



Руководство пользователя



Программа моделирования

Рассмотрены вопросы моделирования динамики механических систем в программном комплексе «Универсальный механизм»

Оглавление

4. ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	4-5
4.1. НАСТРОЙКИ МОДУЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ	4-6
4.1.1. Общие	4-6
4.1.2. Автосохранение	4-8
4.1.3. Формат чисел.....	4-9
4.1.4. Экспорт графиков в MS Excel.....	4-11
4.1.5. Отчеты об ошибках.....	4-12
4.2. МЕНЮ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ	4-13
4.2.1. Файл	4-13
4.2.2. Анализ	4-15
4.2.3. Сканирование	4-15
4.2.4. Инструменты	4-16
4.2.5. Окна.....	4-19
4.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МОДУЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ	4-20
4.3.1. Переменные	4-20
4.3.2. Мастер переменных	4-21
4.3.2.1. Координаты	4-23
4.3.2.2. Угловые переменные.....	4-24
4.3.2.3. Линейные переменные	4-26
4.3.2.4. Переменные, созданные пользователем в программе ввода.....	4-28
4.3.2.5. Датчики.....	4-29
4.3.2.6. Силы: активные, биполярные, шарнирные, линейные, специальные, силы реакции.....	4-30
4.3.2.6.1. Т-силы.....	4-31
4.3.2.6.2. Биполярные силы	4-32
4.3.2.6.3. Скалярные моменты.....	4-33
4.3.2.6.4. Шарнирные силы.....	4-34
4.3.2.6.5. Линейные силы.....	4-35
4.3.2.6.6. Специальные силы	4-36
4.3.2.6.6.1. Зубчатое зацепление и зубчатая рейка.....	4-36
4.3.2.6.6.2. Сайлент-блок	4-36
4.3.2.6.6.3. Кулачок	4-36
4.3.2.6.6.4. Пружина	4-37
4.3.2.6.6.5. Комбинированное трение	4-37
4.3.2.6.6.6. Шина	4-38
4.3.2.6.7. Силы реакций.....	4-39
4.3.2.6.8. Все силы	4-40
4.3.2.6.9. Контактные силы для тел.....	4-41
4.3.2.6.10. Контактные силы: контакт типа Точки — Плоскость и Точки — Z-поверхность	4-43
4.3.2.6.11. Контактные силы: остальные типы контактных сил.....	4-46
4.3.2.7. Переменные, рассчитываемые пользователем	4-47
4.3.2.8. Векторы, рассчитываемые пользователем	4-48
4.3.2.9. Идентификаторы.....	4-49
4.3.2.10. Переменная – выражение.....	4-50
4.3.2.10.1. Основные действия при создании списка	4-50
4.3.2.10.2. Операторы	4-51
4.3.2.10.3. Простейший пример.....	4-52
4.3.2.11. Железнодорожные экипажи.....	4-54
4.3.2.12. Автомобиль	4-56
4.3.2.13. Гусеничная машина	4-57
4.3.2.14. Поезд.....	4-58
4.3.2.15. Внешние библиотеки.....	4-59
4.3.2.16. Переменные для группы тел	4-60
4.3.3. Список переменных	4-61
4.3.3.1. Создание и модификация списков переменных.....	4-62
4.3.3.2. Наполнение списка переменных	4-64
4.3.3.3. Обработка данных в списках рассчитанных переменных	4-65

4.3.3.4. Импорт файлов рассчитанных переменных в MATLAB	4-66
4.3.3.5. Формат файлов рассчитанных переменных	4-67
4.3.4. Окно для построения графиков	4-68
4.3.4.1. Работа с графиками в графическом окне	4-71
4.3.4.2. Параметры графического окна	4-73
4.3.4.3. Частотная фильтрация переменных	4-74
4.3.4.4. Статистическая обработка переменных	4-75
4.3.4.5. Изменение параметров переменной	4-77
4.3.4.6. Копирование графиков в MS Excel	4-77
4.3.5. Окно гистограмм	4-78
4.3.6. Анимационное окно программы моделирования	4-81
4.3.6.1. Основные операции и инструментальная панель	4-81
4.3.6.2. Режимы изображения объектов в окне	4-83
4.3.6.3. Контекстное меню	4-84
4.3.6.4. Визуализация векторов/траекторий	4-86
4.3.6.5. Создание анимационных файлов	4-87
4.3.6.6. Работа с подсистемой "Камеры"	4-88
4.3.7. Процессор переменных	4-90
4.3.7.1. Табличный процессор	4-90
4.3.7.2. Преобразование переменных	4-94
4.3.8. Статистика	4-95
4.3.9. Пульт управления	4-98
4.3.9.1. Использование пульта управления	4-98
4.3.9.2. Редактор пульта управления	4-99
4.3.10. Макросы идентификаторов	4-103
4.4. РЕЖИМ ОДНОКРАТНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ	4-106
4.4.1. Подготовка процесса интегрирования	4-107
4.4.1.1. Численные методы	4-107
4.4.1.2. Общие параметры интегрирования	4-109
4.4.1.3. Метод Парка	4-111
4.4.1.4. Численный метод: Park Parallel	4-113
4.4.1.4.1. Условия, при которых можно использовать метод Park Parallel	4-113
4.4.1.4.2. Параметры метода	4-115
4.4.1.5. Изменение, сохранение и чтение значений идентификаторов	4-116
4.4.1.6. Управление идентификаторами	4-119
4.4.1.6.1. Общая информация	4-119
4.4.1.6.2. Деактивация элемента управления	4-120
4.4.1.6.3. Создание и модификация управления идентификатором	4-120
4.4.1.7. Выбор и автоматическое вычисление начальных условий	4-124
4.4.1.7.1. Общие понятия	4-124
4.4.1.7.2. Окно задания начальных условий	4-126
4.4.1.7.3. Задание начальных условий для систем без избыточных координат	4-128
4.4.1.7.4. Расчет начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями	4-128
4.4.1.7.5. Расчет начальных условий при наличии зубчатых зацеплений. Файл фиксации	4-130
4.4.1.7.6. Связи на начальные условия	4-132
4.4.1.7.7. Расчет интервала допустимых значений координат	4-133
4.4.1.8. Тест для начальных значений сил	4-134
4.4.1.9. Включение и выключение сил. Ключ жесткости силовых элементов	4-135
4.4.1.10. Назначение и использование списка автоматически рассчитываемых переменных	4-136
4.4.1.11. Настройка параметров 3D контакта	4-137
4.4.2. Интегрирование уравнений движения	4-141
4.4.2.1. Режим паузы в процессе интегрирования	4-141
4.4.2.2. Текущие параметры процесса интегрирования	4-143
4.4.2.3. Режим XVA-анализа результатов моделирования	4-144
4.5. СТАТИЧЕСКИЙ И ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ	4-145
4.5.1. Основные соотношения статического и линейного анализа	4-147
4.5.1.1. Уравнения равновесия	4-148
4.5.1.1.1. Расчет устойчивого положения равновесия методом интегрирования уравнений	4-149
4.5.1.1.2. Численное решение уравнений равновесия	4-150
4.5.1.2. Линеаризация уравнений равновесия	4-151

4.5.1.3. Запись матриц линеаризованных уравнений в файлы.....	4-152
4.5.1.3.1. Формат текстового файла	4-153
4.5.1.3.2. Формат бинарного файла	4-154
4.5.1.4. Расчет собственных частот и форм колебаний	4-154
4.5.1.5. Расчет собственных значений и собственных векторов	4-155
4.5.1.6. Расчет приближенных собственных значений и собственных векторов.....	4-155
4.5.1.7. Вынужденные гармонические колебания.....	4-157
4.5.2. Инструмент статического анализа.....	4-158
4.5.2.1. Построение графиков статических значений переменных в зависимости от параметра	4-159
4.5.3. Инструмент расчета собственных частоты и собственных значений	4-160
4.5.3.1. Расчет собственных частот	4-161
4.5.3.2. Расчет собственных значений (корней характеристического уравнения).....	4-162
4.5.3.3. Расчет приближенных собственных значений	4-164
4.5.4. Построение корневых годографов и зависимостей частот от параметров	4-165
4.5.4.1. Зависимость частот от параметров.....	4-166
4.5.4.2. Корневые годографы	4-167
4.5.5. Вынужденные гармонические колебания линеаризованной модели	4-172
4.5.5.1. Подготовка расчета.....	4-172
4.5.5.2. Расчет вынужденных колебаний	4-175
4.5.5.3. Результаты расчета вынужденных колебаний	4-175
4.5.6. Настройки статического и линейного анализа	4-177
4.5.6.1. Общие настройки	4-177
4.5.6.2. Параметры статического и линейного анализа	4-179
4.5.6.3. Включение/выключение сил.....	4-181
4.5.6.4. Силы трения	4-181
4.5.7. Файл конфигурации статического и линейного анализа.....	4-182
4.5.8. Особенности анализа рельсовых экипажей	4-183
4.5.9. Особенности анализа колесных экипажей.....	4-186
4.5.10. Особенности анализа гусеничных машин	4-186
4.5.11. Тестирование и примеры.....	4-187
4.5.11.1. Статический анализ	4-187
4.5.11.1.1. Математический маятник	4-187
4.5.11.1.2. Двухопорная балка	4-190
4.5.11.2. Частоты и собственные значения	4-192
4.5.11.2.1. Цепочка материальных точек, связанных упруго–диссипативно	4-192
4.5.11.2.2. Колесная пара на безынерционном рельсе.....	4-194
4.5.11.3. Линейные вибрации.....	4-197
4.5.11.3.1. Осциллятор с одной степенью свободы	4-197

4.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УМ В КАЧЕСТВЕ РЕШАТЕЛЯ В СТОРОННЕМ ПРОГРАММНОМ

ОБЕСПЕЧЕНИИ	4-199
4.6.1. Введение	4-199
4.6.2. Особенности взаимодействия программ.....	4-199
4.6.3. Модель для тестовых расчётов: excentric	4-202

4.7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4-205

4. Программа моделирования

Программа моделирования представляет собой отдельное приложение **UM Simulation** (*UMSimul.exe*) и подгружает уравнения движения исследуемого объекта, используя предварительно подготовленную динамическую библиотеку (*umtask64.dll*) или синтезирует уравнения движения в численно-итерационной форме, см. [Главу 2](#).

Для запуска программы используйте пункт меню Объект | Моделирование в программе описания моделей **UM Input** (*UMInput.exe*).

Численный анализ уравнений движения включает:

- численное интегрирование уравнений движения;
- расчет равновесия и анализ линеаризованных уравнений.

4.1. Настройки модуля моделирования

Используйте команду **Инструменты | Настройки...** основного меню для того, чтобы открыть окно настроек модуля моделирования. Рассмотрим вкладки окна (рис. 4.1).

4.1.1. Общие

Флажки:

Открывать последний объект – как правило, исследователи долгое время работают с одной и той же моделью, поэтому, может быть, удобно воспользоваться данной настройкой.

Удалять несовместимые переменные – во включенном состоянии все переменные, несовместимые с текущим объектом, будут автоматически удалены из анимационных и графических окон при чтении файла конфигурации, а также при чтении списка переменных. Игнорируется для списка рассчитанных переменных.

Ось Z направлена вниз (при расчете скалярных переменных) – изменение ориентации базовой СК при расчете переменных (проекция на оси Y и Z меняют знаки, если включен данный флажок).

Единица скорости – здесь пользователь может задать единицу изменения скорости экипажа, заданной идентификатором $v0$. Настройка имеет смысл только для специализированных модулей: UM Loco, UM Automotive, UM Tracked Vehicle.

Временный каталог: используется для записи временных файлов при работе программы, например, для временной записи кадров при создании анимационных роликов в анимационных окнах.

Настройки графического окна:

Выпадающая панель инструментов – включает / выключает соответствующий режим панели инструментов графического окна (п. 4.3.4. "Окно для построения графиков", стр. 4-68).

Двухколоночный текстовый файл – устанавливает формат записи результатов моделирования из графического окна в текстовый файл при сохранении n переменных: в виде $n+1$ колонок или в виде n последовательных групп время – i -я переменная.

Префикс для строк с комментариями – символ или набор символов, автоматически располагающийся в начале каждой строки комментариев при копировании рассчитанных переменных в буфер и текстовый файл (п. 4.3.7. "Процессор переменных", стр. 4-90). Данная настройка полезна для экспорта рассчитанных переменных во внешние программы (Maple, MATHEMATICA) с целью пометки строк с комментариями.

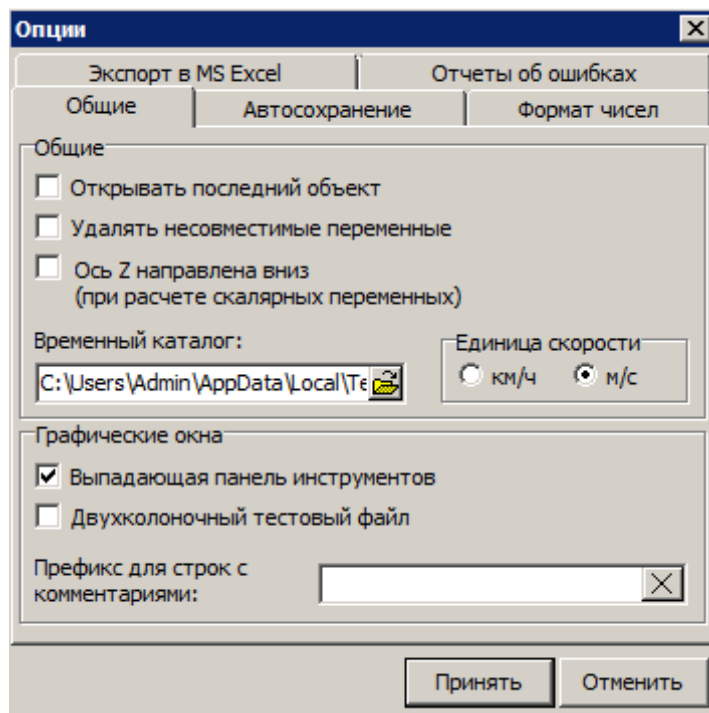


Рис. 4.1. Общие параметры

4.1.2. Автосохранение

Автоматическое сохранение используется для записи состояния объекта при последнем его моделировании (рис. 4.2).

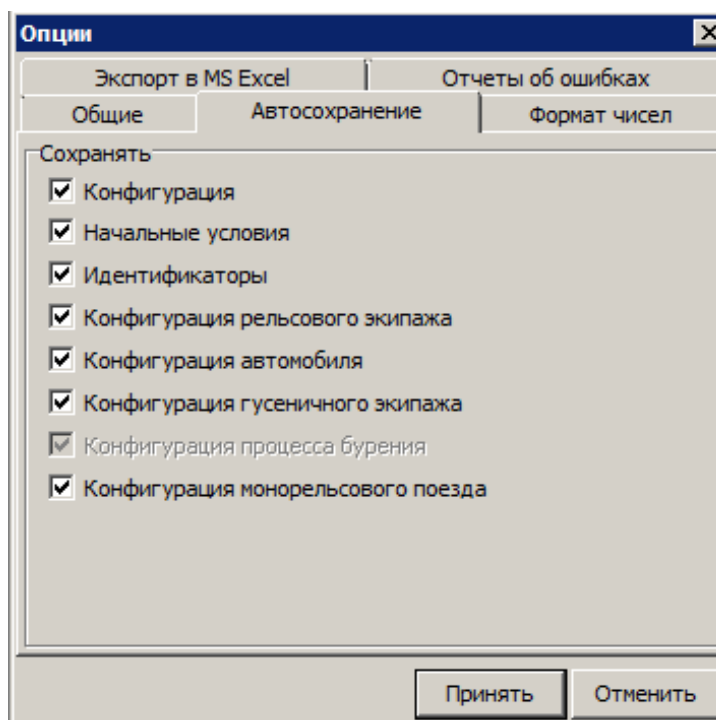


Рис. 4.2. Опции интегратора: автосохранение

Флажки:

- **Конфигурация** – сохраняет расположение графических и анимационных окон, списков переменных, включенных в эти окна, метода интегрирования и его настроек (файл last.icf).
- **Начальные условия** – сохраняет начальные значения координат и их первых производных по времени (файл last.xv).
- **Идентификаторы** – сохраняет значения идентификаторов объекта после последнего изменения (файл last.par).
- **Конфигурация рельсового экипажа** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании объекта – рельсового экипажа (имена файлов неровностей, профилей, параметры пути и так далее, файл last.rwc, модуль **UM Loco**).
- **Конфигурация автомобиля** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании автомобиля (имена файлов неровностей, тестов, параметров модели шин и так далее, файл last.car, модуль **UM Automotive**).
- **Конфигурация гусеничного экипажа** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании гусеничного экипажа (файл last.tvc, модуль **UM Tracked Vehicle**).
- **Конфигурация монорельсового экипажа** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании монорельсового экипажа (файл last.icf, модуль **UM Monorail Train**).

4.1.3. Формат чисел

Задается формат представления в текстовой форме чисел с плавающей точкой (рис. 4.3). Настройки используются в следующих инструментах

- Табличный процессор (п. 4.3.7.1. "Табличный процессор", стр. 4-90).
- **Графическое окно** (при записи рассчитанных переменных в текстовый файл и копировании в буфер).

Типы форматов:

Общий формат чисел. Число представляется наиболее коротким выражением с использованием экспоненциального или фиксированного форматов. Концевые нули удаляются из результирующего выражения. Десятичная точка появляется только в тех случаях, когда необходимо. Результирующее выражение использует фиксированный формат, если число цифр слева от десятичной точки меньше или равно заданному параметру *точности* представления числа, и если число больше или равно 0.00001. В противном случае выражение использует научный формат, при котором параметр **Разряды** определяет минимальное число цифр в экспоненциальной части (от 0 до 4).

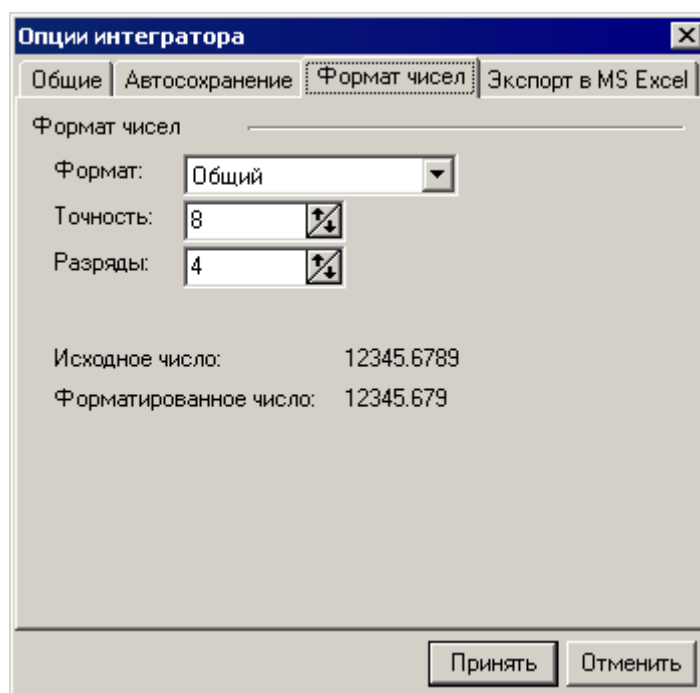


Рис. 4.3. Опции интегратора: формат чисел

Экспоненциальный: научный формат. Значение числа преобразуется в выражение вида "-d.ddd...E+dddd". Выражение начинается со знака минус, если число отрицательное и одна цифра всегда присутствует перед десятичной точкой. Полное число цифр, включая цифру перед десятичной точкой, задается параметром **Точность**. За знаком экспоненты "E" всегда следует знак плюс или минус и до 4 цифр показателя степени. Параметр **Разряды** определяет минимальное число цифр в экспоненциальной части (от 0 до 4).

Фиксированный: формат с фиксированной точкой. Значение числа преобразуется в выражение вида "-ddd.ddd...". Выражение начинается со знака минус, если число отрицательное, и по меньшей мере одна цифра всегда предшествует десятичной точке. Число цифр после десятичной точки задается параметром **Разряды** (от 0 до 18). Если число цифр перед десятичной точкой превосходит заданный параметр **Точность**, значение числа передается в экспоненциальном (научном) формате.

4.1.4. Экспорт графиков в MS Excel

Кнопка **Файл шаблона для графиков** позволяет выбрать один из шаблонов представления графиков в MS Excel (стандартные файлы шаблонов находятся в каталоге {**Данные УМ**}Templates).

Кнопка **Файл шаблона для гистограмм** позволяет выбрать один из шаблонов представления гистограмм в MS Excel (рис. 4.4).

Флажки:

- **Удалять ряды в шаблоне** – временные ряды в шаблонах, используемые для настроек, будут автоматически удаляться при экспорте данных из УМ.
- **Заголовок диаграммы** – при включенном флажке названию диаграммы присваивается заголовок графического окна, если нет – остается заголовок шаблона.
- **Легенда** – при включенном флажке добавляется легенда, сформированная в соответствии с флажками группы Включать в имя ряда, если нет – легенды не будет.
- **Имя переменной** – включать в имя ряда имя переменной (игнорируется, если флажок Легенда выключен).
- **Комментарий к переменной** – включать комментарий к переменной в имя переменной (игнорируется, если флажок Легенда выключен).

Замечание. Если в файле шаблона находится несколько диаграмм, то при экспорте будет использоваться активная. По умолчанию активна первая диаграмма.

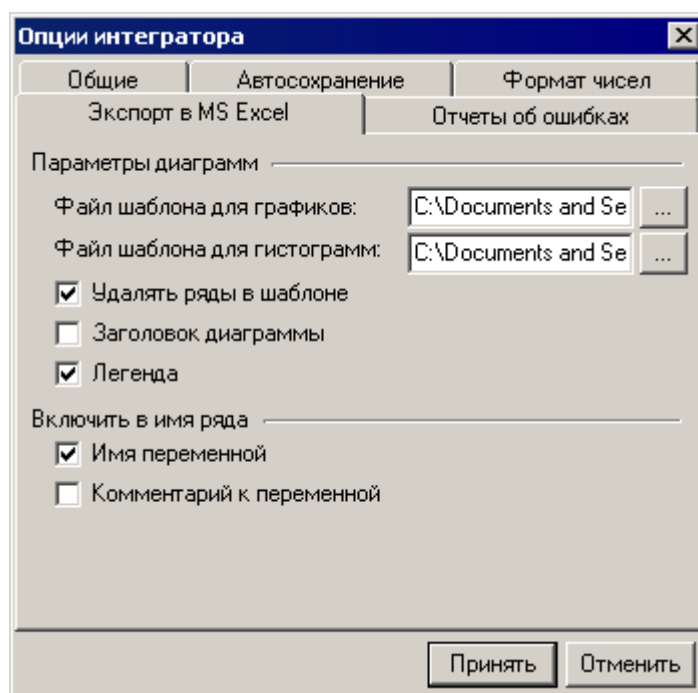


Рис. 4.4. Опции интегратора: экспорт графиков

4.1.5. Отчеты об ошибках

Настройка параметров отправляемых отчетов об ошибках показана на рис. 4.5.

Флажки:

Файлы модели – автоматически добавлять файлы модели в отчет об ошибке.

Информация о компьютере – автоматически добавлять информацию о компьютере в отчет об ошибке.

Информация о пользователе – автоматически добавлять информацию о пользователе в отчет об ошибке.

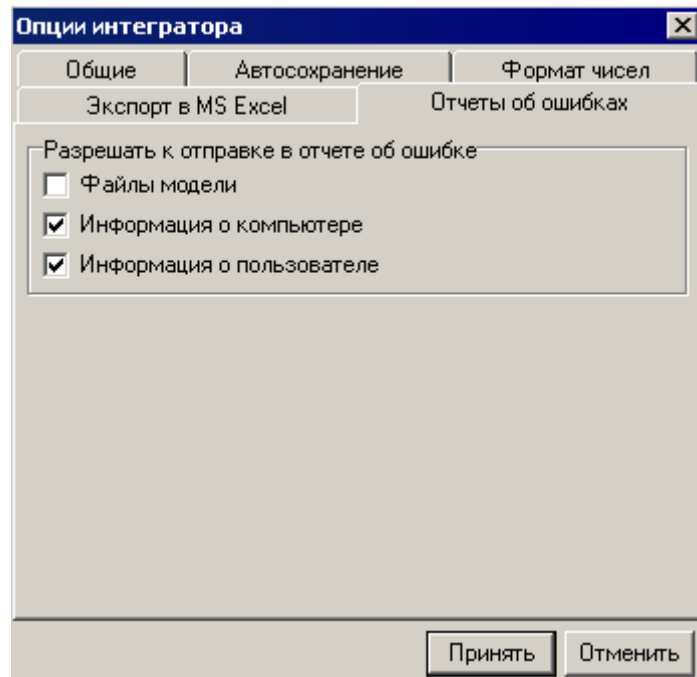


Рис. 4.5. Опции интегратора: отчет об ошибках

4.2. Меню программы моделирования

4.2.1. Файл

Открыть

Выбор задачи для моделирования из списка, рис. 4.6. Данные текущей задачи будут удалены и замещены новыми. Таким образом, не покидая программу моделирования, можно исследовать различные объекты.

