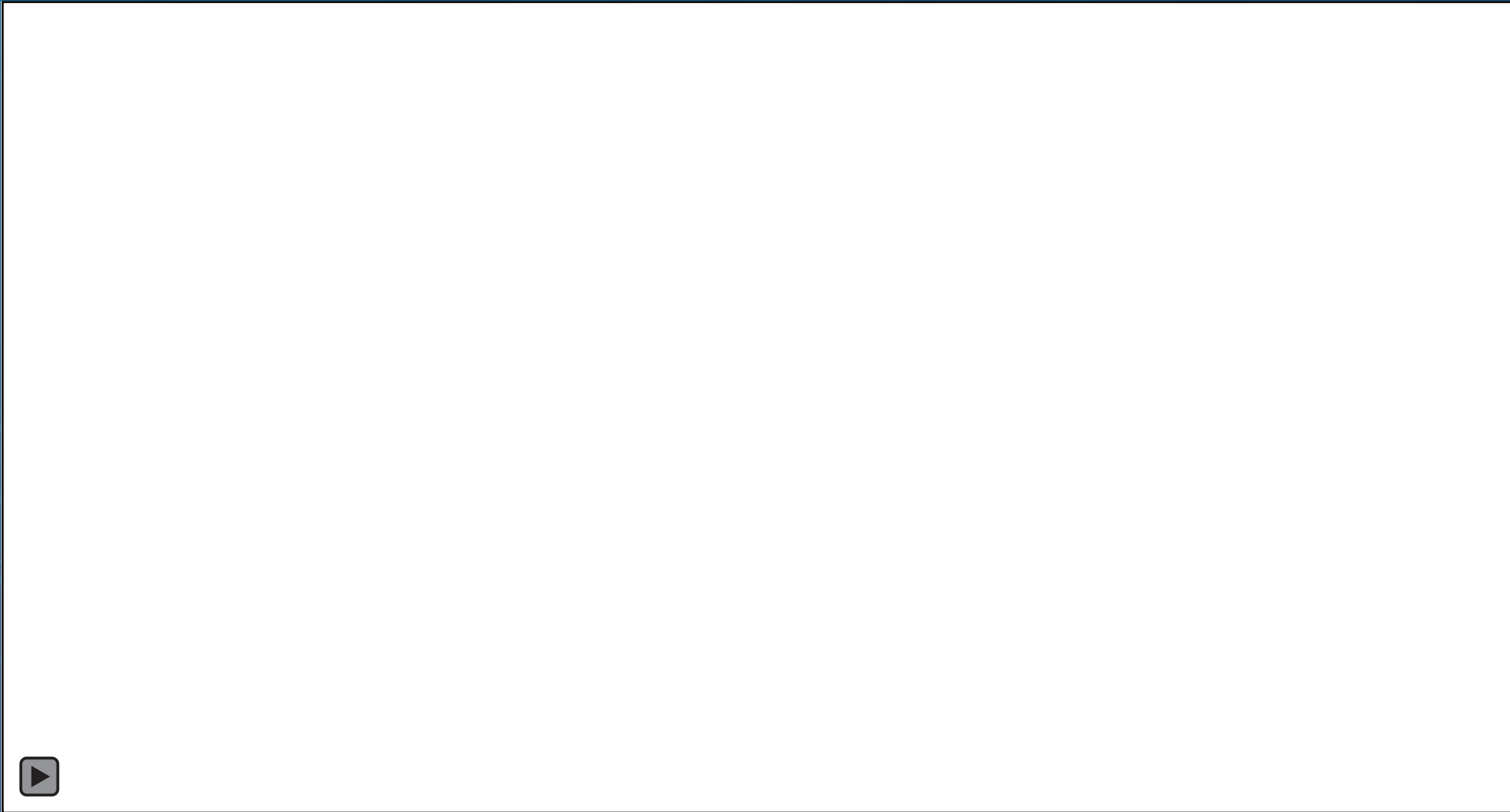
Пример 3. Механизм с открытой кинематической цепью

Нагрузки «Вращение» с привязкой оси к подвижному телу



Пример 3. Механизм с открытой кинематической цепью

Результаты моделирования

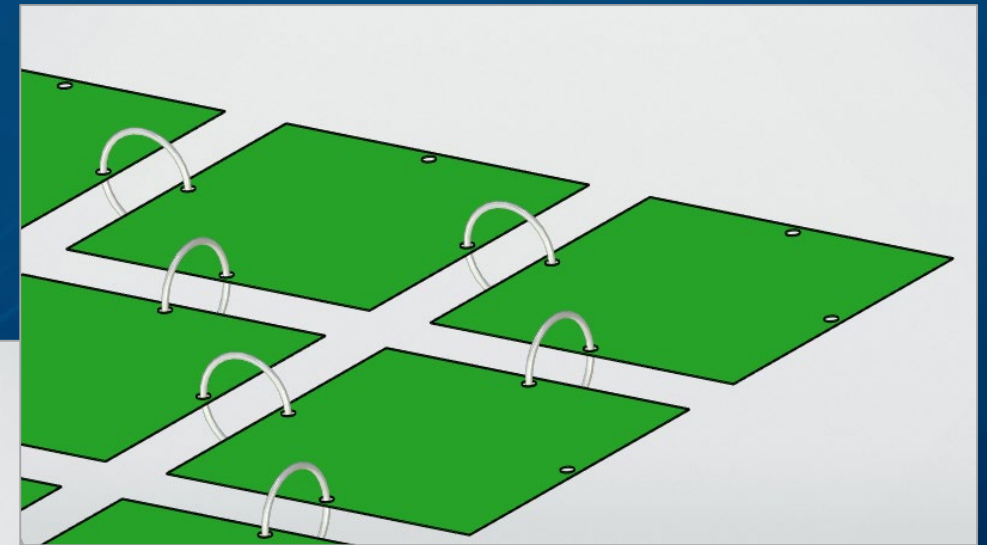
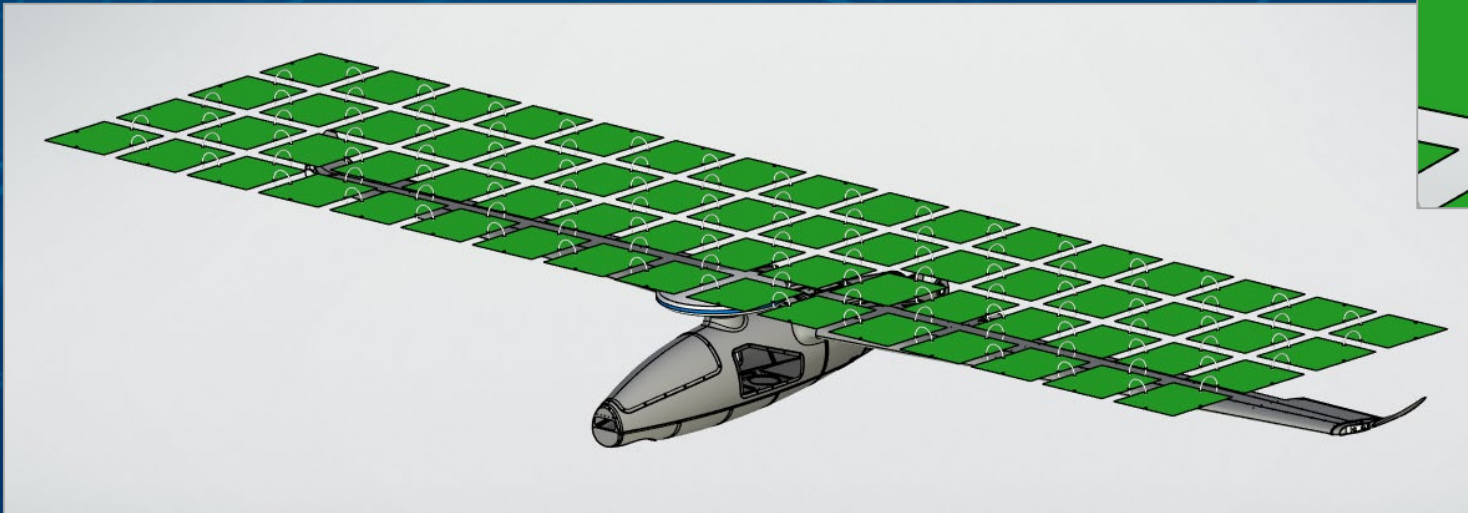


