

СЕССИЯ 5.
ОТ РАЗРОЗНЕННЫХ РАСЧЁТОВ
К ЦЕЛОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ

T-FLEX ДИНАМИКА: МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ ДВИЖЕНИЯ. ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ

Алексей Просолович

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

1. T-FLEX Динамика

1. Основные возможности
2. Задача «Анализ движения»
3. Этапы расчёта

Назначение

- Качественный и количественный анализ кинематики и динамики пространственных механических систем.

Пользователи системы:

- инженеры-конструкторы
- специалисты-расчётчики.



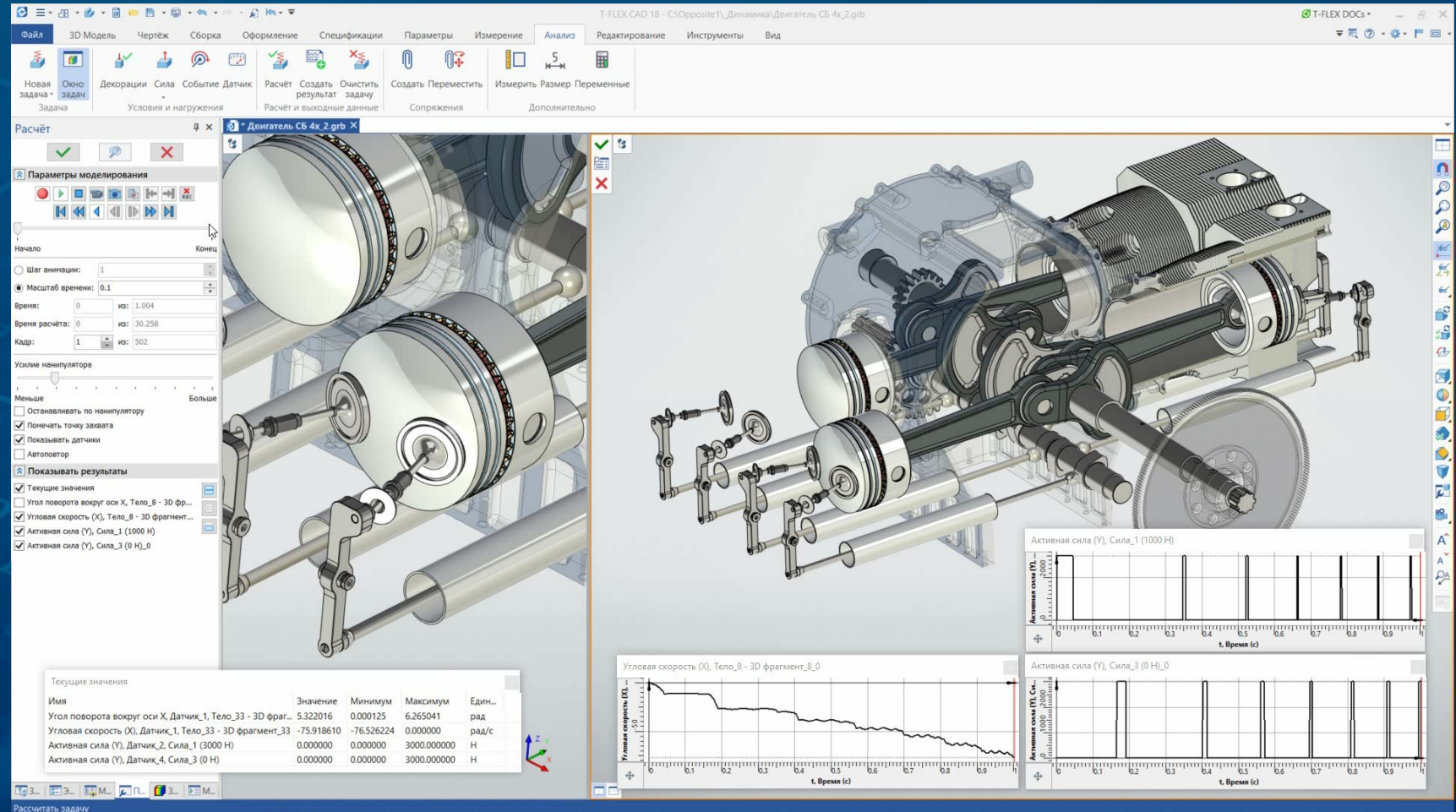
Решаемые задачи

Задачи анализа:

- определение траекторий, скоростей и ускорений;
- расчёт сил взаимодействия между элементами системы, возникающих в процессе движения;
- анализ временных характеристик механической системы.

Задачи синтеза:

- расчёт геометрические параметры звеньев,
- законы движения и мощность привода.

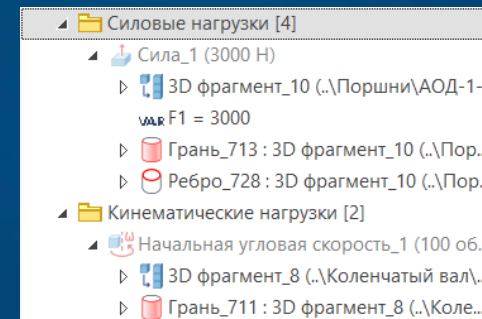
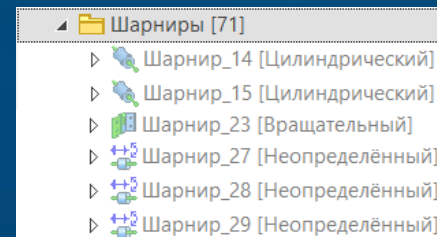
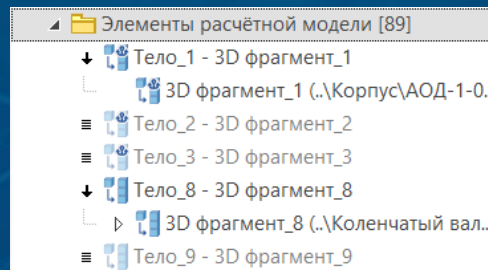


Структура задачи

Задача «Анализ движения»:

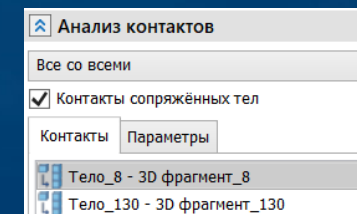
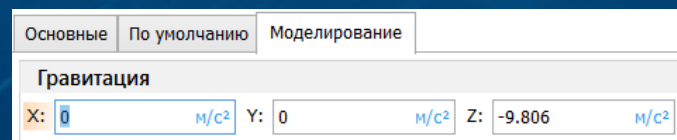
- состав:

- элементы (тела);
- шарниров;
- нагружений.



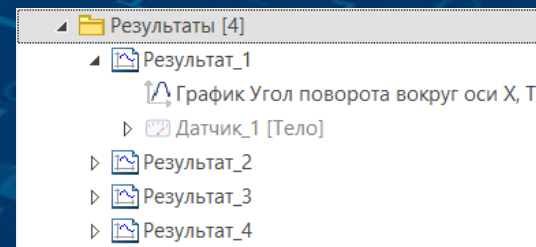
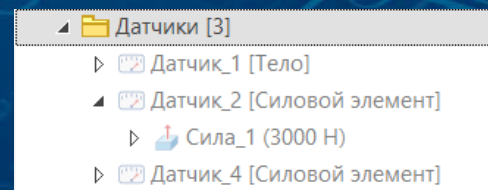
- при расчёте учитываются:

- масс-инерционные характеристики;
- контакты между элементами расчётной модели.



- выходные данные:

- датчики;
- результаты.

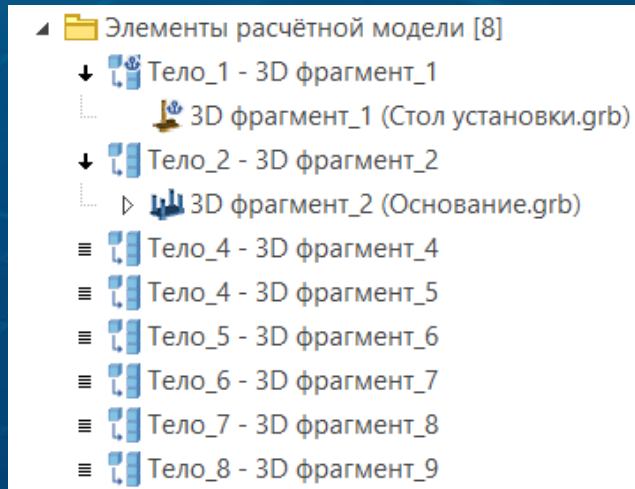


- допущения при расчёте:

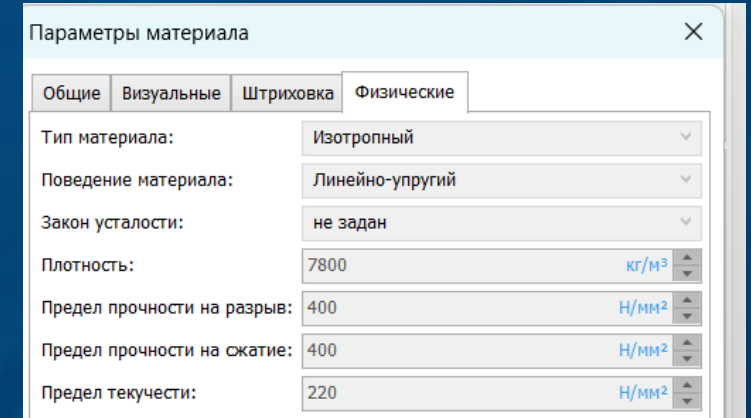
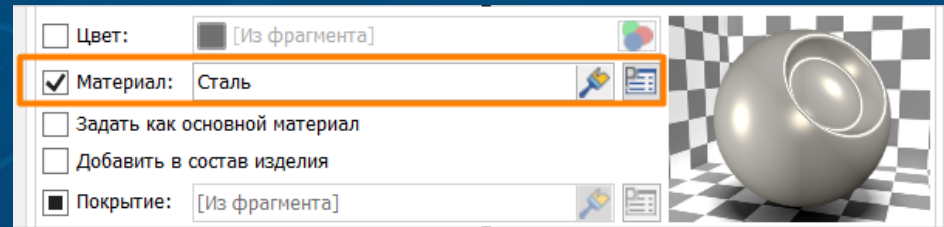
- тела абсолютно жёсткие

Элементы задачи

Тела - 3D фрагменты

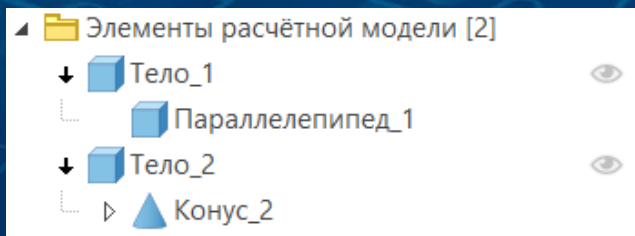


Масс-центровочные и инерционные характеристики



Управление МЦИХ

Тела - Примитивы



Характеристики	
Управление МЦИХ	Вручную
Управление МЦИХ (переменная)	Автоматически
Масса	Масса вручную
Центр тяжести X	Вручную
Центр тяжести Y	0
Центр тяжести Z	50
СК момента инерции	Глобальная
Осевой момент инерции Ixx	32500
Осевой момент инерции Iyy	32500
Осевой момент инерции Izz	13000
Центробежный момент инерции Ixy	0
Центробежный момент инерции Ixz	0
Центробежный момент инерции Iyz	0

Виды нагрузений

- Сила
- Крутящий момент
- Линейная пружина
- Биполярная сила
- Торсионная пружина
- Начальная линейная скорость
- Начальная угловая скорость
- Линейная скорость
- Угловая скорость
- Линейный привод

Задание нагрузки

Сила

✓ 🔍 ✗

Основные параметры

Элементы:

- Параллелепипед_1

Сила: 100

Точка: Ребро_1 : Параллелепипед_1

Направление

- Ребро_2 : Параллелепипед_1

Привязать направление к телу

Тело: Конус_2

Визуальные параметры

Визуальный масштаб: 1

Задать график зависимости

Создать новый
 Использовать существующий

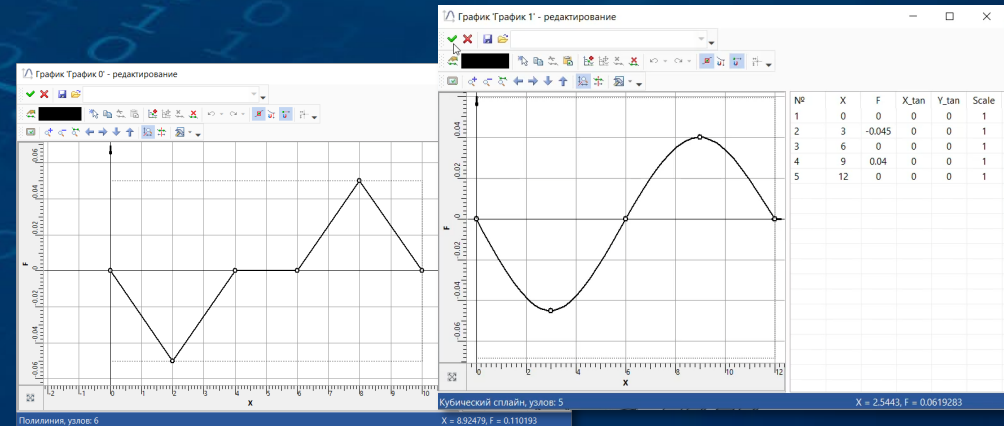
Имя: График 0

Тип: Полилиния

Тип оси X: Время

Единицы времени: с

OK Отмена



Параметры задачи

Параметры задачи

Параметры задачи

Основные | По умолчанию | Моделирование

Задача: Анализ движения_1

Время моделирования

Время

Продолжительность: 27 с

Кадров в секунду: 50

Кадры

Длительность кадра: 0.02 с

Количество кадров: 180000

Шагов в кадре

Штатно: 100

Максимально: 5000

Определение контактов: Сетки

Внешнее хранение результатов расчёта

OK Отмена

Параметры задачи

Основные | По умолчанию | Моделирование

Размеры шарнира

Длина: 50 мм

Ширина: 10 мм

Параметры трения

Контакты Шарниры

Учитывать трение: 1

Трение покоя: 0.1

Трение движения: 0.05

Трение качения: 0.05 мм

Трение верчения: 0.05 мм

Параметры удара

Коэффициент восстановления: 0.5

Граница неупругости: 0.01 м/с

OK Отмена

Параметры задачи

Основные | По умолчанию | Моделирование

Гравитация

X: 0 м/с² Y: 0 м/с² Z: -9.806 м/с²

Точность реализации связей:

Грубее Точнее

Метод расчёта: Авто

Максимальное расстояние от нуля: 10000 мм

OK Отмена

Анализ контактов

Все со всеми

Контакты сопряжённых тел

Контакты | Параметры

Элементов: 45

Элементов: 44

Параметры удара

Коэффициент восстановления: [0.5]

Граница неупругости: [0.01] м/с

Параметры трения

Учитывать трение: [1]

Трение покоя: [0.1]

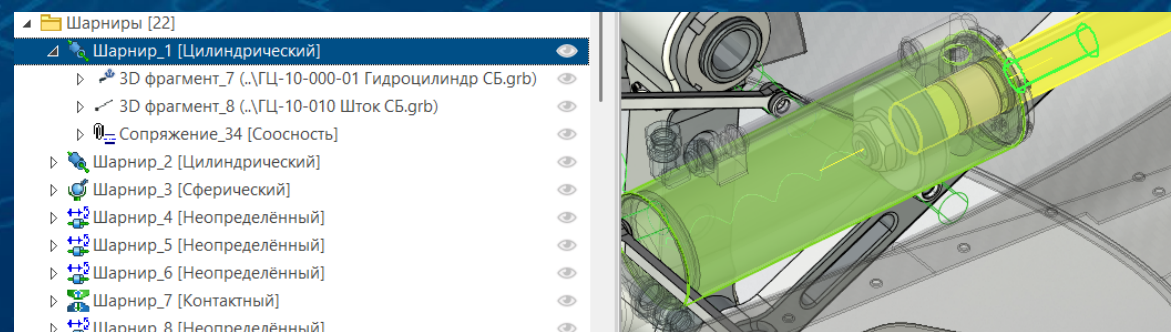
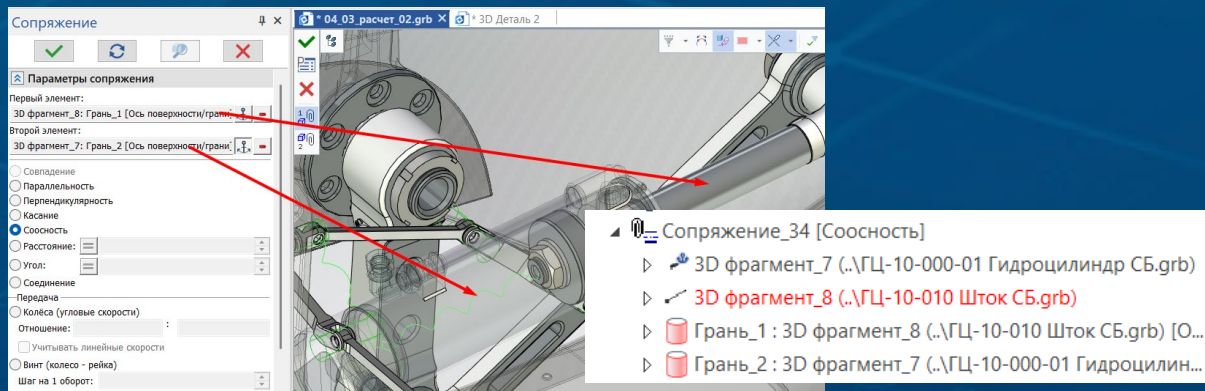
Трение движения: [0.05]