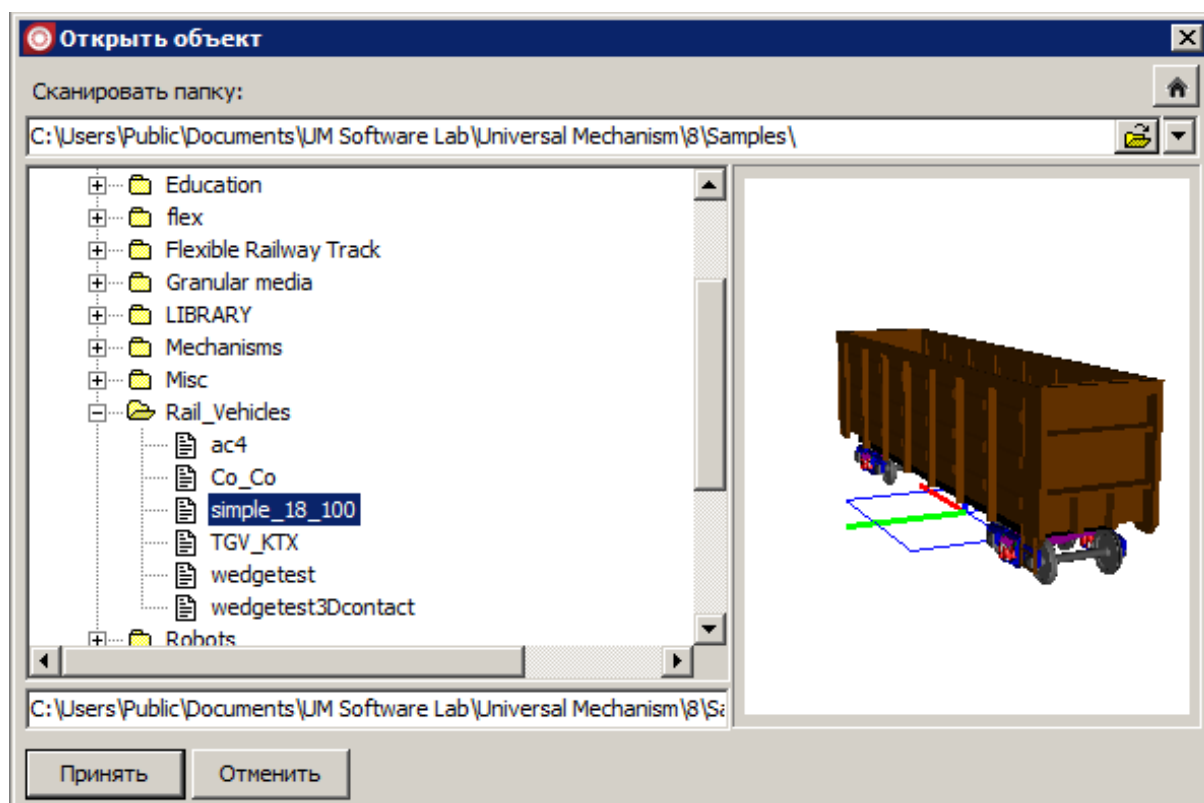


Рис. 4.6. Диалог открытия объекта

Открыть заново

Открывает один из последних ранее моделировавшихся объектов.

Закреть

Выгружает текущий объект.

Прочитать конфигурацию

- **Рабочий стол:** чтение предварительно записанного файла *.icf, содержащего информацию об открытых окнах, графических переменных, методе и точности интегрирования и тому подобное;
- **Другие пункты подменю:** чтение полной конфигурации, включающей рабочий стол, начальные условия, значения идентификаторов, а также, если имеется, специальный файл конфигурации (например, конфигурацию железнодорожного экипажа), рис. 4.7.

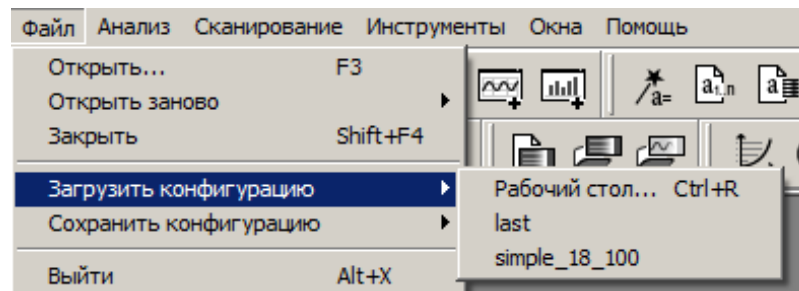


Рис. 4.7. Чтение полной конфигурации

Сохранить конфигурацию

- **Рабочий стол:** записать конфигурацию рабочего стола в файл *.icf;
- **Все настройки:** записать конфигурации рабочего стола, начальных условий, текущих значений параметров, а также специальной конфигурации (например, для железнодорожного экипажа). Позже полная конфигурация может быть прочитана через пункт меню **Загрузить конфигурацию**.

4.2.2. Анализ

Данный элемент меню открывает доступ к процедурам анализа динамики объекта. При переходе к одному из типов анализа меню становится недоступным и открывается после окончания сеанса моделирования.

Моделирование

Численное интегрирование уравнений движения объекта. Через данный пункт меню вызывается **Инспектор моделирования объекта** (п. 4.4.1 *"Подготовка процесса интегрирования"*, стр. 4-107).

Статический и линейный анализ

Анализ, включающий расчет положения равновесия, линеаризацию уравнений движения и расчет частот и форм колебаний, построение корневых годографов, исследование линейных вибраций (п. 4.5 *"Статический и линейный анализ"*, стр. 4-145).

4.2.3. Сканирование

Меню открывает доступ к проекту сканирования. Полная информация об этом содержится в [Главе 6](#) руководства пользователя. Требуется модуль **UM Experiments**.

4.2.4. Инструменты

Анимационное окно

Открывает анимационное окно (п. 4.3.6. "*Анимационное окно программы моделирования*", стр. 4-81), в котором отображается движение объекта. Число окон не ограничено.

Графическое окно

Открывает окно, в котором можно построить графики переменных (п. 4.3.4. "*Окно для построения графиков*", стр. 4-68). Число окон не ограничено.

Гистограмма

Открывает окно, в котором можно построить гистограммы переменных. Число окон не ограничено, п. 4.3.5. "*Окно гистограмм*", стр. 4-78.

Текстовый редактор

Открывает текстовый редактор.

Мастер переменных

Вызов Мастера переменных (п. 4.3.2. "*Мастер переменных*", стр. 4-21), с помощью которого можно сформировать новые переменные для анализа динамики объекта.

Список переменных

Вызов **Списка переменных** (п. 4.3.3. "*Список переменных*", стр. 4-61) для его создания/модификации/чтения, а также для анализа ранее рассчитанных списков переменных. Составленный с помощью Мастера переменных для конкретного объекта **Список переменных** является основой графической или табличной обработки результатов моделирования сложных технических систем.

Список рассчитанных переменных

Вызов списка предварительно рассчитанных переменных (п. 4.3.3.3. "*Обработка данных в списках рассчитанных переменных*", стр. 4-65) для анализа или сравнения.

Табличный процессор

Вызов **Табличного процессора** (п. 4.3.7. "*Процессор переменных*", стр. 4-90), позволяющего провести статистический анализ рассчитанных переменных (максимум, минимум, среднее, среднеквадратическое отклонение и так далее).

Калькулятор выражений

Калькулятор выражений позволяет пользователю вычислить сложные зависимости между параметрами механической системы.

Калькулятор ориентации

Калькулятор ориентации позволяет связать тройку углов ориентации, вектор и угол поворота, кватернион и матрицу направляющих косинусов.

Статистика

Инструмент **Статистика** предназначен для расчета и графического отображения таких статистических характеристик временного ряда, как гистограммы плотности распределения вероятностей и распределения вероятностей, оценки корреляционной функции и спектральной плотности мощности, комплексной спектральной плотности (спектра), см. п. 4.3.8. "*Статистика*", стр. 4-95.

Макросы идентификаторов

Инструмент для создания макрокоманд группового изменения идентификаторов, п. 4.3.10. "*Макросы идентификаторов*", стр. 4-103.

Анализ сил: анализ силовых элементов в частотной области.

Редактор пульта управления

Позволяет создавать и модифицировать окна визуального управления процессом моделирования, п. 4.3.9.2. "*Редактор пульта управления*", стр. 4-99.

Активный пульт управления

Задаёт пульт управления, который будет использоваться при моделировании.

Открыть пульт управления

Открывает одно из ранее созданных окон визуального управления процессом моделирования, п. 4.3.9. "*Пульт управления*", стр. 4-98.

Интерфейс с внешними библиотеками

Позволяет подключать математические модели из внешних библиотек (DLL) к расчетным схемам в УМ. Подробно описан в [Главе 5](#), п. "*Создание и использование внешних библиотек*".

Мастер экспорта в Matlab/Simulink

С помощью мастера происходит создание файлов настроек и управляющего m-файла, необходимых для подключения УМ-моделей к моделям систем управления в Matlab/Simulink. Подробно описан в [Главе 19](#), п. "*Мастер экспорта в Matlab/Simulink*".

Долговечность

Запускает **Мастер расчета долговечности**. См. [Главу 13](#) руководства пользователя.

Справочник материалов

Позволяет управлять списком материалов и их свойства, необходимые для расчета долговечности.

Настройки

Открывает окно с настройками модуля моделирования, п. 4.1. "*Настройки модуля моделирования*", стр. 4-6.

Панели инструментов

Список видимых групп кнопок на панели инструментов.

4.2.5. Окна

Список окон

Вывод на экран окна со списком окон, открытых в данный момент. Список позволяет поместить одно из окон поверх остальных.

Следующее

Переход к следующему окну.

Предыдущее

Переход к предыдущему окну.

Текущий инспектор

Активизация текущего инспектора.

4.3. Общие сведения о модуле моделирования

4.3.1. Переменные

Переменной называется любая характеристика исследуемого объекта, которая может быть рассчитана при помощи УМ, например модуль вектора скорости точки, величина силы, координаты произвольной точки тела и т.д.

Переменные создаются при помощи **Мастера переменных** (п. 4.3.2. "*Мастер переменных*", стр. 4-21) и хранятся в **Списке переменных** (п. 4.3.3. "*Список переменных*", стр. 4-61).

Переменные могут иметь размерность скаляра и размерность вектора, в зависимости от этого они отображаются либо в **графическом** (п. 4.3.4. "*Окно для построения графиков*", стр. 4-68), либо в **анимационном** (п. 4.3.6. "*Анимационное окно программы моделирования*", стр. 4-81) окне. В процессе моделирования значения переменных выводятся в графическом окне в виде графика, или в анимационном окне в виде вектора или траектории (для радиус-векторов).

4.3.2. Мастер переменных

Мастер переменных (см. рис. 4.8) используется для создания переменных. Используйте пункт меню **Инструменты | Мастер переменных...** для его активизации.

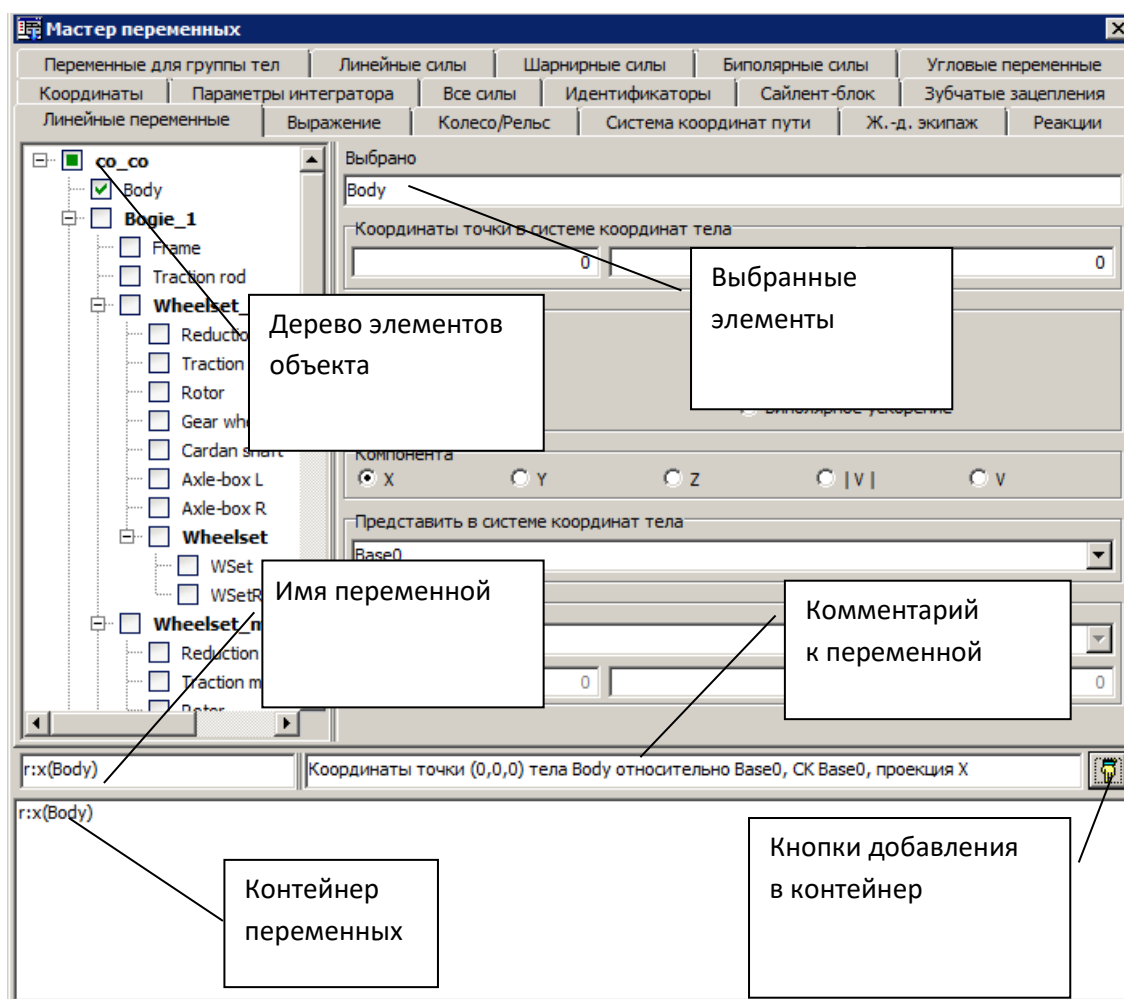


Рис. 4.8. Мастер переменных


Мастер переменных – инструмент, с помощью которого можно создать переменные. Созданные переменные можно перетащить, в зависимости от типа, в графическое или анимационное окно или список переменных.

Основными элементами окна являются *вкладки*, относящиеся к различным типам переменных (координаты, кинематические переменные тел, силы реакций и так далее), а также дерево элементов объекта, соответствующее каждой вкладке. Для каждой модели в мастере переменных появляются только вкладки с элементами, которые имеются в текущей модели. Таким образом, набор вкладок мастера переменных может меняться от модели к модели.

В общем, переменные, созданные для одного объекта, являются недействительными для другого.

Создание новой переменной объекта происходит в следующей последовательности:

- выбрать вкладку (например, Линейные переменные);

- выбрать необходимые элементы (для вкладки **Линейные переменные** – это тела), отметив их галочками в дереве элементов; обратите внимание, что в дереве элементов поддерживается множественное выделение – при выделении нескольких элементов переменные будут созданы для каждого элемента;
- задать дополнительные параметры, определяющие переменную, в данном случае тип и компоненту, а также координаты точки, скорость которой следует определить;
- для создания переменной, которая может принимать векторное значение (скорости, ускорения, силы) следует установить параметр **Компонента** проекция на ось (X , Y или Z), модуль вектора ($|V|$) или сам вектор (V); если переменная является проекцией, то следует задать систему координат, на которую осуществляется проецирование (поле **Представить в системе координат тела**);
- при изменении параметров переменной автоматически обновляется имя и комментарий к переменной; вы можете изменить имя или комментарий к переменной и затем создать ее, щелкнув по кнопке ; обратите внимание, что в случае множественного выбора нельзя изменить имя и комментарий к переменной.

Далее сформированная переменная (или группа переменных) переносится с помощью мыши в соответствующее окно (графическое окно и список переменных – для скалярных переменных; анимационное окно – для векторных переменных) используя технологию *Drag&Drop*.

Перейдем к рассмотрению основных типов переменных, представленных на вкладках мастера.

4.3.2.1. Координаты

Вкладка **Координаты** (рис. 4.9) используется для выбора в качестве переменной одной из шарнирных координат, а также ее первой (скорость) или второй (ускорение) производной по времени из списка координат активного объекта. Дерево элементов для данной вкладки содержит все шарниры объекта вместе с шарнирными координатами с указанием номера подсистемы и локального номера каждой из координат.

В примере, приведенном на рис. 4.9 сформирована следующая переменная: координата номер 21 подсистемы 1 – локальная шарнирная координата в шарнире:

Bogie_1.Wheelset_motor_assembly1.jRotor_Cardan_shaft.

Данная переменная может быть перенесена либо в графическое окно, либо добавлена к списку переменных.

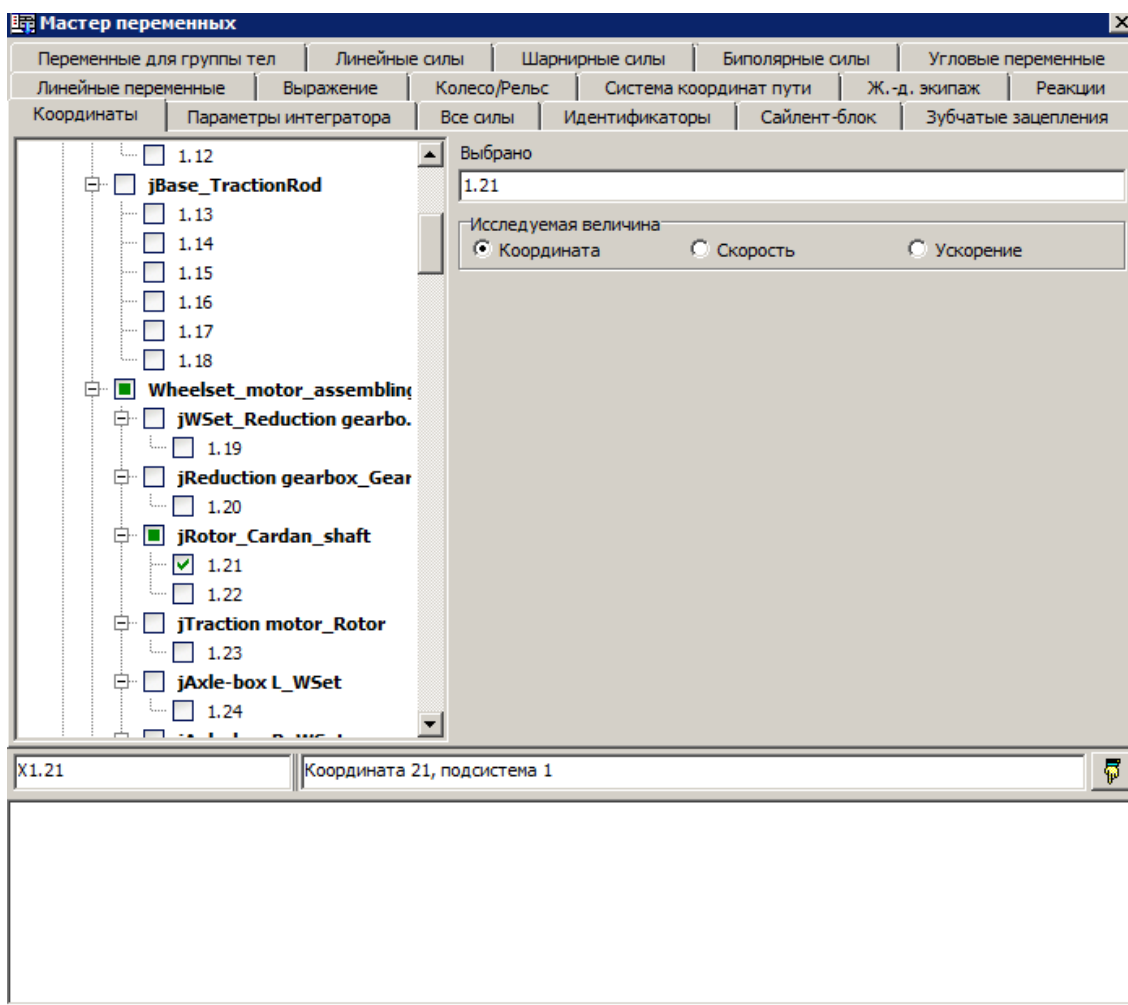


Рис. 4.9. Координаты

4.3.2.2. Угловые переменные

Вкладка Угловые переменные, рис. 4.10, позволяет определить переменную, связанную с изменением ориентации одного тела относительно другого. Речь идет о проекции или модуле вектора поворота, угловой скорости и углового ускорения при движении одного тела объекта относительно любого другого. Проекция вектора могут быть представлены в системе координат любого объекта системы. Дерево элементов данной вкладки содержит тела.

В примере, приведенном на рис. 4.10 сформирована следующая переменная: вектор углового ускорения тела *Bogie_1.Wheelset_motor_assembling_1.Rotor* относительно СК0 (абсолютное движение). Данная переменная может быть перенесена только в анимационное окно.

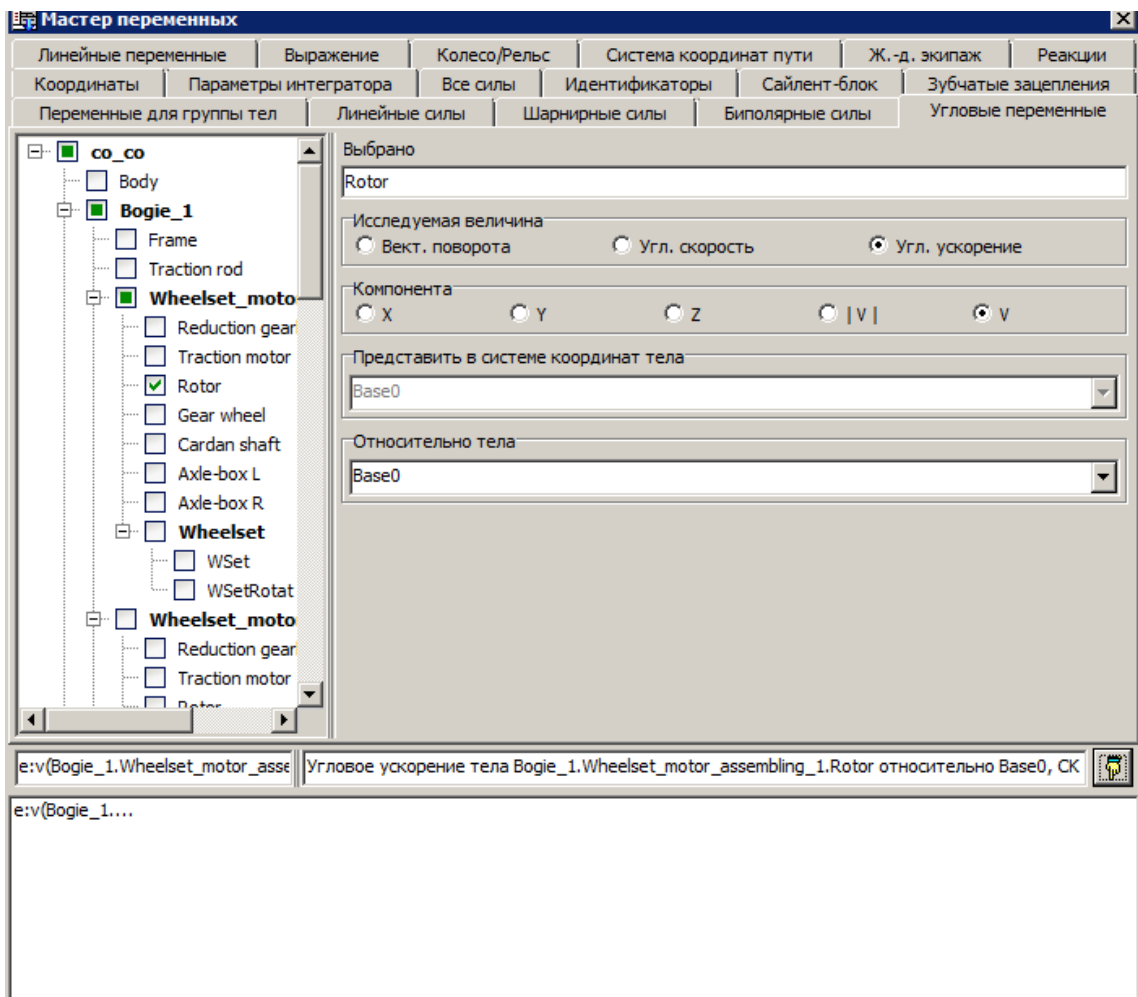


Рис. 4.10. Угловые переменные

Флаг **Использовать ориентацию при нулевых координатах** (на рис. 4.10 не показан) используется только для переменной **Вектор поворота**. Использование ориентации при нулевых координатах означает, что переменная рассчитывается для поворотов тел относительно положений, которые они занимали при нулевых значениях всех координат объекта. При выключенном ключе переменная рассчитывается для систем координат, связанных с телами.

Замечание. Вектор поворота определяется в соответствии с теоремой о конечном повороте и равен произведению единичного вектора поворота на угол поворота. В случае малых движений одного тела относительно другого проекции вектора определяют углы поворота вокруг соответствующих осей координат.

4.3.2.3. Линейные переменные

Вкладка **Линейные переменные**, рис. 4.12, позволяет создать переменные, характеризующие линейное движение одного тела относительно другого. Речь идет о проекции или модуле радиуса-вектора (координата), траектории, скорости (\mathbf{v}) и ускорении (\mathbf{a}) произвольной точки исследуемого тела относительно любого другого или о так называемых биполярных переменных: биполярном векторе (\mathbf{r}_{12}), скорости (\mathbf{v}_{12}) и ускорении (\mathbf{a}_{12}) пары точек двух тел. Проекции вектора могут быть представлены в СК любого тела объекта.

Рис. 4.11 иллюстрирует понятие биполярного вектора, скорости и ускорения. Рассмотрим пару тел и две связанные с ними точки **A** (для тела, относительно которого исследуется движения) и **B** (для исследуемого тела). Пусть \mathbf{e}_{12} – единичный вектор по направлению от точки **A** к точке **B**. Биполярный вектор между парой точек определяется соотношением

$$\mathbf{r}_{12} = r\mathbf{e}_{12}$$

где r – расстояние между точками. Биполярная скорость v_{12} и ускорение a_{12} находятся из формул

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{12} &= \dot{r}\mathbf{e}_{12}, \\ \mathbf{a}_{12} &= \ddot{r}\mathbf{e}_{12}. \end{aligned}$$

Величины биполярной скорости и ускорения \dot{r}, \ddot{r} характеризуют скорость и ускорение сближения/удаления пары точек.

В примере, приведенном на (рис. 4.12) сформирована следующая переменная: положение точки в проекции на ось Y базовой системы координат точки с координатами (0, 0, 1.45) тела *Body*. Данная переменная может быть перенесена в графическое окно и список переменных.

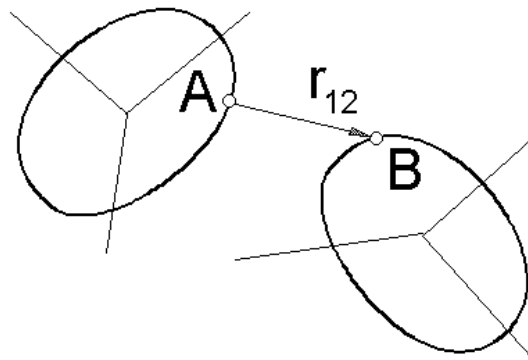


Рис. 4.11. Биполярный вектор

Замечания.