Пример 3. Механизм с открытой кинематической цепью

Результаты моделирования в контексте сборки

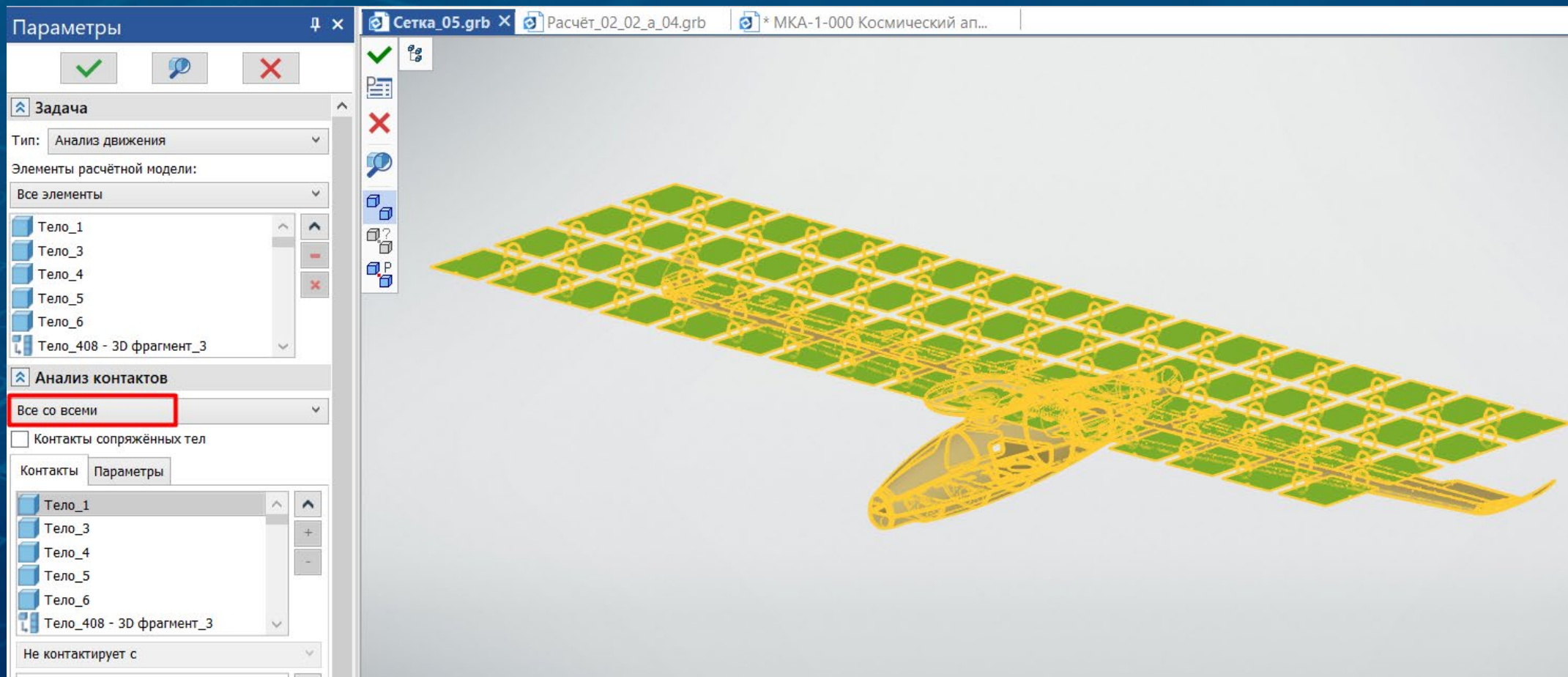


Маскировочная сетка

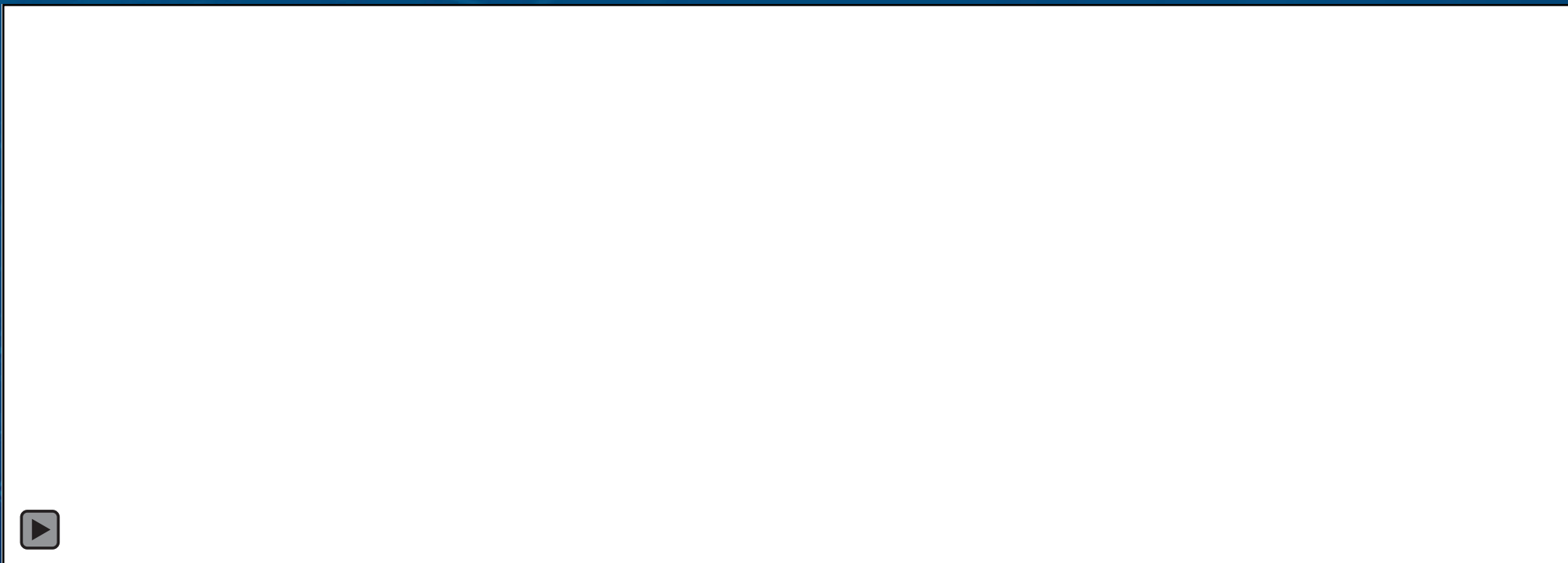


Пример 4. Свободное движение с учётом контактов

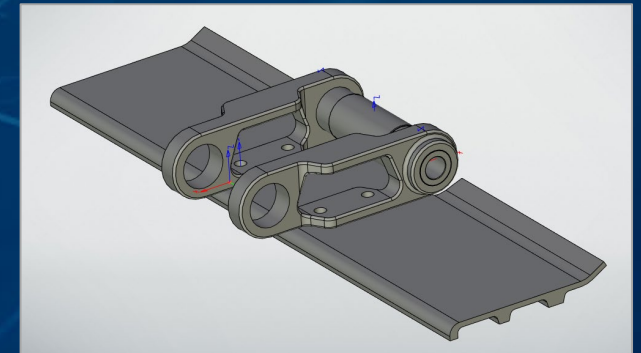
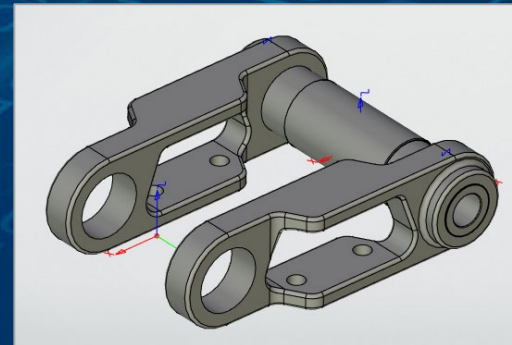
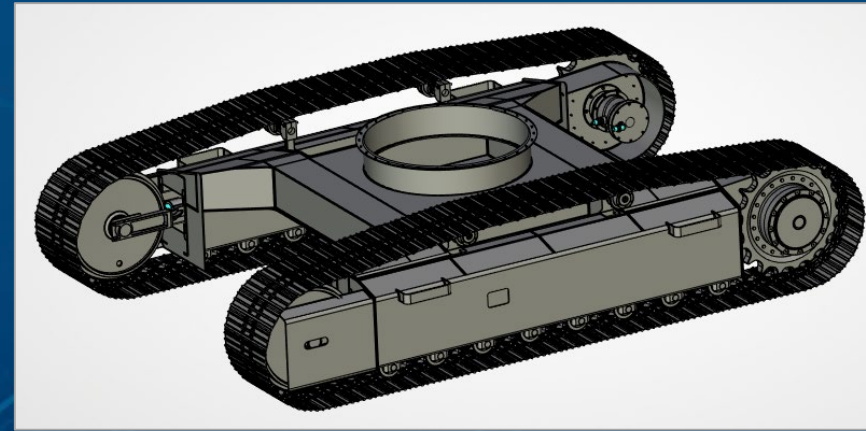
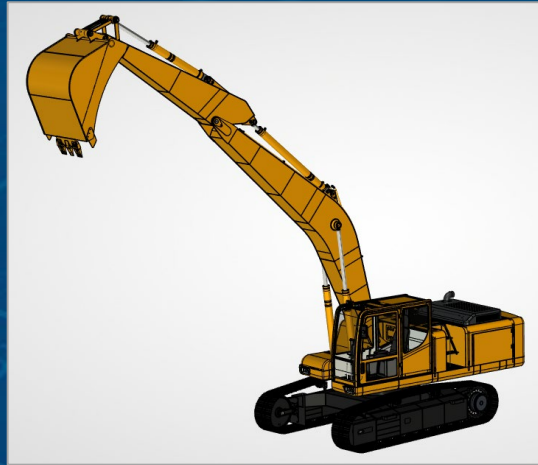
Анализ контактов – все со всеми