Трение качения: [0.05] мм

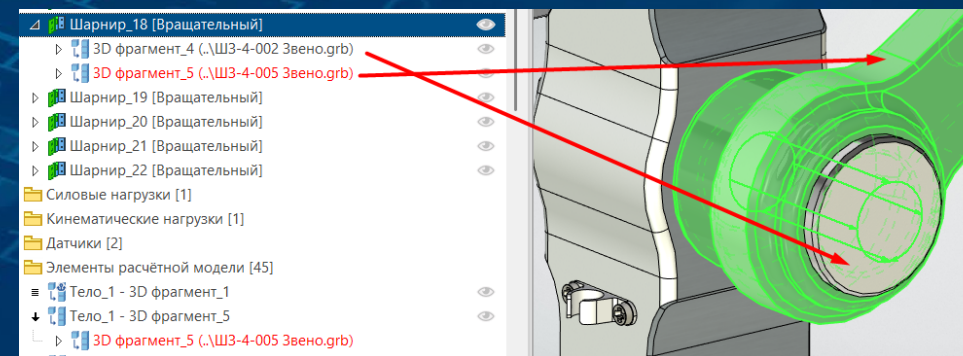
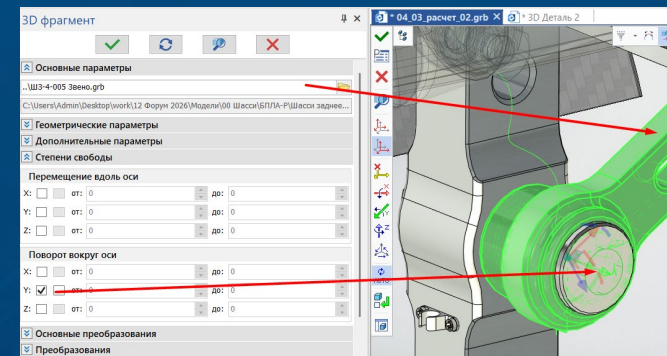
Трение верчения: [0.05] мм

Шарниры

Шарнир на основе сопряжения



Шарнир на основе степеней свободы



Этапы расчёта

Последовательность этапов расчёта

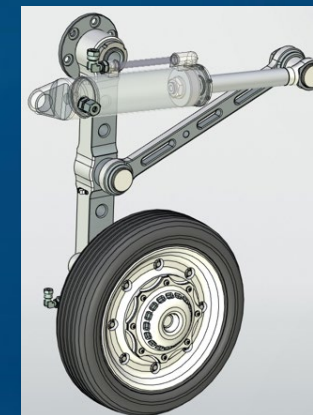
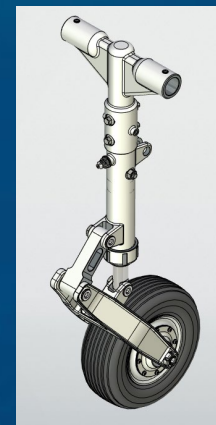
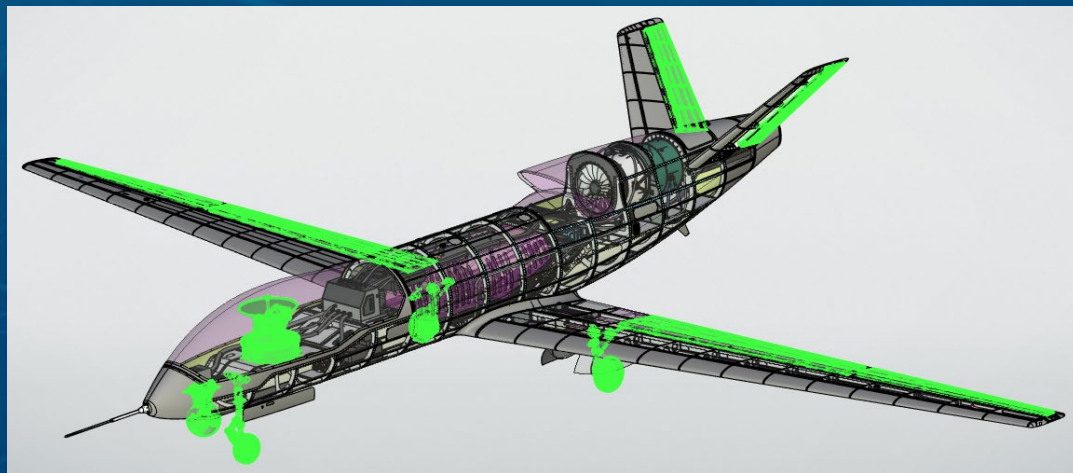


2. Пример типового расчёта

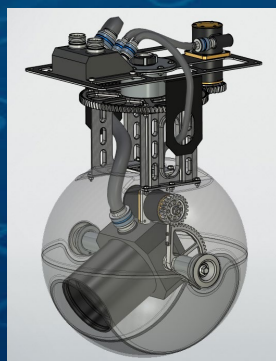
1. Подготовка подвижной геометрии
2. Создание задачи и настройка параметров
3. Задание нагрузжений
4. Выполнение расчёта
5. Настройка результатов расчёта

1. Подготовка подвижной геометрии

Примеры механизмов БПЛА



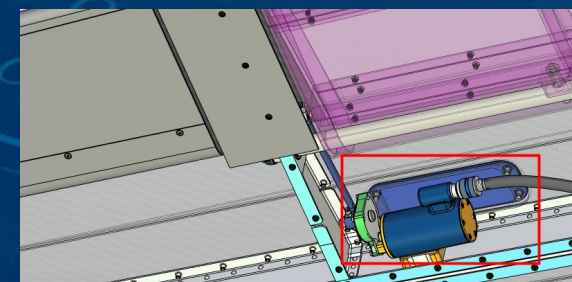
Механизмы стоек шасси



Механизм поворота камера



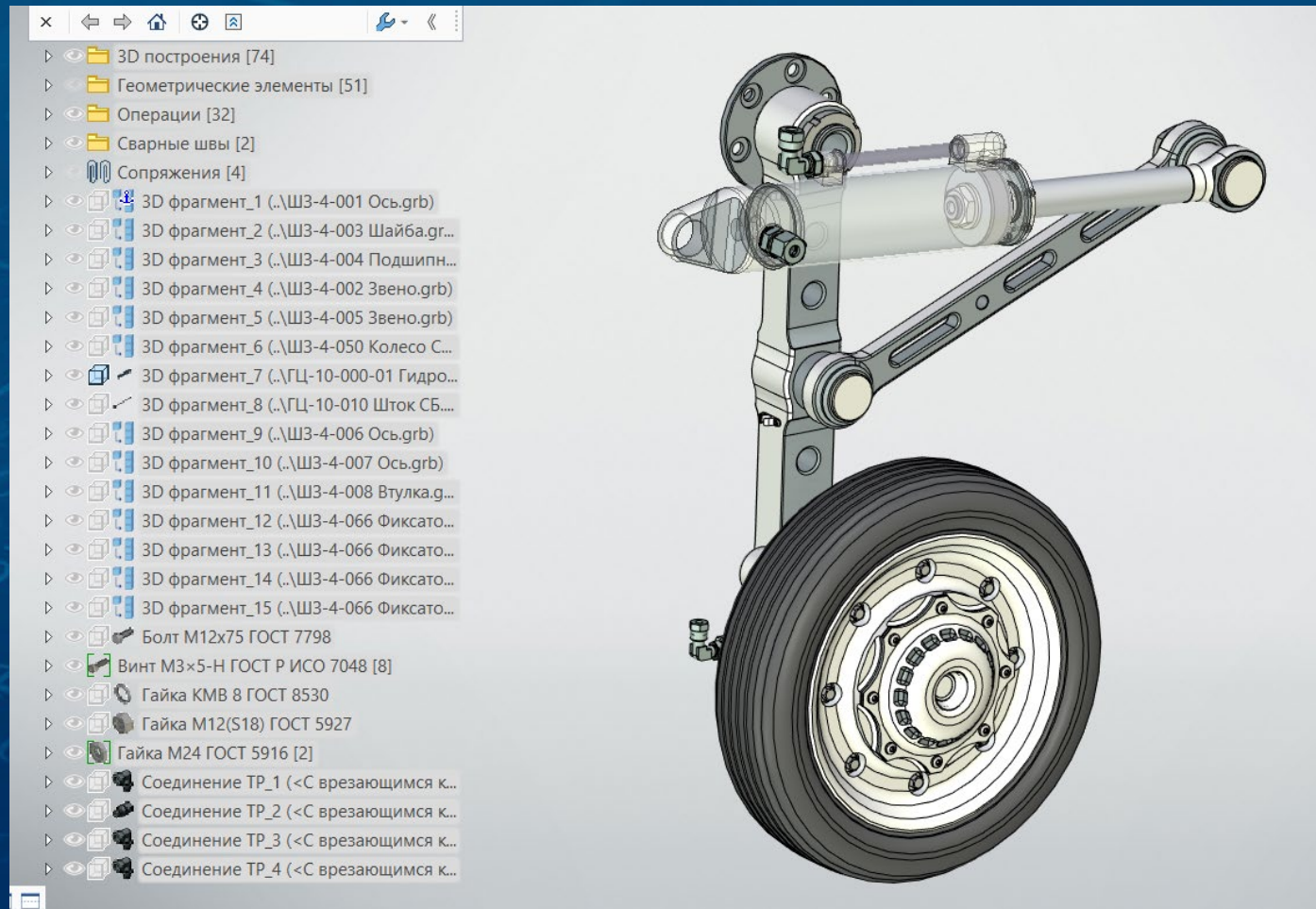
Механизм поворота антенны



Механизмы приводов закрылков, элеронов, рулей

1. Подготовка подвижной геометрии

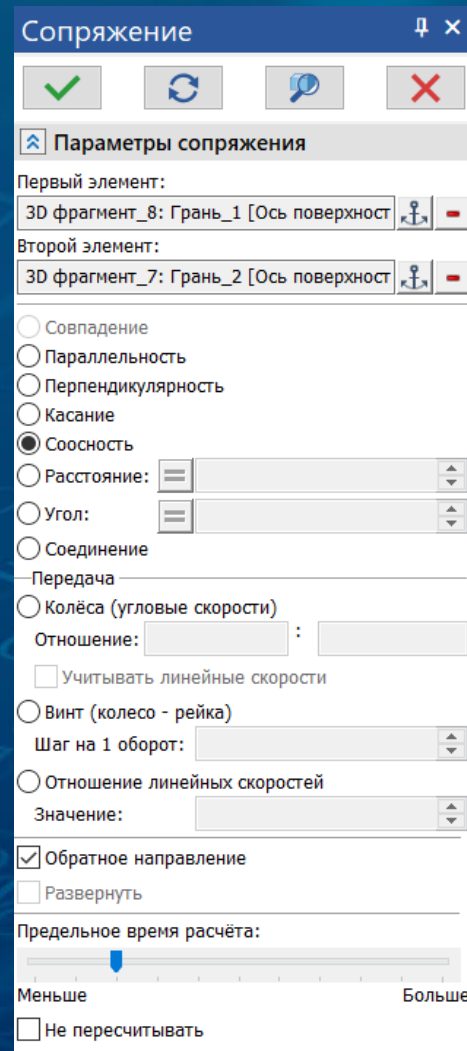
Сборка механизма стойки шасси



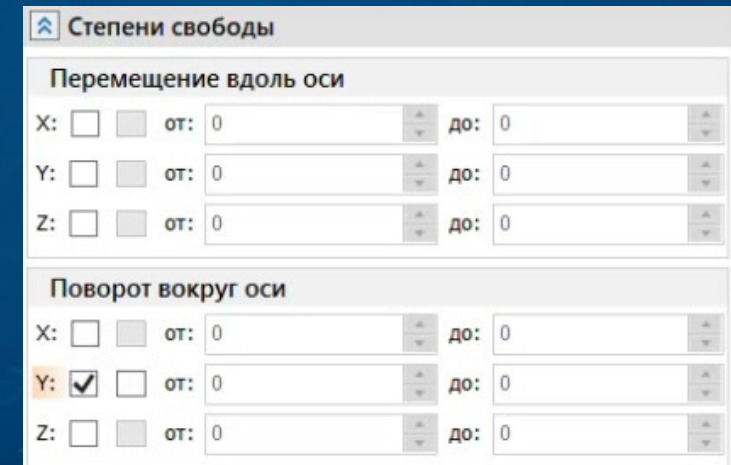
1. Подготовка подвижной геометрии

Типы сопряжений:

- Совпадение
- Параллельность, перпендикулярность
- Касание
- Соосность
- Расстояние
- Угол
- Передача типа «Колёса»
- Передача типа «Винт»
- Отношение линейных скоростей