1. Для построения пространственной траектории какой-либо точки тела в анимационном окне следует выбрать тело; указать координаты точки в системе координат тела; задать тип переменной – **координата**; задать компоненту – вектор (V).
2. При задании компоненты – модуль $|V|$ в случае биполярной скорости и ускорения формируется не модуль соответствующего вектора, а величины со знаком: \dot{r}, \ddot{r} .

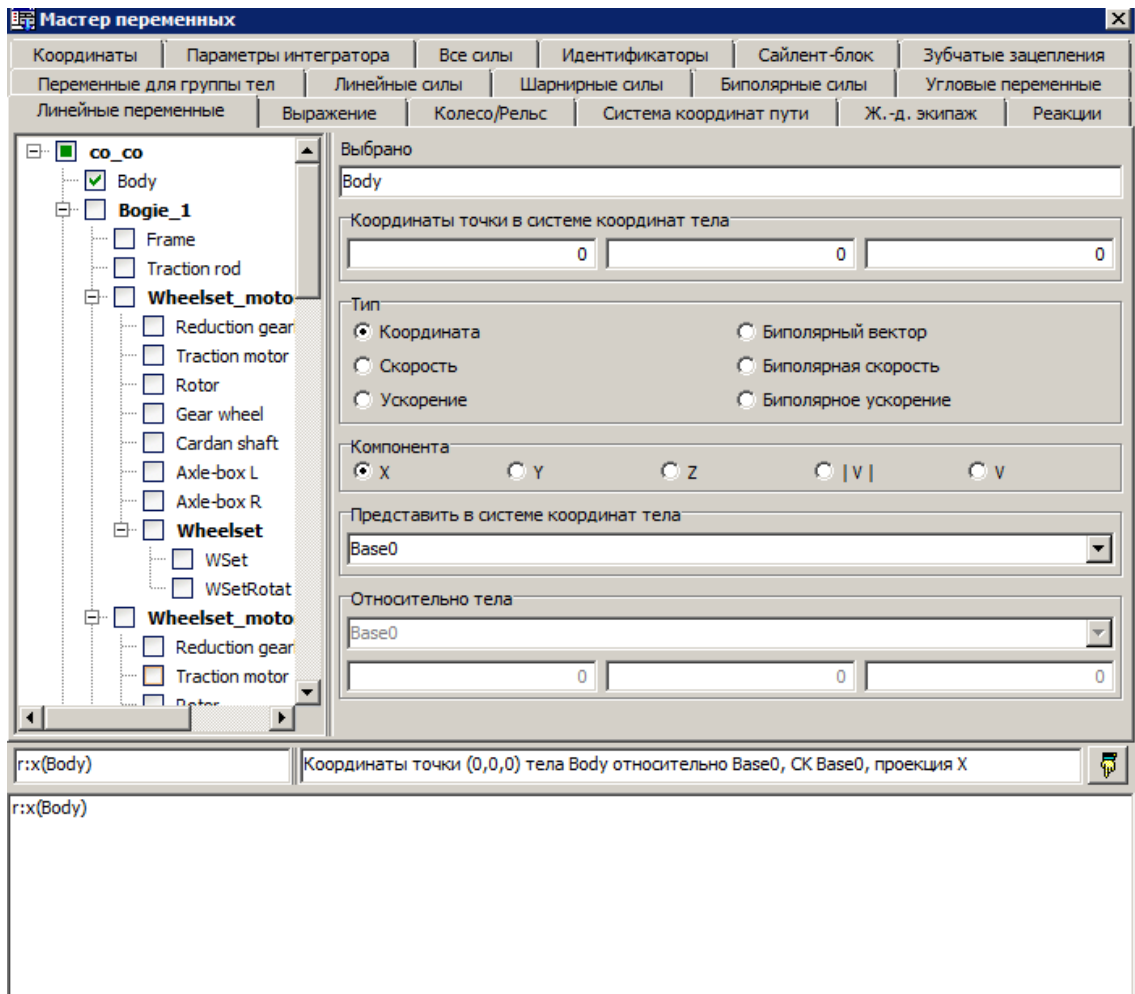


Рис. 4.12. Линейные переменные

4.3.2.4. Переменные, созданные пользователем в программе ввода

Пользователь может создать рассчитываемую переменную с помощью списка переменных, описанных в программе ввода, см. [Главу 3](#), п. *Список переменных*.

Список переменных программы ввода размещается на вкладке мастера Переменные, рис. 4.13.

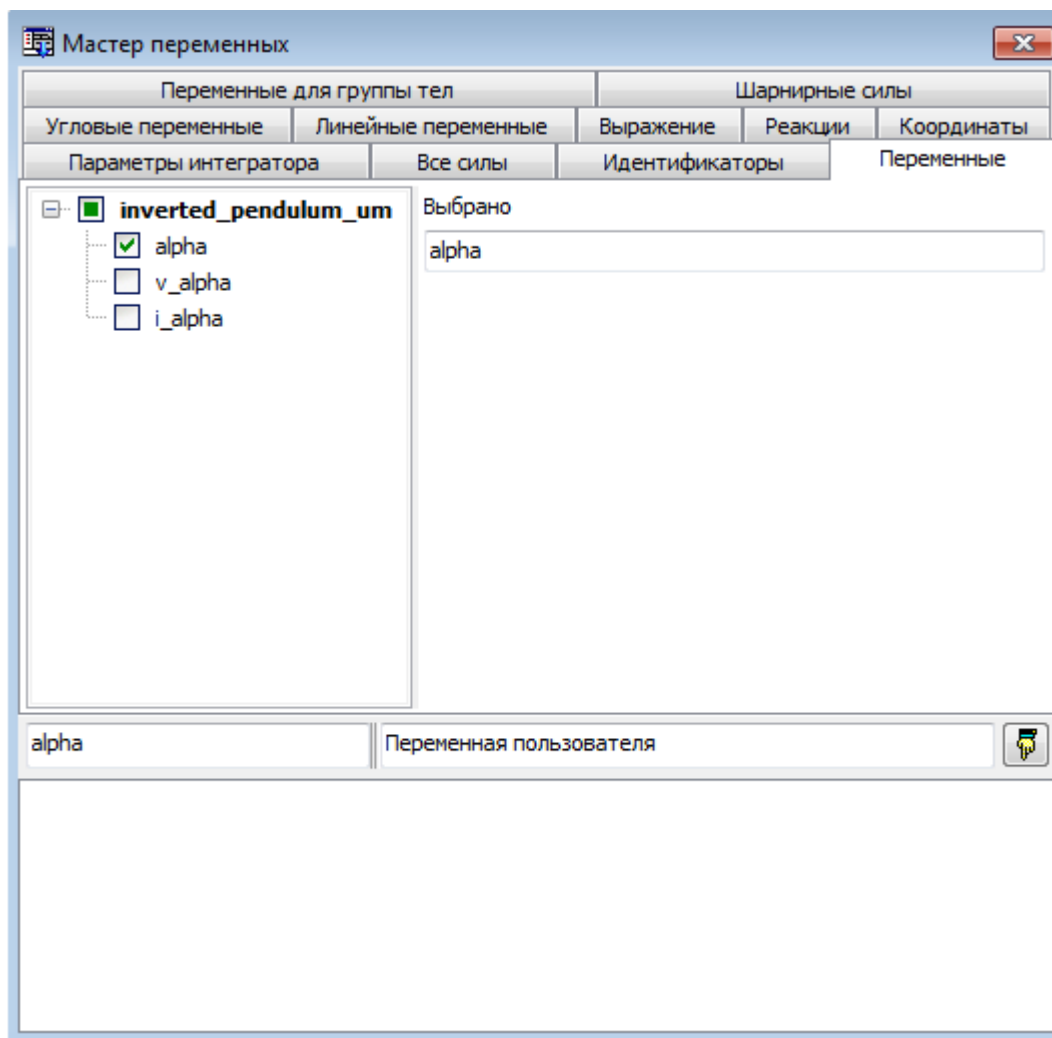


Рис. 4.13. Список переменных, созданных в программе ввода

Примеры моделей, содержащих список переменных:

[{Данные УМ}\Samples\Library\Variables_and_Kinematic_functions\](#)

[Inverted_pendulum_UM;](#)

[{Данные УМ}\Samples\Library\Variables_and_Kinematic_functions\Euler_angles;](#)

[{Данные УМ}\Samples\Library\Variables_and_Kinematic_functions\Yaw_Pitch_Roll.](#)

4.3.2.5. Датчики

Данный тип переменных доступен, если пользователь создал для текущего объекта набор датчиков в программе **UM Input**, см. [Главу 3](#), п. Вкладка «Датчики/ЛСК».

Переменная типа **Датчик** позволяет построить координату, скорость или ускорение точки тела, так же как в случае линейной переменной, см. п. 4.3.2.3. "Линейные переменные", стр. 4-26. Единственное существенное отличие заключается в том, что координаты точки при использовании датчика могут быть **параметризованными** с помощью идентификаторов. Соответственно, координаты точки в СК тела будут изменяться при изменении идентификаторов.

Тело, несущее датчик, и параметризованные координаты датчика в символьном виде указываются в дереве в скобках после имени датчика, в левой части мастера отражается дерево датчиков модели (рис. 4.14).

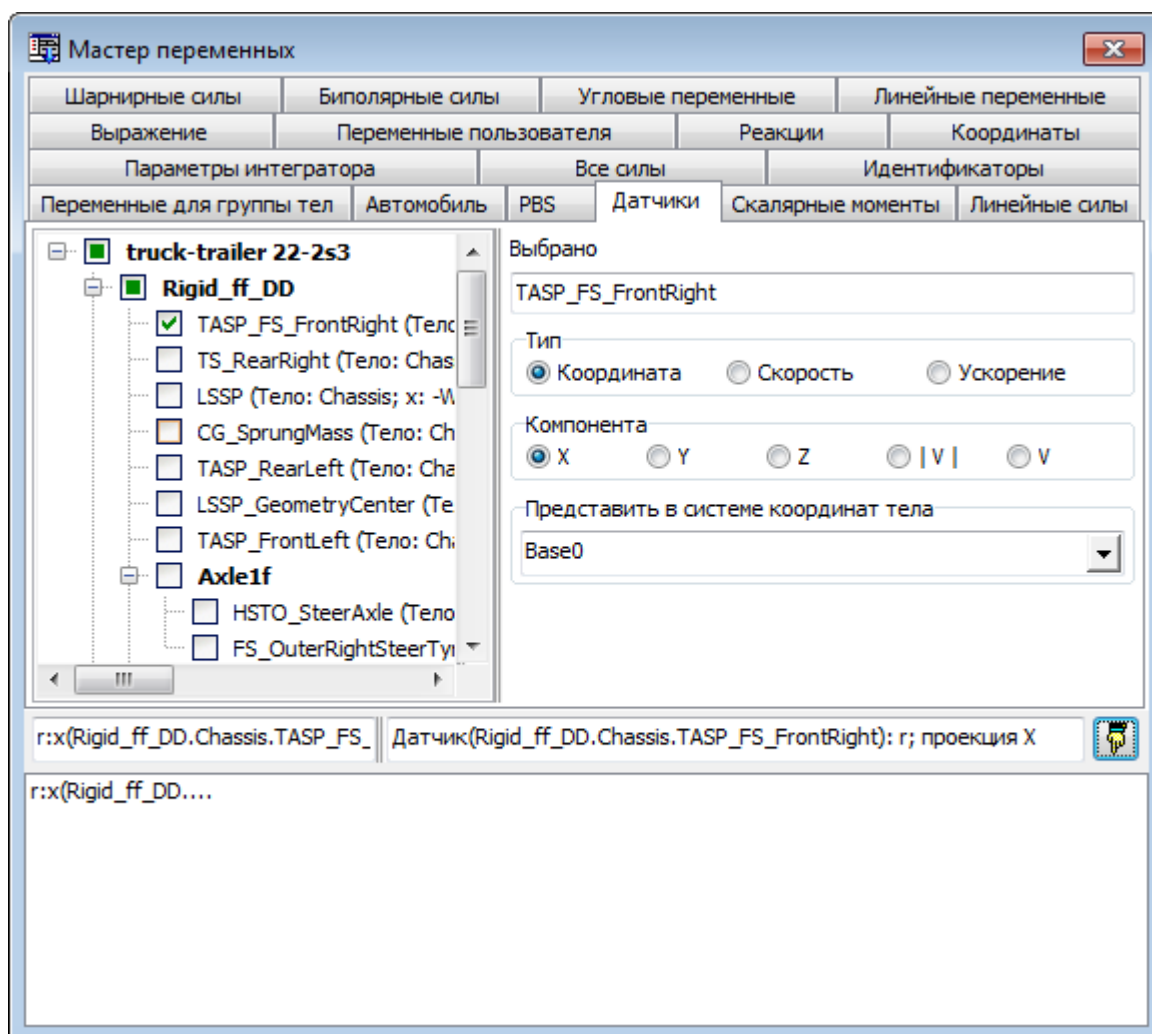


Рис. 4.14. Датчики

4.3.2.6. Силы: активные, биполярные, шарнирные, линейные, специальные, силы реакции

Создание переменных, соответствующих перечисленным типам сил имеет схожий интерфейс в мастере переменных, поэтому рассмотрим переменные данных типов в одном разделе, кратко останавливаясь на некоторых особенностях, присущих каждому типу.

В дереве элементов после имени в скобках указываются имена тел, между которыми действует данный силовой элемент.

Дополнительно к стандартным данным (элемент, компонента, тип – сила или момент, система координат для определения проекции) следует выбрать тело из пары тел, на которое действует данная сила (поле **Действует на тело 1 / тело 2**, рис. 4.15).

Если описание объекта не содержит элементов заданного типа, соответствующая вкладка мастера переменных не показывается.

Рассмотрим особенности задания сил каждого из типов.

4.3.2.6.1. Т-силы

Переменная соответствует одной из Т-сил (рис. 4.15). Переменная имеет размерность силы, либо момента.

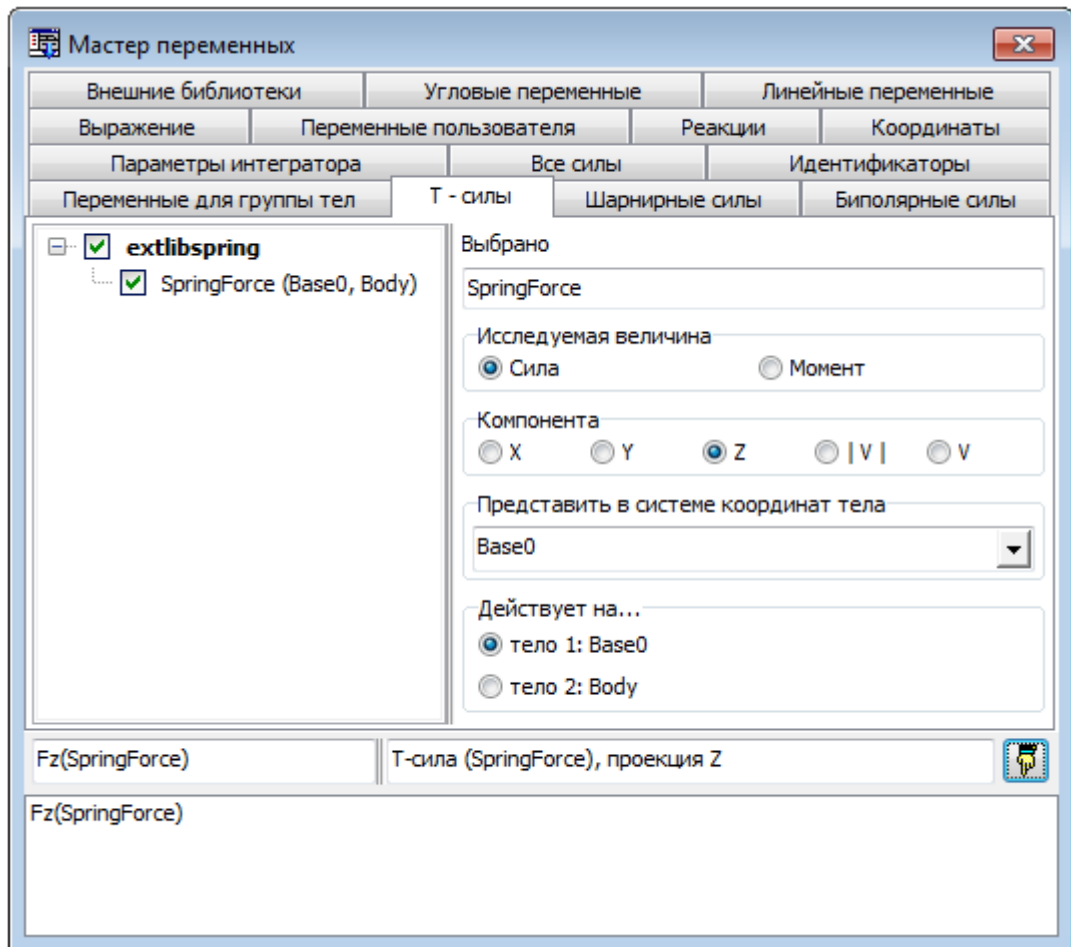


Рис. 4.15. Т – сила

4.3.2.6.2. Биполярные силы

Переменная соответствует одному из силовых элементов биполярного типа, входящих в описание объекта. Особенности переменных, рис. 4.16:

- компонента **Модуль силы** соответствует не модулю силы, а ее численному значению со знаком;
- компонента **Длина элемента** соответствует длине биполярного элемента. В частности, данная переменная часто используется для построения графика силы в зависимости от длины;
- компонента **Скорость элемента** соответствует скорости изменения (производной по времени) длины биполярного элемента. В частности, данная переменная часто используется для построения графика силы в зависимости от скорости.

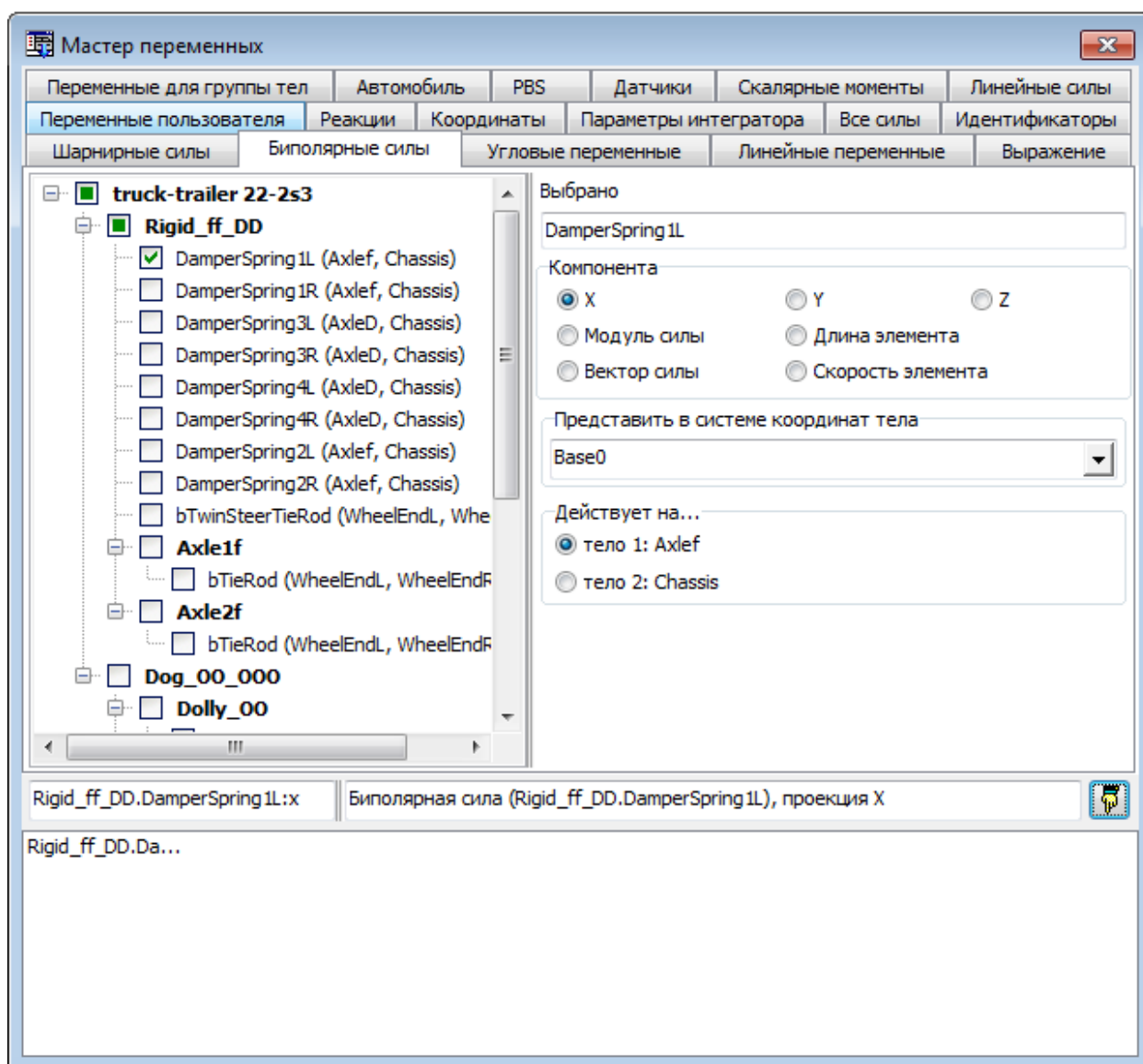


Рис. 4.16. Биполярная сила

4.3.2.6.3. Скалярные моменты

Переменные типа **Скалярный момент** соответствуют одноименному силовому элементу. Задание переменной очень похоже на задание переменной «Биполярная сила», рис. 4.16. Компоненты **Угол** и **Скорость** соответствуют углу поворота и угловой скорости, используемых для расчета момента (рис. 4.17).

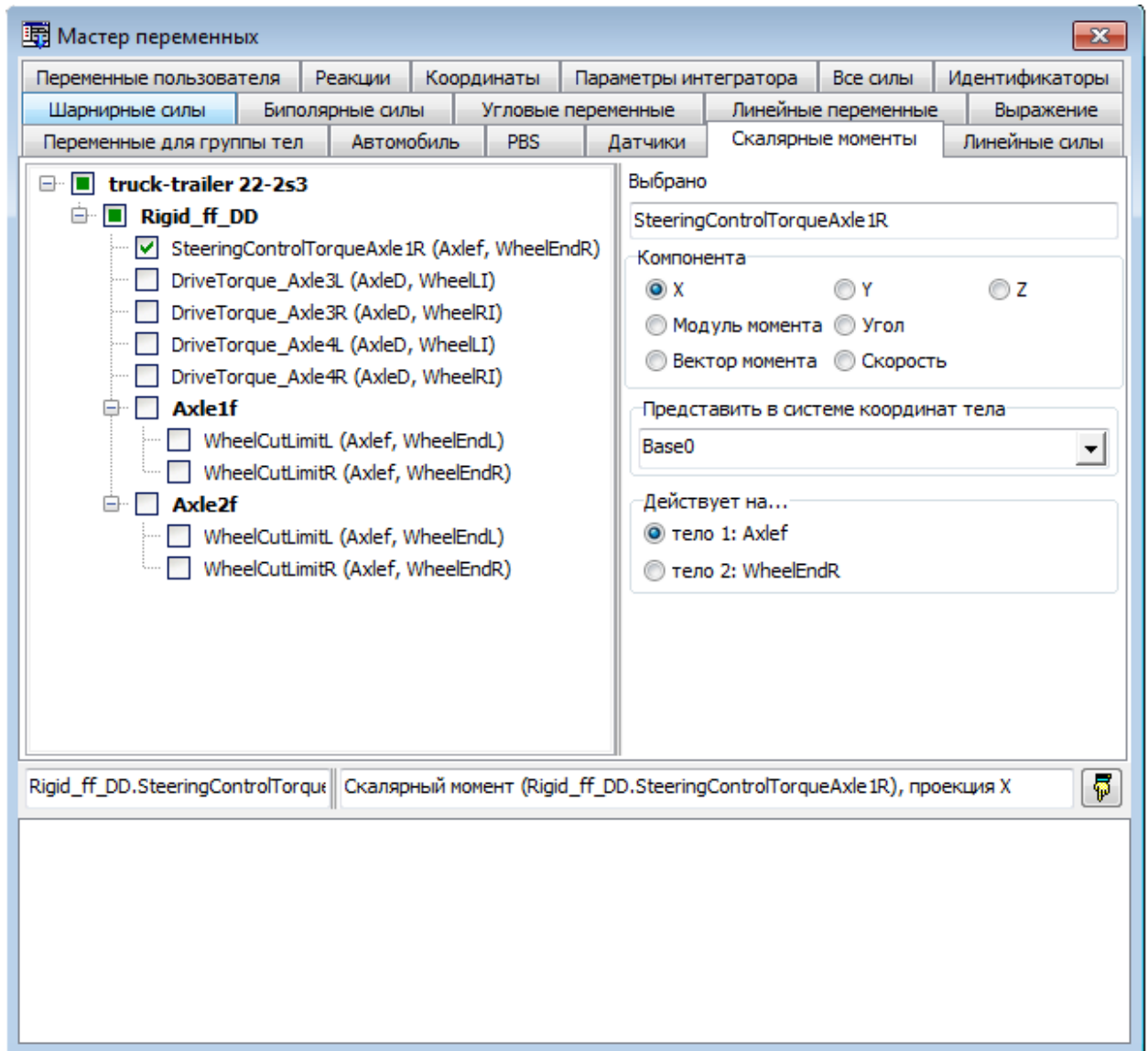


Рис. 4.17. Скалярный момент

4.3.2.6.4. Шарнирные силы

Переменная соответствует активным силам и моментам в шарнирах, заданных пользователем при описании объекта. Список шарниров представлен в дереве элементов (рис. 4.18). Шарнирные силы присутствуют только для поступательного, вращательного шарниров и шарнира обобщенного типа. Для остальных типов шарниров переменная принимает нулевое значение.

Если при описании шарнира обобщенного типа, имеющего несколько степеней свободы, введены шарнирные силы для разных степеней свободы, то в переменной формируются суммарные векторы силы или момента, приведенные к шарнирной точке.