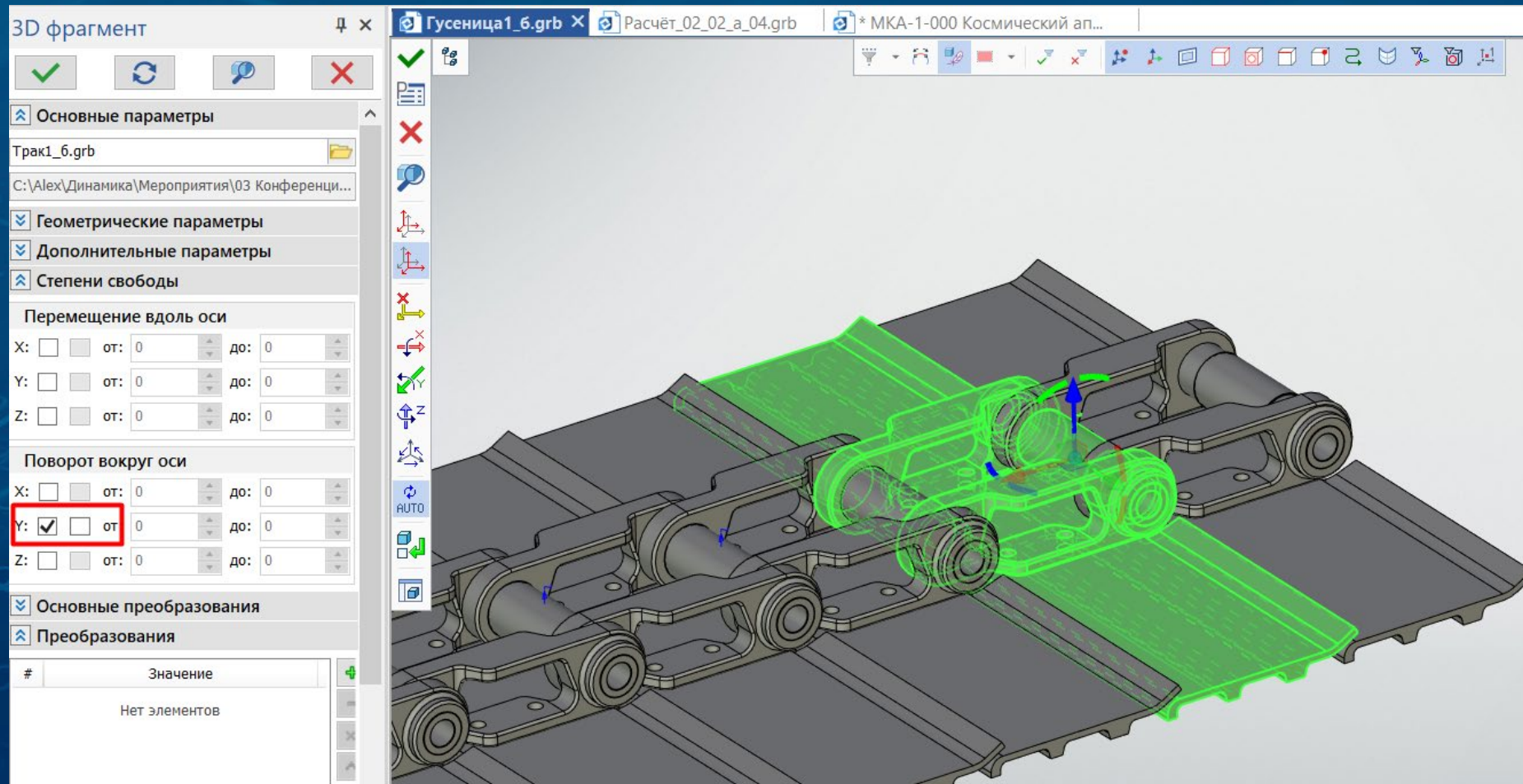
Результаты моделирования



Гусеница



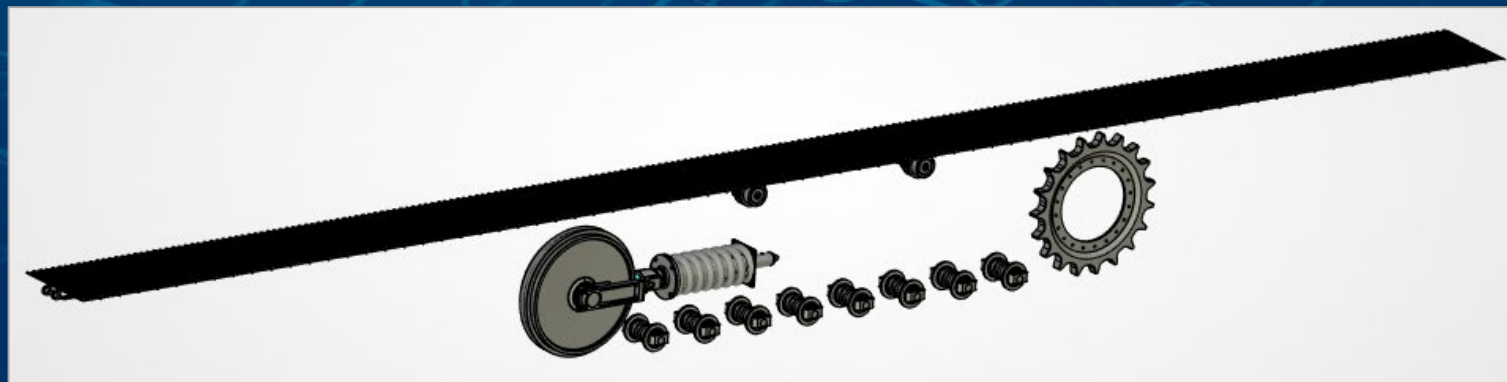
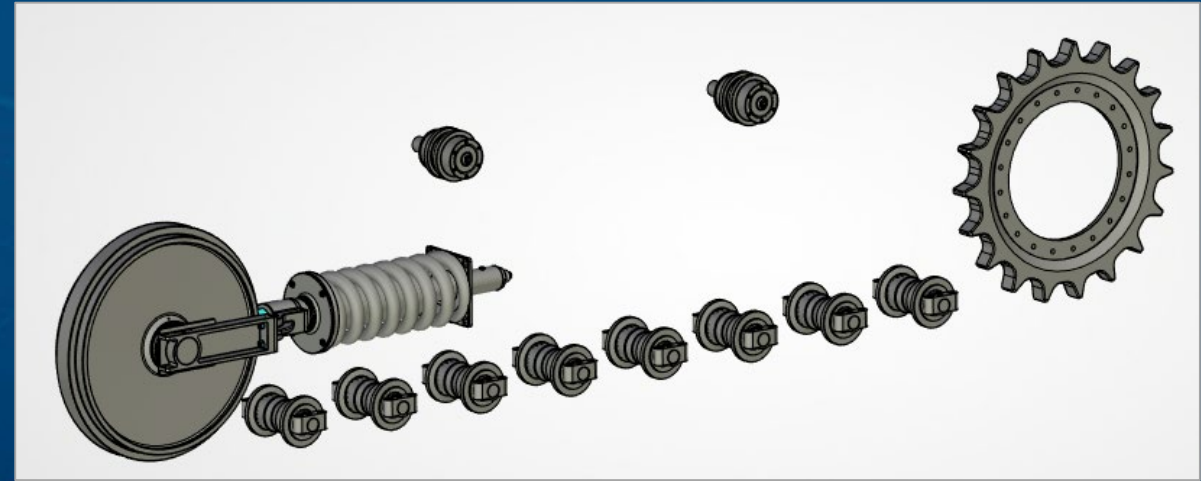
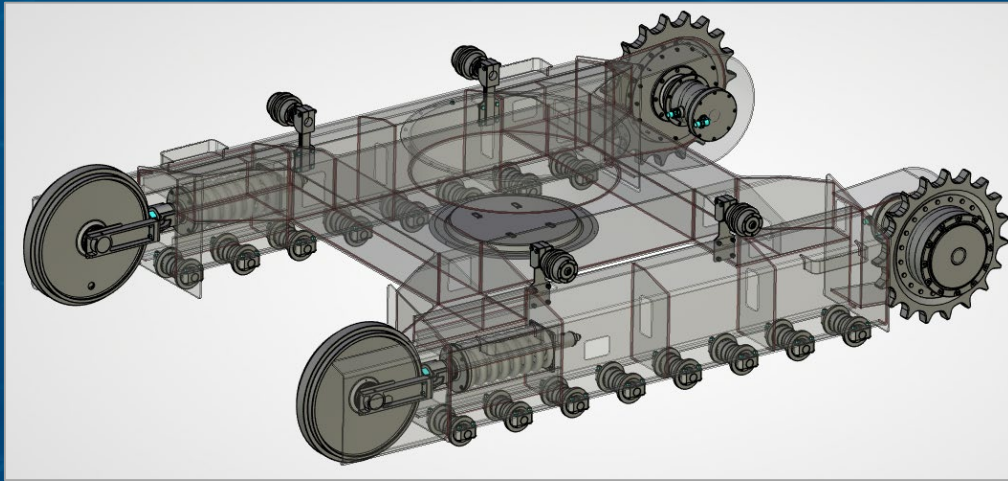
Настройка степеней свободы



T-FLEX Динамика | Примеры – задача анализа

Пример 5. Свободное движение с учётом контактов и шарниров

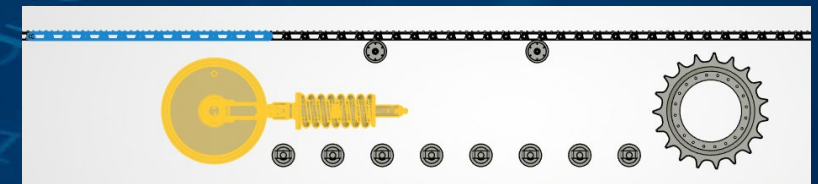
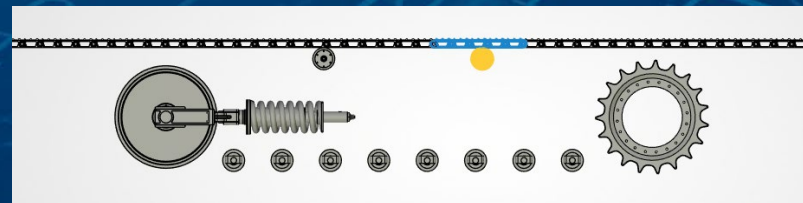
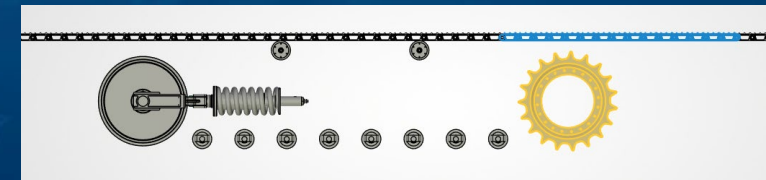
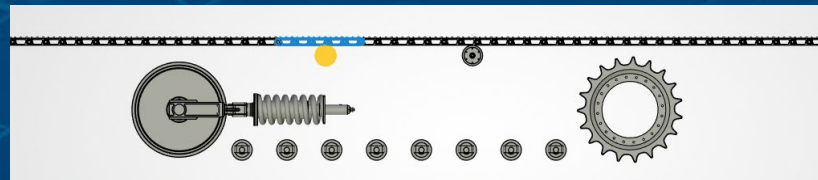
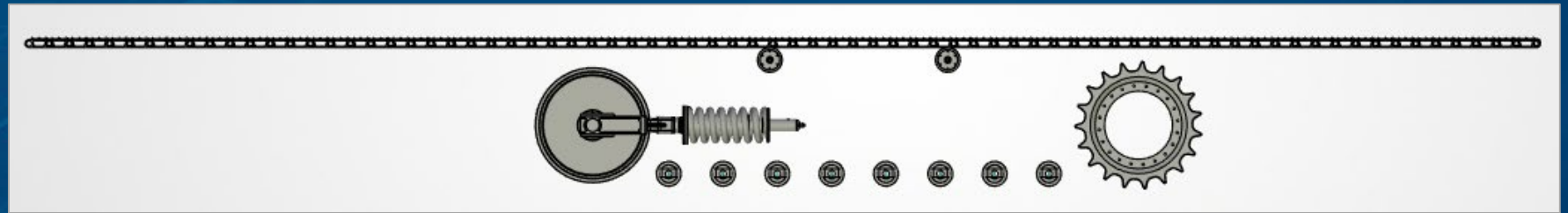
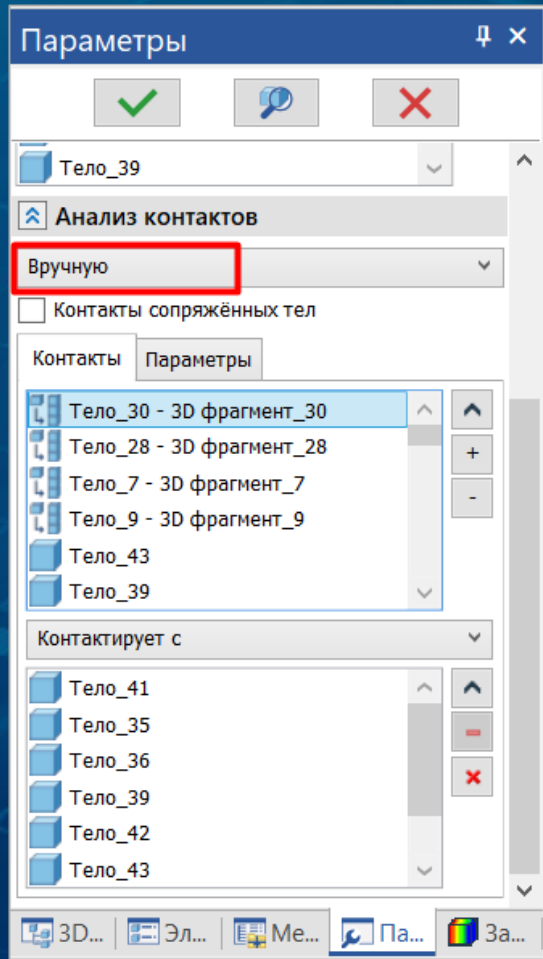
Подготовка расчётной модели