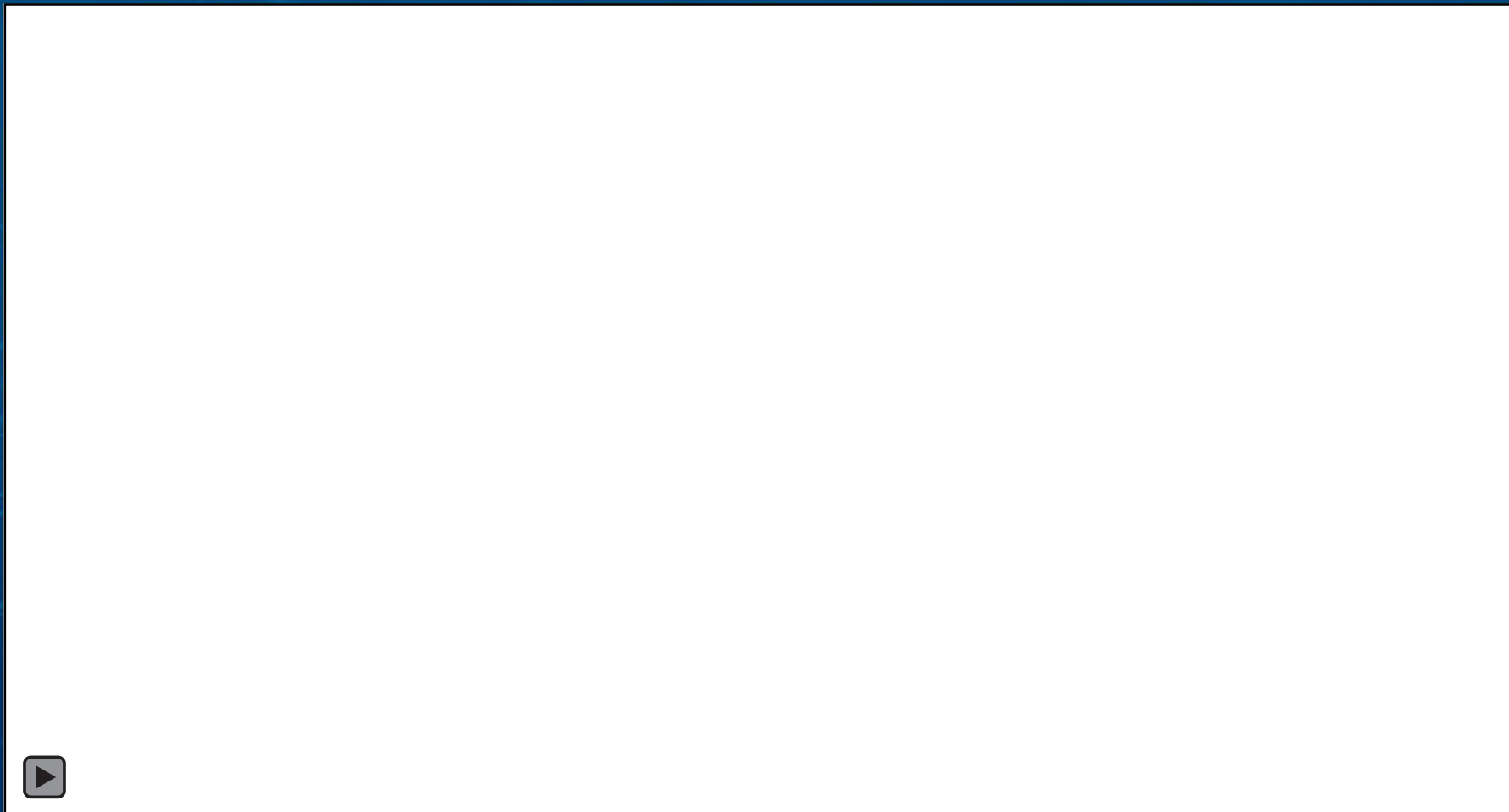


Степени свободы



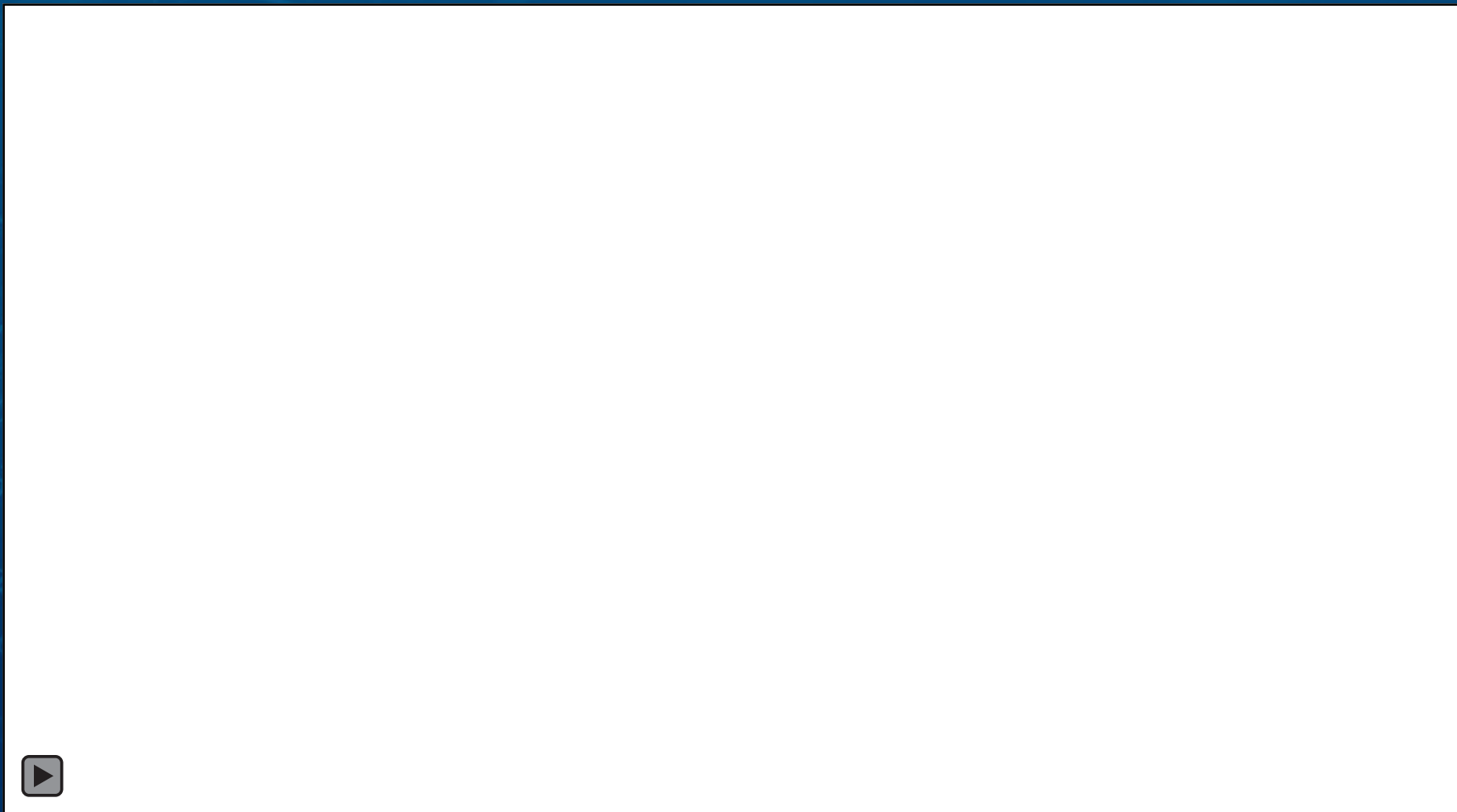
1. Подготовка подвижной геометрии

Фиксирование неподвижных элементов



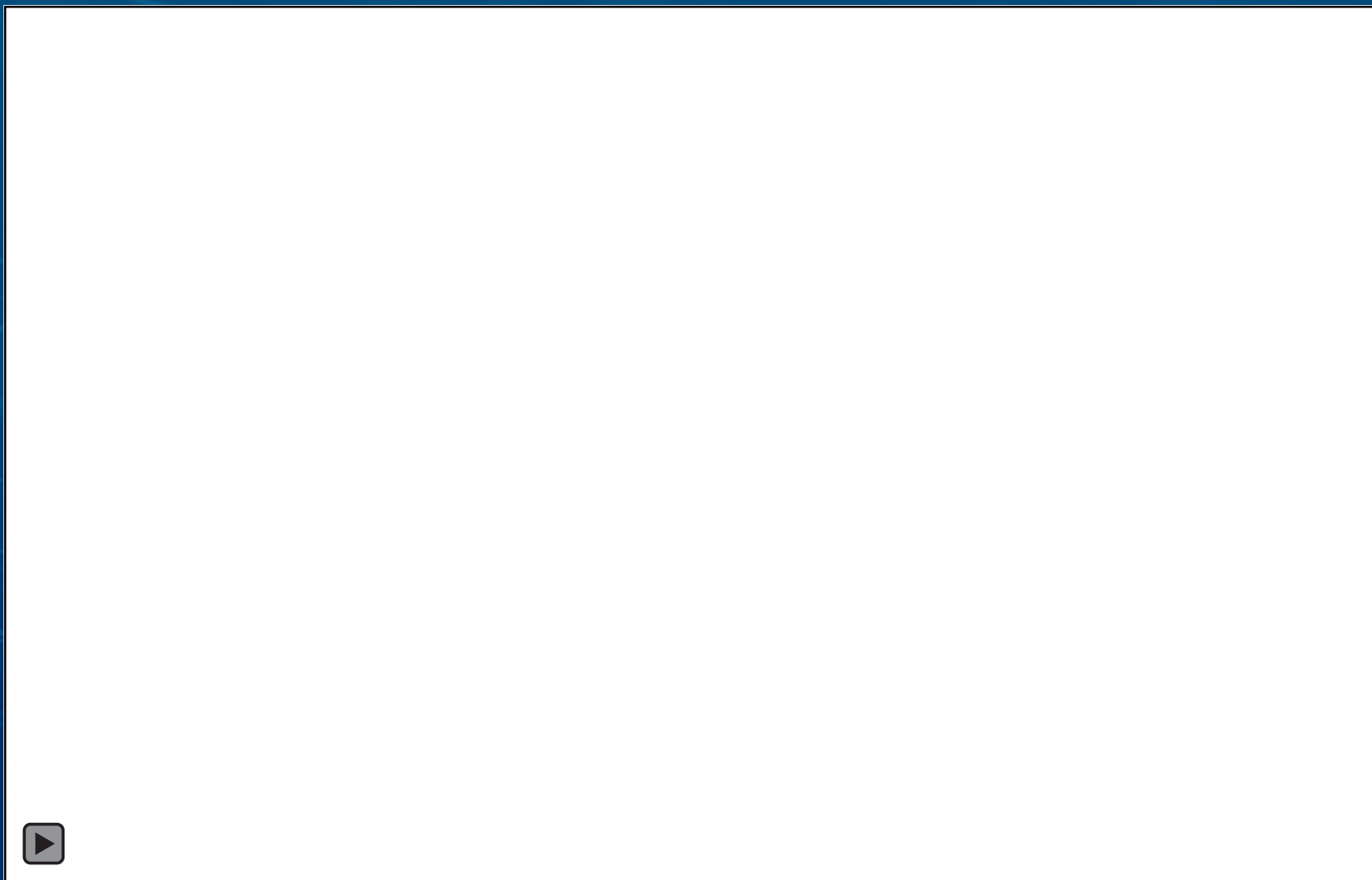
1. Подготовка подвижной геометрии

Задание сопряжений



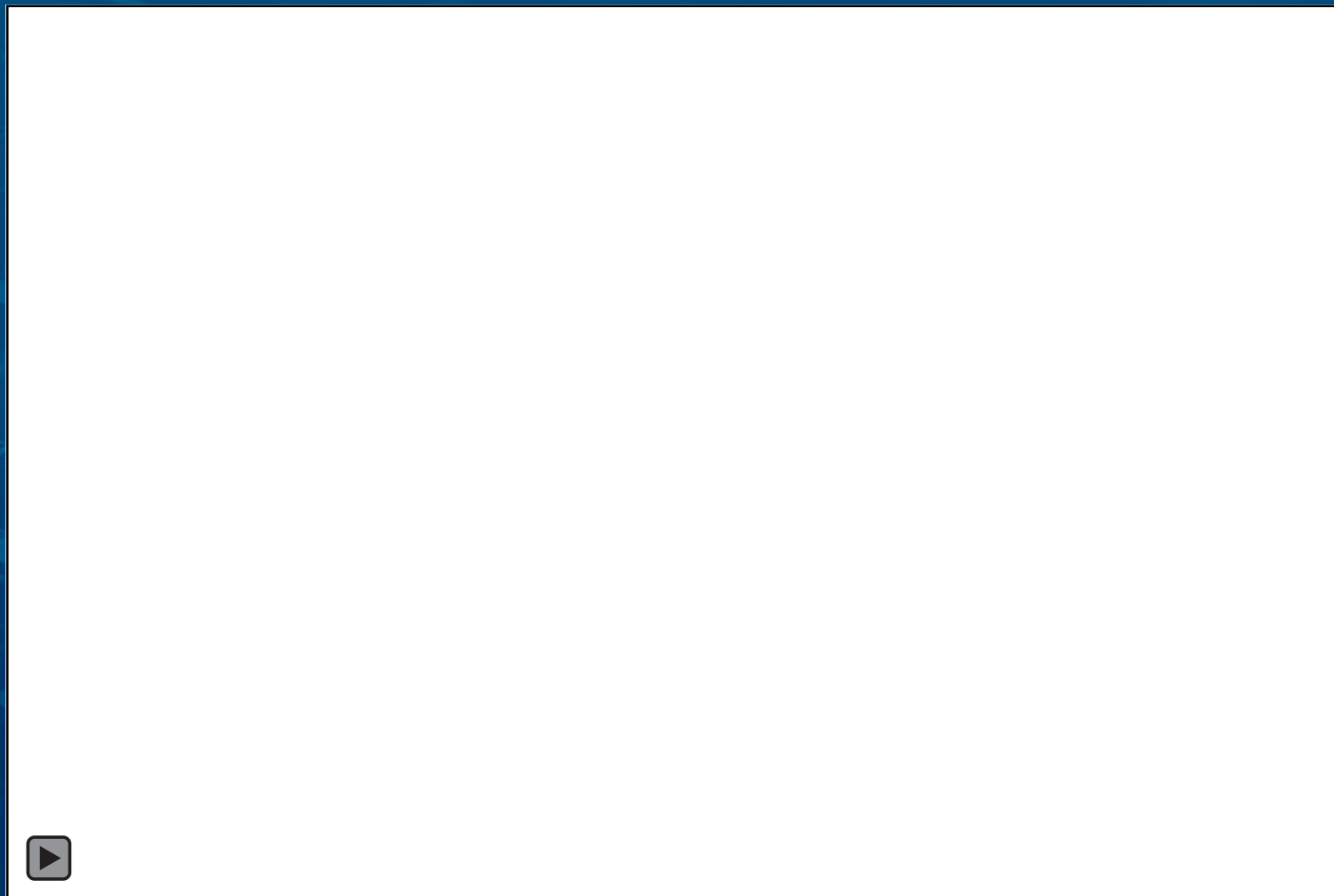
1. Подготовка подвижной геометрии

Задание степеней свободы для подвижных 3D фрагментов



1. Подготовка подвижной геометрии

Проверка степеней свободы



2. Создание задачи и настройка параметров

Создание задачи

Тип

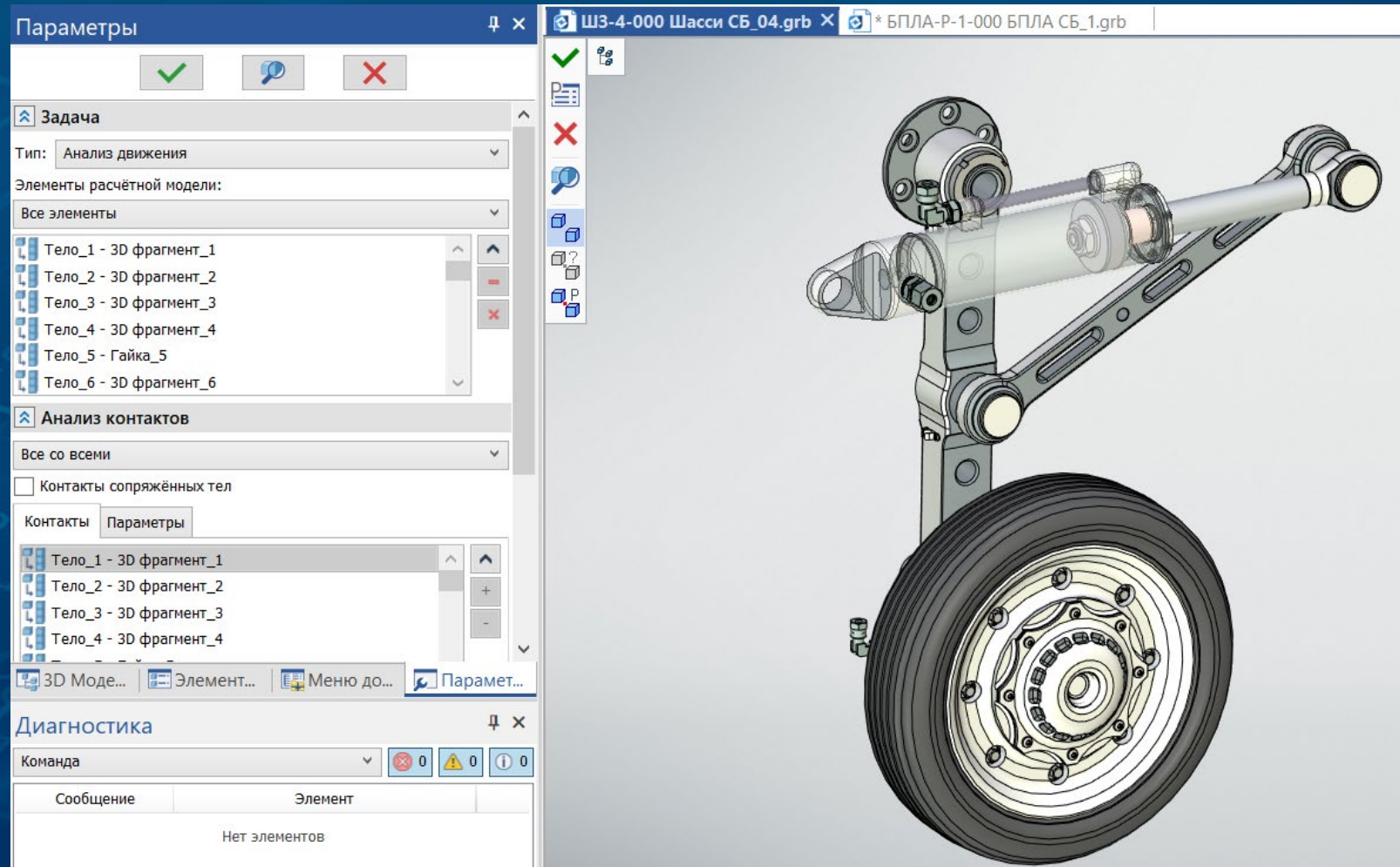
- Анализ движения

Элементы расчётной модели

- Все элементы
- Выбранные
- Все кроме выбранных

Анализ контактов

- Отключен
- Все со всеми
- Вручную



2. Создание задачи и настройка параметров

Параметры задачи – основные

- Задание времени моделирования
 - ✓ Продолжительность и кадров в секунду или
 - ✓ Длительность кадра и количество кадров
- Шагов в кадре
 - ✓ Штатно и максимально
- Метод определения контактов

Параметры задачи

Основные По умолчанию Моделирование

Задача: Анализ движения_1

Время моделирования

Время

Продолжительность: 8.5 c

Кадров в секунду: 50

Кадры

Длительность кадра: 0.02 c

Количество кадров: 180000

Шагов в кадре

Штатно: 100

Максимально: 5000

Определение контактов: Сетки

OK Отмена

2. Создание задачи и настройка параметров

Параметры задачи – по умолчанию

- Настройки для шарниров:
 - ✓ Коэффициенты трения
 - ✓ Натяг
 - ✓ Геометрические размеры шарнира
- Настройки для контактов:
 - ✓ Коэффициенты трения
 - ✓ Коэффициент восстановления при ударе
 - ✓ Граница неупругости.

Параметры задачи

Основные | По умолчанию | Моделирование

Размеры шарнира

Длина: 50 мм

Ширина: 10 мм

Параметры трения

Контакты | Шарниры

Учитывать трение: 1

Трение покоя: 0.3

Трение движения: 0.25

Трение качения: 0.05 мм

Трение верчения: 0.05 мм

Параметры удара

Коэффициент восстановления: 0.5

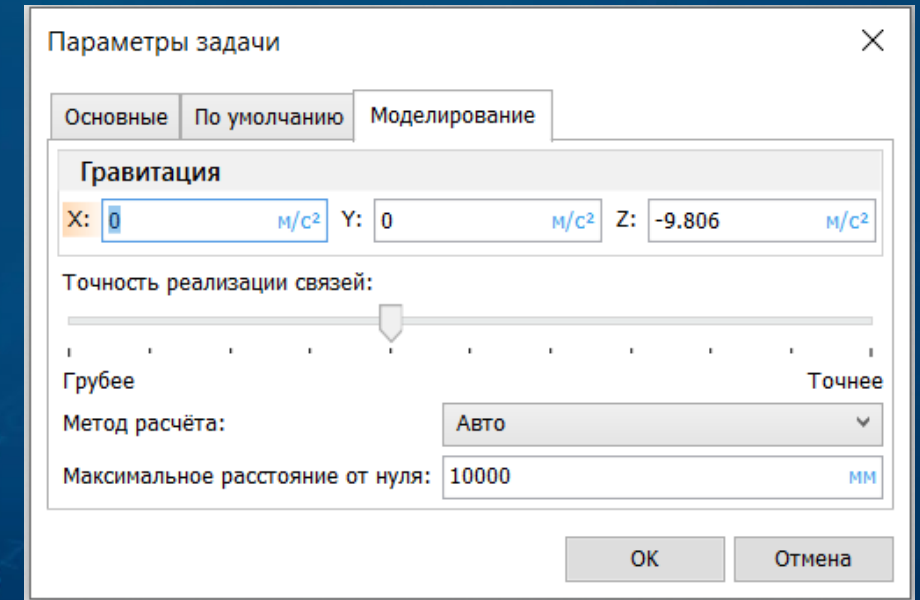
Граница неупругости: 0.01 м/с

OK Отмена

2. Создание задачи и настройка параметров

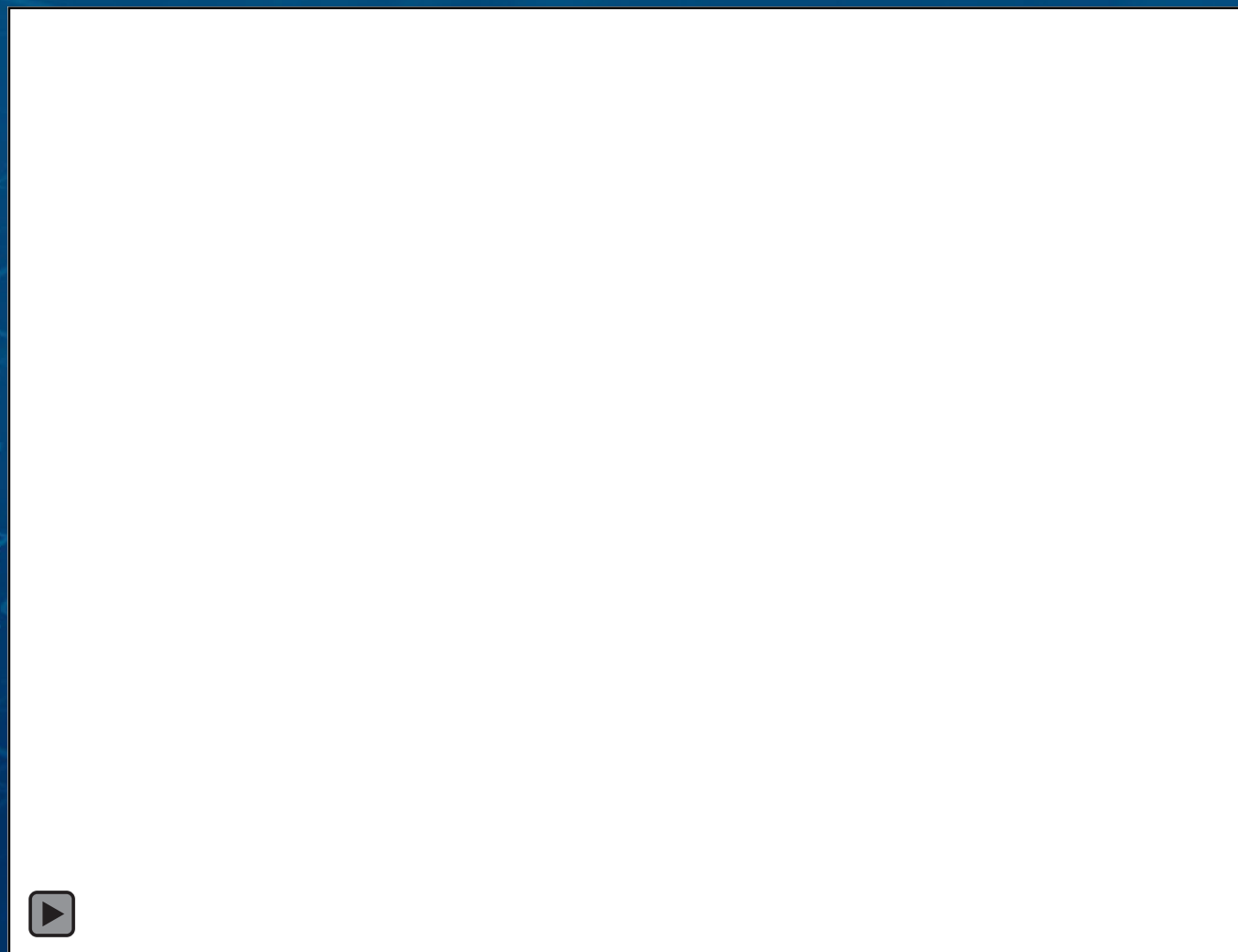
Параметры задачи - моделирование

- Задание гравитации
 - ✓ направление;
 - ✓ величина.
- Настройка точности реализации связей в шарнирах
- Выбор метода расчета (точность вычислений)
 - ✓ Авто;
 - ✓ Точный;
 - ✓ Быстрый.
- Задание расстояния, на которое могут удаляться тела