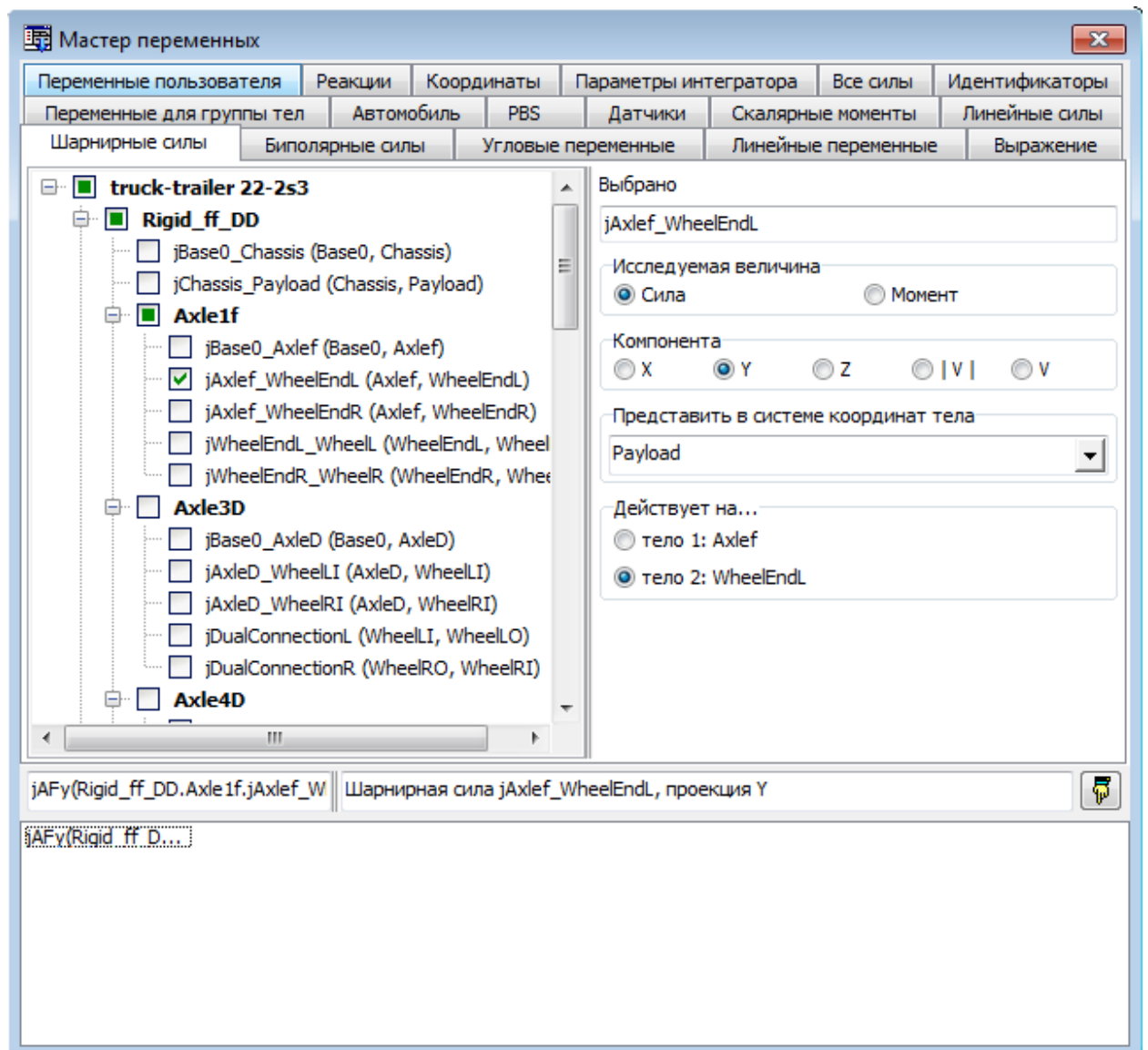


Рис. 4.18. Шарнирные силы

4.3.2.6.5. Линейные силы

Линейные силы соответствуют обобщенным линейным упругим силовым элементам. Группа **Исследуемая величина** позволяет выбрать тип переменной: **Сила**, **Момент**, **Смещение** и **Поворот** (рис. 4.19). Два последних типа переменной соответствуют относительным движениям взаимодействующих тел, используемым для расчета сил в соответствии с [Главой 2](#), п. "Обобщенный линейный силовой элемент".

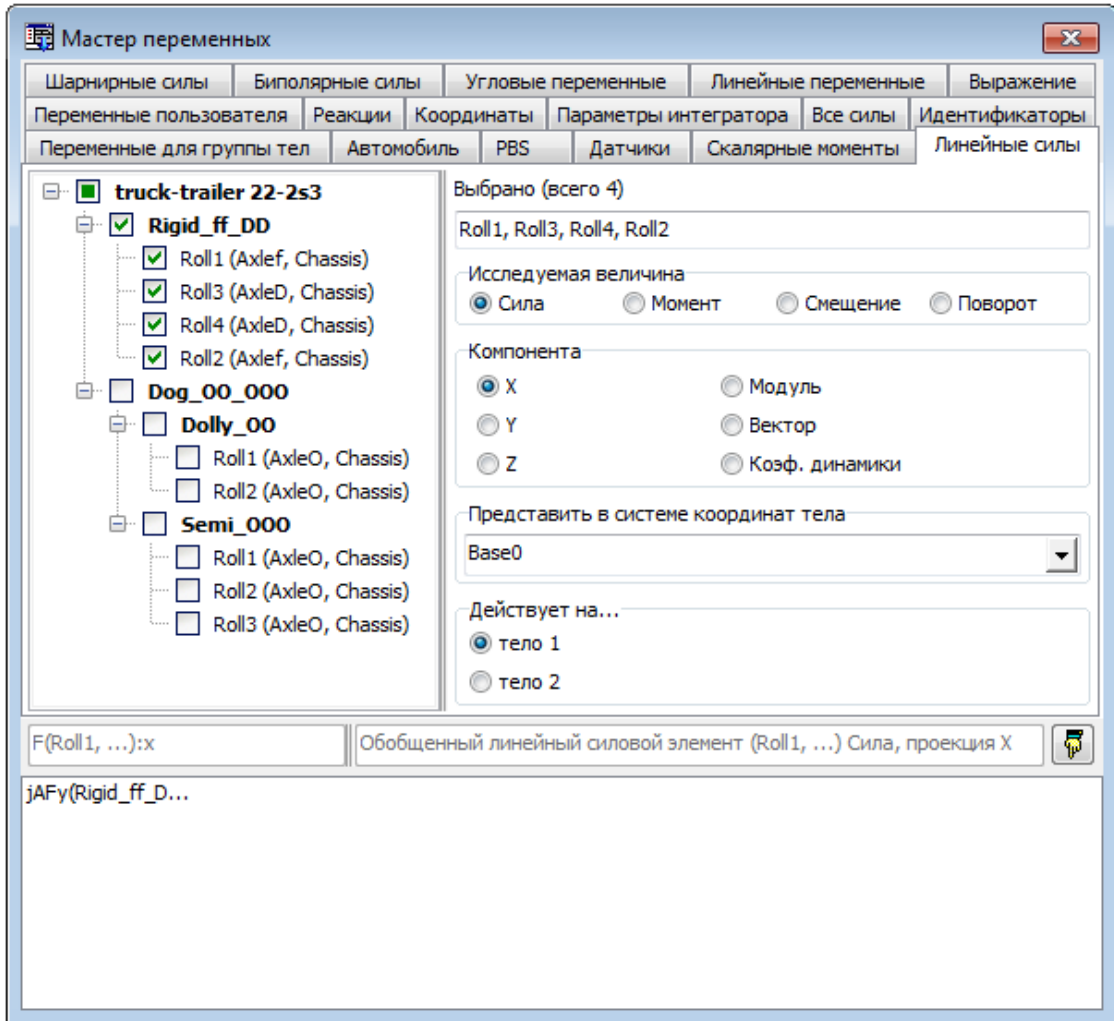


Рис. 4.19. Линейные силы

Поле **Компонента** имеет дополнительное значение **Коэффициент динамики**. Данный параметр имеет эффект только для типа **Сила** (и игнорируется для момента) в случае, когда при описании соответствующего элемента задано *стационарное значение силы*, причем *только одна* компонента стационарной силы отлична от нуля. Значение коэффициента динамики равно разности между ненулевой составляющей стационарной силы к соответствующей динамической проекции силы, отнесенной к стационарному значению. Например, если проекция стационарной силы на ось z отлична от нуля, то

$$k_D = \frac{F_z - F_{z0}}{F_{z0}}$$

4.3.2.6.6. Специальные силы

Переменная соответствует одному из силовых элементов типа специальной силы. Каждой специальной силе соответствует отдельная вкладка.

Рассмотрим все типы специальных сил и при необходимости укажем особенности создания соответствующих переменных.

4.3.2.6.6.1. Зубчатое зацепление и зубчатая рейка

Для зубчатого зацепления переменной является только сила в зацеплении, а момент отсутствует (рис. 4.20).

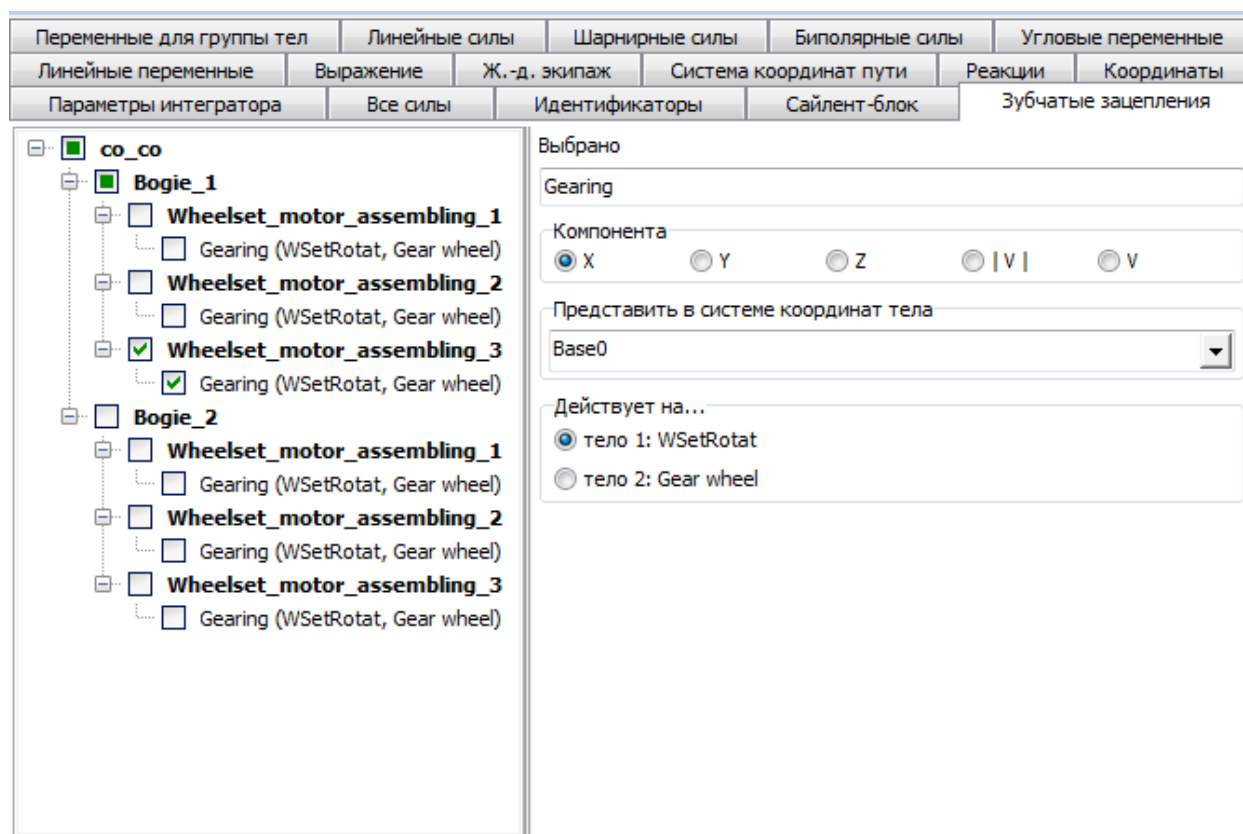


Рис. 4.20. Пример переменной для зубчатого зацепления

4.3.2.6.6.2. Сайлент-блок

Создание переменной имеет стандартный интерфейс, совпадающий с рис. 4.15.

4.3.2.6.6.3. Кулачок

Для силового элемента типа **Кулачок** переменная соответствует либо нормальной реакции, либо силе трения (используется терминология программы **UM Input**), см рис. 4.21.

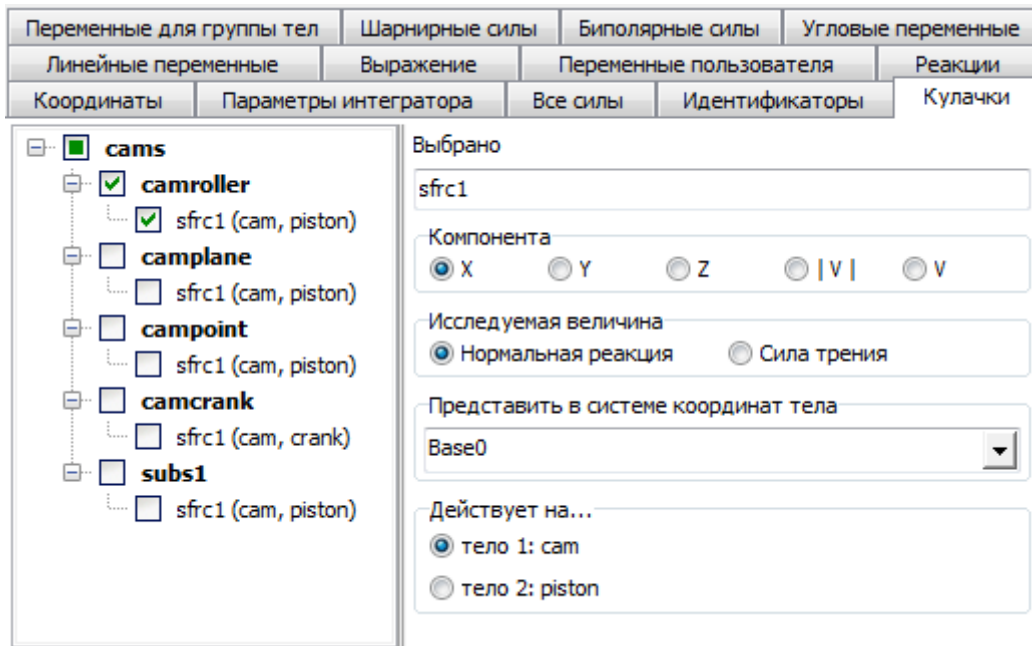


Рис. 4.21. Пример переменной для кулачка

4.3.2.6.6.4. Пружина

В случае специальной силы типа «Пружина» введена дополнительная переменная – коэффициент динамики К.Д. (см. п. 4.3.2.6.5. "Линейные силы", стр. 4-35), рис. 4.22.

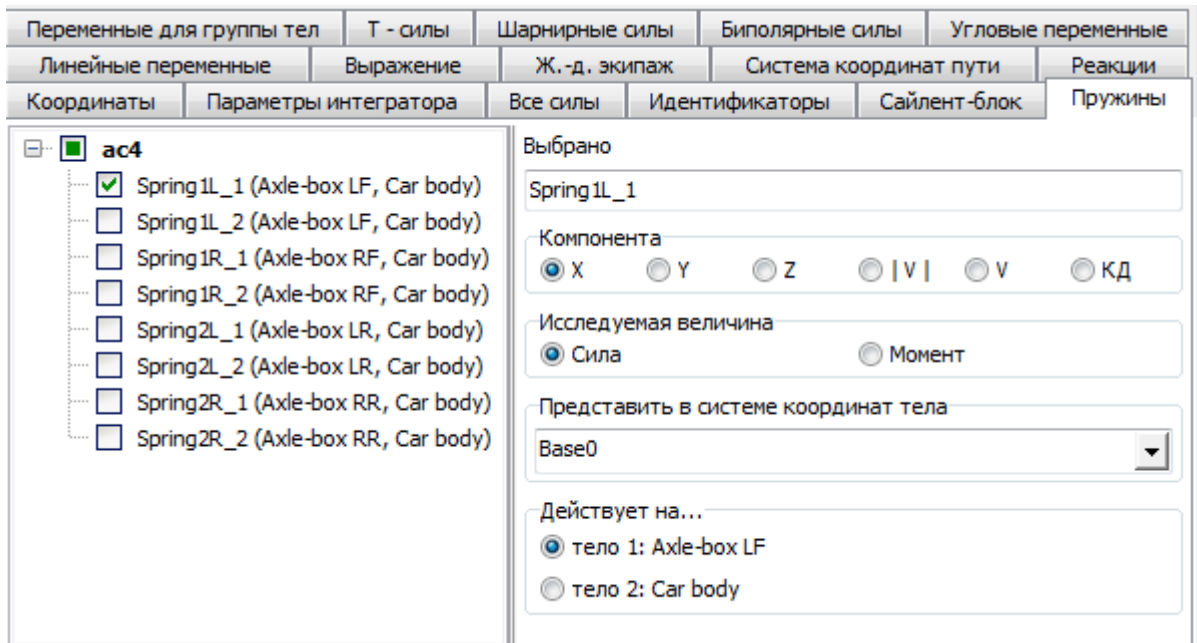


Рис. 4.22. Пример переменной для пружины

4.3.2.6.6.5. Комбинированное трение

Для силового элемента типа **комбинированного трения** переменная соответствует осевой силе, силе трения, суммарной мощности сил трения скольжения (**W**) и суммарной работе сил трения скольжения (**A**) (используется терминология программы **UM Input**).

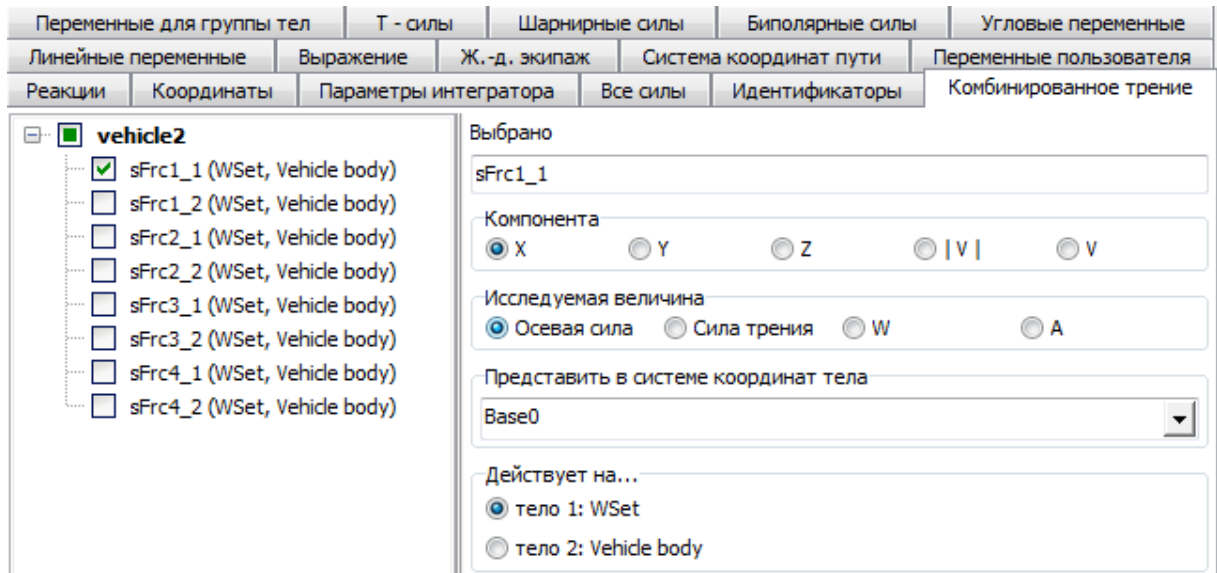


Рис. 4.23. Комбинированное трение

4.3.2.6.6.6. Шина

Специальные силы типа **Шина** дублируют основные переменные контакта шины с дорогой, поэтому для создания переменных используется вкладка **Автомобиль**, рис. 4.24, п. 4.3.2.12. "Автомобиль", стр. 4-56.

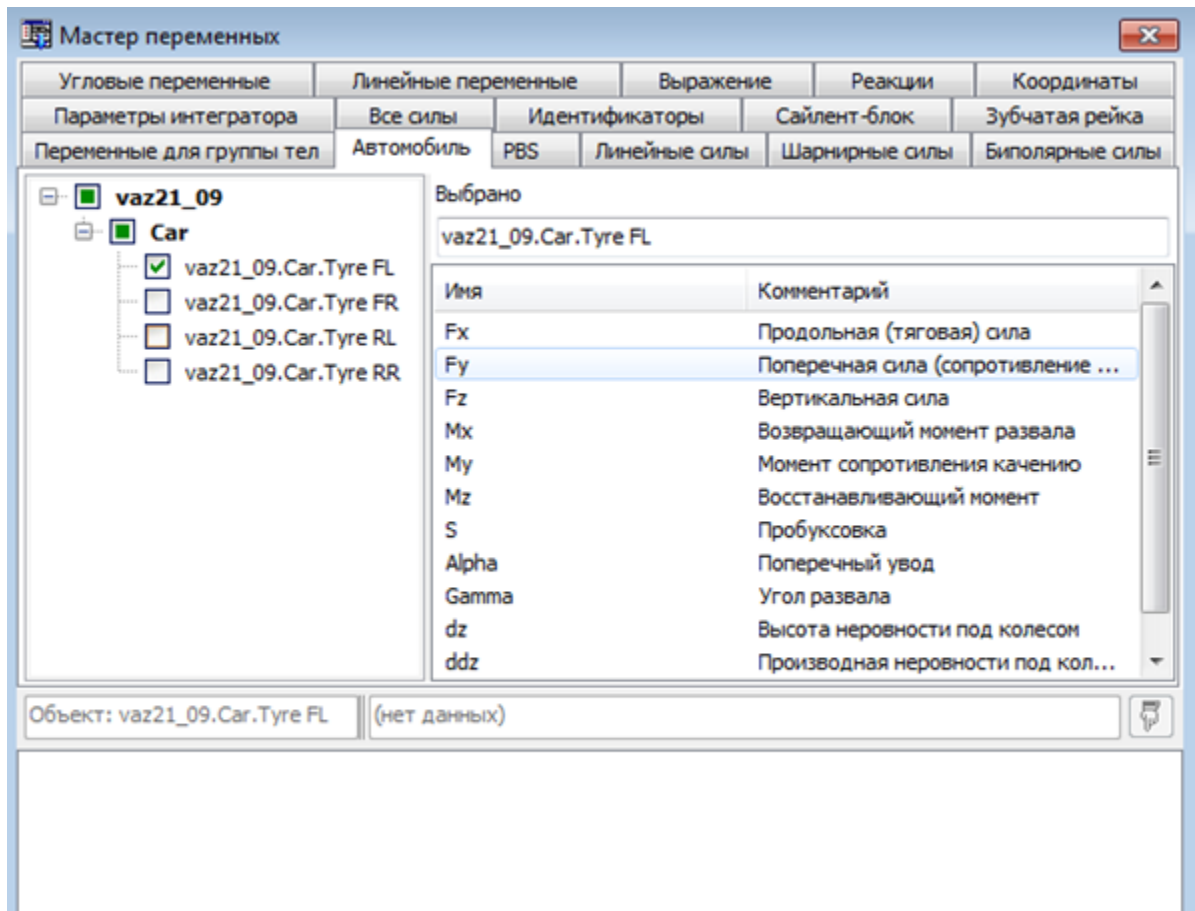


Рис. 4.24. Специальная сила типа Шина

4.3.2.6.7. Силы реакций

Силы соответствуют силам реакций шарниров объекта и считаются приведенными к шарнирной точке.

Если шарнир имеет шесть степеней свободы (или три для плоского механизма), то силы реакций должны быть равны нулю, так как в данном случае шарнир не является связью. Поскольку расчет динамики производится с определенной погрешностью, то фактическое значение сил будет отлично от нуля, но стремиться к нулю при увеличении точности интегрирования, причем величина силы и момента может служить ориентировочной оценкой точности расчета сил реакций при моделировании.

Расчет сил реакций является корректным только в том случае, если механизм является статически определенным. Например, статически определенными являются все системы тел, не имеющие замкнутых кинематических цепей. При наличии замкнутых кинематических цепей расчет может быть некорректным, хотя моделирование динамики механизма является правильным. Например, кривошипно-ползунный механизм является плоским и, рассматриваемый в пространстве – статически неопределенным. Если приложить к механизму активную силу, перпендикулярную его плоскости, то расчет сил реакций будет некорректным. Данный механизм можно сделать статически определенным, если заменить вращательные шарниры кривошип-база и шатун-ползун шарнирами с двумя и тремя вращательными степенями свободы соответственно.

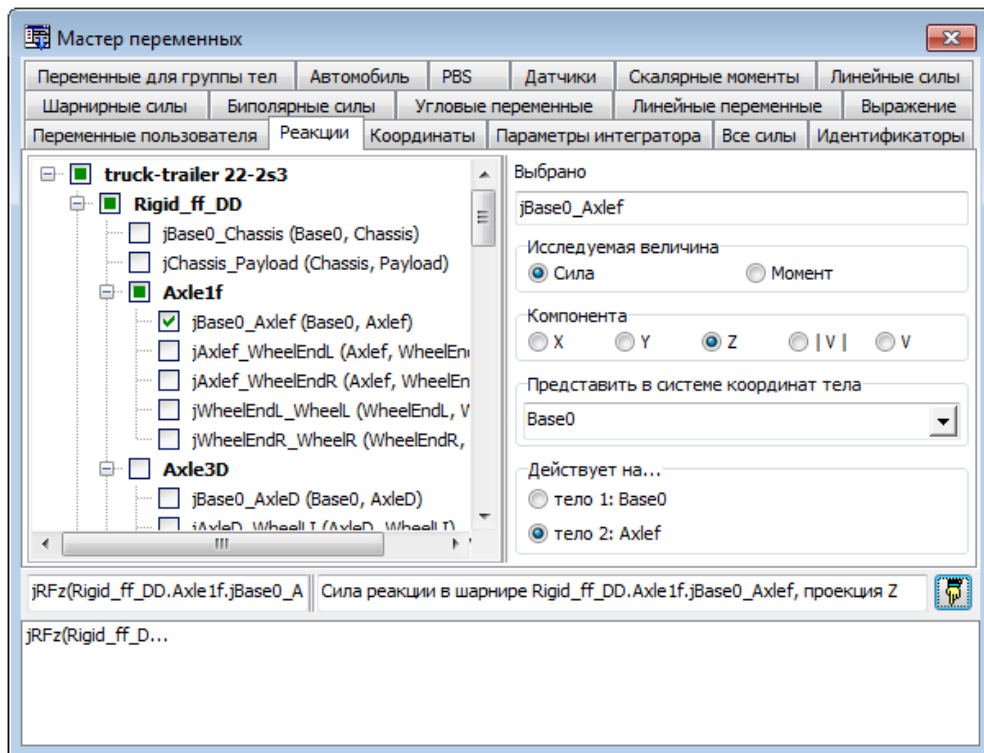


Рис. 4.25. Силы реакции

4.3.2.6.8. Все силы

Переменная предназначена для отображения в анимационном окне *всех* сил, действующих на отдельное тело или на группу тел. Отметьте в дереве тело или группу тел, для которых формируется переменная, укажите типы сил (активные, реакции и инерции). Силы инерции приводятся к центру масс тела. На рис. 4.26 сформирована переменная: все активные силы и силы реакций связей, действующие на отмеченную галочками группу тел.