T-FLEX Динамика | Примеры – задача анализа

Пример 5. Свободное движение с учётом контактов и шарниров

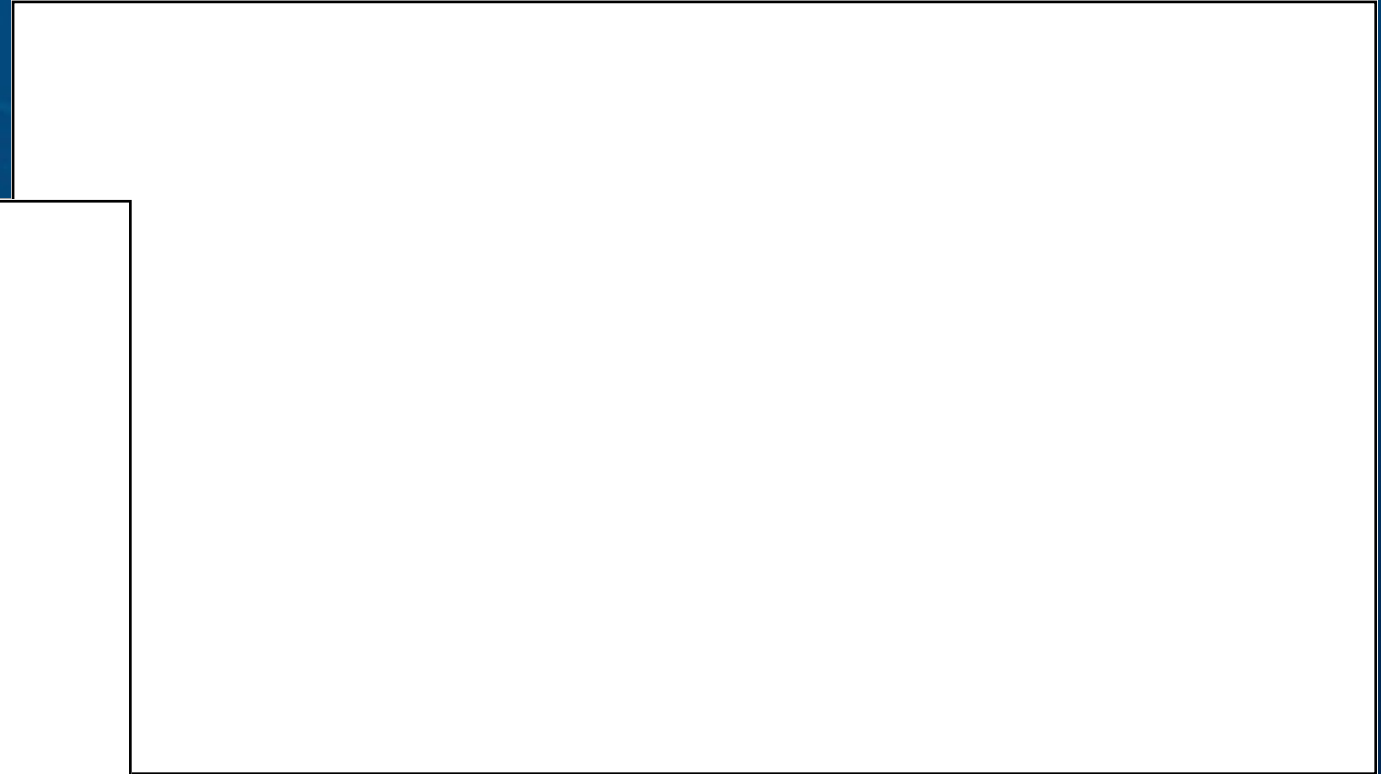
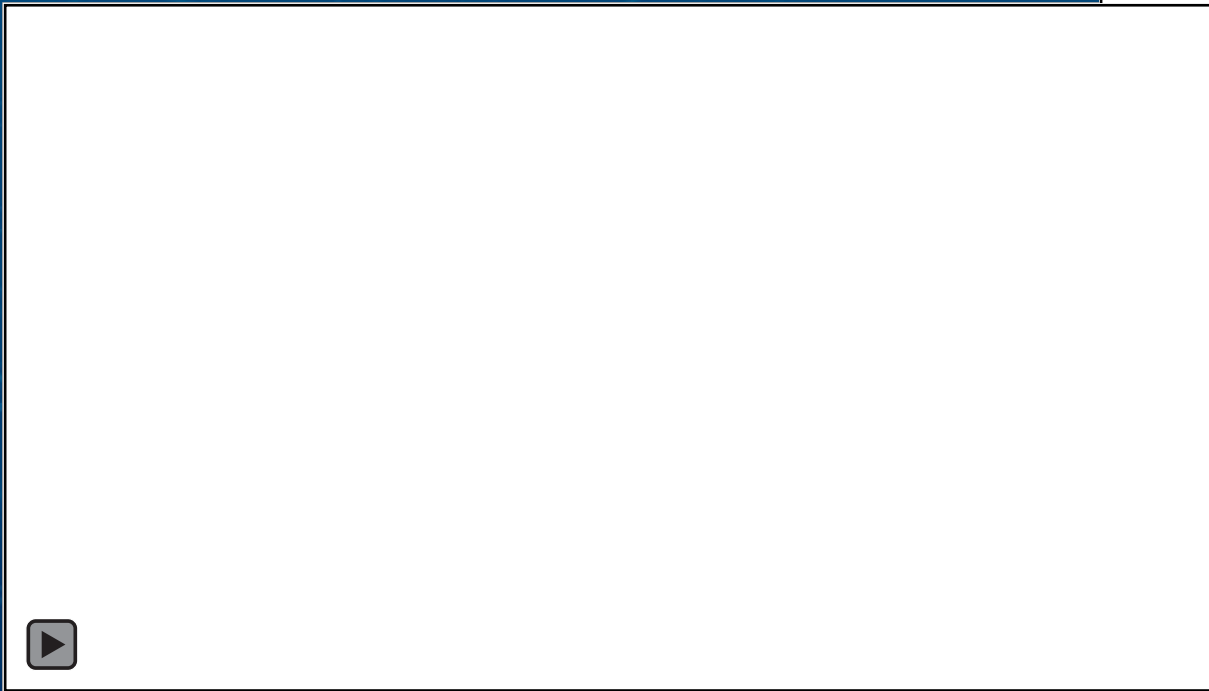
Настройка контактов вручную



Результаты моделирования

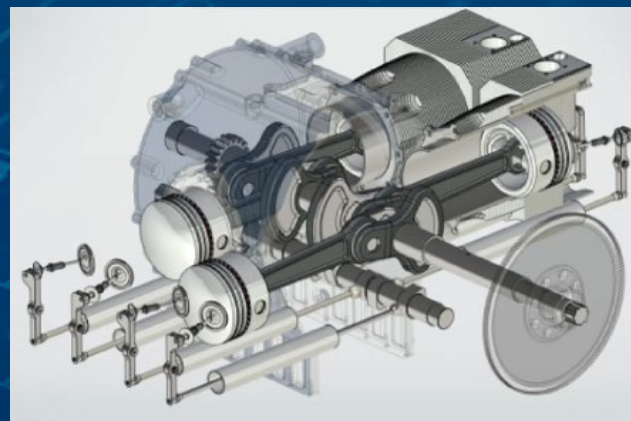
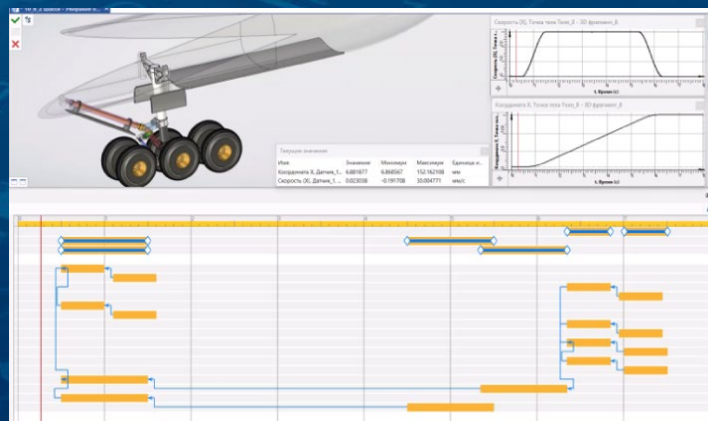