2. Создание задачи и настройка параметров

Создание задачи



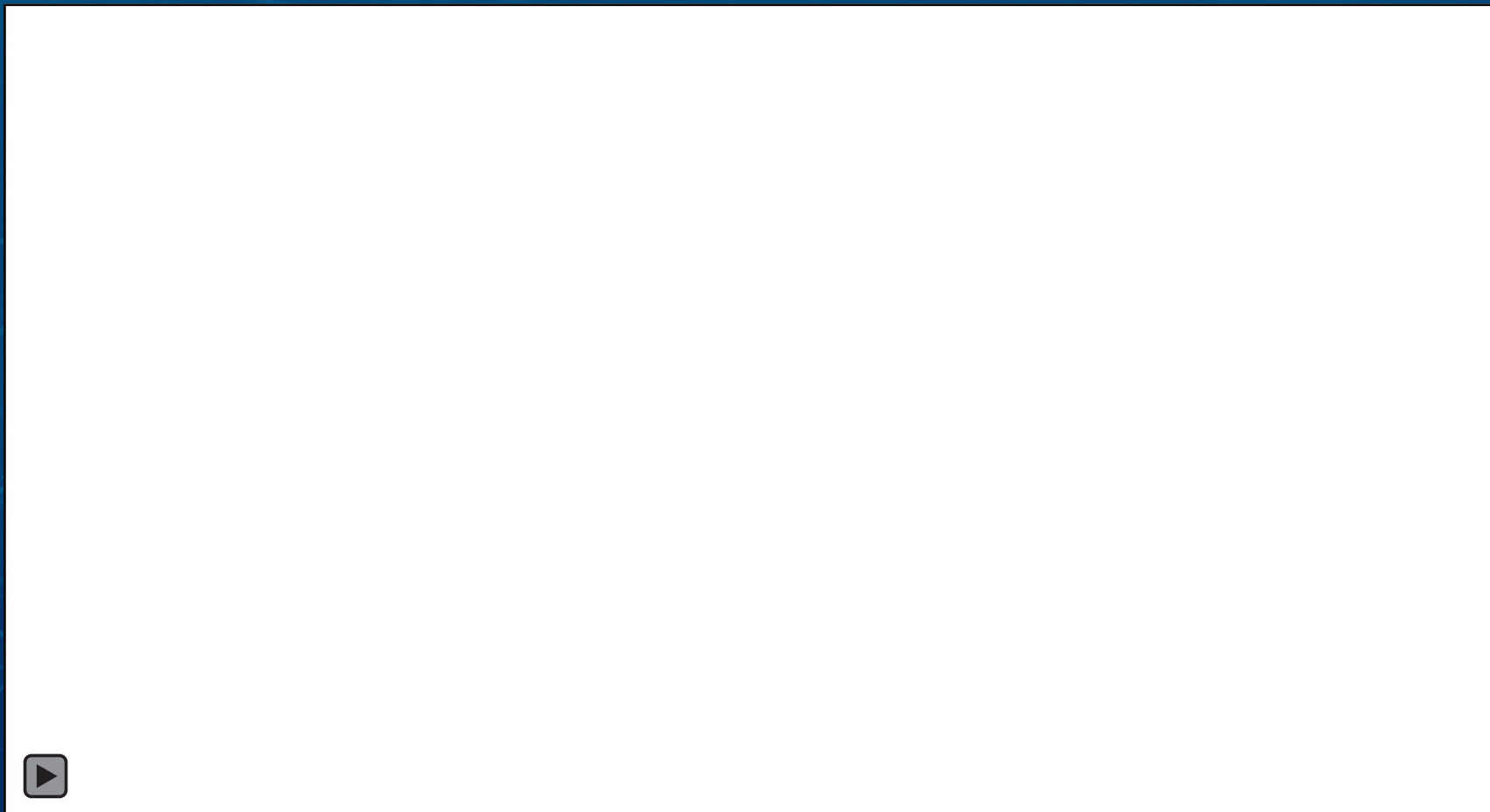
2. Создание задачи и настройка параметров

Типы шарниров:

- **Сферический шарнир**
 - ✓ разрешены повороты во всех направлениях и запрещены все перемещения.
- **Вращательный шарнир**
 - ✓ разрешено только вращение вокруг определенной оси.
- **Поступательный шарнир**
 - ✓ разрешено только перемещение в определенном направлении.
- **Цилиндрический шарнир**
 - ✓ разрешено вращение вокруг определенной оси и перемещение вдоль неё.
- **Винтовой шарнир**
 - ✓ имитирует винтовое соединение, создается на основе передаточных связей.
- **Контактный шарнир**
 - ✓ Контактные шарниры задают отношение между парой элементов тел, связанных другими шарнирами.
- **Неопределенный шарнир**
 - ✓ Все остальные сочетания связей

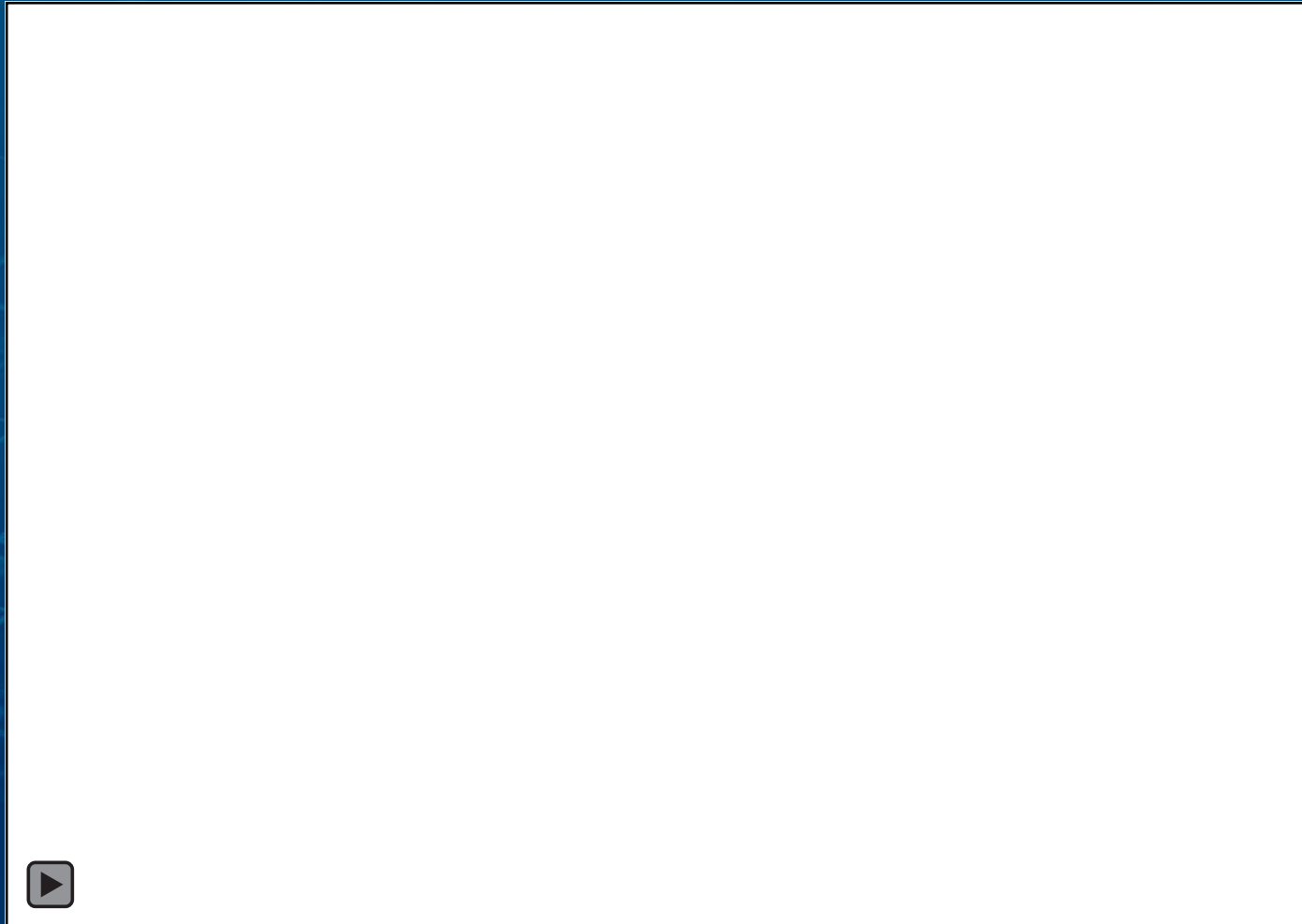
3. Задание нагрузжений

Линейный привод с использованием графика



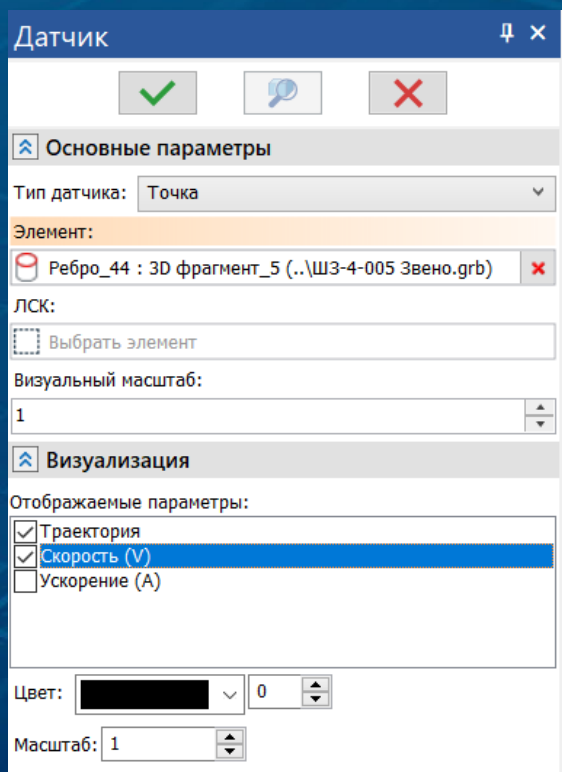
4. Выполнение расчёта

Выполнение расчёта

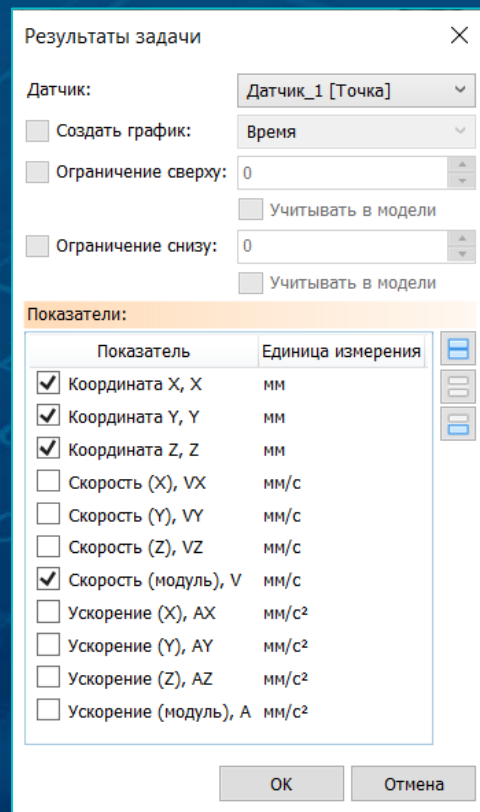


5. Настройка результатов расчёта

1. Создание датчиков



2. Выбор результатов по датчику



3. Отображение текущих значений и графиков



4. Анимация результата

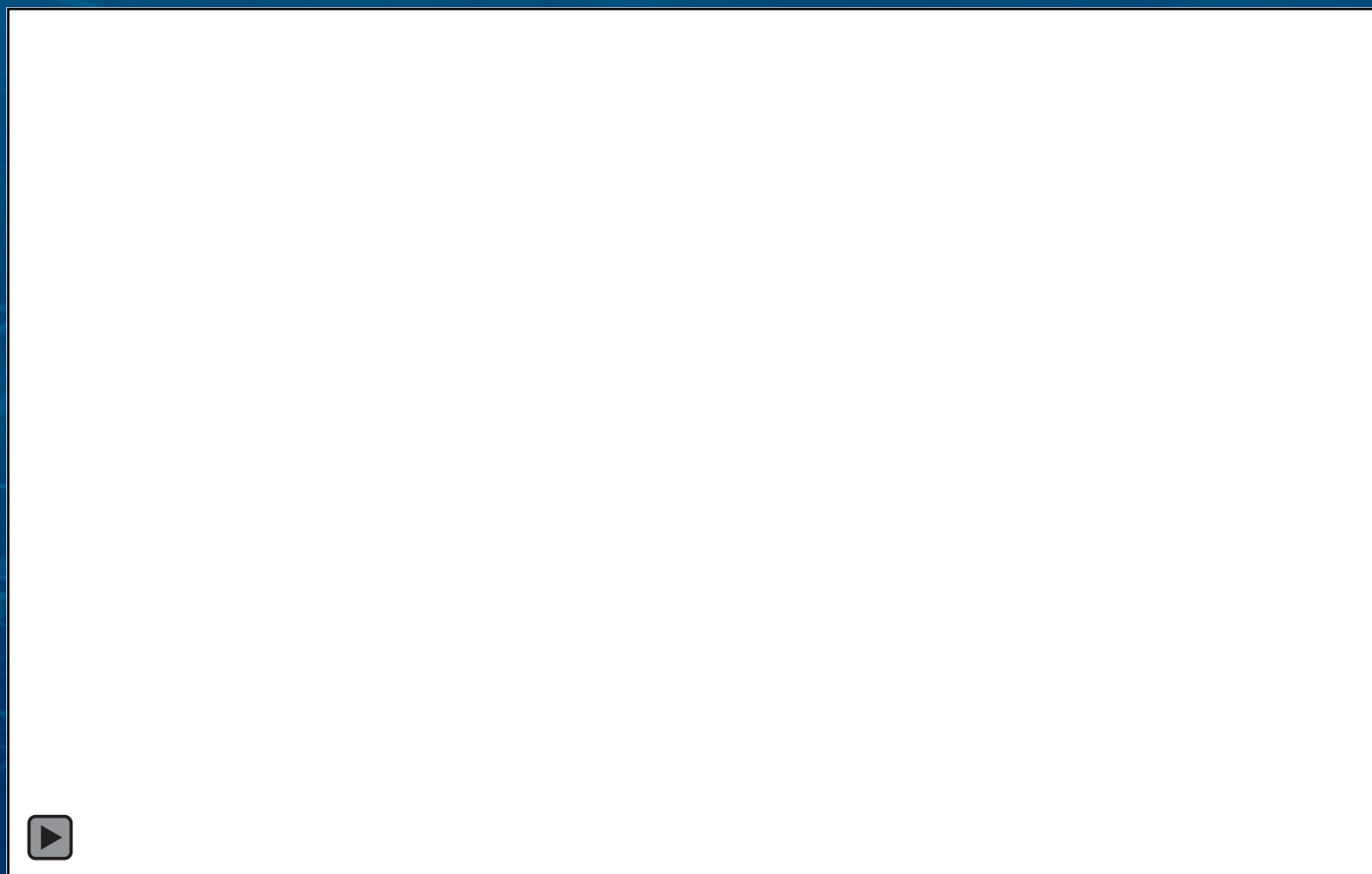


5. Настройка результатов расчета

Типы датчиков:

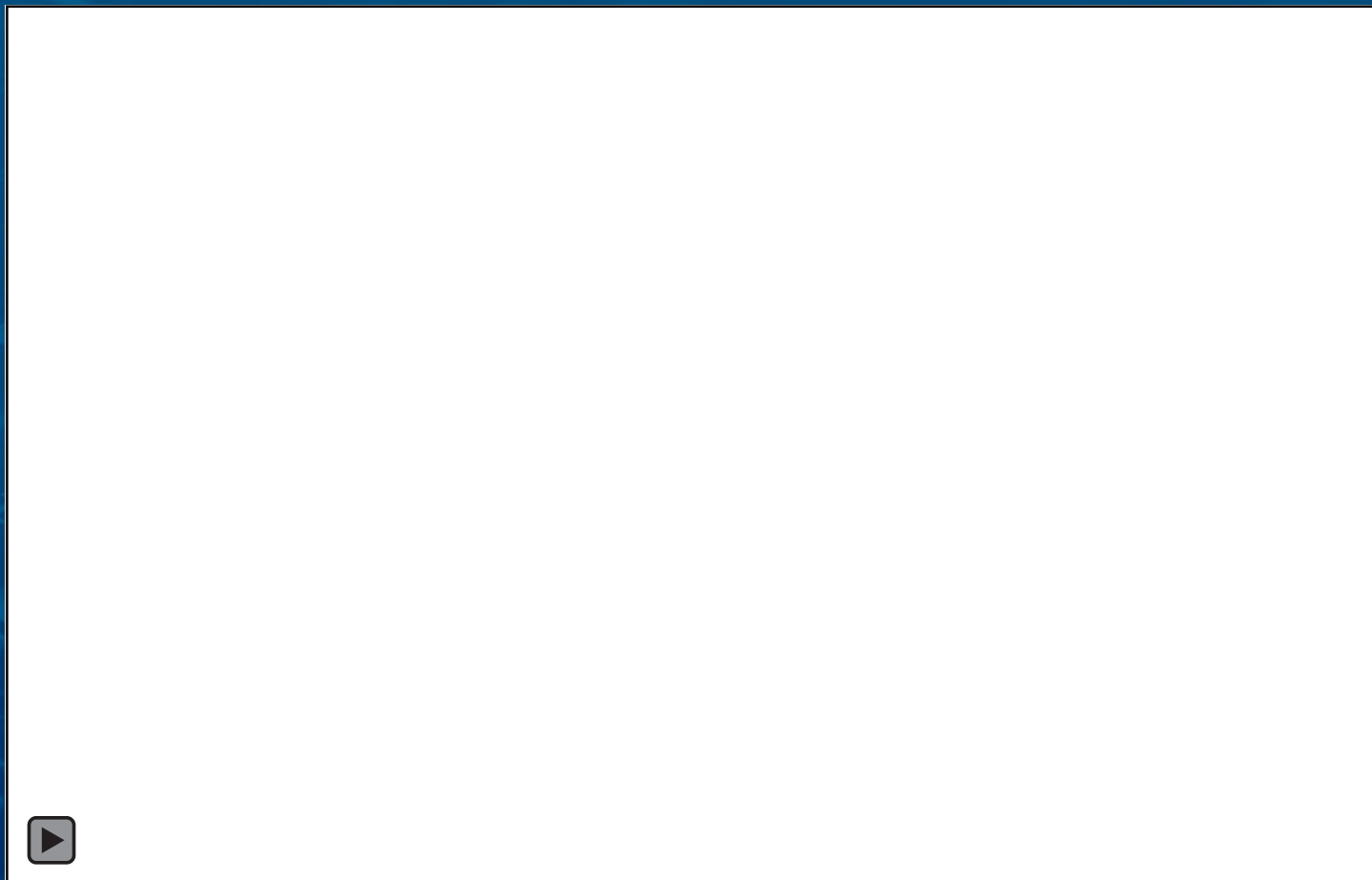
- Тело
 - ✓ для измерения координат, линейных и угловых скоростей и ускорений, а также активной силы и момента, действующих на тело.
- Точка
 - ✓ для измерения координат, линейных скоростей и ускорений любой точки механической системы.
- Шарнир
 - ✓ для измерения сил и моментов реакции в шарнире, сил трения, скоростей, ускорения и координат шарнира.
- Силовой элемент
 - ✓ для измерения фактических значений силы и/или момента, прикладываемых к телу.
- Расстояние
 - ✓ для измерения дистанции между двумя точками, связанными с любыми телами задачи, скорость изменения дистанции, ускорение.
- Пара тел
 - ✓ для измерения сил реакции и трения при контакте двух тел. В качестве основы для построения датчика выбирается два тела задачи.