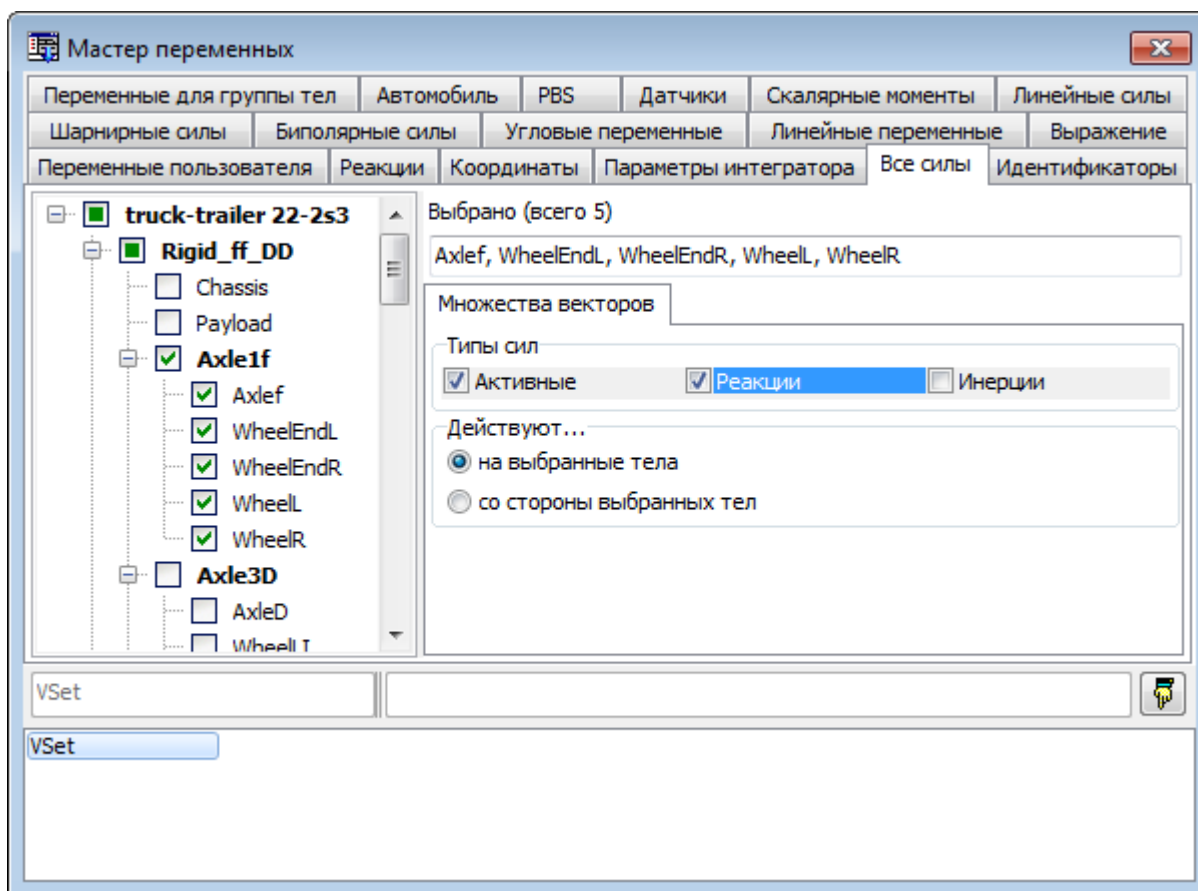


Рис. 4.26. Все силы

4.3.2.6.9. Контактные силы для тел

Вкладка **Контактные силы для тел** (рис. 4.27) предназначена для создания переменных, соответствующих контактному силовому элементу. Вкладка используется исключительно для контактов типа *Точки-Плоскость*.

Рассматриваются все контактные силы типа *Точки-Плоскость*, действующие на тело, выбранное пользователем. Переменная формируется одного из следующих типов.

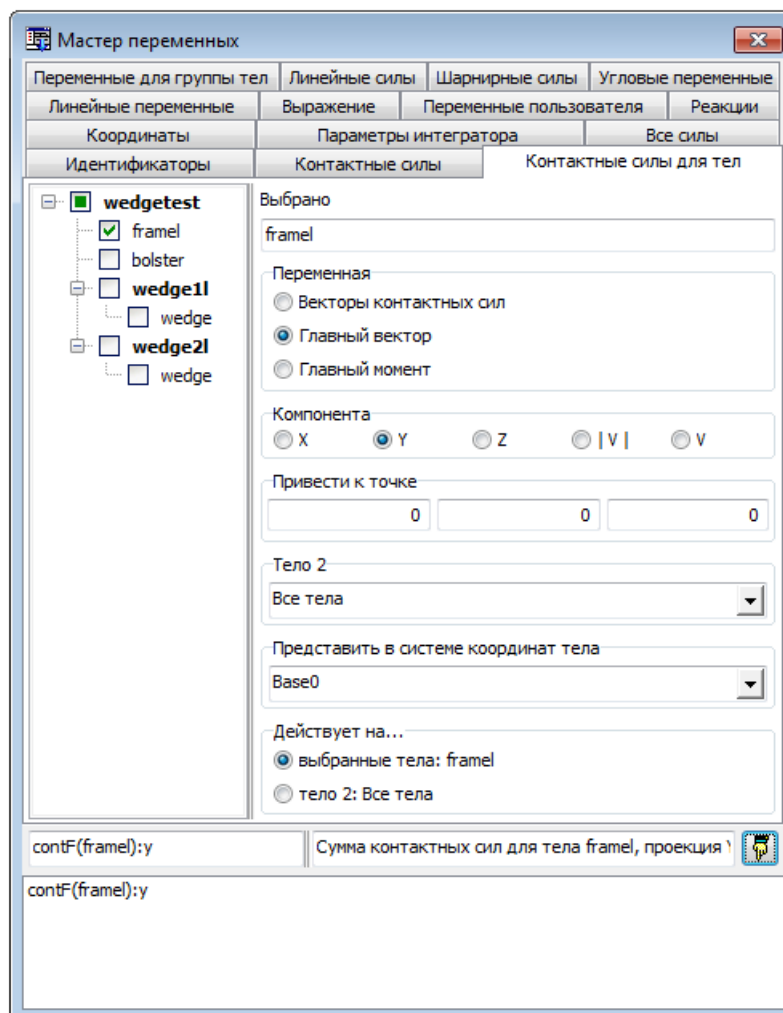


Рис. 4.27. Вкладка Контактные силы

Векторы контактных сил

Переменная может быть помещена только в анимационное окно, в котором будут изображены векторы всех контактных сил указанного типа (по числу точек), приложенные каждая в соответствующей точке контакта, причем нормальные силы и силы трения будут представлены отдельными векторами. Пример реализации двух переменных данного типа для изображения контактных сил, действующих со стороны фрикционных клиньев на боковину и надрессорную балку трехэлементной тележки грузового вагона, представлен на рис. 4.28.

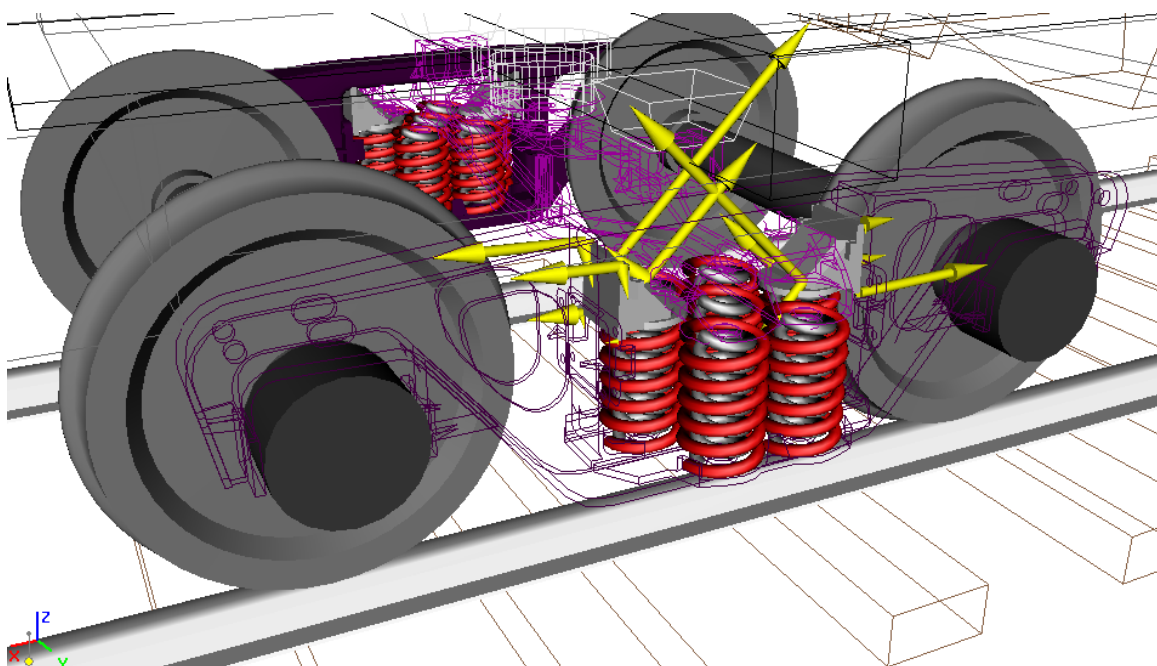


Рис. 4.28. Векторы контактных сил

Главный момент

Главный момент представляет собой геометрическую сумму моментов всех контактных сил, действующих на данное тело, относительно точки, координаты которой представлены в СК тела, рис. 4.29.

Привести к точке

0	0	0
---	---	---

Рис. 4.29. Координаты точки приведения главного вектора и главного момента

На рис. 4.27 сформирована следующая переменная: проекция на ось Y СК тела *Кузов* главного вектора всех контактных сил, действующих на тело *Кузов*.

Главный вектор можно спроецировать на оси координат, вывести длину вектора и непосредственно вектор поместить в анимационное окно. Для этого используйте нужный вариант в группе **Компонента**. Главный вектор и главный момент в анимационном окне рисуются приложенными к точке, заданной координатами в группе *Привести к точке*, рис. 4.29.

4.3.2.6.10. Контактные силы: контакт типа Точки — Плоскость и Точки — Z-поверхность

В случае контакта типа *Точки-Плоскость* и *Точки-Z-поверхность* параметры, приведенные на вкладке (рис. 4.30), имеют следующие значения.

Главный вектор

Имеется в виду суммарное воздействие от всех точек многоточечного контакта. В зависимости от значения параметра **Тип силы** рассчитывается

R – сумма всех сил, включая нормальные силы и силы трения, вектор;

N – сумма нормальных сил, вектор;

Ffr – сумма сил трения, вектор;

D – среднее арифметическое значение внедрения точек, скаляр;

W – суммарная мощность сил трения скольжения, вектор;

A – суммарная работа сил трения скольжения, вектор.

Для всех векторных величин можно сформировать переменную в виде проекции и величины.

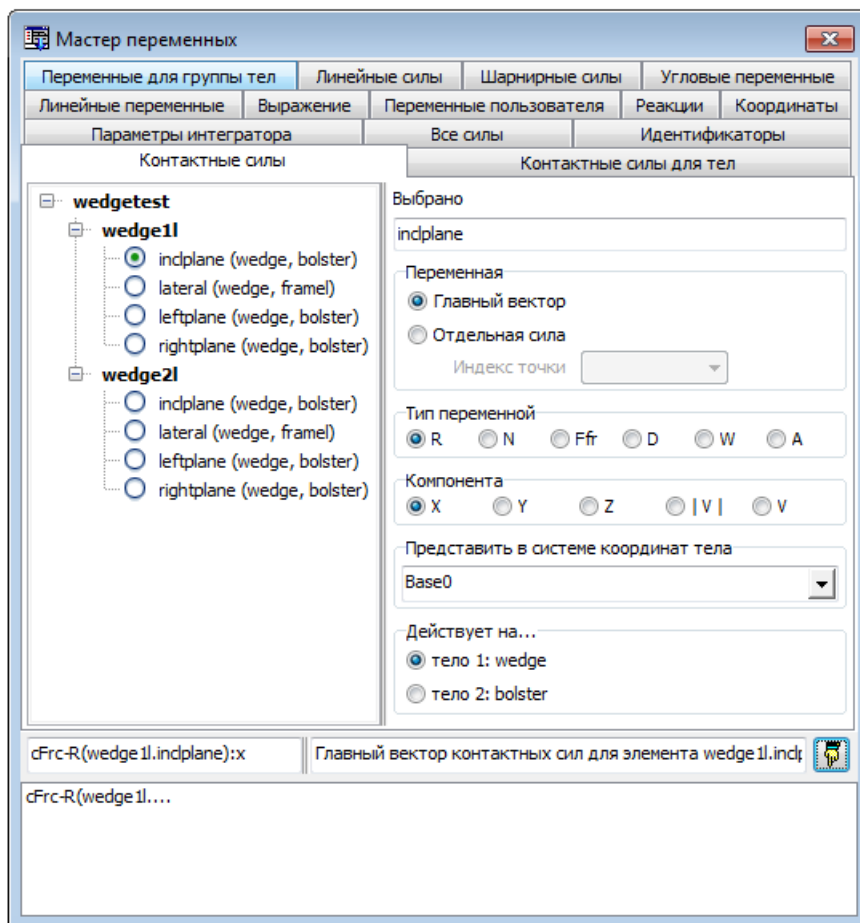


Рис. 4.30. Вкладка Контактные силы: многоточечный контакт

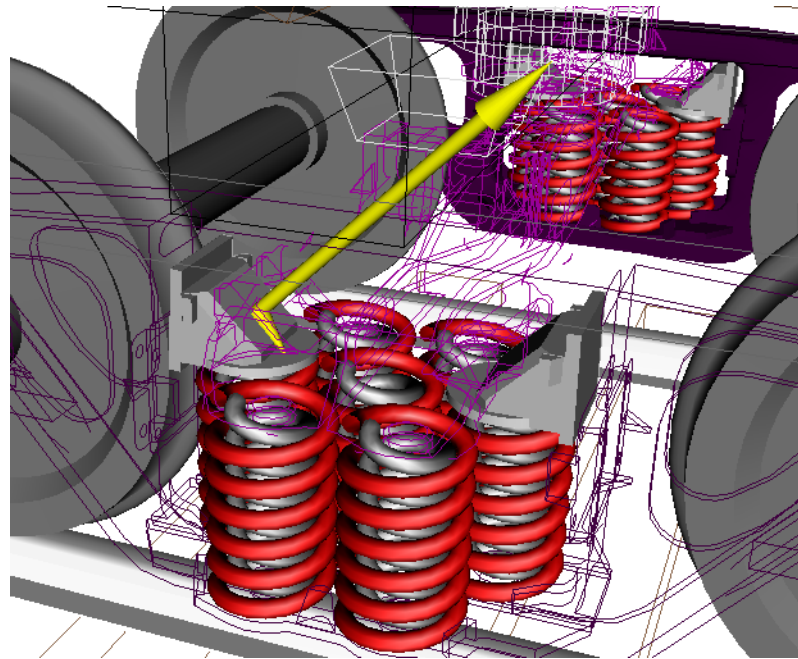


Рис. 4.31. Главный вектор нормальных сил и сил трения, действующих на надрессорную балку со стороны клина

Если вектор \mathbf{R} , \mathbf{N} или \mathbf{Ffr} помещается в анимационное окно, то начало вектора размещается в геометрическом центре контактных точек, рассчитываемом к СК тела по формуле

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i,$$

где ρ_i – радиус-вектор контактной точки относительно начала отсчета СК тела, N – число контактных точек для силового элемента. Например, на рис. 4.31 показаны векторы суммарных сил \mathbf{N} , \mathbf{Ffr} .

Вектор мощности сил трения рассчитывается по проекциям в СК второго тела (содержащего контактную плоскость) в соответствии с формулой

$$\vec{W} = \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum F_{ix} v_{ix} \\ \sum F_{iy} v_{iy} \\ \sum F_{iz} v_{iz} \end{pmatrix},$$

F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} – проекции силы трения в режиме скольжения в i -й точке на оси СК второго тела, а v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} – проекции скорости проскальзывания на ту же СК. В режиме сцепления мощность силы трения полагается равной нулю.

Вектор мощности не преобразуется в другие СК.

Проекции вектора мощности на ось можно интерпретировать как доля мощности, рассеиваемой трением в данном направлении.

Если выбрать компоненту $|V|$, то рассчитывается не модуль вектора \vec{W} , а действительная мощность сил трения $W = W_x + W_y + W_z$.

Вектор работы сил трения рассчитывается по проекциям в СК второго тела (содержащего контактную плоскость) в соответствии с формулой

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int W_x dt \\ \int W_y dt \\ \int W_z dt \end{pmatrix},$$

Вектор работы не преобразуется в другие СК.

Проекции вектора работы на ось можно интерпретировать как доля энергии, рассеиваемой трением в данном направлении.

Если выбрать компоненту $|V|$, то рассчитывается не модуль вектора \vec{A} , а действительная работа сил трения $A = A_x + A_y + A_z = \int W dt$.

Отдельная сила

Из всех точек контакта выбирается одна (поле **Индекс силы** – порядковый номер контактной точки в описании элемента в программе ввода). Для нее выбирается Тип силы:

R – сумма нормальной силы и силы трения, вектор;

N – нормальная сила, вектор;

Ffr – сила трения, вектор;

D – внедрение точки в плоскость, скаляр;

W – мощность силы трения скольжения, вектор;

A – работа силы трения скольжения, вектор.

Для отдельной силы справедливы все соотношения и комментарии, сделанные выше для главных векторов, если в формулах положить число точек равным единице.

4.3.2.6.11. Контактные силы: остальные типы контактных сил

Переменные позволяют рассчитать следующие величины, связанные с контактным взаимодействием:

- R** – сумма нормальной силы и силы трения, вектор;
- N** – нормальная сила, вектор;
- Ffr** – сила трения, вектор;
- D** – внедрение контактных элементов, скаляр.

Для всех векторных величин можно сформировать переменную в виде проекции и модуля вектора (рис. 4.32).

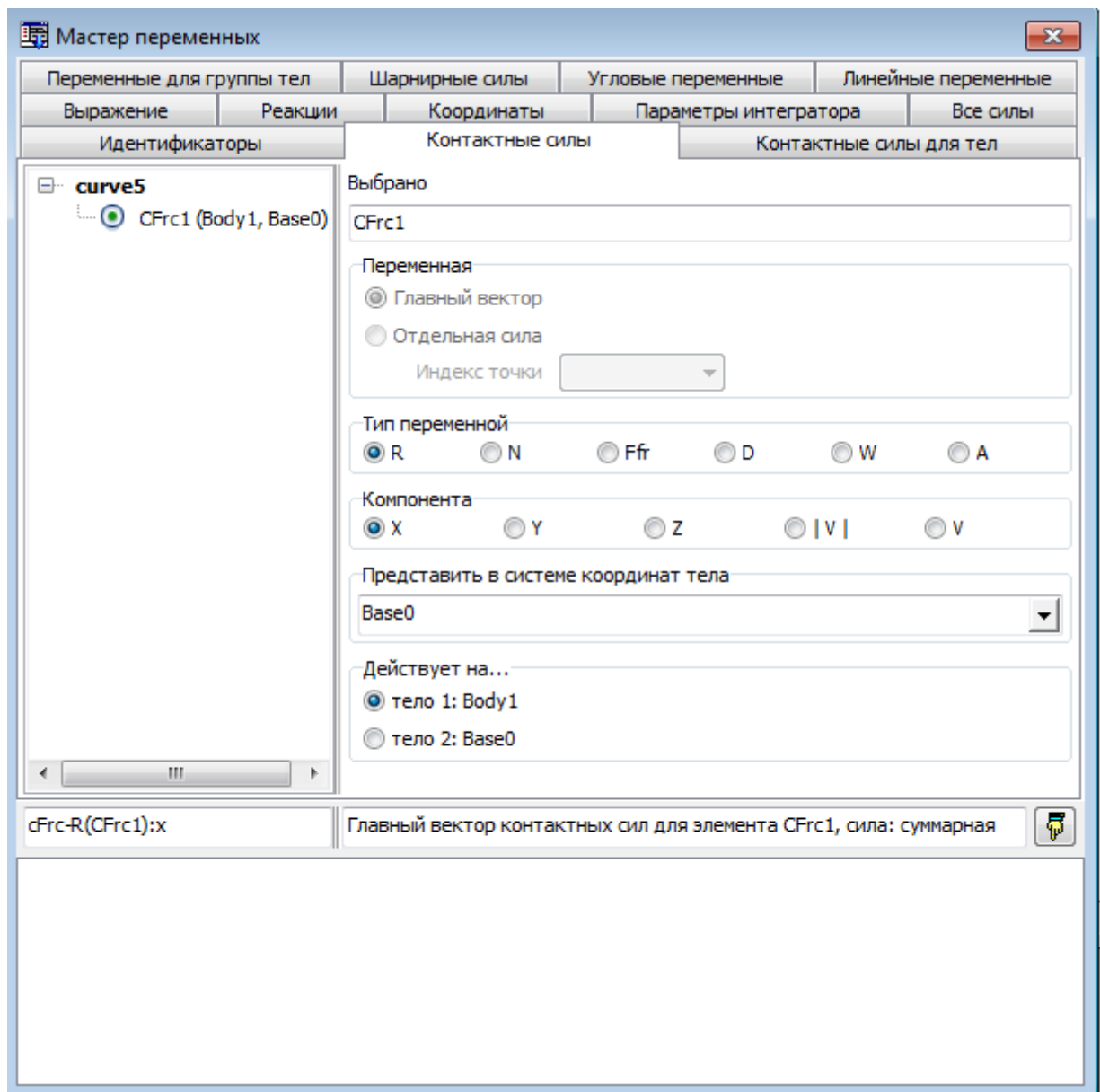


Рис. 4.32. Вкладка Контактные силы

4.3.2.7. Переменные, рассчитываемые пользователем

Вкладка Переменные пользователя | UserVars (рис. 4.33) позволяет сформировать переменную, рассчитываемую пользователем в файле управления при программировании в среде УМ с использованием файла управления, см. [Главу 5](#) руководства пользователя.

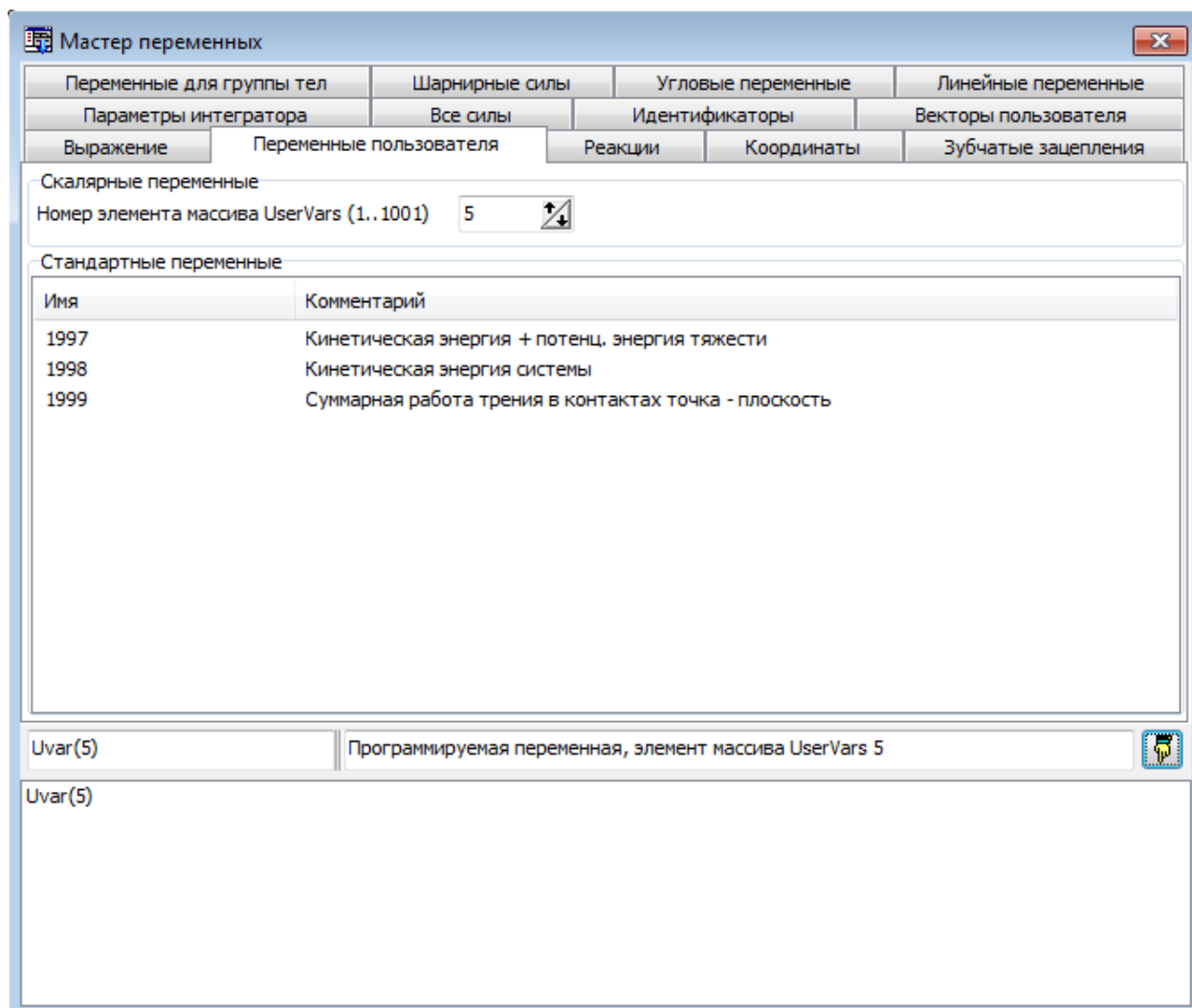


Рис. 4.33. Переменные пользователя

Пользователь должен позаботиться о том, чтобы значение рассчитанного им выражения в файле управления было присвоено одному из элементов массива UserVars[1..1001].