Результаты моделирования



3. Новые возможности

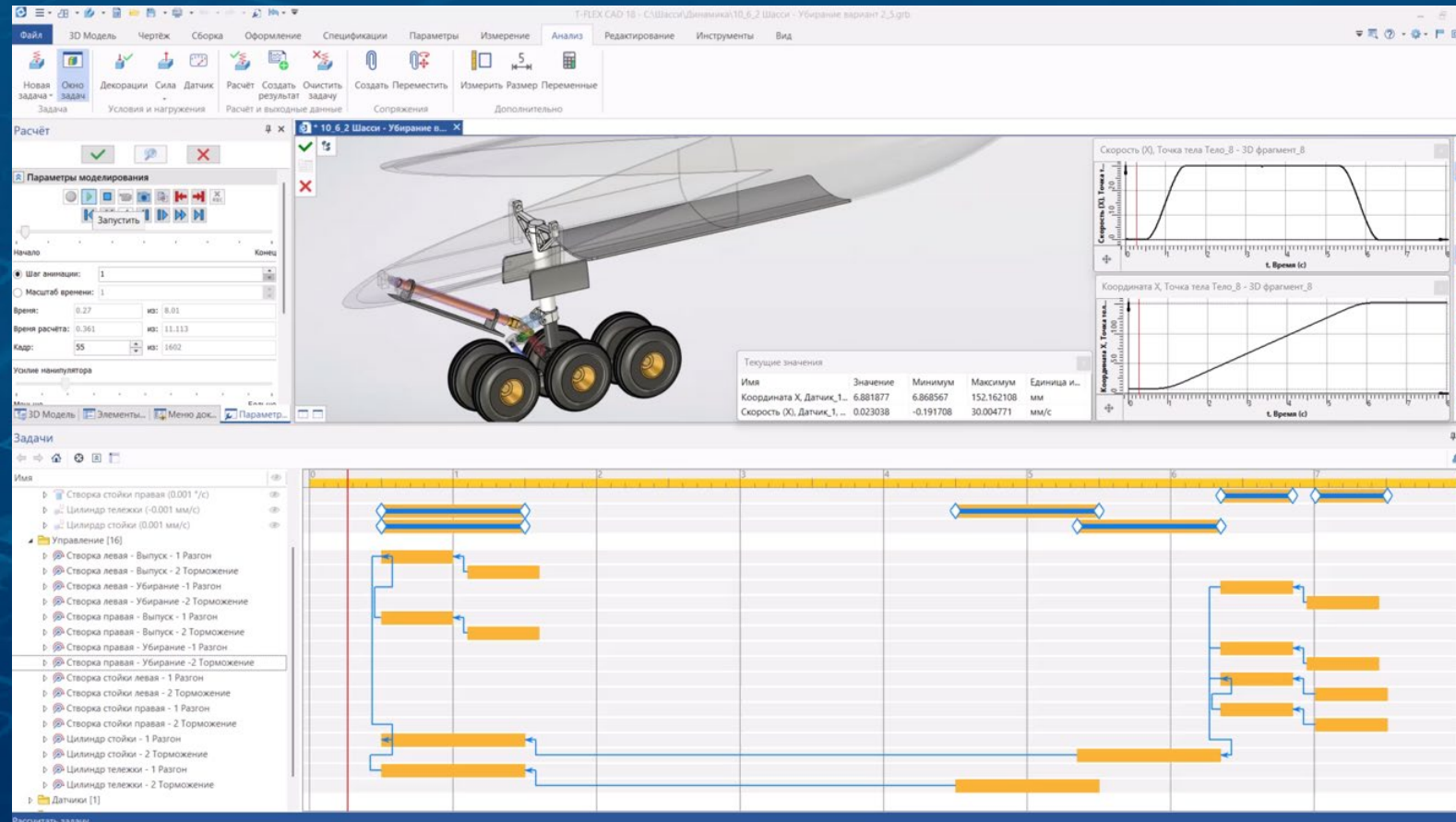
1. Управление по событиям
2. Использование макросов и API



T-FLEX Динамика | Примеры – Новые возможности

Пример 1. Управление по событиям

Стойка шасси



Пример 1. Управление по событиям

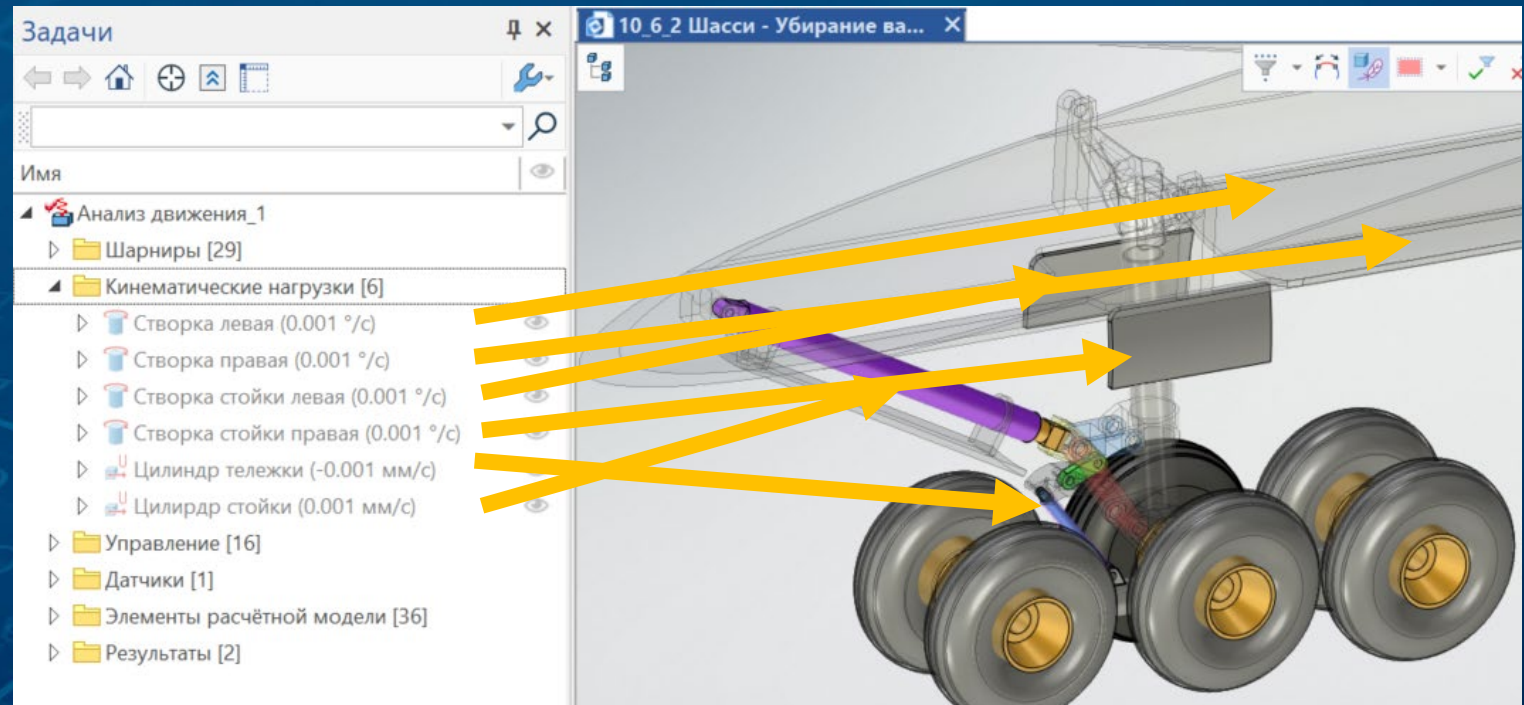
Нагрузки

Кинематические нагрузки –
Линейная скорость:

- Цилиндр стойки
- Цилиндр тележки

Кинематические нагрузки –
Угловая скорость:

- Створка стойки левая
- Створка стойки правая
- Створка левая
- Створка правая

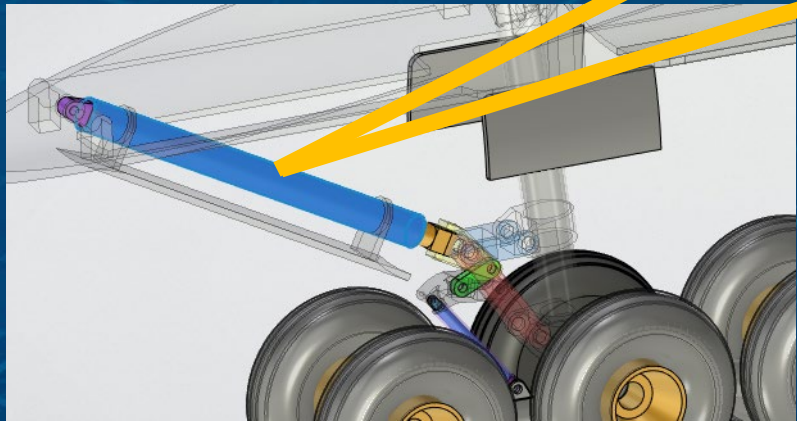


Пример 1. Управление по событиям

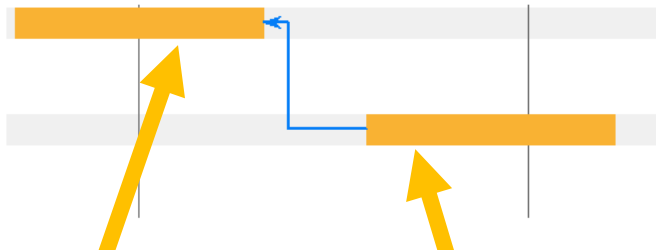
Стадии:

1. Разгон
2. Равномерное движение
3. Торможение

Стадии движения



- Цилиндр стойки - 1 Разгон
 - Триггер - Время (0.5 с)
 - Действие - Изменить (0.03 м/с, 1 с, Кубическ...
- Цилиндр стойки - 2 Торможение
 - Триггер - Событие (Завершение)
 - Действие - Изменить (0 м/с, 1 с, Кубическ...



Событие

Основные параметры

Триггер

Вид:

Задержка: с

Действие

Тип элемента:

Элемент:

Вид действия:

Установить значение: м/с

Продолжительность: с

Закон:

Событие

Основные параметры

Триггер

Вид:

Элемент:

Условие:

Задержка: с

Действие

Тип элемента:

Элемент:

Вид действия:

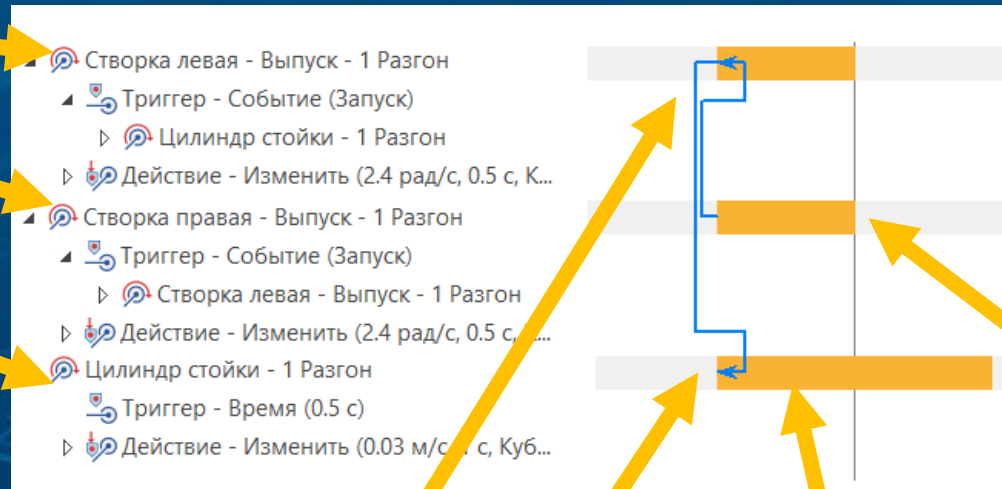
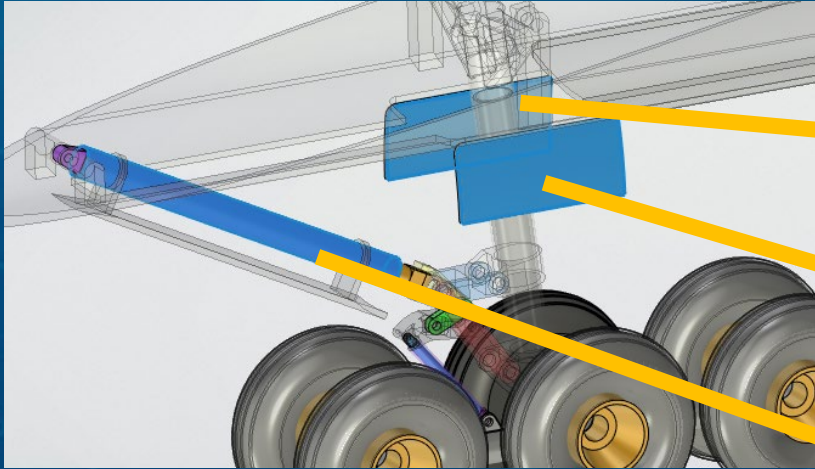
Установить значение: м/с