Создание датчиков



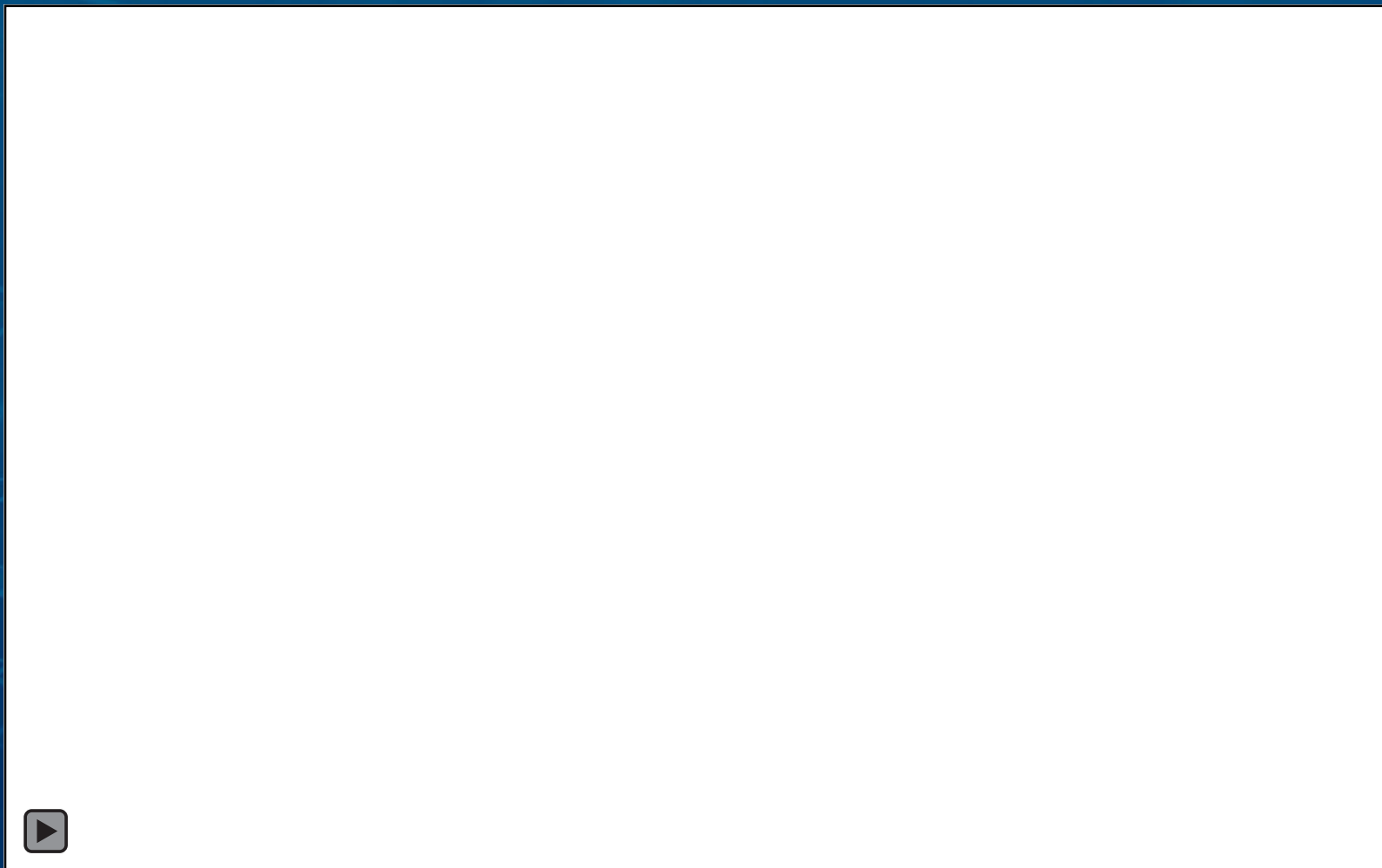
5. Настройка результатов расчёта

Визуализация траектории и вектора скорости



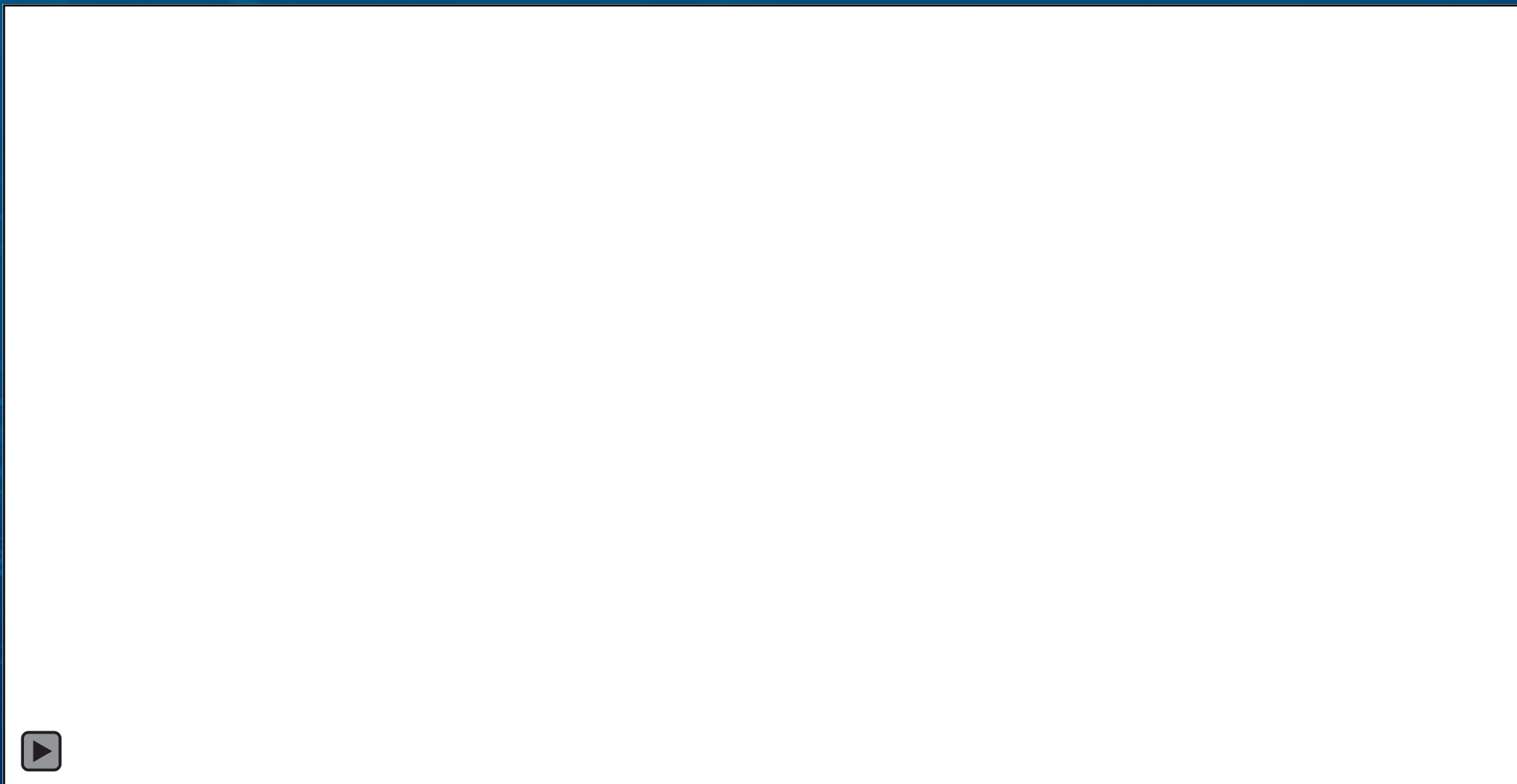
5. Настройка результатов расчета

Выбор результатов (графиков) по датчику



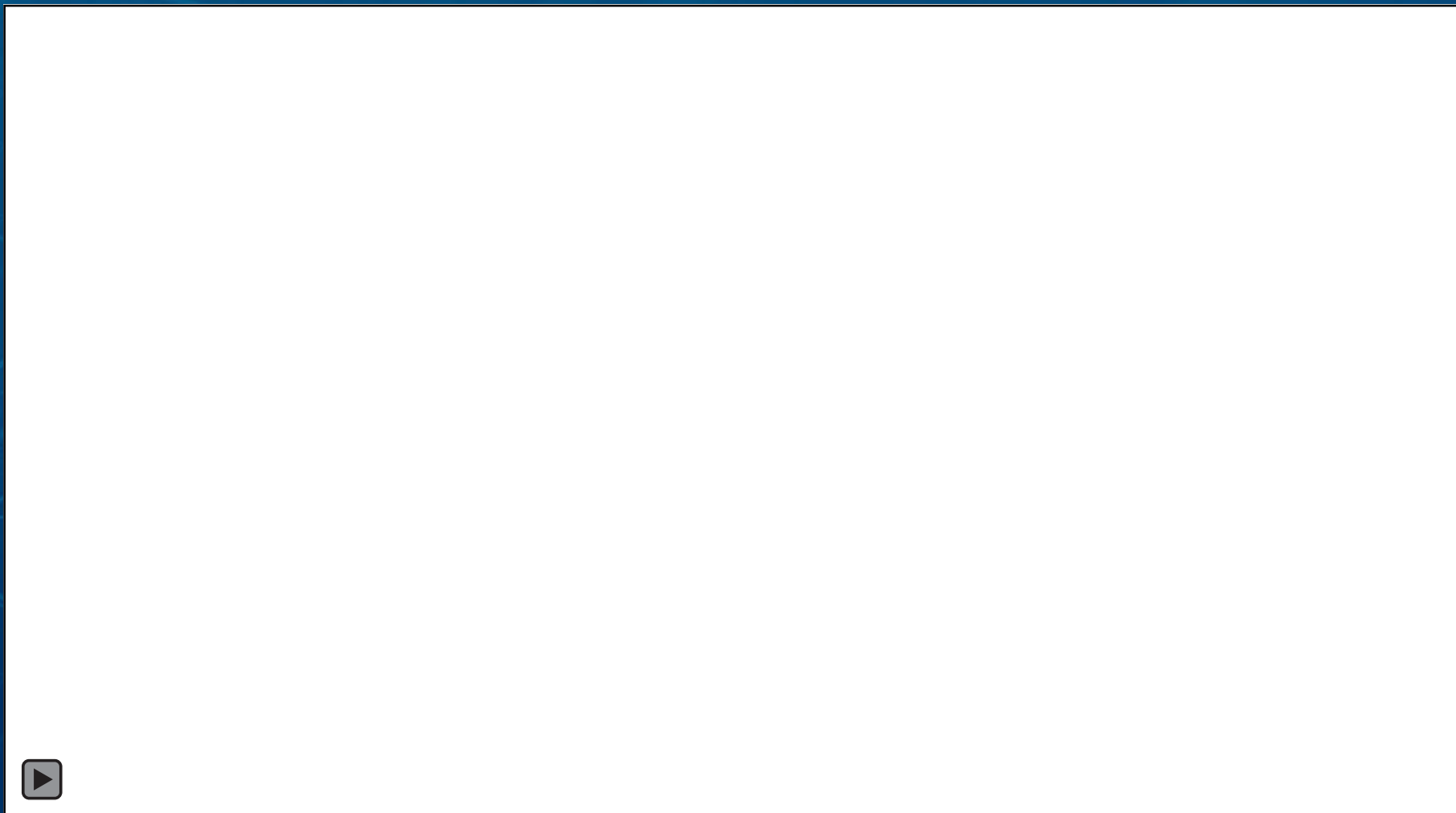
5. Настройка результатов расчета

Визуализация текущих значений и графиков при проигрывании



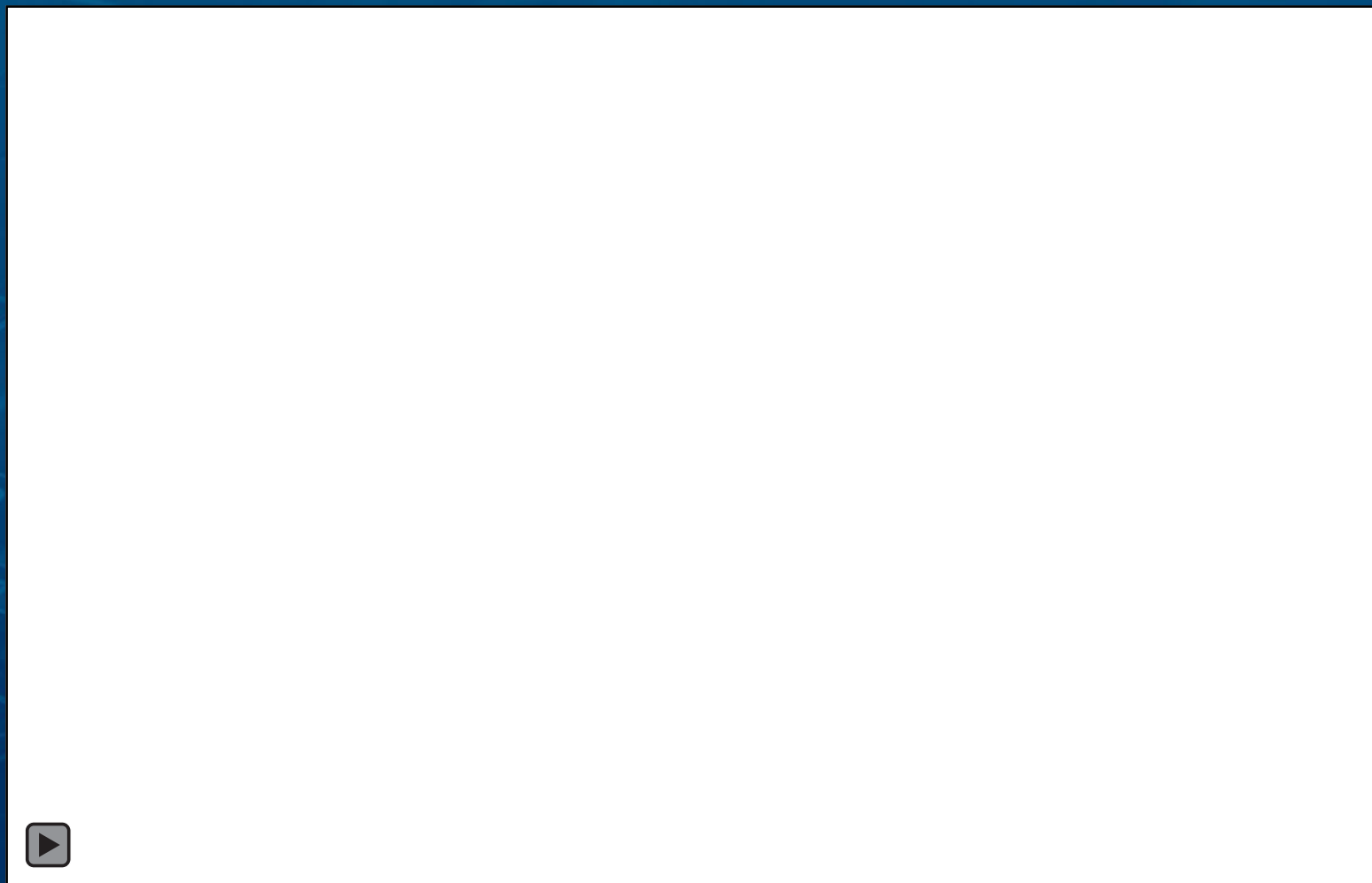
5. Настройка результатов расчёта

3D кривая по траектории



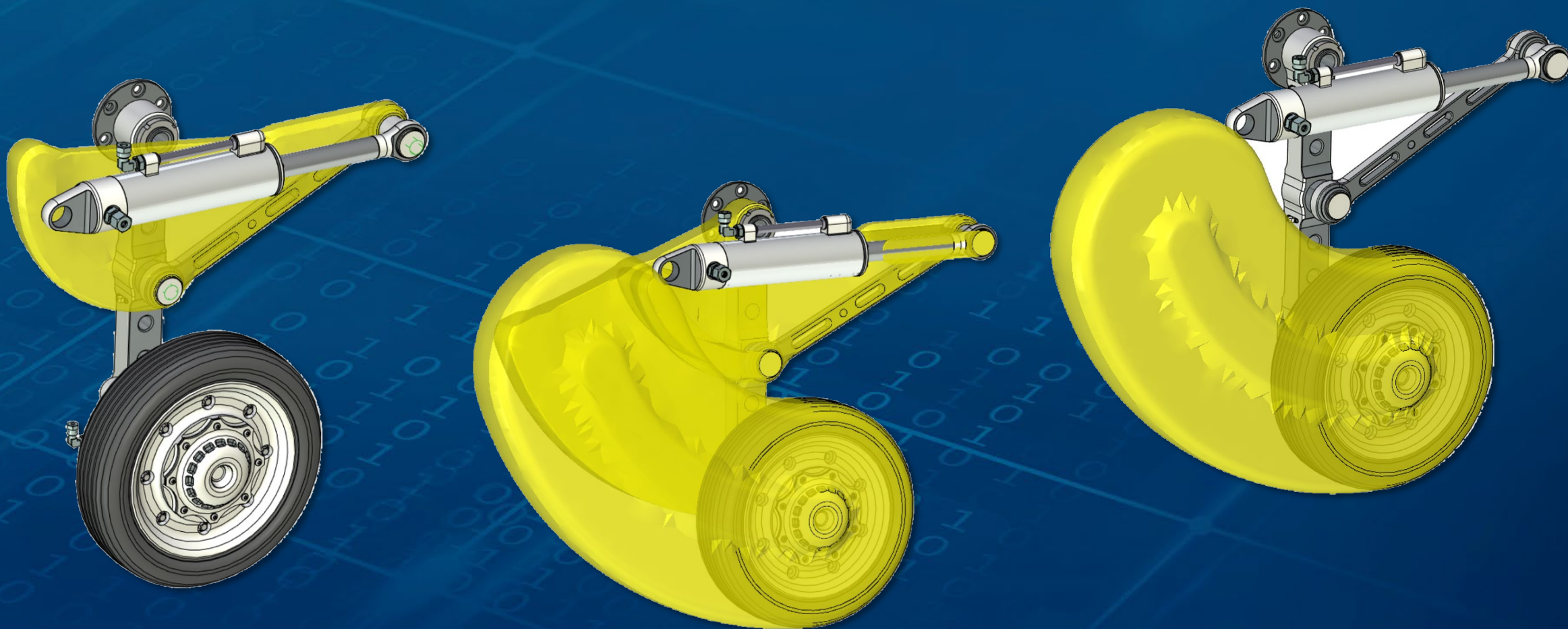
5. Настройка результатов расчета

Ометаемый объем



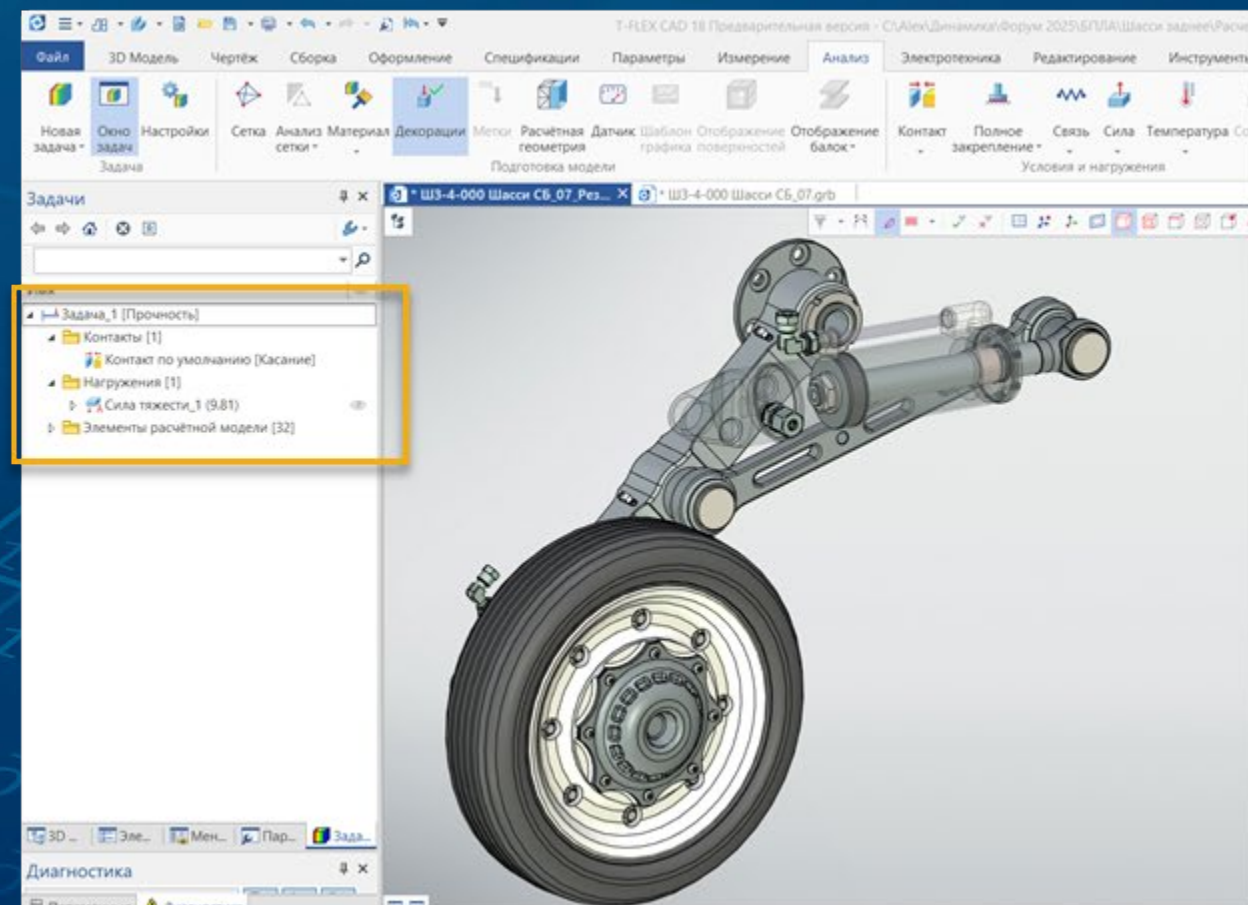
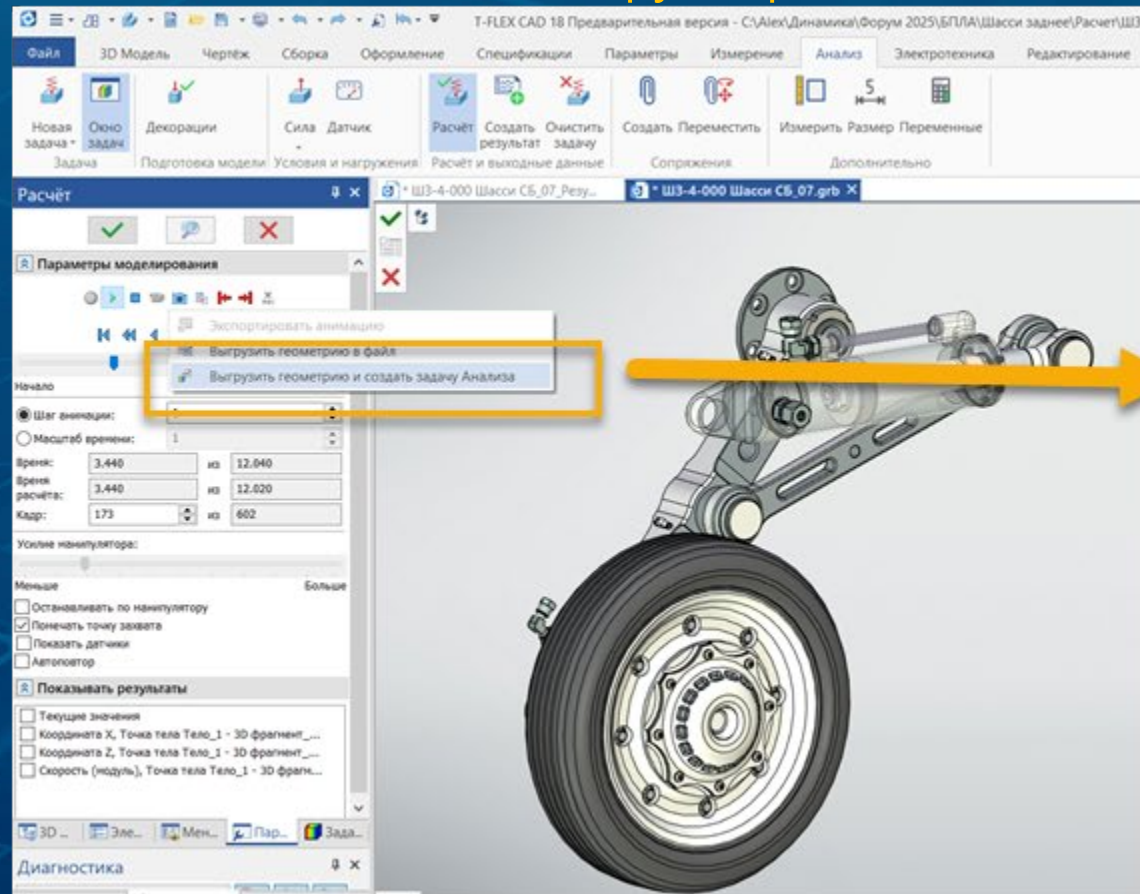
5. Настройка результатов расчета

Примеры ометаемого объема



5. Настройка результатов расчёта

Выгрузка расчётного положения для дальнейшего анализа



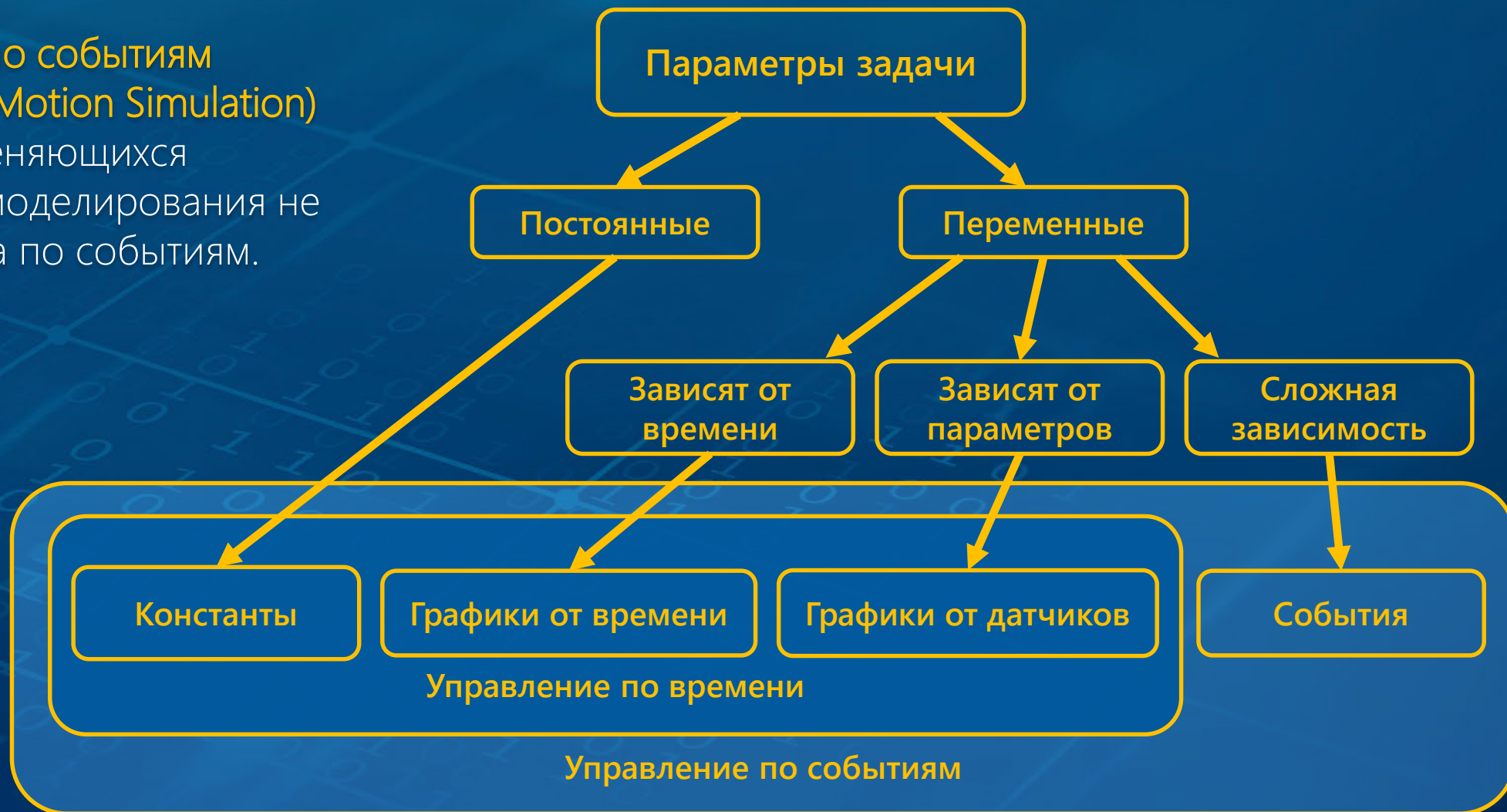
3. Управление по событиям (Event-Based Motion Simulation)

1. Принцип управления по событиям
2. Объект «Событие»
3. Пример расчёта
4. Визуализация с помощью временной шкалы
5. Преимущества управления по событиям

1. Принцип управления по событиям