Для задания переменной с помощью мастера следует указать ее номер в массиве, задать стандартное или оригинальное имя и комментарий и отослать переменную в контейнер.

4.3.2.8. Векторы, рассчитываемые пользователем

Вкладка **Векторы пользователя** (рис. 4.34) позволяет сформировать векторы для изображения в анимационном окне, которые рассчитываются пользователем в *файле управления*. Пользователь имеет возможность динамически сформировать список векторов, величины которых рассчитываются в файле управления. Основная цель данного списка – предоставить возможность отображения в анимационном окне нестандартных векторов, которые не могут быть получены автоматически с помощью мастера переменных, см. [Главу 5](#), п. *Анимация векторов пользователя*.

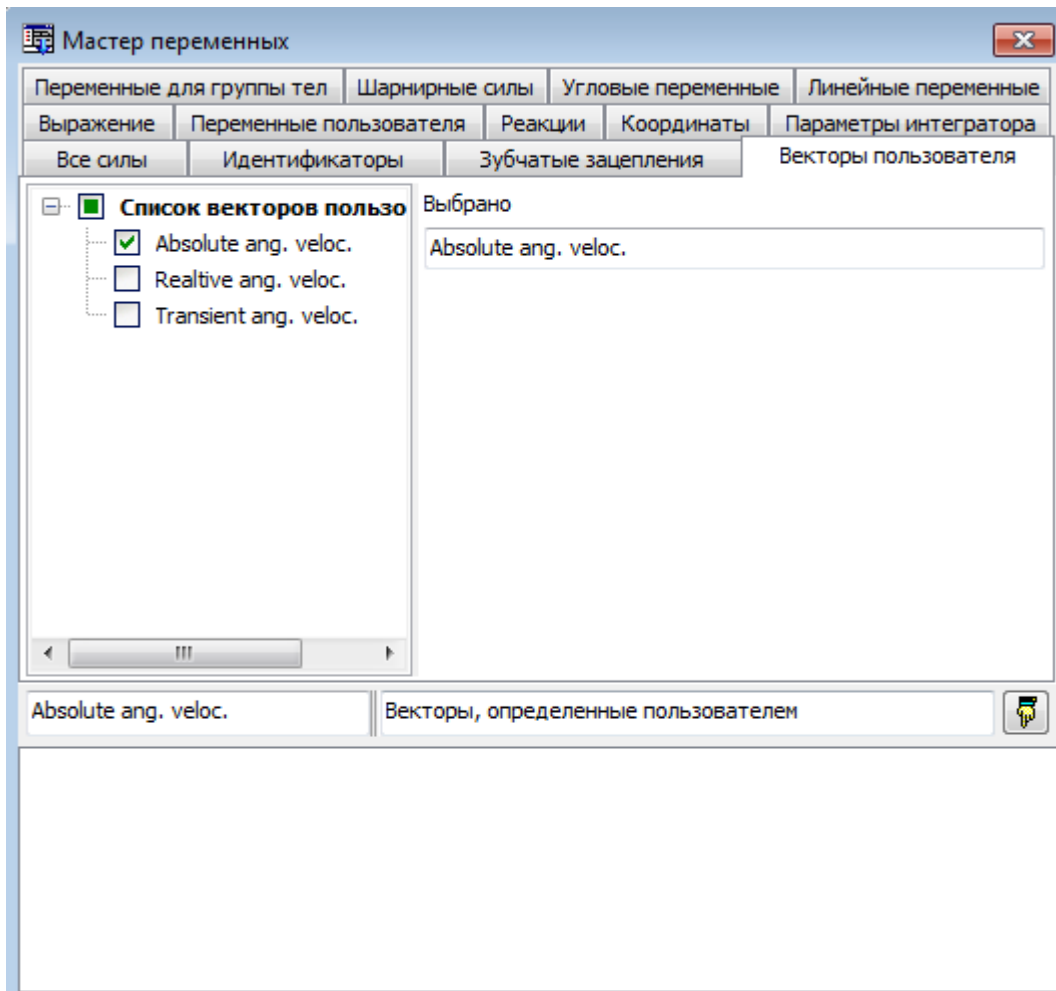


Рис. 4.34. Векторы пользователя

4.3.2.9. Идентификаторы

Вкладка **Идентификаторы** (рис. 4.35) позволяет сформировать переменную, связанную с идентификатором. В процессе моделирования значения некоторых идентификаторов могут изменяться, например, идентификаторы, описывающие величину силы, таким образом, может возникнуть необходимость контроля над ними.

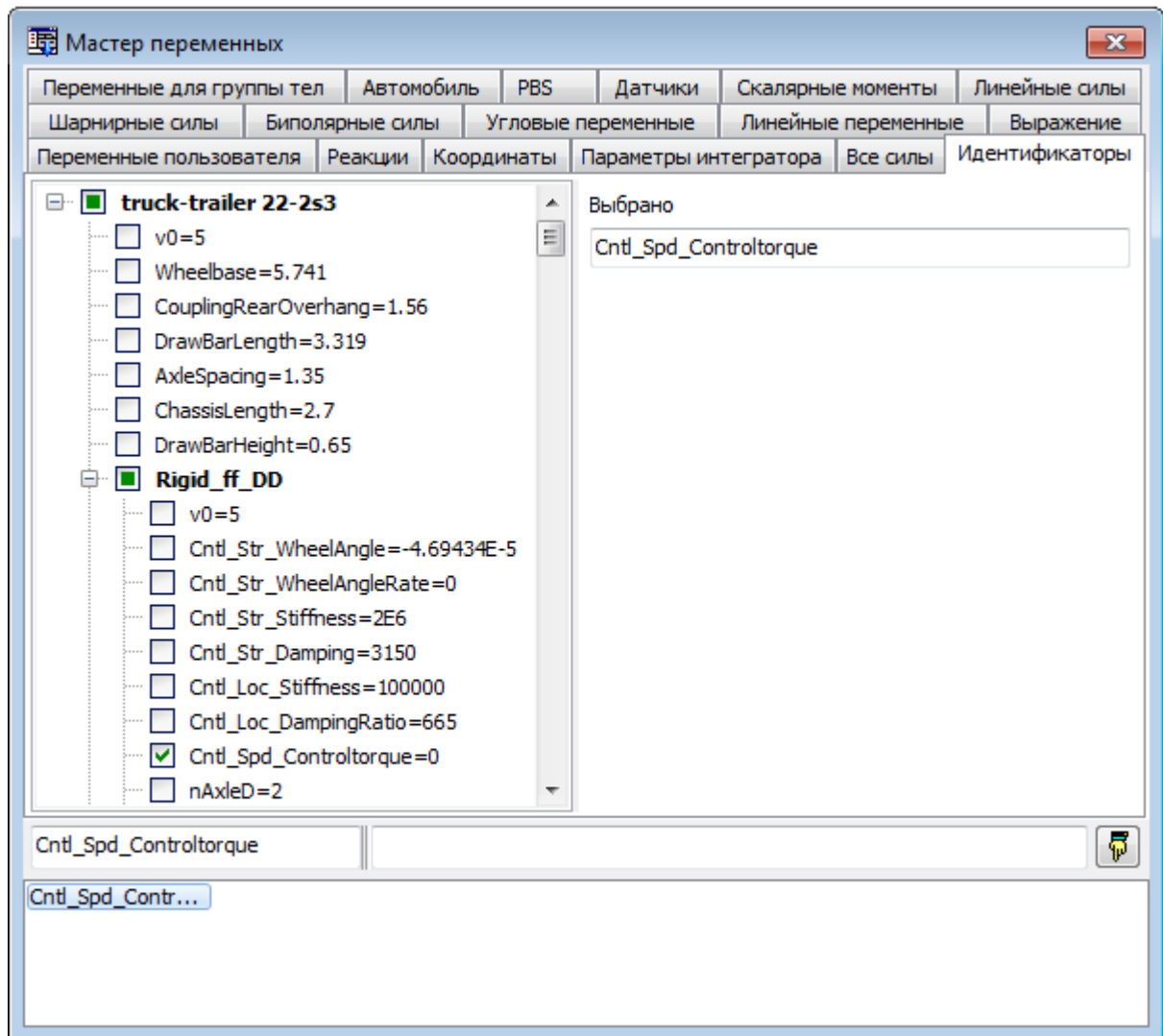


Рис. 4.35. Идентификаторы

4.3.2.10. Переменная – выражение

С помощью вкладки **Выражение** мастера переменных можно создавать новые программируемые переменные, применяя к заранее созданным с помощью мастера переменным и идентификатору времени t арифметические, векторные и другие операции, функции, а также, используя операторы условия.

Примеры переменных, которые можно создать с помощью данного инструмента:

- Векторная сумма произвольного набора сил, а также ее модуль и проекция на любую ось.
- Стандартная переменная, но со знаком, измененным на противоположный. Стандартная переменная, умноженная на число (для получения единиц в других единицах, например, для перевода метров в дюймы или футы).
- Функция времени, например, $\sin(10t)$.
- Разность значений двух переменных.

4.3.2.10.1. Основные действия при создании списка

Для программирования переменных следует выполнить следующие действия.

1. Подготовить переменные, которые будут участвовать в создании новой переменной (например, открыть список переменных). При необходимости создать новые переменные с помощью мастера и поместить в контейнер.
2. Последовательно запрограммировать новую переменную. Для этого используются следующие правила.

Каждый оператор (функция или операция) занимает одну строку таблицы, за исключением условных операторов. Строка оператора содержит имя результата (в первом столбце), графический образ или имя оператора (например, \sin) и поля с одним или двумя операндами (светло-голубого цвета).

Новый оператор либо вставляется в пустую активную строку таблицы, либо заменяет существующий оператор в активной строке после щелчка на кнопке с именем оператора.

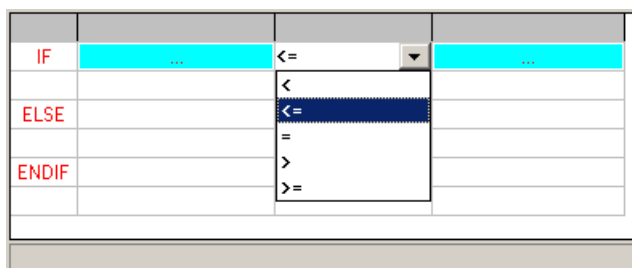
Операндом является:

- число (вводится в поле операнда с клавиатуры),
- идентификатор времени t (вводится в поле операнда с клавиатуры),
- переменная из контейнера мастера переменных, из списка переменных данного объекта или из открытого графического окна (перетаскиваются в поле операнда с помощью мыши),
- стандартные константы (π , rtod , dtr , mtoi , ntop), [Глава 3](#), п. "Стандартные функции и константы",
- результат выполнения одного из вышестоящего оператора (имя результата в первой колонке перетаскивается в поле операнда с помощью мыши).

Старое значение операнда может быть заменено новым таким же образом, как и выше, то есть вводом с клавиатуры или перетаскиванием новой переменной с помощью мыши.


Используйте всплывающее меню для удаления или вставки отдельной строки, а также для удаления всех введенных операторов.

Для выбора условия (<, <=, >...) в условных операторах используйте выпадающий список (после щелчка на соответствующем поле оператора 'IF').



Удаление одного из элементов условного оператора ('if', 'else', 'endif') приводит к удалению всего условного оператора и всех операторов, помещенных внутри его.

3. Для добавления сформированной переменной в контейнер

- выделите мышкой оператор, результат которого является новой переменной,
- задайте имя переменной (рис. 4.8),
- отошлите переменную в контейнер щелчком на кнопке .

4.3.2.10.2. Операторы



Оператор	Первый операнд	Второй операнд	Комментарий
+ - *	Вектор или скаляр	Вектор или скаляр	Произведение двух векторов соответствует векторному произведению
/	Вектор или скаляр	Скаляр	
=	Вектор или скаляр	–	
sin, cos, abs, ln, exp, sqrt, atan, sign	Скаляр	–	Элементарные функции
χ	Скаляр	–	Функция Хэвисайда (1 для положительного аргумента, 0 в остальных случаях)
pow	Скаляр	Скаляр	Возведение первого операнда в степень, равную второму операнду
Px, Py, Pz	Вектор	–	Проекция вектора на соответствующую ось
$\ \bullet\ $	Вектор	–	Норма вектора
\bullet	Вектор	Вектор	Скалярное произведение векторов
IF	Скаляр	–	Оператор условия IF (условие) [группа операторов] ENDIF

IF...ELSE	Скаляр	–	<p>Оператор условия IF (условие) [группа операторов] ELSE [группа операторов] ENDIF</p>
-----------	--------	---	--

4.3.2.10.3. Простейший пример

Рассмотрим переменную, равную модулю разности двух скалярных переменных, например, проекций ускорений двух точек на ось Z $|a_{z1} - a_{z2}|$.

Для формирования переменной выполните следующие действия (рис. 4.36).

- Создайте переменные $az1$, $az2$ с помощью мастера и поместите их в контейнер.
- Щелкните на кнопке  для создания операции вычитания.
- Перетащите мышкой переменную $az1$ в поле первого оператора, $az2$ – в поле второго оператора.
- Щелкните мышкой на второй (пустой) строке таблицы, чтобы сделать ее активной, а затем щелкните на кнопке **abs** для создания соответствующей операции во второй строке.
- Перетащите имя результата первой операции ($_x1$) в поле операнда операции **abs**.
- Введите имя переменной $|az1-az2|$ и щелкните на кнопке  для того, чтобы отослать переменную в контейнер. При этом активной должны быть вторая строка.

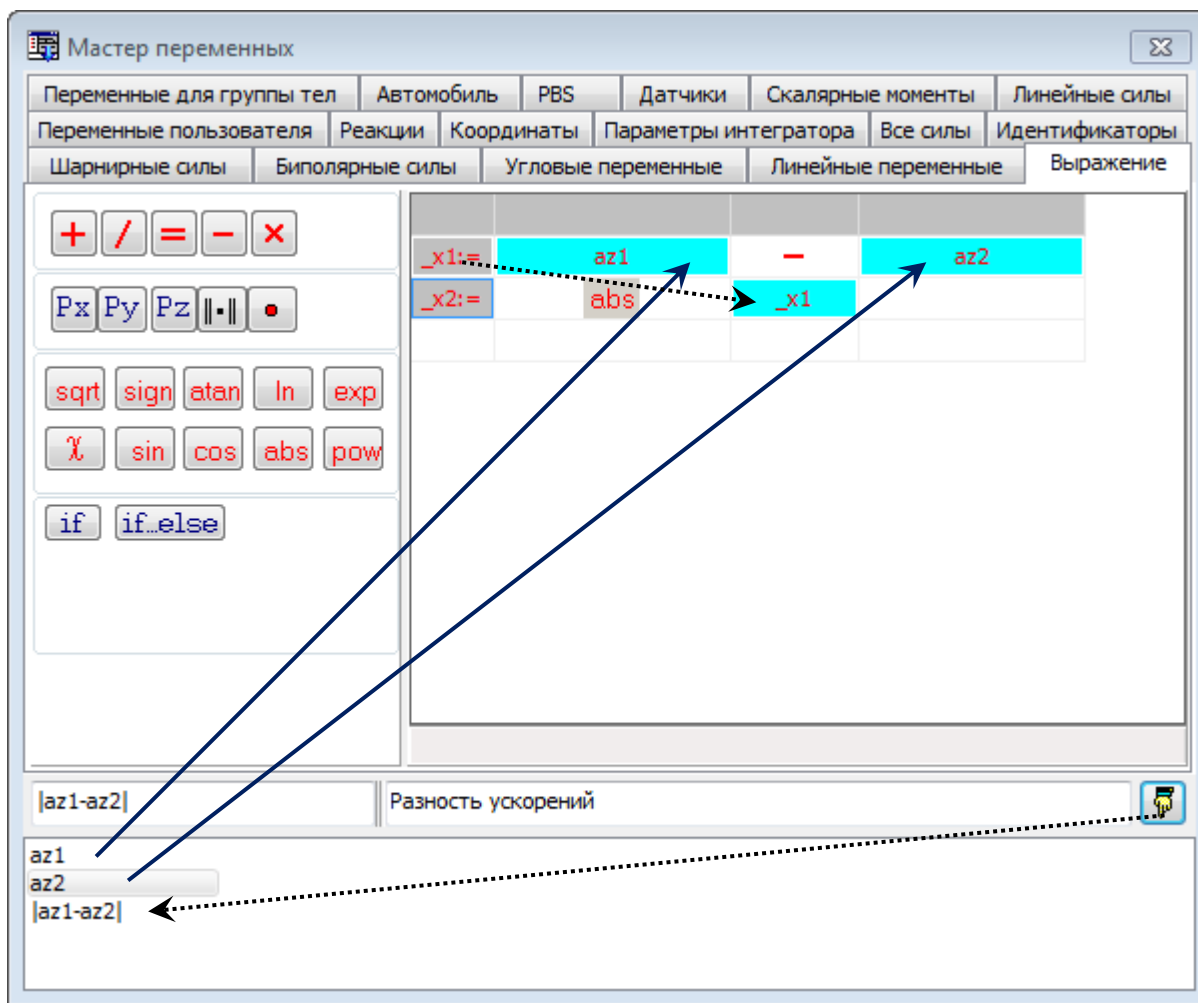


Рис. 4.36. Пример программирования переменной – выражения

4.3.2.11. Железнодорожные экипажи

Мастер переменных содержит две вкладки, включающие специальные переменные для железнодорожных экипажей – это вкладки **Ж.-д. экипаж** (рис. 4.37) и **Система координат пути** (рис. 4.38). Данные вкладки появляются только при моделировании рельсовых экипажей. Подробное описание переменных находится в [Главе 8](#), п. "Особенности создания списка переменных".

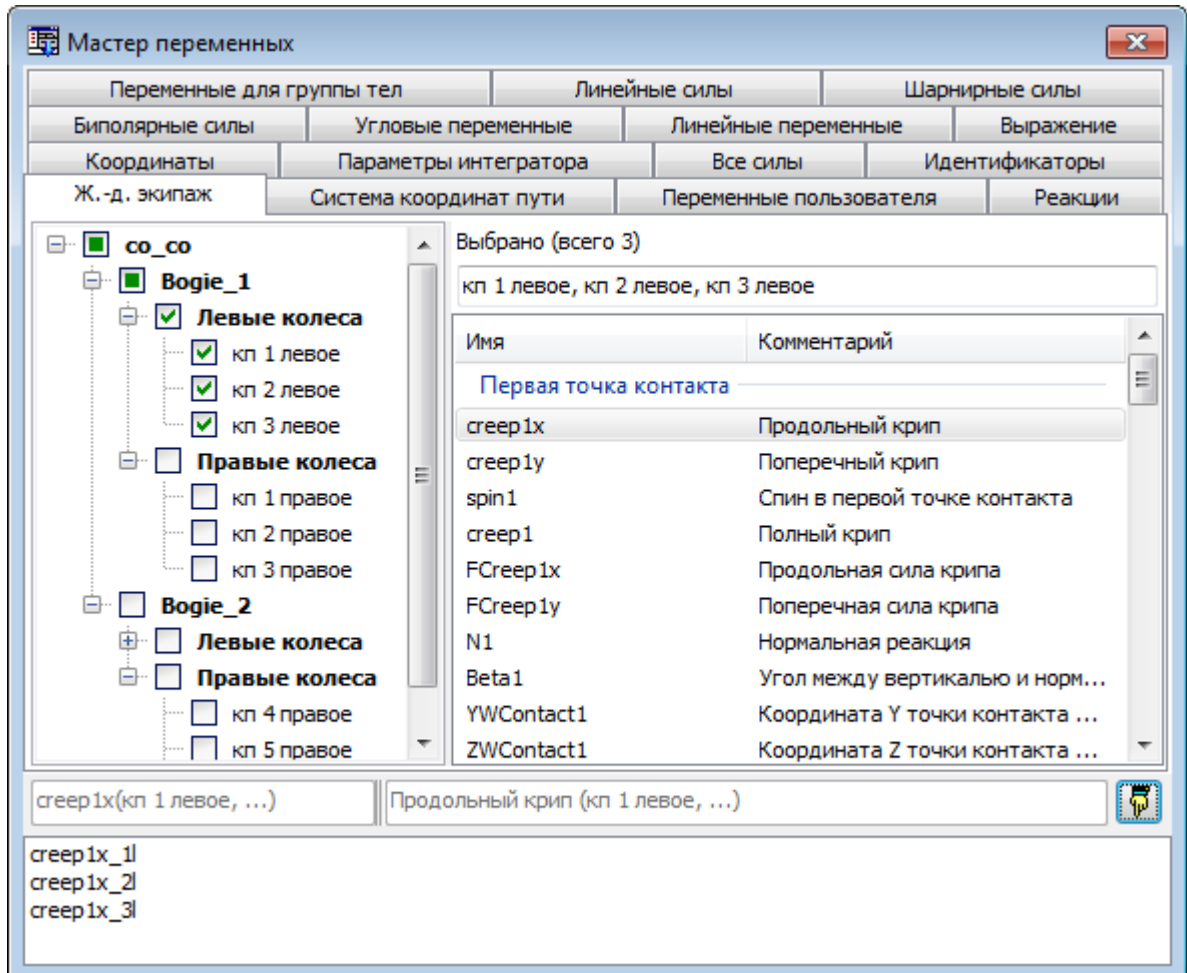


Рис. 4.37. Ж.-д. экипаж

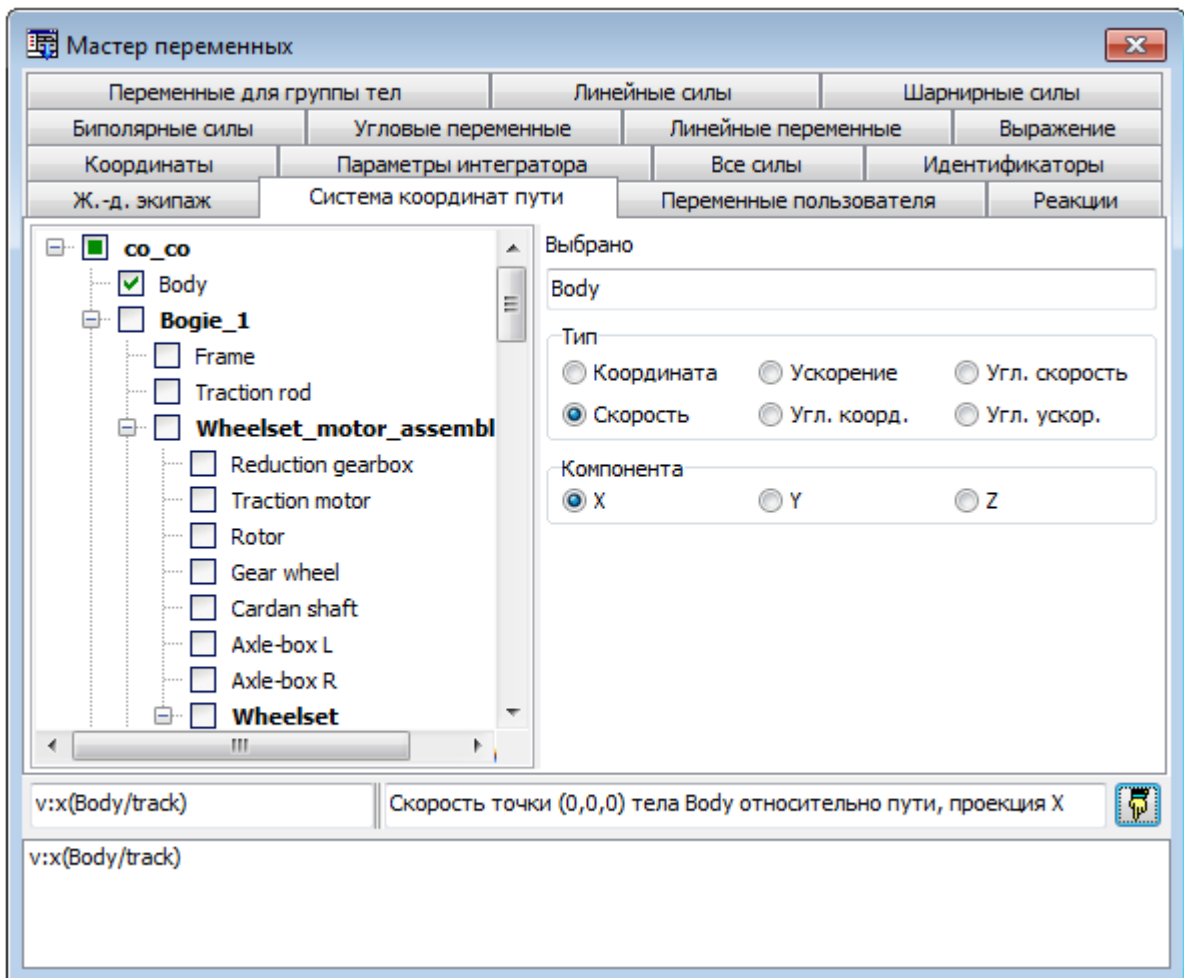


Рис. 4.38. Система координат пути

4.3.2.12. Автомобиль

Данная вкладка появляется только при моделировании автомобилей (рис. 4.39). Подробное описание переменных находится в [Главе 12](#), п. "Создание переменных".