Продолжительность: с

Закон:

Пример 1. Управление по событиям

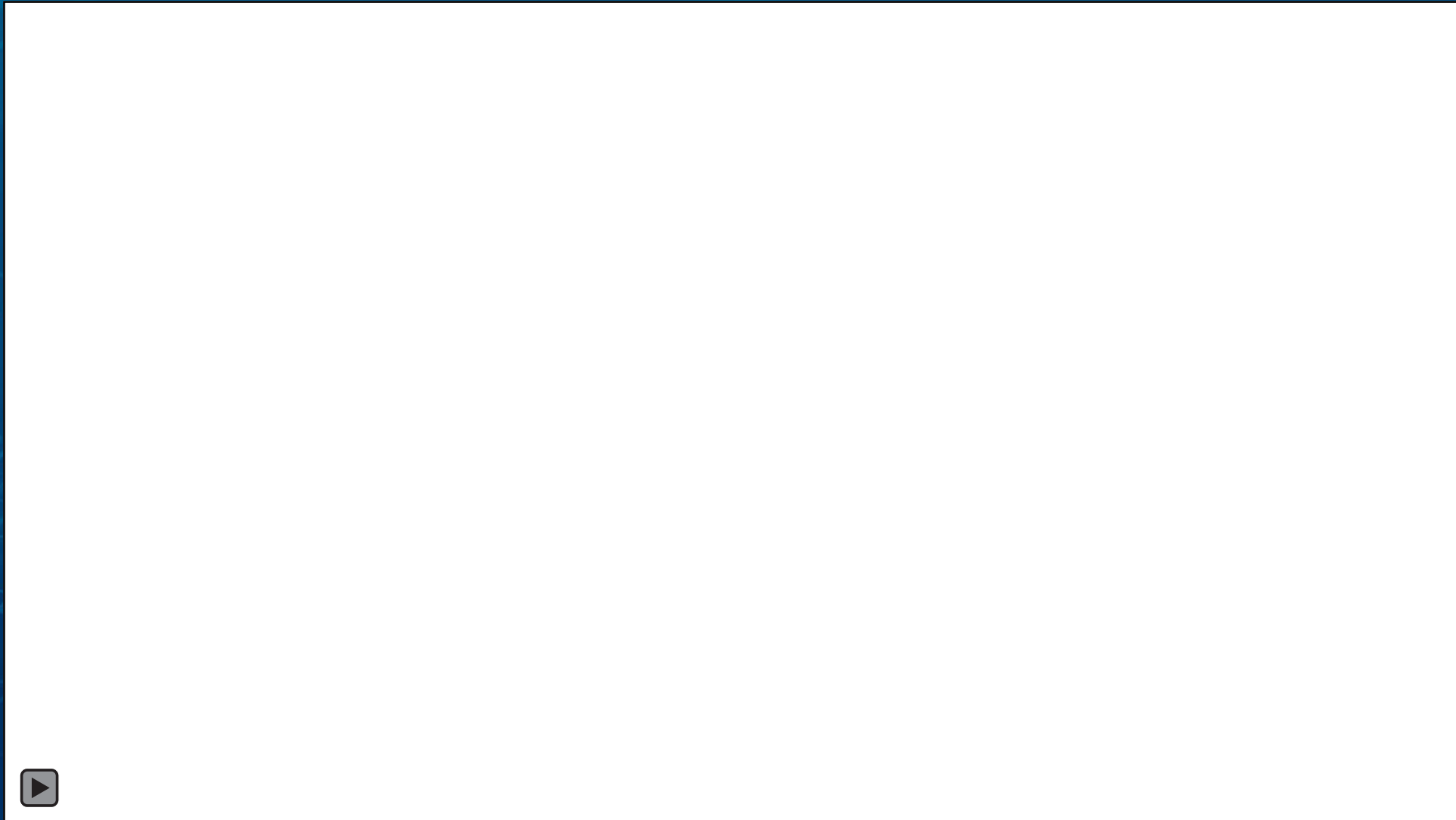
Синхронизация



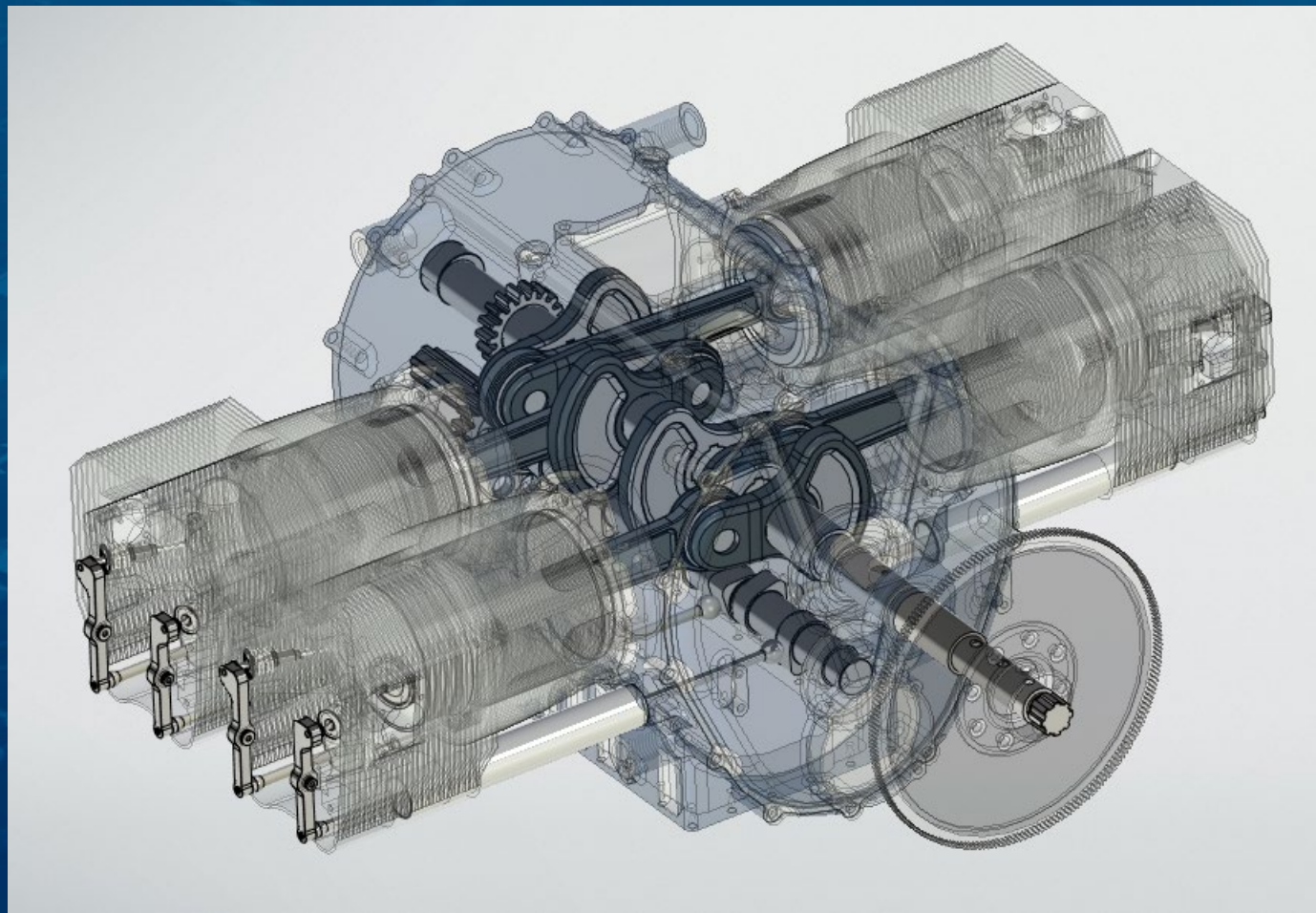
Синхронизация:

1. Створка правая начинает движение с началом движения створки левой
2. Створка левая начинает движение с началом движения цилиндра стойки