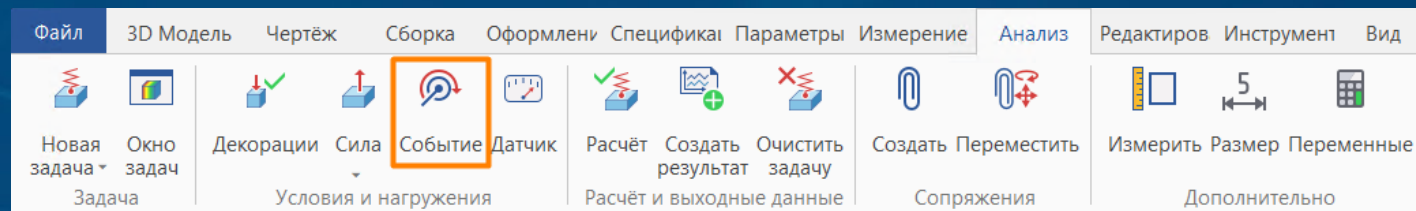
Управление по событиям (Event-Based Motion Simulation)

Задание изменяющихся параметров моделирования не по времени, а по событиям.



2. Объект «Событие»

Инструмент «Событие»



Событие [Close] [Help] [OK] [Cancel]

Основные параметры

Триггер

Вид: Событие

Элемент: Цилиндр стойки - 1 Разгон

Условие: Запуск

Задержка: 0 с

Действие

Тип элемента: Напряжение

Элемент: Створка левая (0.001 °/с)

Вид действия: Изменить

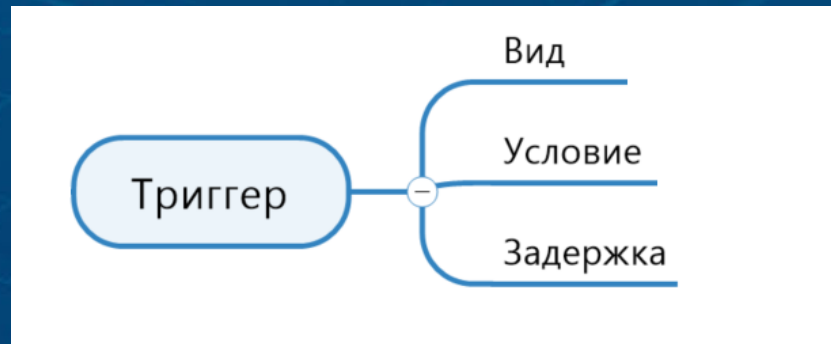
Установить значение: 2.4 рад/с

Продолжительность: 0.5 с

Закон: Кубический

2. Объект «Событие»

Свойство «Триггер»



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: рад/с

Продолжительность: с

Закон:

2. Объект «Событие»

Свойство «Действие»



Событие

✓ 🔍 ✗

Основные параметры

Триггер

Вид:

Задержка: с

Действие

Тип элемента:

Элемент:

Вид действия:

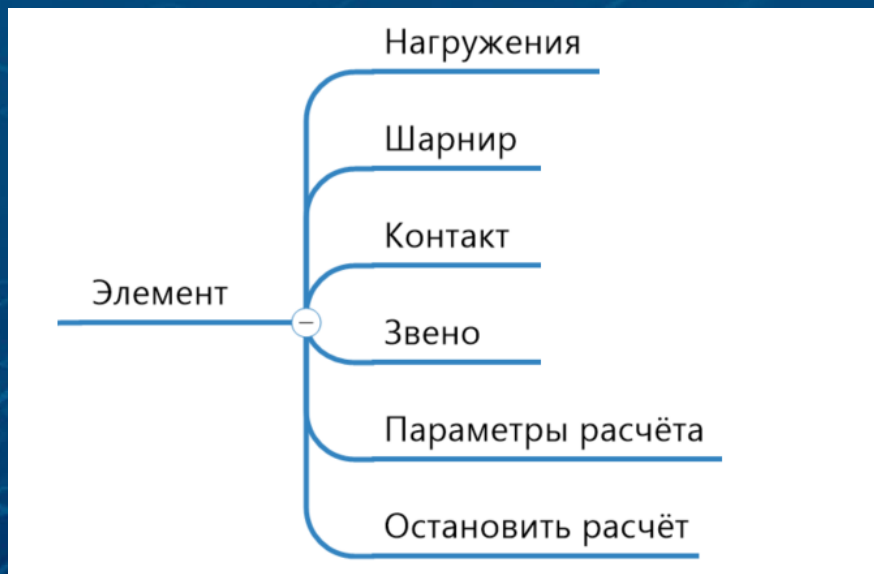
Установить значение: м/с

Продолжительность: с

Закон:

2. Объект «Событие»

Свойство «Элемент»



Событие

✓ 🔍 ✗

Основные параметры

Триггер

Вид:

Задержка: с

Действие

Тип элемента:

Элемент:

Вид действия:

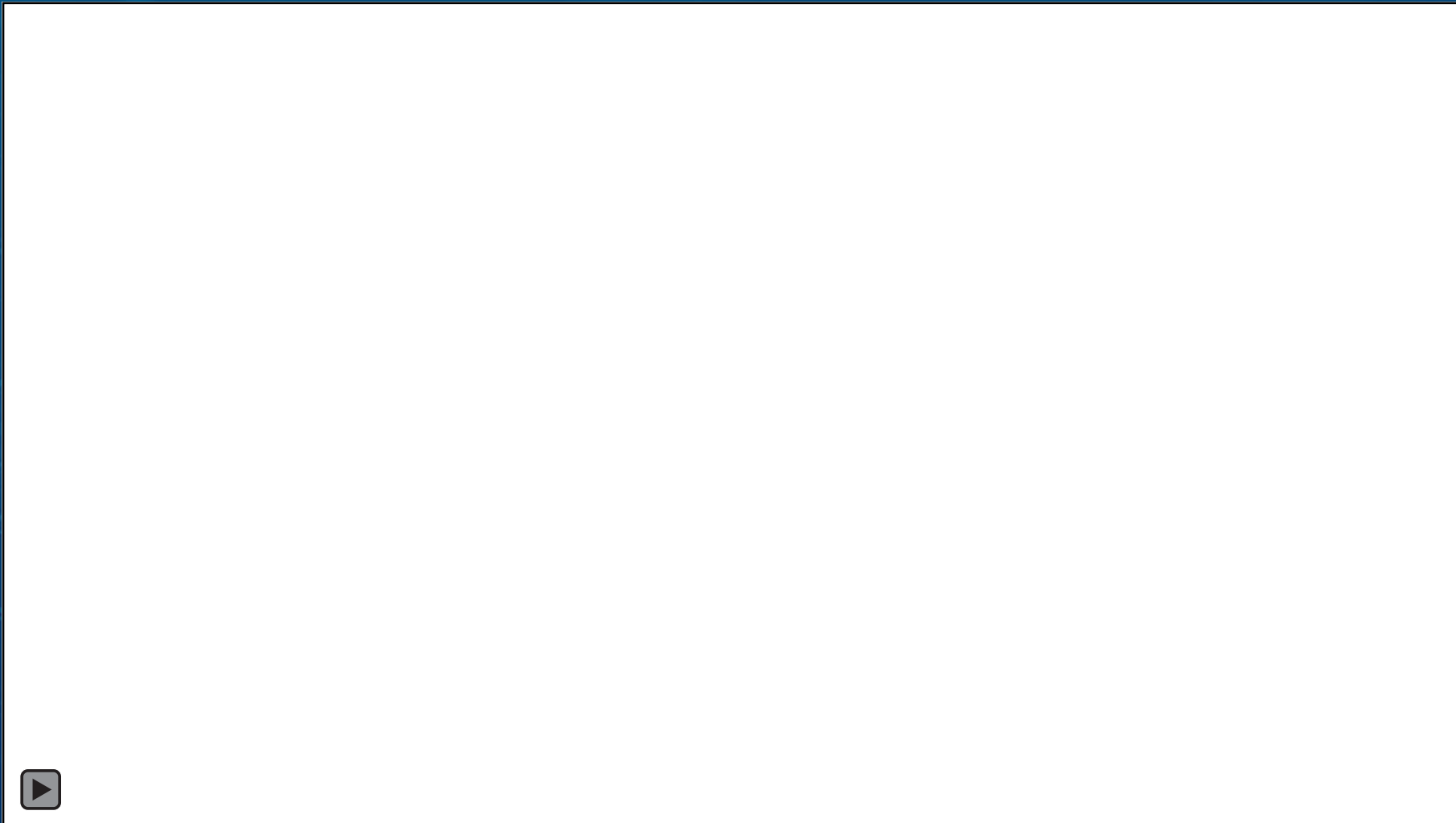
Установить значение: м/с

Продолжительность: с

Закон:

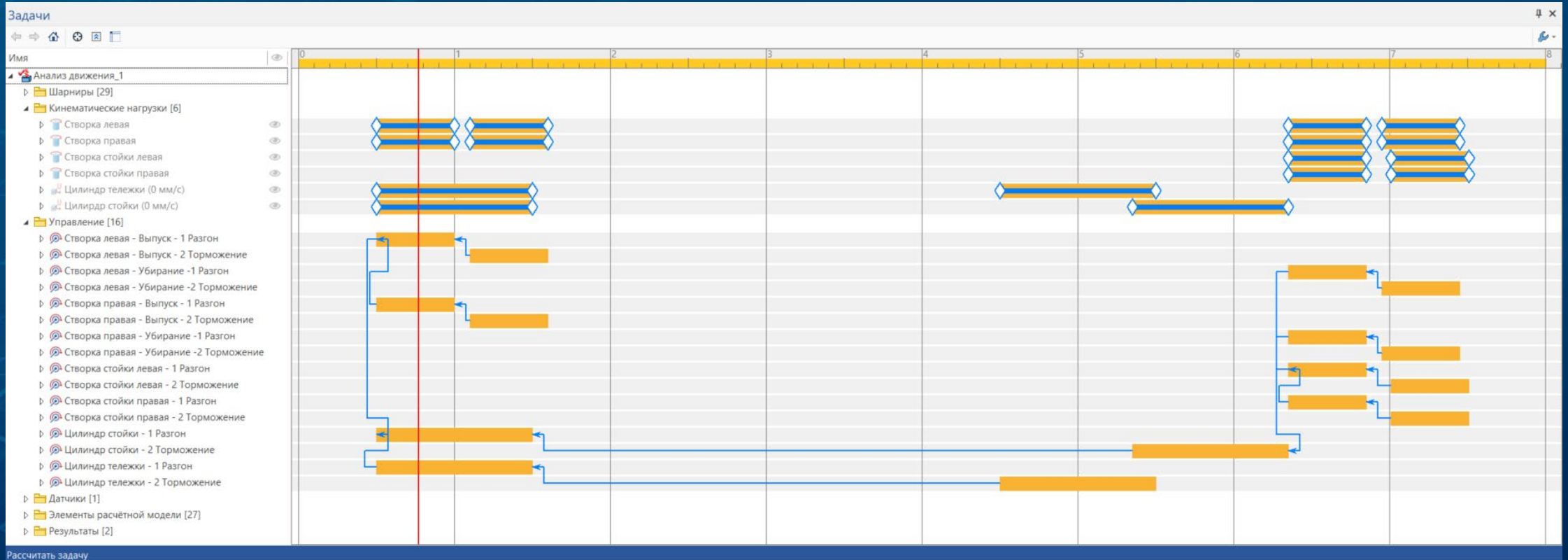
3. Пример расчёта

Пример расчёта с управлением по событиям

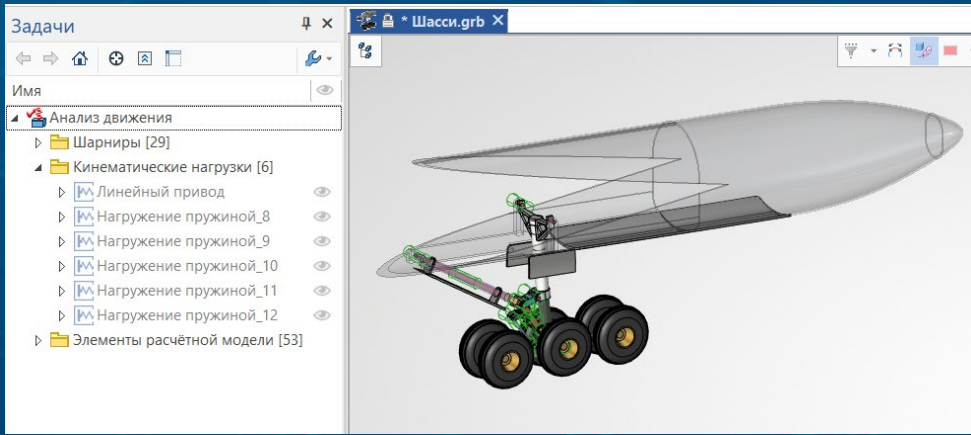


4. Визуализация с помощью временной шкалы

Временная шкала



По времени

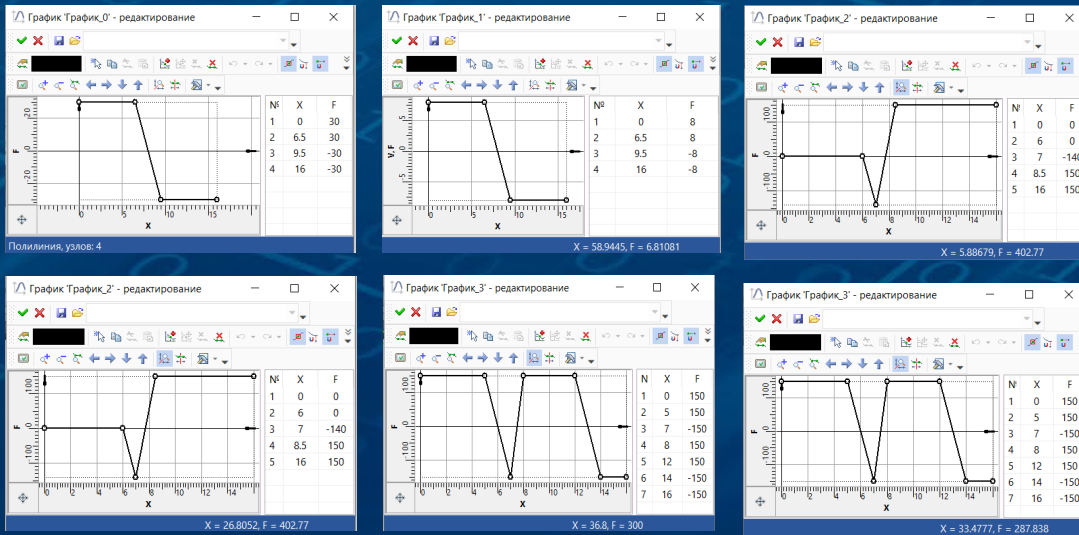


По событиям

Задачи

Имя

- Управление [16]
 - Створка левая - Выпуск - 1 Разгон
 - Створка левая - Выпуск - 2 Торможение
 - Створка левая - Убирание -1 Разгон
 - Триггер - Событие (Завершение)
 - Действие - Изменить (-2.4 рад/с, 0.5 с, Кубический)
 - Створка левая - Убирание -2 Торможение
 - Створка правая - Выпуск - 1 Разгон
 - Створка правая - Выпуск - 2 Торможение
 - Створка правая - Убирание -1 Разгон
 - Створка правая - Убирание -2 Торможение
 - Створка стойки левая - 1 Разгон
 - Створка стойки левая - 2 Торможение
 - Створка стойки правая - 1 Разгон
 - Створка стойки правая - 2 Торможение
 - Цилиндр стойки - 1 Разгон
 - Цилиндр стойки - 2 Торможение
 - Цилиндр тележки - 1 Разгон
 - Цилиндр тележки - 2 Торможение



5. Преимущества управления по событиям

Преимущества:

- гибкое управление объектами задачи:
 - нагрузками (включить, отключить, изменить);
 - шарнирами (включить, отключить, изменить);
 - телами (включить, исключить);
 - контактами (включить, отключить, изменить);
 - параметрами расчёта (изменить);
- структурирование сложного движения (стадии);
- синхронизация движений;
- построение последовательностей движений (сценариев);
- наглядность представления на временной шкале.

4. Управление T-FLEX Динамикой с помощью API

1. API T-FLEX Динамики
2. Примеры использования

1. API T-FLEX Динамики

API T-FLEX Динамики входит в API T-FLEX CAD

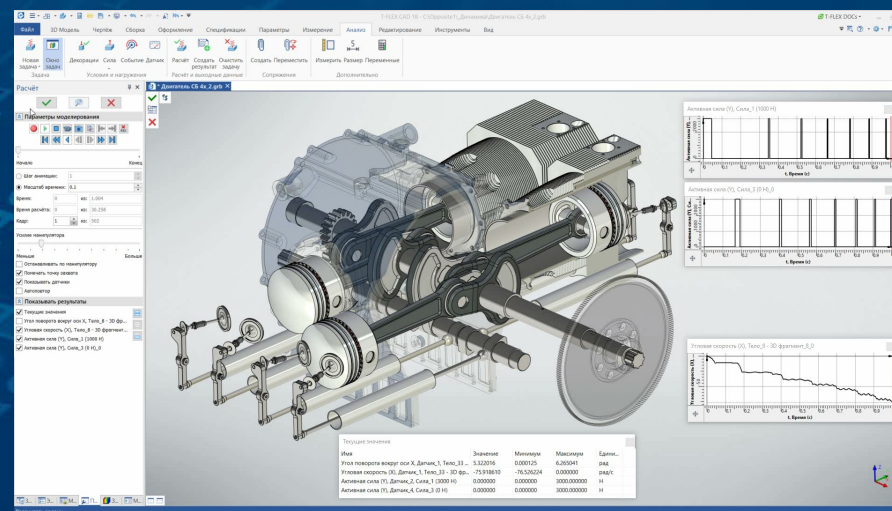
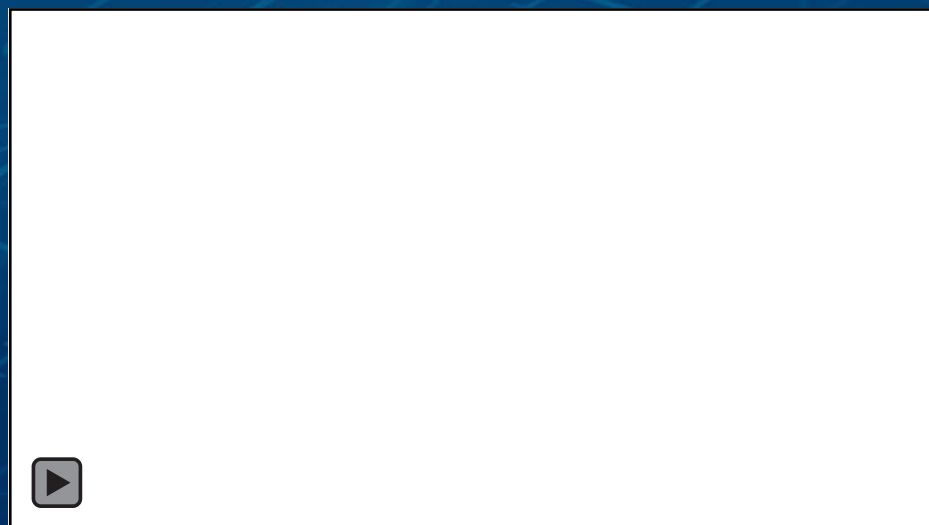
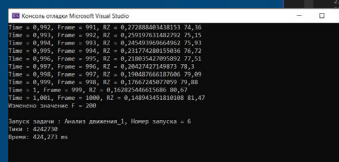
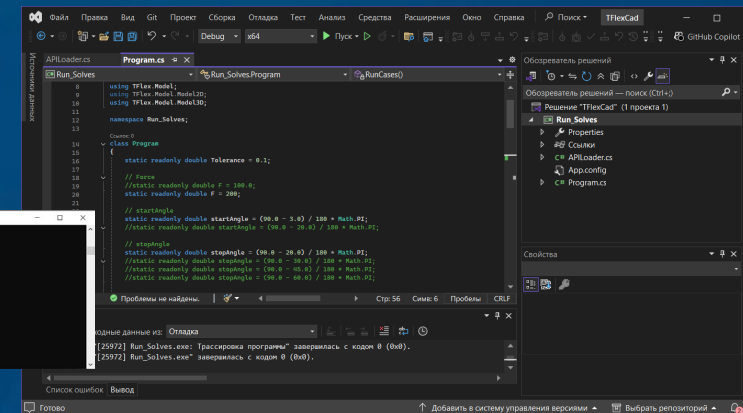
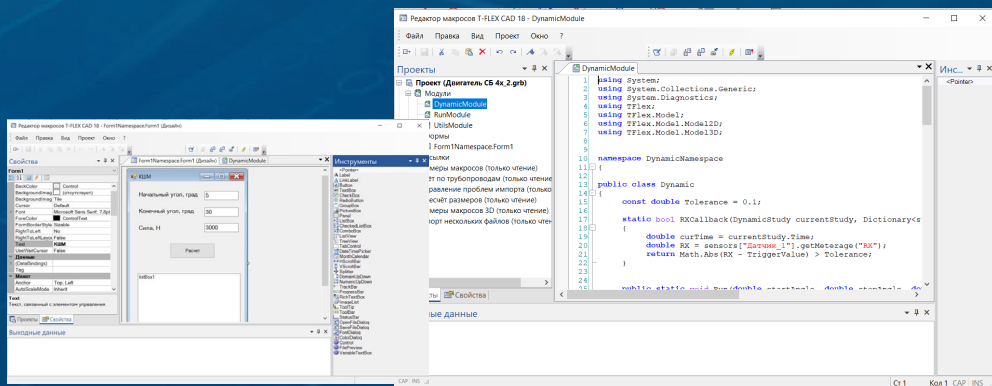
Применение:

- выполнение расчётов **по шагам**;
- **автоматизация** расчётов с помощью макросов;
- **интеграция** с продуктами T-FLEX и внешними системами.