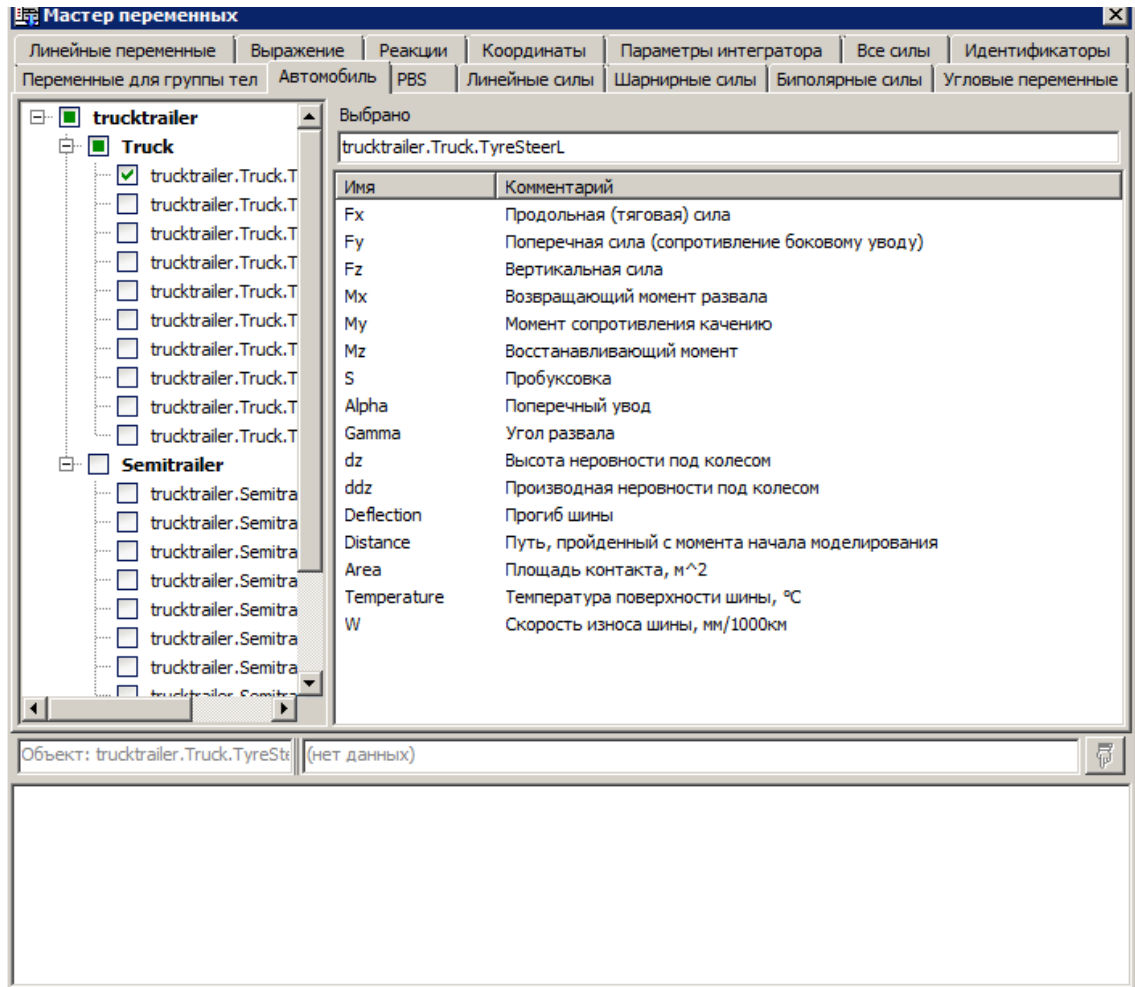


Рис. 4.39. Специальные переменные для автомобиля

4.3.2.13. Гусеничная машина

Данная вкладка появляется только при моделировании гусеничных машин (рис. 4.40). Подробное описание переменных находится в [Главе 18](#), п. "Список специализированных переменных".

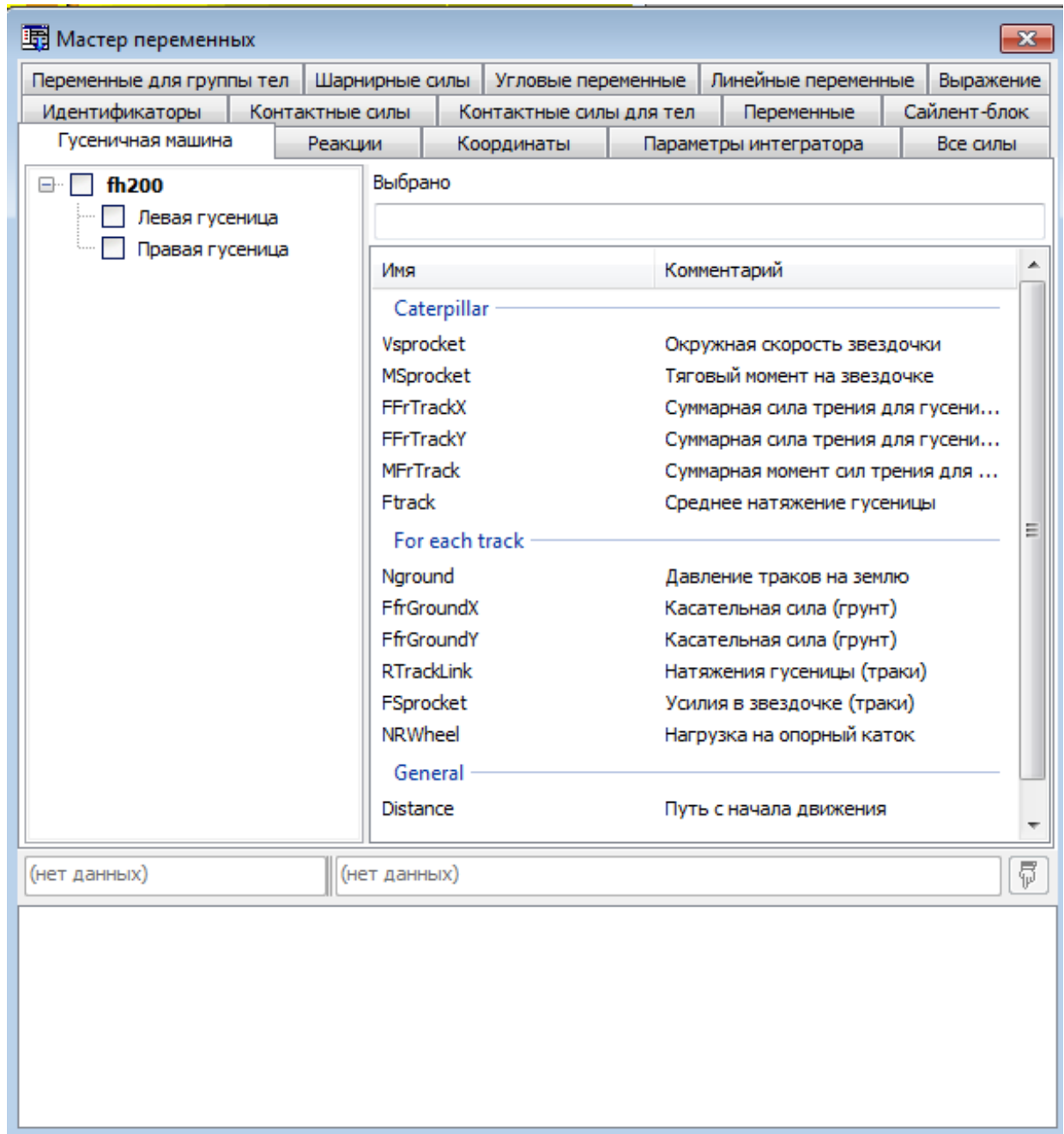


Рис. 4.40. Специальные переменные для гусеничной машины

4.3.2.14. Поезд

Данная вкладка появляется только при моделировании динамики поезда (рис. 4.41), [Глава 15](#).

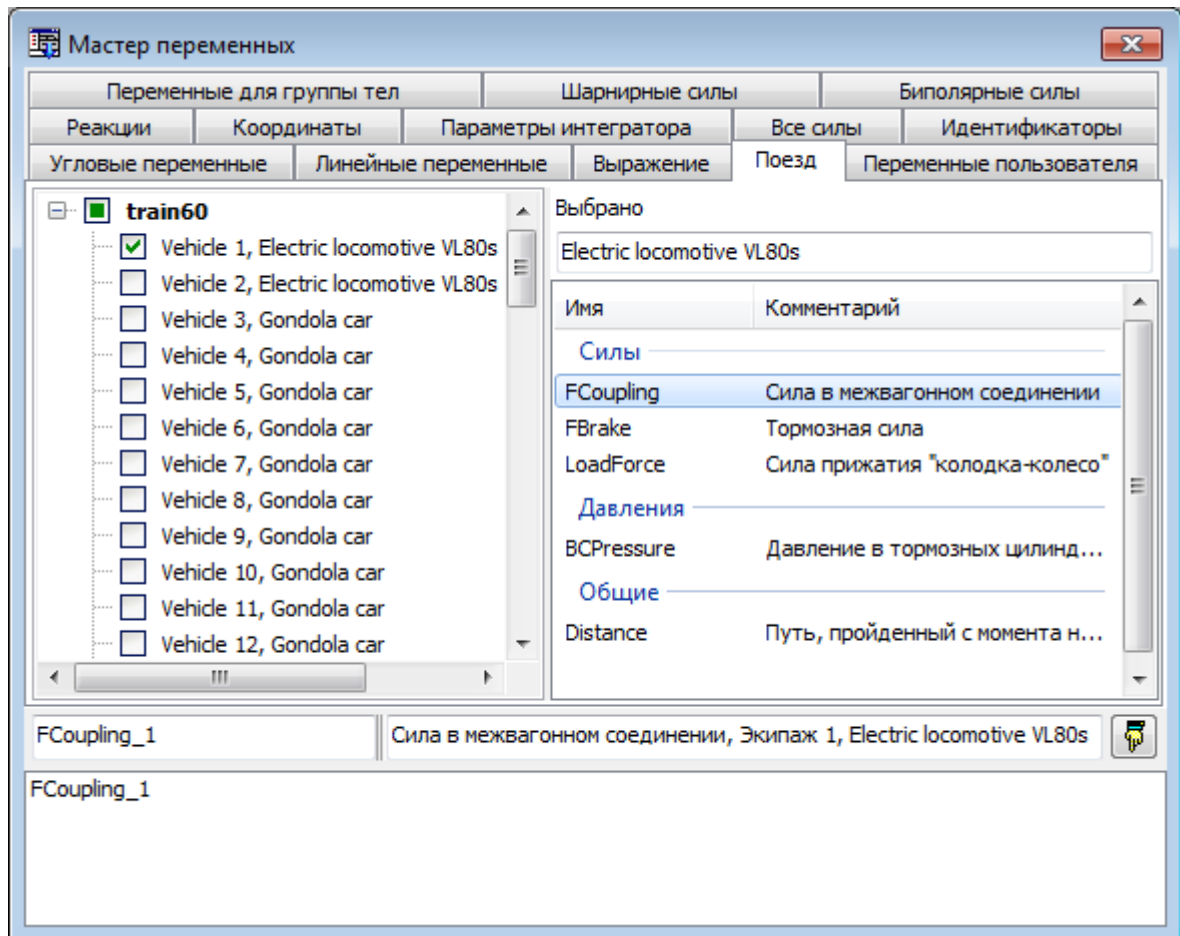


Рис. 4.41. Специальные переменные для модели поезда

4.3.2.15. Внешние библиотеки

Данная вкладка доступна только при условии, что модель содержит подключенные внешние библиотеки. Это могут быть как библиотеки, импортированные из Matlab/Simulink, так и библиотеки пользователя, созданные с помощью инструмента *UM Control / Block Editor* или разработанные на некотором языке программирования. Подробнее о разработке, подключении и использовании внешних библиотек см. [Главу 5](#), п. "Создание и использование внешних библиотек".

В дереве элементов в левой части окна доступны все входные и выходные величины всех внешних библиотек (рис. 4.42).

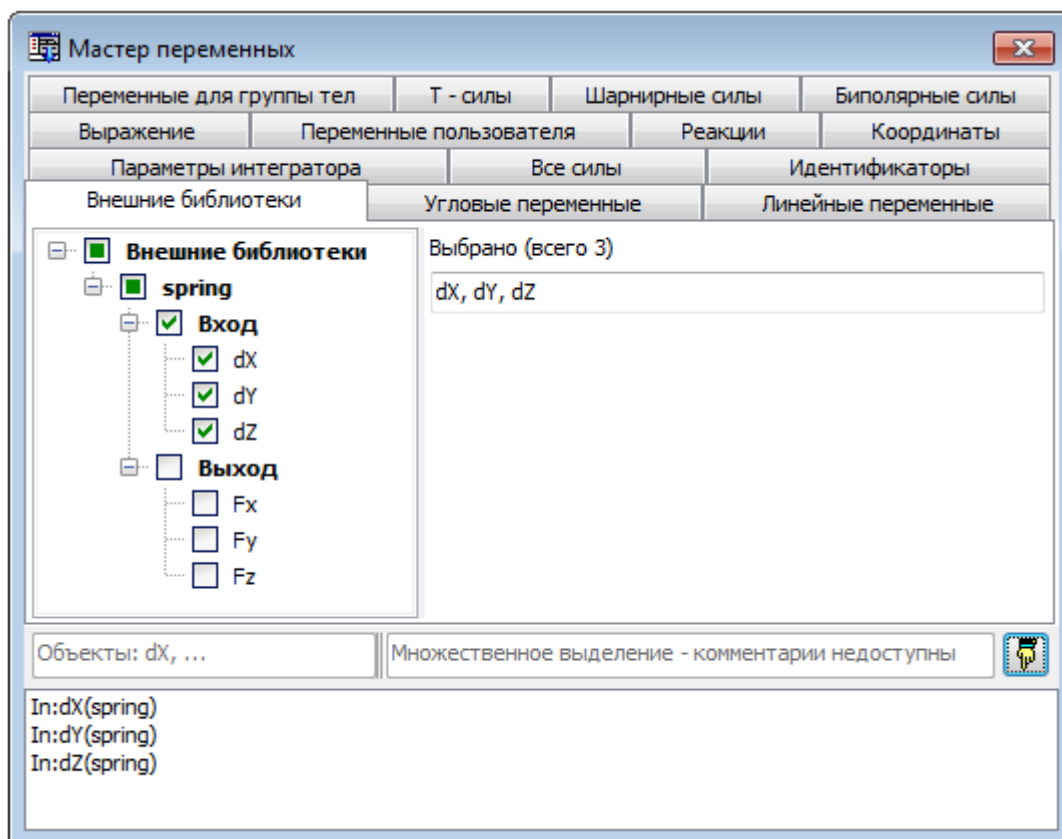


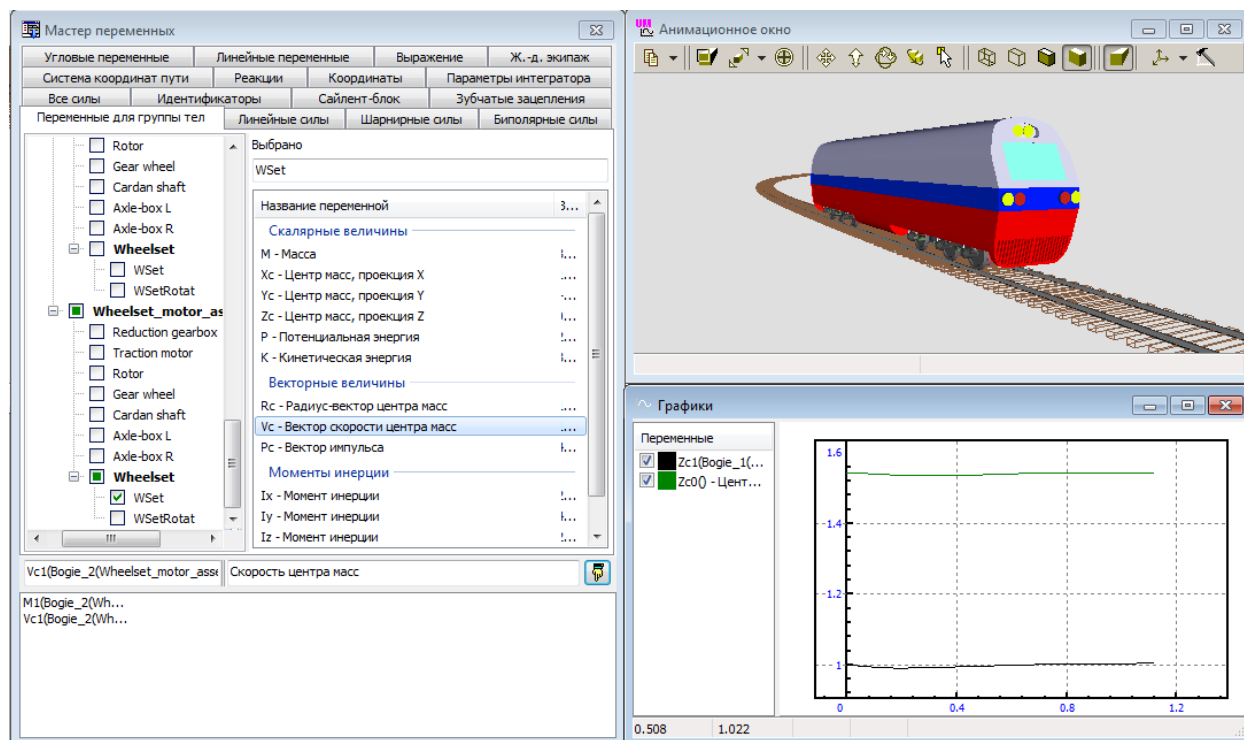
Рис. 4.42. Внешние библиотеки

4.3.2.16. Переменные для группы тел

В приложениях может быть необходимым определить характеристики для выбранной группы тел, например: массу, положение центра масс, кинетическую энергию группы тел и т.п. Например, масса и центр масс может понадобиться в железнодорожных приложениях для проверки точности развески локомотива или отдельных его частей (тележек); кинетическая и потенциальная энергии полезны для проверки точности интегрирования консервативной системы (сумма этих энергий должна быть постоянной во времени), и т.п.

Общий вид вкладки показан на рис. 4.43, слева. В левой части вкладки тела и подсистемы объекта отображаются в виде дерева, с возможностью выбора любого отдельного тела, либо отдельной подсистемы, либо всего объекта целиком. Выбор осуществляется нажатием левой кнопки мыши в прямоугольнике рядом с именем тела/подсистемы. При изменении списка выбранных тел список доступных величин для вычисления групповых характеристик отображается в нижней части окна, вместе с их текущими числовыми значениями.

Созданные переменные можно обычным способом перетаскивать в анимационные (векторы) или графические (скаляры) окна. Также эти переменные можно использовать в выражениях для выполнения операций с ними, например, для суммирования кинетической и потенциальной энергии.



а)

б)

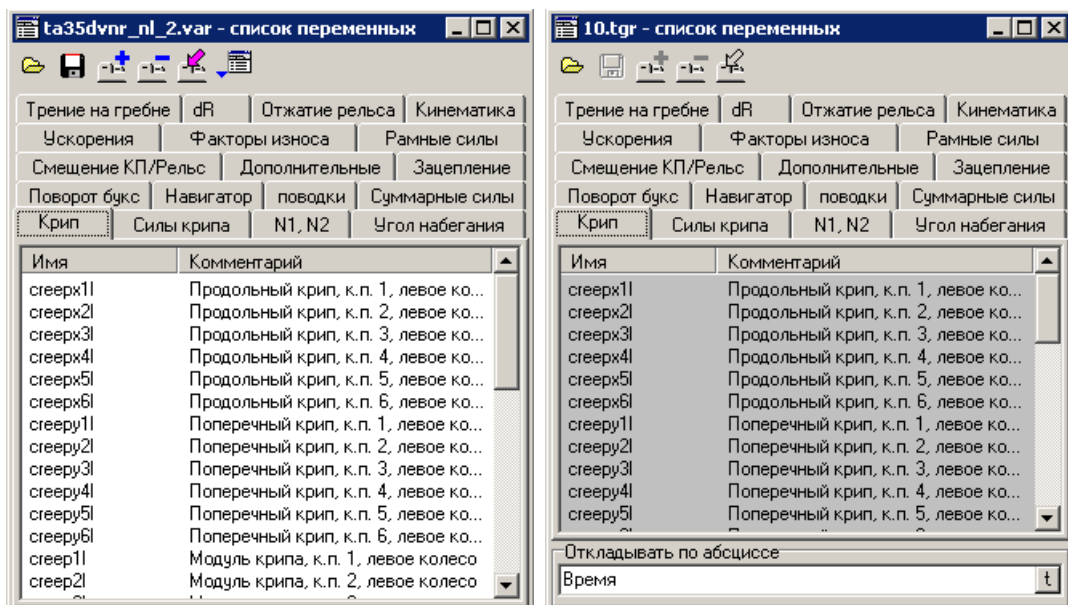
Рис. 4.43. Переменные для группы тел:
а) дерево тел; б) окна, использующие эти переменные

4.3.3. Список переменных

При моделировании сложных технических систем исследователя, как правило, интересует анализ вполне определенных кинематических и динамических характеристик (переменных): ускорения определенных (характерных) точек тел, силы реакций в некоторых шарнирах, коэффициенты динамики пружин и так далее. УМ позволяет заранее подготовить и сохранить для дальнейшего использования *списки* таких *переменных* для каждого моделируемого объекта с целью их использования при анализе результатов численного моделирования.

Как будет показано ниже, такой подход позволяет значительно сократить время анализа системы. Например, при исследовании динамики рельсовых экипажей список может включать сотни переменных, и даже их однократное создание требует значительных затрат времени. Рассматриваемая методика позволяет разбивать переменные по группам, использовать специальную терминологию, принятую в данной области техники, использовать списки, подготовленные для одного объекта, при формировании списков переменных родственного объекта (при некоторых ограничениях).

В процессе моделирования можно сохранять численные характеристики различных переменных в *файл рассчитанных переменных* (см. 4.4.1.10. "Назначение и использование списка автоматически рассчитываемых переменных", стр. 4-136). Доступ к таким файлам также осуществляется при помощи *списка переменных* (в дальнейшем – *списка рассчитанных переменных*).



а)


б)

Рис. 4.44. Список переменных:
а) – список переменных, б) – список рассчитанных переменных

4.3.3.1. Создание и модификация списков переменных

Элементами списка являются кинематические и динамические переменные анализируемой модели. Каждый элемент характеризуется именем и комментарием. Имя и комментарий могут включать произвольное число символов, в том числе и пробелы.

Для создания списка загрузите исследуемый объект в модуль моделирования (команда меню **Файл | Открыть...**), вызовите окно списка переменных (рис. 4.44) с помощью пункта меню **Инструменты | Список переменных...**

Окно, появившееся на экране, содержит одну пустую вкладку (**Без имени**). Кнопки в верхней части окна  имеют следующие функции:

- чтение заранее подготовленного списка переменных (файл *.var или *.tgr);
- сохранение списка в файл *.var;
- добавить новую вкладку к списку;
- удалить текущую вкладку;
- переименовать текущую вкладку;
- настройки статистической обработки групп переменных (единица измерения, параметры фильтра, функционал и т.д. (рис. 4.45). Настройки используются при обработке результатов сканирования ([Глава 6](#), п. "Обработка результатов сканирования").

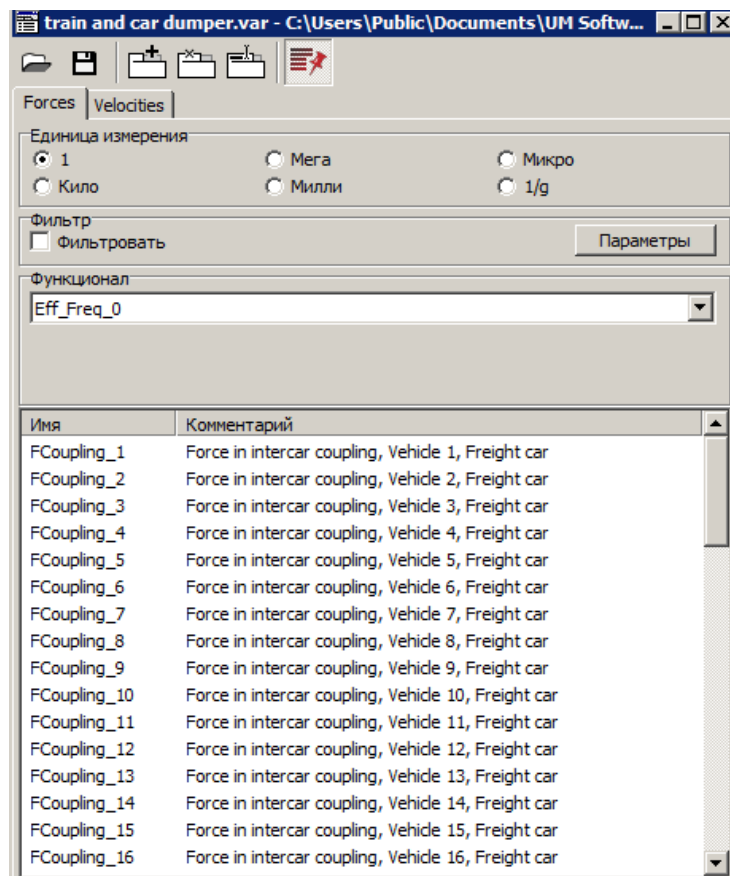


Рис. 4.45. Настройки статистической обработки групп переменных

В списке переменных можно выделить одну или несколько переменных стандартным образом. Выделенные элементы можно удалить (клавиша Delete) или скопировать мышкой в другие окна:

- анимационное окно,
- графическое окно,
- табличный процессор (только рассчитанные переменные),
- другой список переменных,
- окно анализа статистики (только рассчитанные переменные).

Пользователь так же может менять порядок переменных во вкладках. Для этого необходимо выделить нужные переменные и перетащить их с помощью мышки на новую позицию (рис. 4.46).

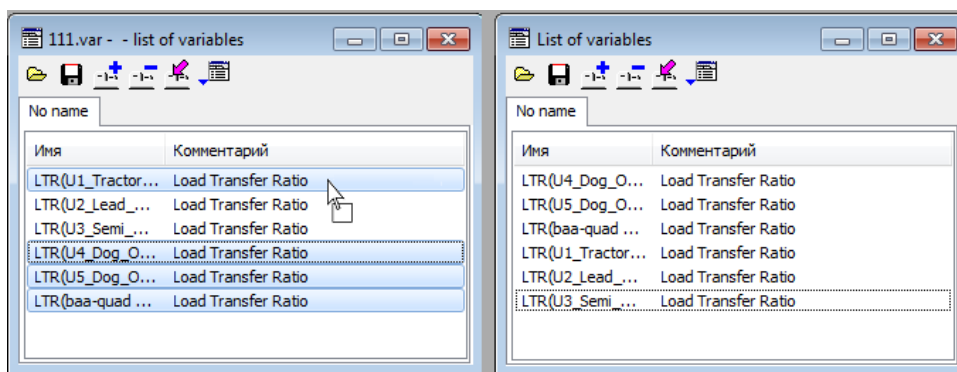


Рис. 4.46. Перемещение переменных на новую позицию

Кроме того, список переменных поддерживает перенос переменных из одной вкладки в другую. Для этого во время перемещения переменных нужно навести курсор на нужную вкладку, после чего отпустить переменные на открывшийся список переменных другой вкладки (рис. 4.47).

Данная функция работает как в пределах одного списка переменных, так и между различными списками переменных.