Пример 1. Управление по событиям

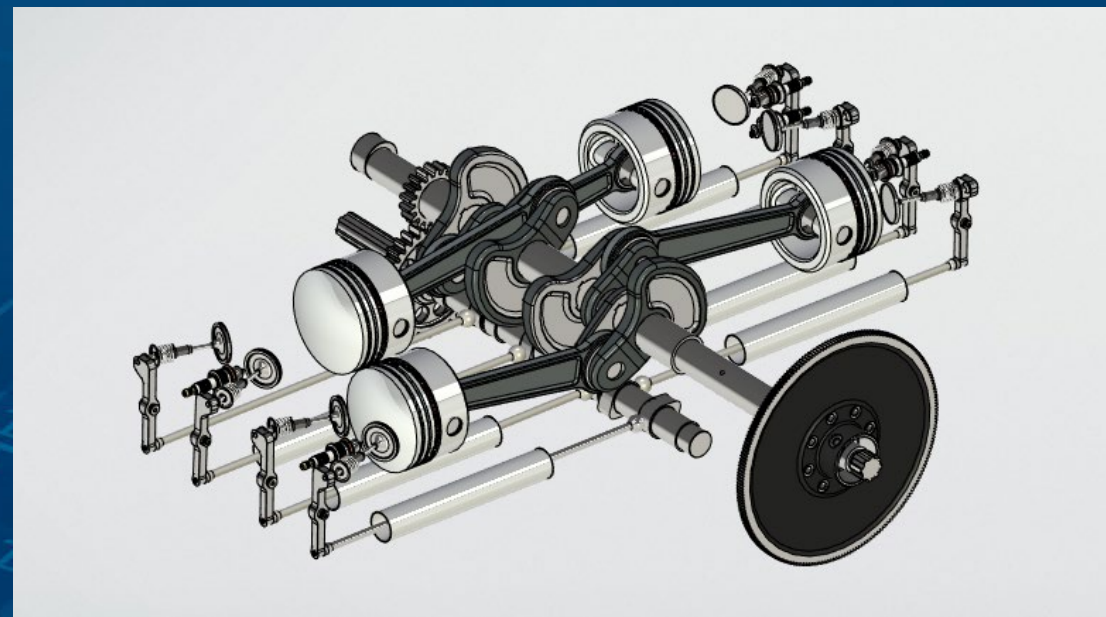
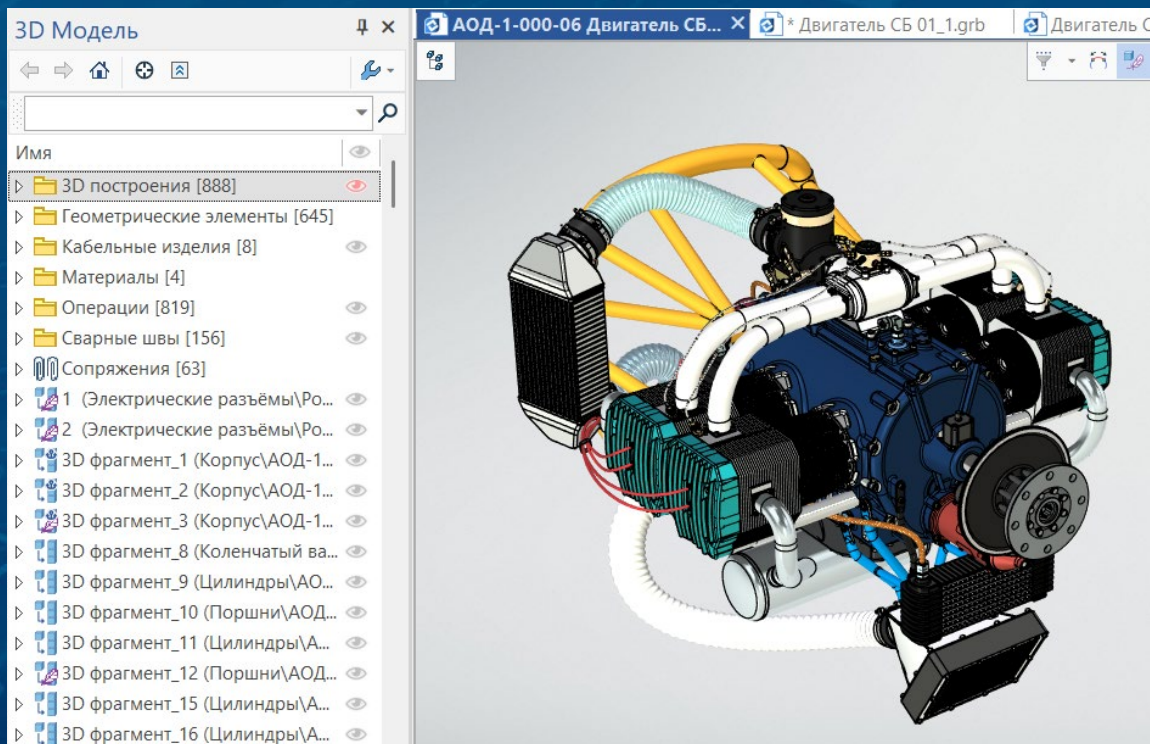


Оппозитный двигатель



Пример 2. Использование макросов и API

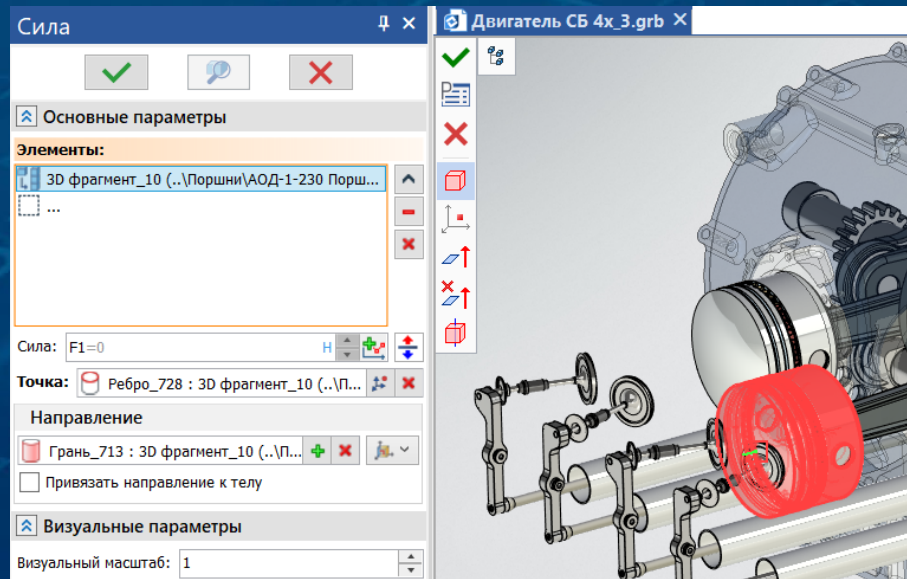
Сборочная модель



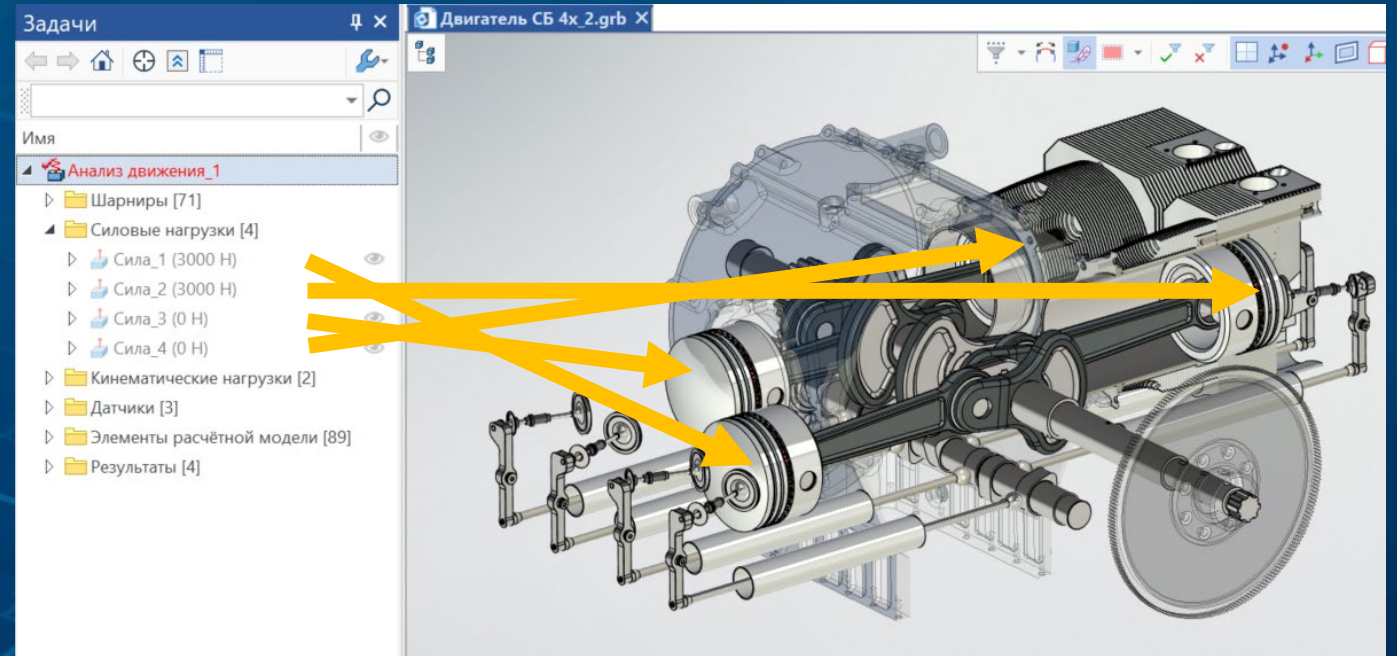
Пример 1. Управление по событиям

Силовые нагрузки - Сила:

- Поршень 1 пары 1 – F1
- Поршень 2 пары 1 – F1
- Поршень 1 пары 2 – F2
- Поршень 2 пары 2 – F2



Нагрузки



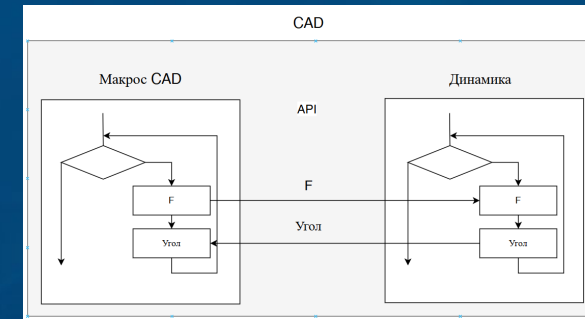
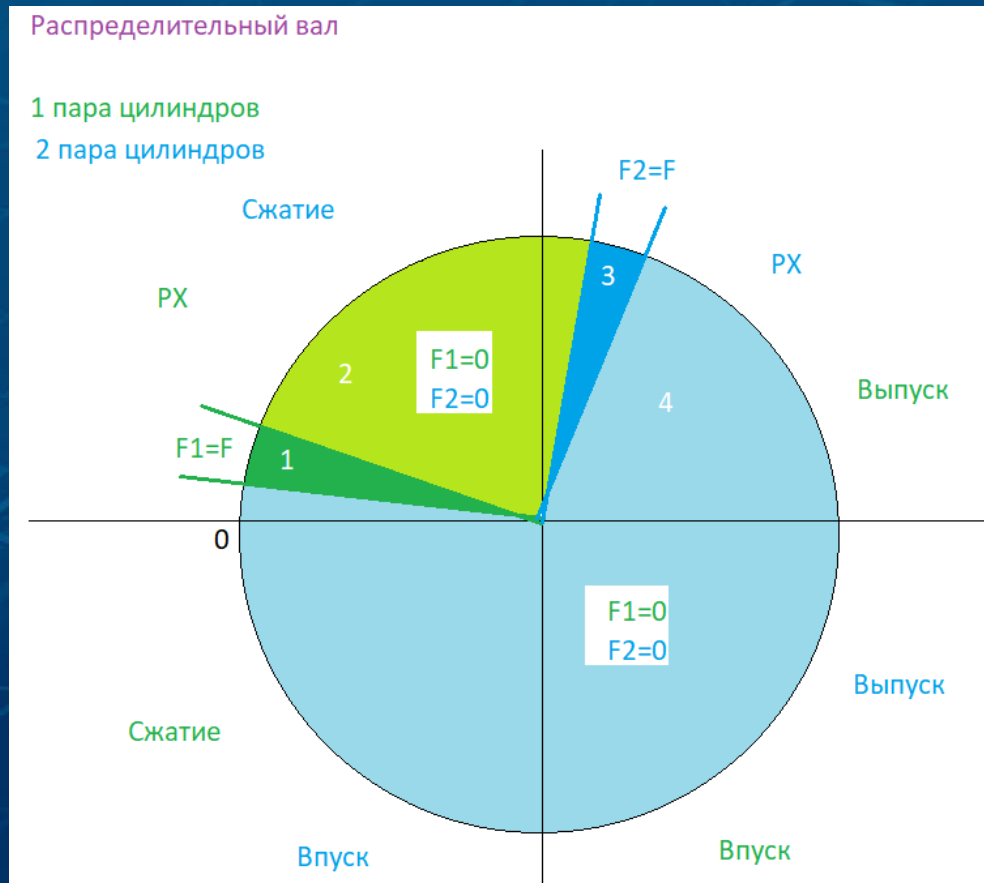
Переменные			
?	Имя	Выражение	Значение
▾	Группа:		
▢	F1	0	0
▢	F2	0	0