1. API T-FLEX Динамики

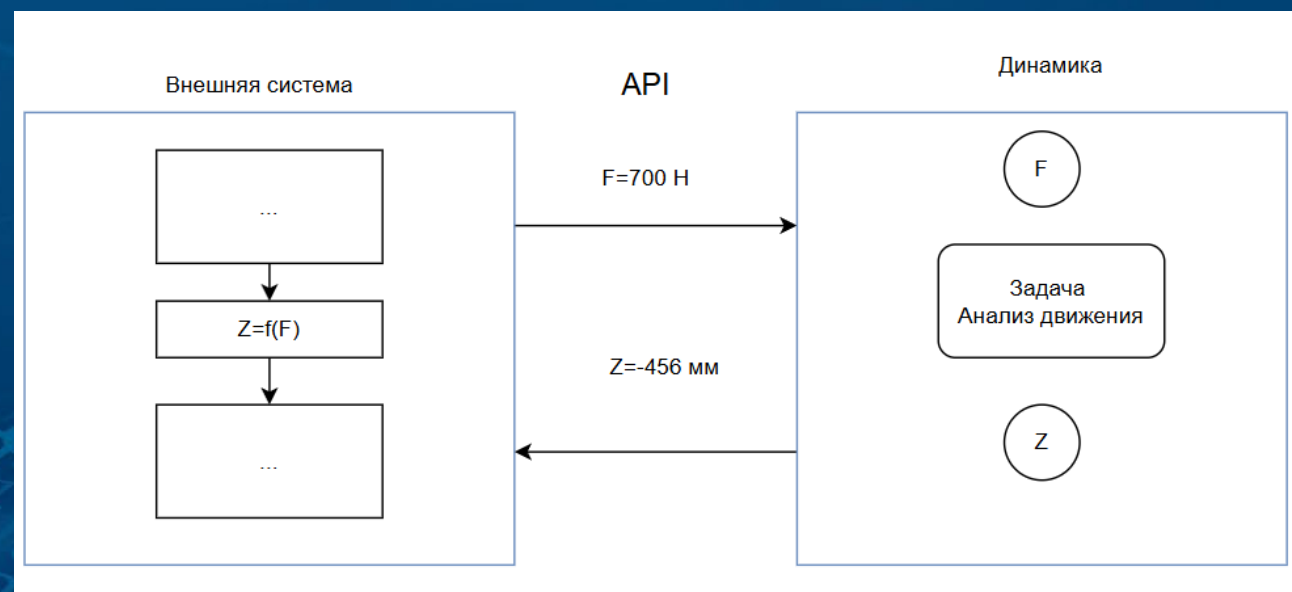
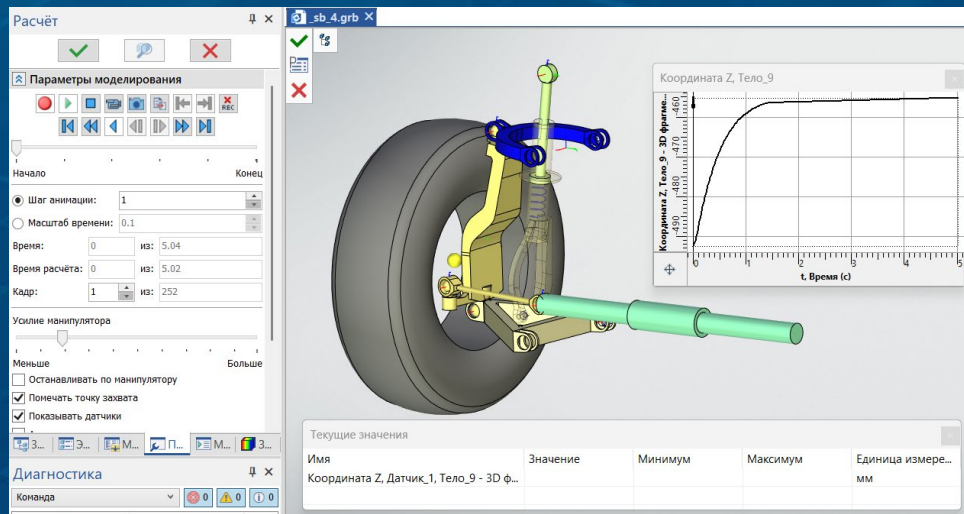
Из макроса T-FLEX CAD

Из внешнего приложения



2. Примеры использования

Запуск задачи целиком, параметры - константы

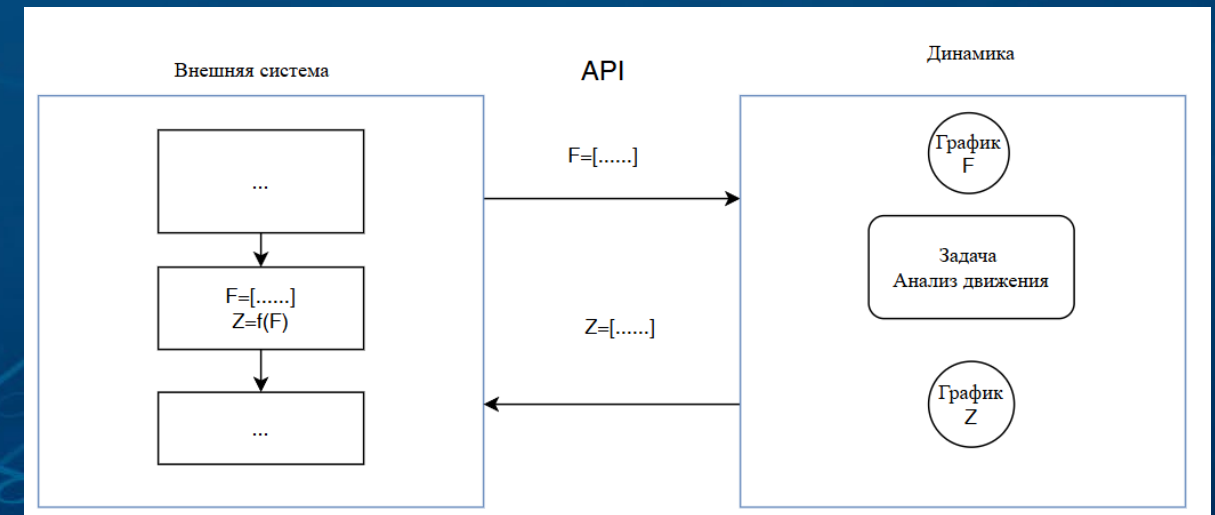
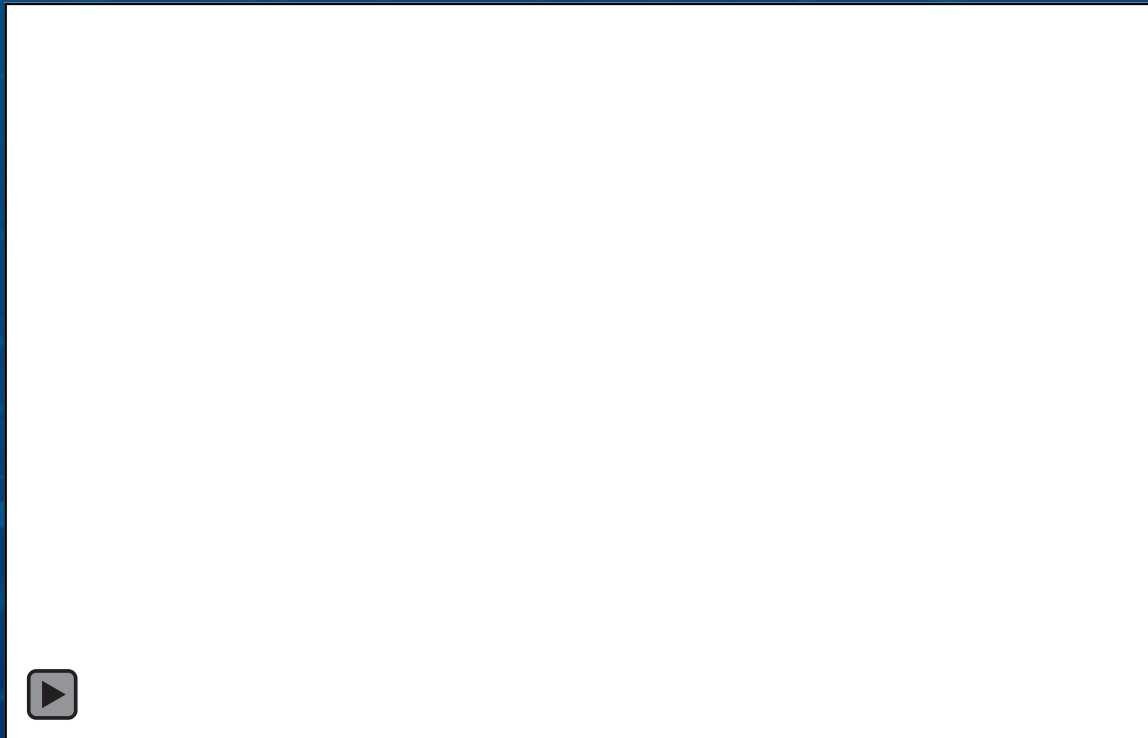


The 'Редактор переменных' (Variable Editor) window shows a table with the following data:

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
F	1700	1700	Вес
Z	graph("Координата Z, Тело_9",2)	-456.232956	Положение

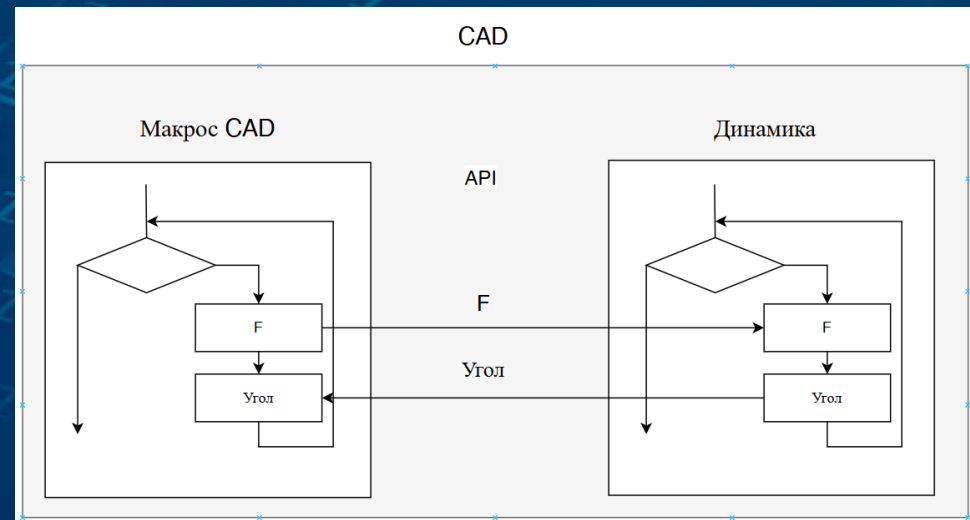
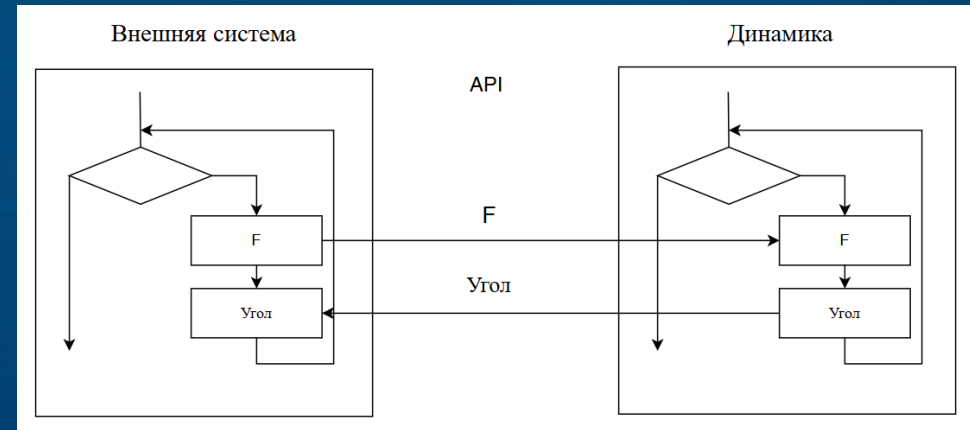
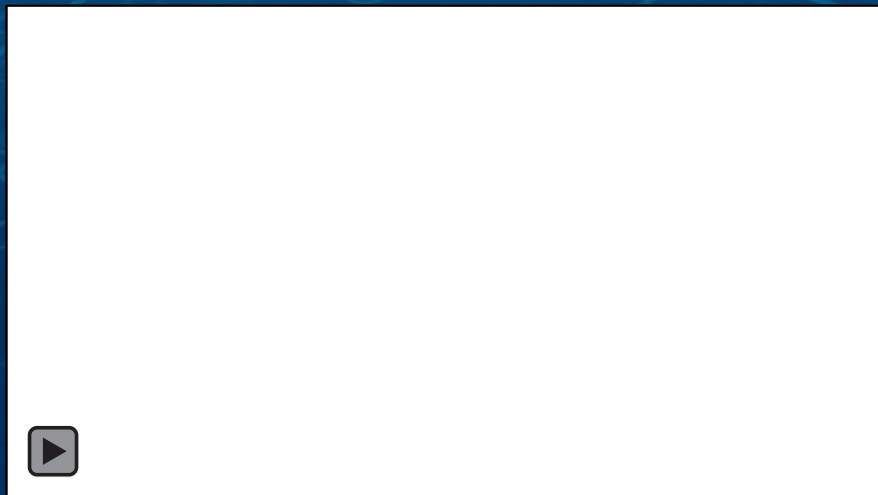
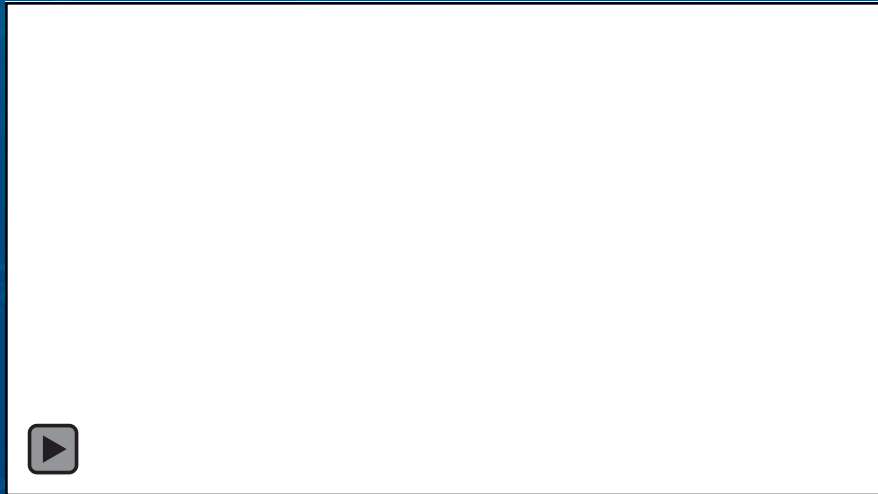
2. Примеры использования

Запуск задачи целиком, параметры – временные ряды



2. Примеры использования

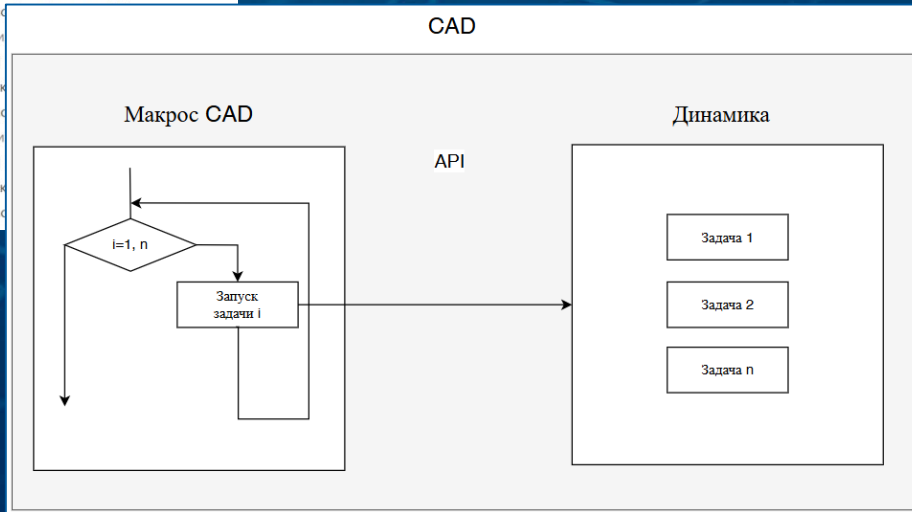
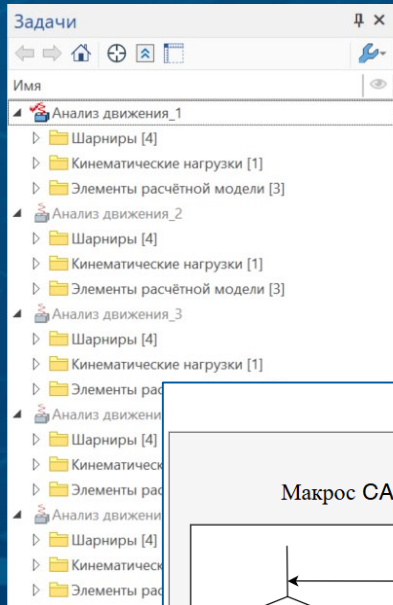
Запуск задачи по шагам, параметры – константы



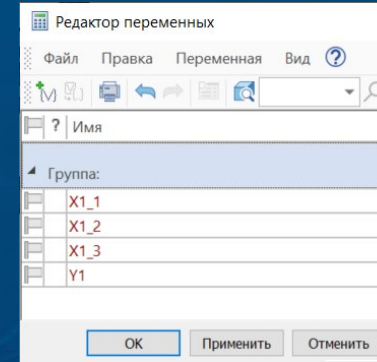
2. Примеры использования

Автоматизация

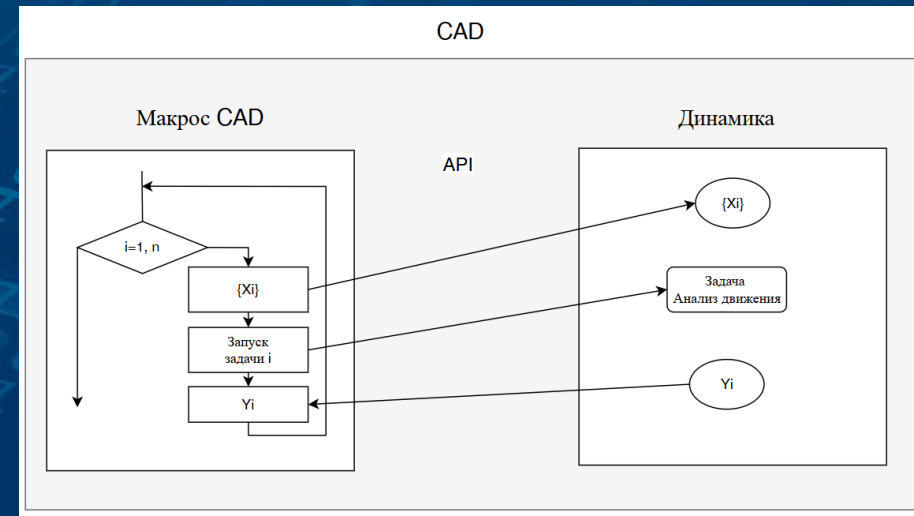
Несколько задач в одном файле



Параметризованная задача – план эксперимента



№ опыта	Уровни переменных		
	x_1	x_2	x_3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	-	-
4	+	-	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	-	+
8	+	-	+



- **Сокращение времени** проектирования механизмов за счёт прямого использования CAD-моделей и автоматизации подготовки расчётных схем.
- **Повышение точности и достоверности** кинематического и динамического анализа на основе единой параметрической модели.
- **Обоснованный выбор** геометрических и кинематических параметров механизмов, силовых приводов и законов движения благодаря решению задач синтеза с оптимизацией.
- **Раннее выявление проблемных зон**, ударов, заклиниваний и нежелательных колебаний до изготовления опытного образца.
- **Прозрачность и повторяемость** расчётов в корпоративной среде T-FLEX PLM.

Единая платформа T-FLEX PLM:

- полная ассоциативность расчётных данных с единой моделью изделия,
- использование общих механизмов платформы для управления данными и процессами.

Сквозное CAD/CAE-проектирование:

- автоматическое определение шарниров;
- задание звеньев по 3D-фрагментам,
- автоматический учёт масс-центровочных и инерционных характеристик,
- параметризация конструкции и расчёта.

Гибкое управление моделированием:

- поддержка управления по времени (time-based);
- поддержка управления по событиям (event-based).

Автоматизация расчётов:

- применение макросов T-FLEX CAD для ускорения типовых расчётных процедур и снижения ручного труда.

Поэтапное усложнение геометрии:

- возможность последовательно переходить от упрощённых к детализированным 3D-моделям без перестроения расчётной схемы.

Наглядное представление результатов:

- построение графиков параметров;
- визуализация траекторий, векторов, ометаемых объёмов, текущих значений в движении;
- формирование фотореалистичных видеороликов.

Интеграция с расчётными модулями и оптимизация:

- сохранение произвольного положения механизма для других видов анализа;
- использование задачи T-FLEX Динамики в процедурах оптимизации T-FLEX CAD;
- развитый API для интеграции с внешними системами.



АЛЕКСЕЙ ПРОСОЛОВИЧ

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