Пример 1. Управление по событиям

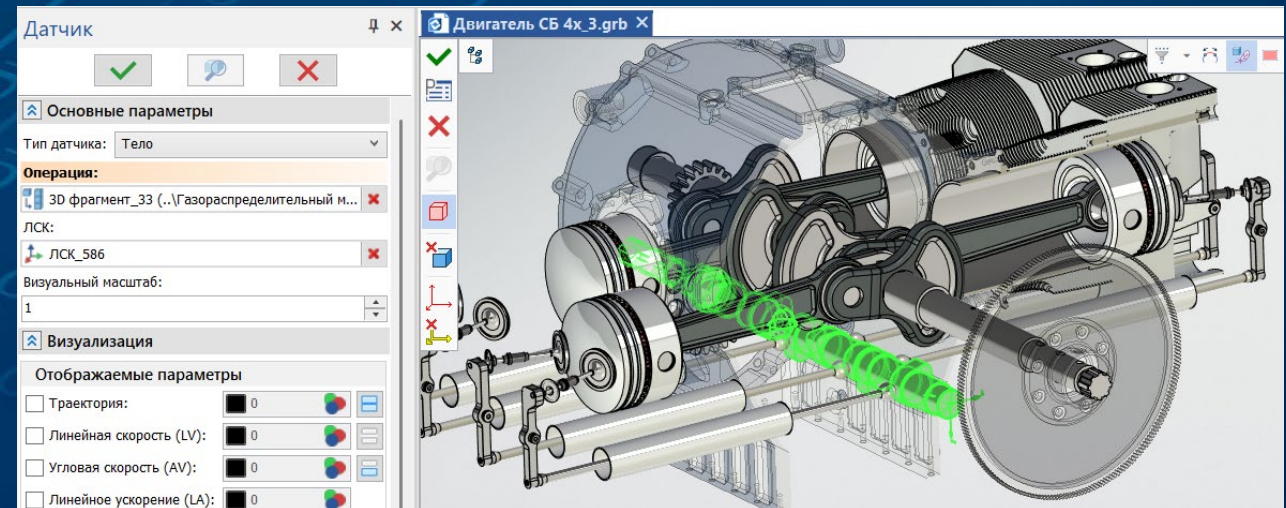
Запуск задачи по шагам, параметры – константы

Расчёт углов

Алгоритм расчёта

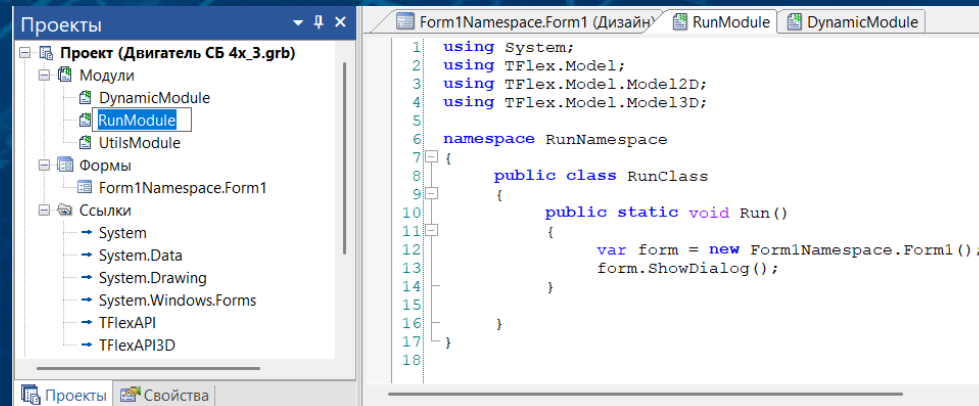
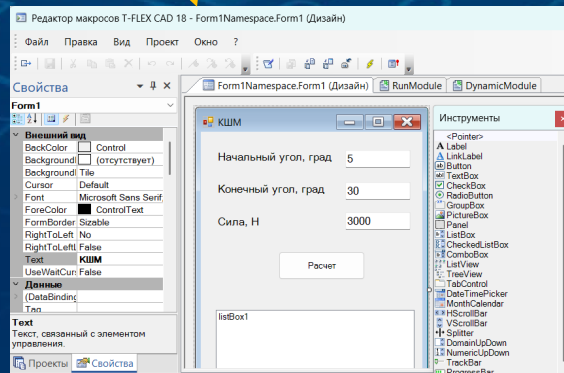
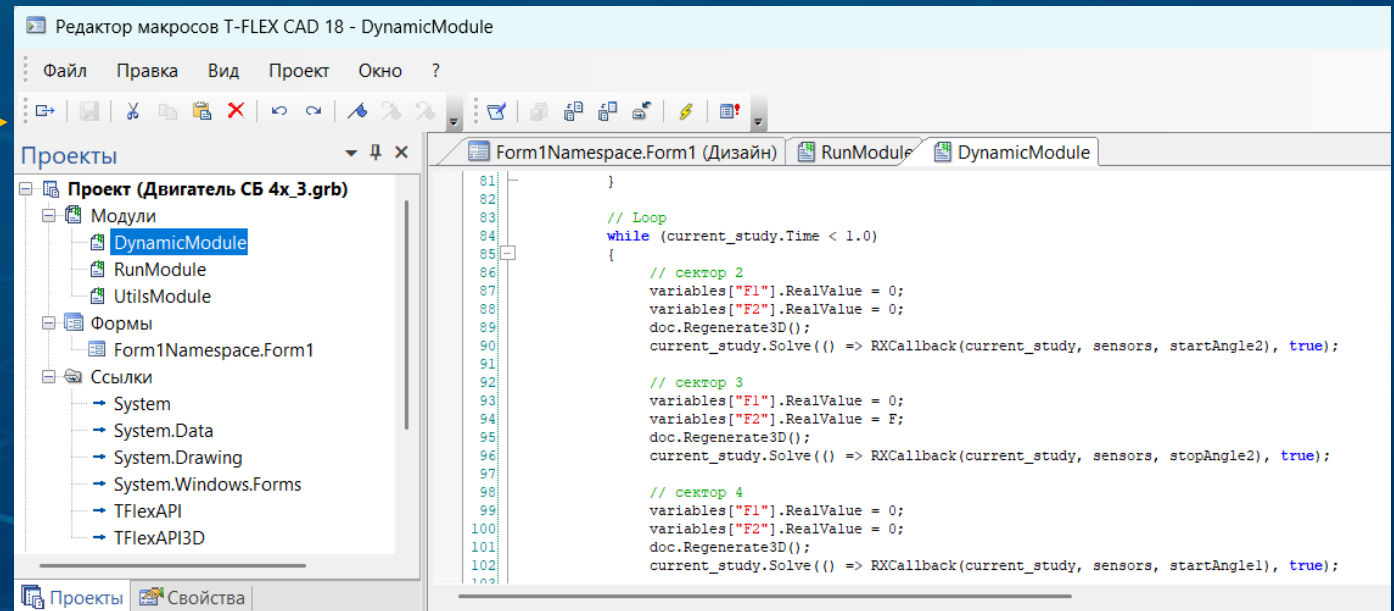
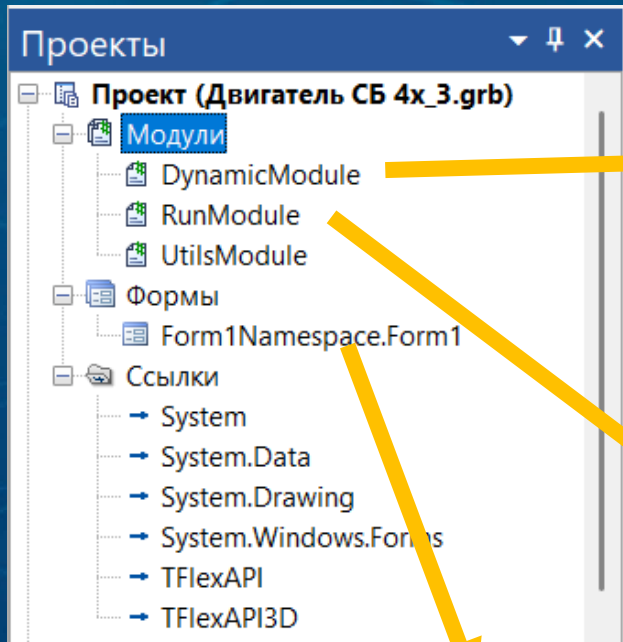


Датчик углового положения распределительного вала



Пример 1. Управление по событиям

Состав проекта



Пример 2. Использование макросов и API

Запуск расчёта



- T-FLEX Динамика позволяет в полном объеме решать **задачу анализа** механизмов: определять траектории, скорости, ускорения, силы взаимодействия и временные характеристики движения.
- **Задача синтеза** механизмов может решаться в T-FLEX Динамике с применением инструментария параметризации и процедур оптимизации, имеющихся в T-FLEX CAD: рассчитывать геометрические параметры звеньев, законы движения звеньев и мощность привода.
- На основе решения задач синтеза и анализа в T-FLEX Динамике с применением принципов сквозного проектирования с среде T-FLEX PLM возможна полноценная реализация современных **методик проектирования** механизмов.
- Функции **интеграции** T-FLEX Динамики позволяют использовать её совместно как с продуктами T-FLEX PLM, так и со сторонним ПО для проектирования сложных изделий.
- Текущий функционал и разрабатываемые в настоящий момент механизмы позволяют рассматривать T-FLEX Динамику как **гибкую платформу для интеграции** с 1D и CAE-системами.
- Для раскрытия и отработки методических приемов планируется разработать **учебное пособие** по работе в T-FLEX Динамика.



АЛЕКСЕЙ ПРОСОЛОВИЧ

Ведущий аналитик по направлению инженерного анализа, канд. техн. наук