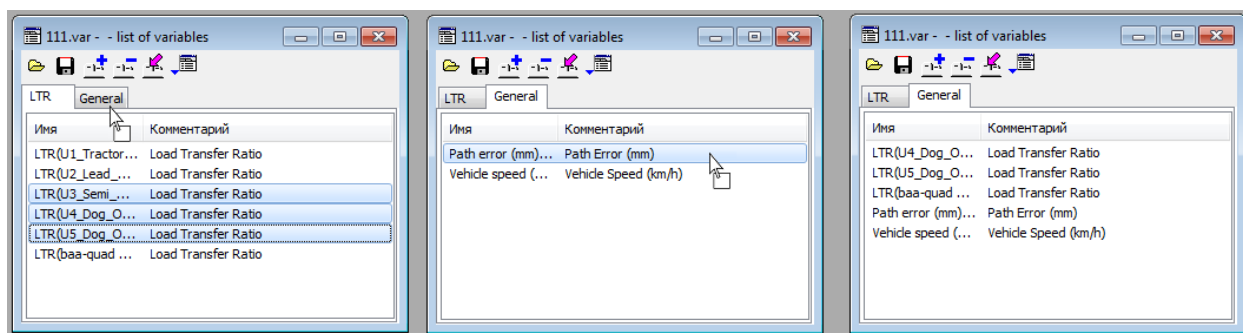



Рис. 4.47. Перемещение переменных из одной вкладки в другую

4.3.3.2. Наполнение списка переменных

Наполнение списка переменных производится двумя способами. Первый метод состоит в переносе в данный список переменных из других списков или графических окон. Другой метод – создание новых переменных с помощью мастера переменных (п. 4.3.2. "Мастер переменных", стр. 4-21). Добавляемые переменные могут быть разделены на группы (на отдельные вкладки списка).

Для добавления новой переменной с помощью мастера следует:

- открыть мастер переменных (п. 4.3.2. "Мастер переменных", стр. 4-21) с помощью команды основного меню **Инструменты | Мастер переменных...** или щелкнув на кнопке  на панели инструментов.
- создать переменную и перенести на соответствующую вкладку списка (рис. 4.48);
- сохранить список.

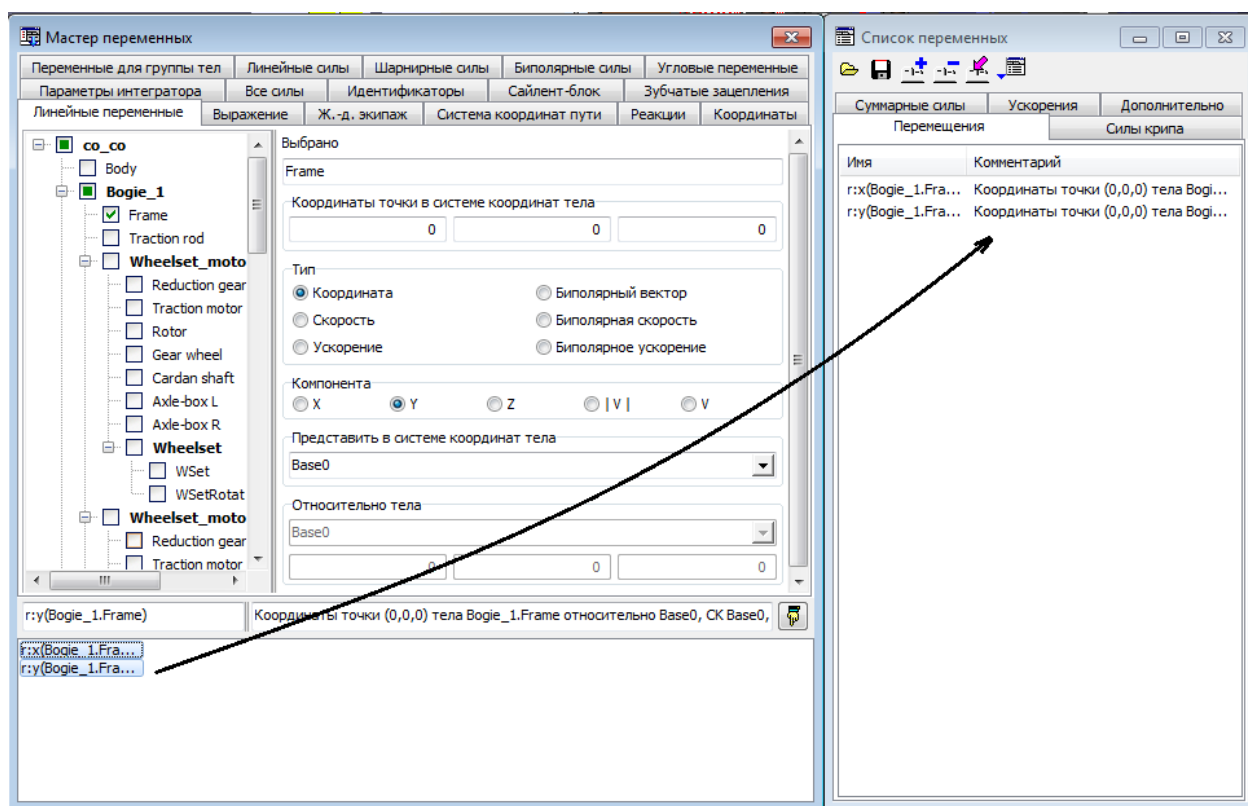


Рис. 4.48. Создание списка переменных

4.3.3.3. Обработка данных в списках рассчитанных переменных

Создание списка переменных при однократном расчете динамики см. п. 4.4.1.10. "Назначение и использование списка автоматически рассчитываемых переменных", стр. 4-136.

Любая переменная из списка рассчитанных переменных может быть обработана путем копирования в окна, являющиеся инструментами анализа данных:

- графическое окно (п. 4.3.4. "Окно для построения графиков", стр. 4-68),
- табличный процессор (п. 4.3.7. "Процессор переменных", стр. 4-90),
- окно статистического анализа (п. 4.3.8. "Статистика", стр. 4-95).

После получения переменной соответствующее окно обрабатывает результаты и визуализирует их.

Обработка данных может производиться в зависимости от времени (независимая переменная **по умолчанию**) или в зависимости от любой другой переменной, принадлежащей тому же **списку рассчитанных переменных**, что и анализируемая переменная. Чтобы назначить переменную в качестве абсциссы, следует просто перенести ее с помощью мыши в поле **Откладывать по абсциссе** в нижней части окна списка (рис. 4.44).

Используйте *фильтр интервала независимой переменной* для того, чтобы выполнить анализ части данных рассчитанной переменной (рис. 4.49). Для установки фильтра

- щелкните правой кнопкой мыши в пределах списка рассчитанных переменных,
- выберите команду контекстного меню Настройка фильтра,
- установите значения левой и правой границы изменения независимой переменной (откладываемой в качестве абсциссы).

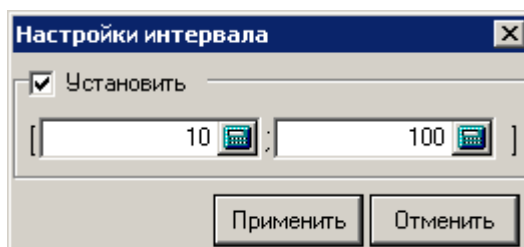


Рис. 4.49. Интервал изменения независимой переменной для обработки данных

4.3.3.4. Импорт файлов рассчитанных переменных в MATLAB

Любой файл рассчитанных переменных может быть загружен в среду MATLAB, с помощью утилиты **LoadUMDataFile.m**. Данная утилита загружает файл переменных в рабочее пространство среды MATLAB в виде двух массивов, см. рис. 4.50.

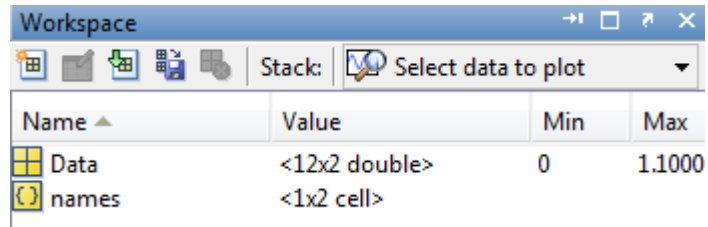


Рис. 4.50. Созданные массивы в рабочем пространстве среды MATLAB

Утилита **LoadUMDataFile.m** находится в каталоге {Данные УМ}\Utils. Для загрузки файла рассчитанных переменных необходимо в командной строке среды MATLAB набрать следующую команду:

```
[Data, names] = LoadUMDataFile('filename');
```

где *Data* – имя массива, куда будут загружены значения рассчитанных переменных;

names – имя массива, куда будут загружены имена рассчитанных переменных;

filename – имя файла рассчитанных переменных (без расширения).

На рис. 4.51 показаны результаты работы этой утилиты. Значения общей абсциссы находятся в первом столбце, в остальных столбцах – ординаты соответствующих переменных (графиков). Имена переменных загружены в массив *names*; первый столбец с абсциссой называется *x*.

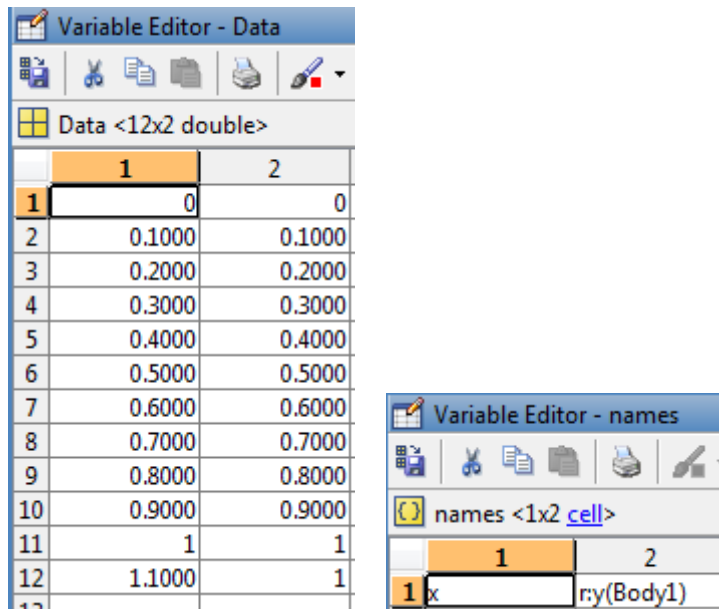


Рис. 4.51. Массив со значениями рассчитанных переменных и массив с их имена

4.3.3.5. Формат файлов рассчитанных переменных

Файлы рассчитанных переменных *.SGR имеют двоичный формат. В файле последовательно хранятся значения для времени и всех рассчитываемых переменных. Первый блок данных хранит значения времени, остальные блоки содержат значения рассчитанных переменных в этот момент времени. Значения сохраняются в формате вещественного числа с одинарной точностью (Single), 4 байта на точку. Количество точек в каждом блоке одинаково.

[Время, N точек, Nx4 байт][Переменная_1, N точек, Nx4 байт] [Переменная_2, N точек, Nx4 байт]...[Переменная_i, N точек, Nx4 байт]...[Переменная_M, N точек, Nx4 байт]

Чтобы корректно извлечь данные из файла в формате SGR нужно знать количество переменных M, которое в нем записано. Количество переменных можно определить открыв соответствующий файл VAR и подсчитав общее количество переменных на всех вкладках. Непосредственно по SGR файлу нельзя определить количество переменных, которое в нем содержится – в файле SGR нет соответствующих полей. Общее число числовых рядов, записанных в файле – M+1. К общему количеству переменных нужно добавить еще один ряд, в котором записано время. Далее справедливы следующие соотношения:

$$[\text{Количество байт в числовом ряду}] = [\text{Размер файла в байтах}]/[M+1]$$

$$[\text{Количество точек в числовом ряду}] = [\text{Количество байт в числовом ряду}]/[4]$$

Зная количество байт или точек в ряду можно смещаться к началу очередного ряда и выполнять последовательное чтение из файла. Имена переменных и комментарии к ним хранятся в соответствующем VAR файле.

4.3.4. Окно для построения графиков

Графическое окно (рис. 4.52) является одним из основных инструментов представления и анализа результатов моделирования. Одновременно пользователь может открыть (пункт меню **Инструменты | Графическое окно...**) любое число окон, в которых могут отображаться различные графики. Положение каждого окна и список назначенных ему переменных (кроме переменных, перенесенных из *файла рассчитанных переменных*, п. 4.3.3.3. "*Обработка данных в списках рассчитанных переменных*", стр. 4-65) сохраняется в конфигурационном файле (команда меню **Файл | Записать конфигурацию**).

Графическое окно состоит из следующих основных элементов:

- контейнера переменных,
- поля построения графиков с нанесенной на нем координатной сеткой,
- панель инструментов в верхней части окна.

Разметка осей координат производится автоматически, в левой части оси абсцисс и верхней части оси ординат указываются *масштабные множители*.

При перемещении курсора мыши по полю графиков производится автоматический расчет координат точки (в масштабах оси абсцисс и ординат), а соответствующие численные значения указываются в строке статуса (*координаты курсора*).

Положение контейнера относительно окна можно изменить. Для этого используйте пункт контекстного меню **Положение**.

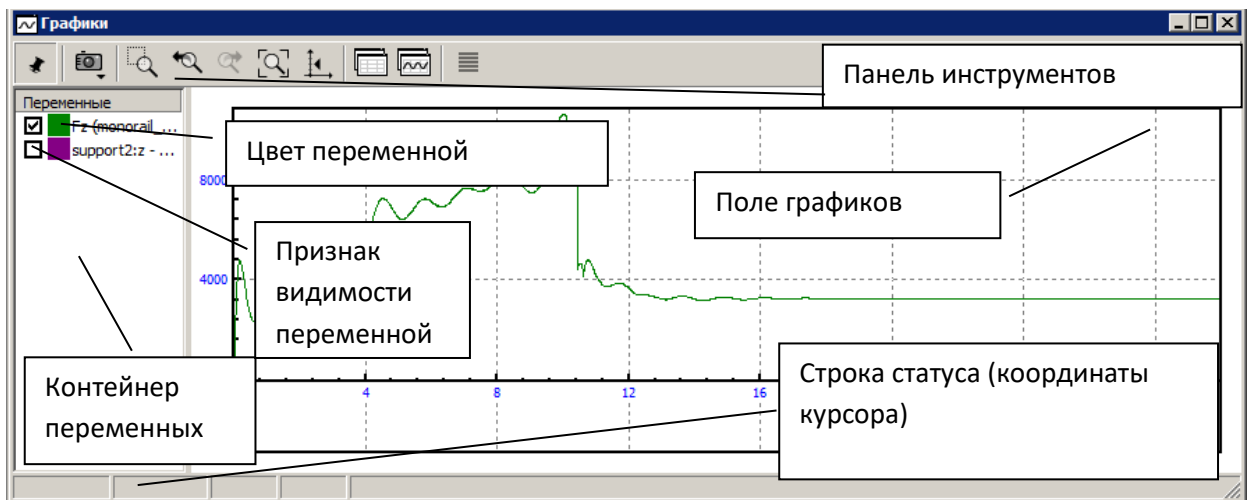


Рис. 4.52. Окно для построения графиков

Графики переменных, выделенных в контейнере, рисуются жирными линиями. Элементы панели инструментов графического окна (рис. 4.53).



Рис. 4.53. Панель инструментов графического окна

Удерживая *левую* кнопку мыши, вы можете перемещать поле графиков в окне.

Удерживая *правую* кнопку мыши, вы можете менять масштаб графиков по двум осям координат одновременно.

Удерживая клавишу **Shift**, вы можете распахнуть выделенную область графика на все окно при помощи левой кнопки мыши.

Панель инструментов может быть выпадающей или фиксированной. Этот признак по умолчанию можно установить в поле **Инструменты | Настройки | Общие | Выпадающая панель инструментов графического окна**.

Графики в окно можно перетаскивать из другого графического окна и из списка рассчитанных переменных. Из графического окна график можно перетащить в табличный процессор (п. 4.3.7. "Процессор переменных", стр. 4-90) и в окно статистической обработки (п. 4.3.8. "Статистика", стр. 4-95).

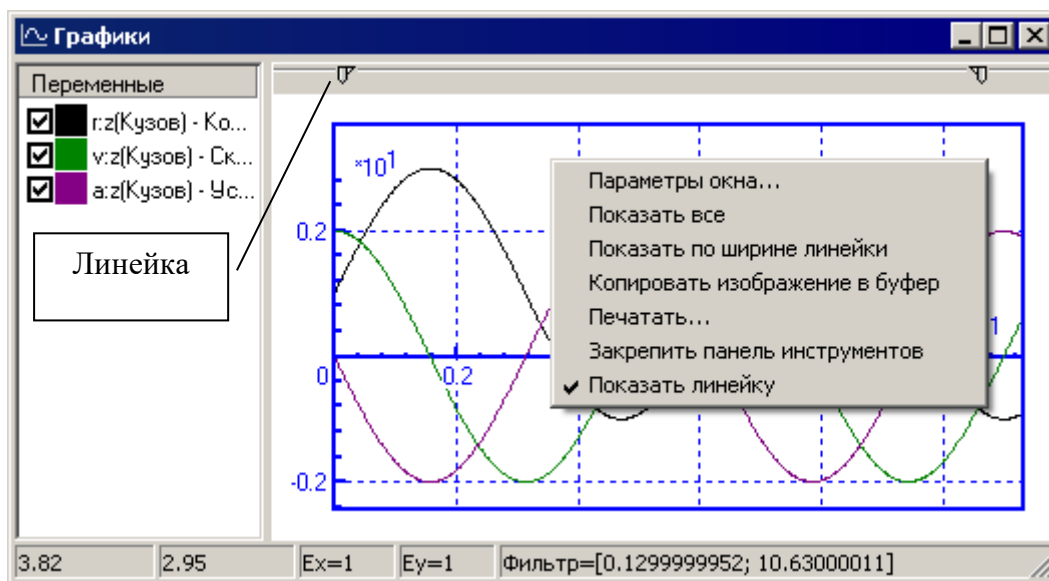


Рис. 4.54. Меню области построения графиков

На рис. 4.54 показаны пункты контекстного меню области построения графиков, которые во многом повторяют команды панели инструментов:

- **Параметры окна...** – вызов диалогового окна Параметры окна,
- **Показать все** – показать графики целиком (учитываются только видимые в данный момент графики),
- **Показать по ширине линейки** – показать графики по ширине линейки,
- **Копировать изображение в буфер** – копировать в буфер изображение графиков в области построения,
- **Печатать...** – печатать область построения (вызывает стандартное диалоговое окно печати на принтер),
- **Закрепить панель инструментов** – закрепить панель инструментов, находящуюся в верхней части графического окна.
- **Показать линейку** – показать/спрятать линейку.

Часто для анализа результатов необходимо задать границы отображения данных по абсциссе (вырезать часть графика). Например, удалить переходный процесс и оставить только данные, соответствующие установленному режиму. Для включения/выключения

подобного режима используйте вкладку **Границы** в окне настроек. Кроме того, ширину окна, устанавливающего границы, можно установить при помощи линейки. Показать/спрятать линейку можно через контекстное меню (пункт **Показать линейку**). Текущие данные об установках показываются в строке статуса графического окна.

4.3.4.1. Работа с графиками в графическом окне

В контейнере переменных графического окна расположен список всех графиков. Рассмотрим пункты контекстного меню контейнера переменных, рис. 4.55.

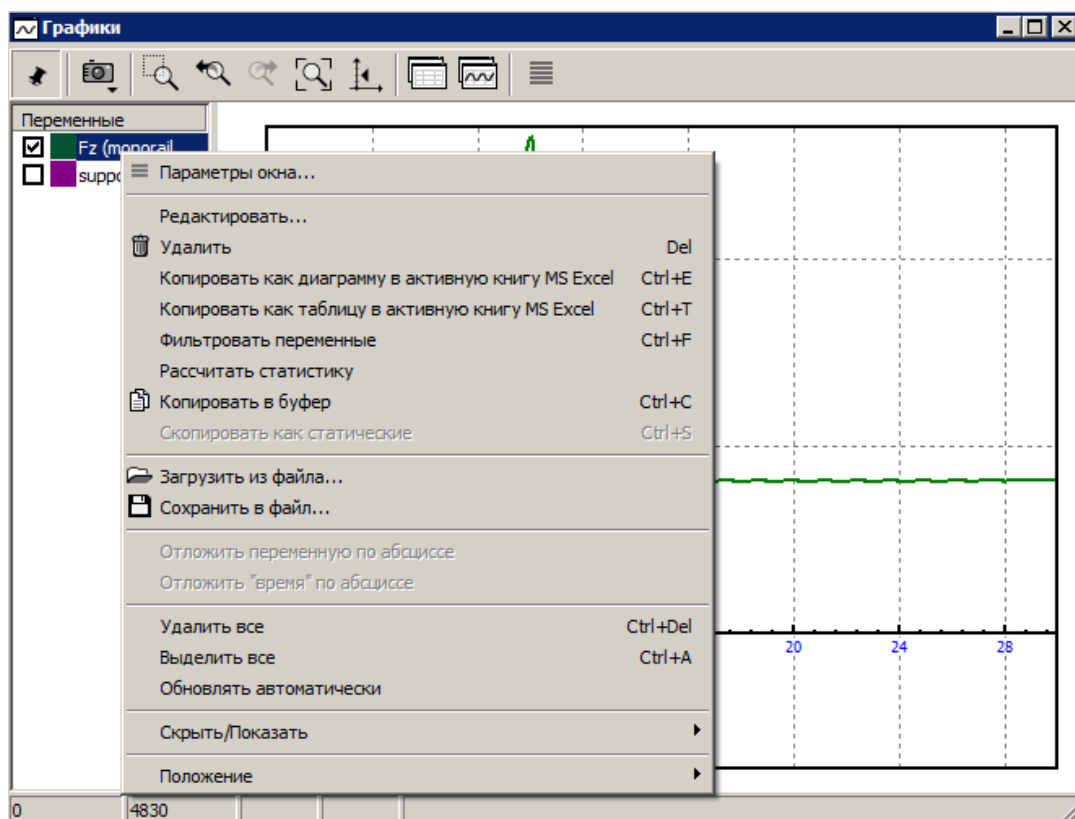



Рис. 4.55. Контекстное меню контейнера переменных

- **Параметры окна** – вызов диалогового окна Параметры окна.
- **Редактировать** – редактирование выбранных переменных (п. 4.3.4.5. *"Изменение параметров переменной"*, стр. 4-77),
- **Удалить** – удалить выбранные переменные из списка,
- **Копировать в буфер** – копировать значения переменных в буфер обмена (в текстовом формате), см. ниже,
- **Копировать в активную книгу MS Excel** – копировать выбранные графики в программу MS Excel (п. 4.3.4.6. *"Копирование графиков в MS Excel"*, стр. 4-77),
- **Фильтровать переменные** – частотная фильтрация выбранных переменных (п. 4.3.4.3. *"Частотная фильтрация переменных"*, стр. 4-74),
- **Скопировать как статические** – скопировать график как статический (различаются два вида переменных: динамические – рассчитываются каждый раз при запуске интегрирования, статические – получаются из динамических копированием, не изменяются при очередном запуске моделирования),
- **Сохранить в файл...** – сохранить выделенные переменные в одном из следующих форматов:
 - Текстовый файл (*.txt);
 - Файл неровностей (*.way);

- Файл рассчитанных переменных (*.tgr);
- Текстовый файл в формате CSV (Comma-separated values, *.csv) – данные представлены в виде чисел, разделенных запятыми;
- Текстовый файл в формате CSV (Semi-comma-separated values, *.csv) – данные представлены в виде чисел, разделенных точками с запятой;
- Drawing eXchange Format (*.dxf).
- **Загрузить из файла...** – загрузить переменные файлов в одном из следующих форматов:
 - Текстовый файл (*.txt);
 - RPC III файлы (*.rsp);
 - Файлы дорожных неровностей (*.irr), см. ([Глава 12](#), п. 12.3.2);
 - Файлы ж.-д. неровностей (*.way);
 - Файл групп ж.-д. неровностей (*.tig), см. ([Глава 8](#), п. 5.2.4.2.1).
- **Отложить переменную по абсциссе** – переменная станет абсциссой для всех остальных переменных в окне;
- **Отложить «время» по абсциссе** – если ранее была отложена одна из переменных по оси абсцисс, то отложить «время»;
- **Удалить все** – удалить все переменные в окне;
- **Выделить все** – выделить все переменные в окне;
- **Скрыть/показать** – скрыть/показать все или выделенные переменные в зависимости от выбранного подпункта меню;
- **Положение** – положение контейнера переменных (слева, справа, сверху, снизу).

4.3.4.2. Параметры графического окна

Вызов окна изменения параметров (рис. 4.56) графического окна осуществляется через пункт контекстного меню **Настройка** или через кнопку  на панели инструментов.

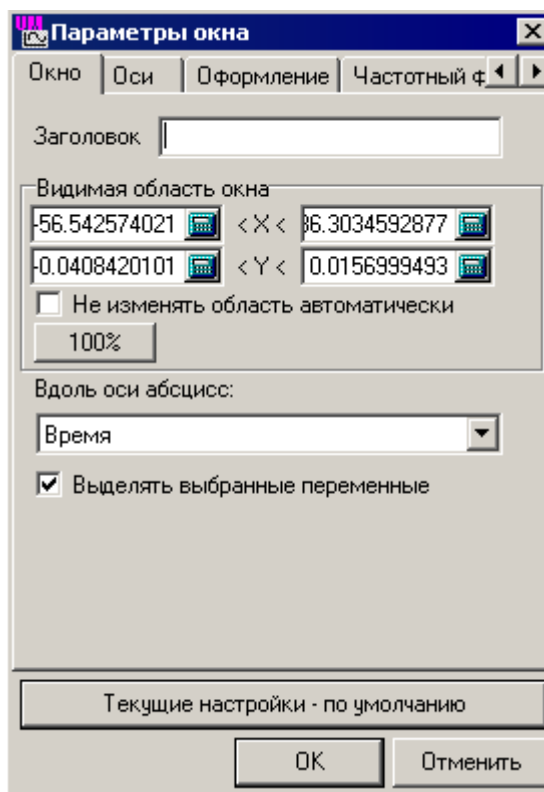


Рис. 4.56. Параметры графического окна

При помощи этого окна вы можете выполнить следующие действия:

- изменить заголовок графического окна;
- точно установить видимую область экрана;
- установить переменную, которая будет откладываться вдоль оси абсцисс (вдоль оси абсцисс могут быть отложены все переменные, кроме переменных пересылаемых из списка рассчитанных переменных, которые всегда откладываются в зависимости от своей независимой переменной, значения которой читаются из файла), время – по умолчанию;
- установить режим выделения выбранных переменных;
- установить режим видимости сетки;
- режим равного масштаба по осям;
- установить режим логарифмической шкалы по оси ординат и абсцисс;
- установить граничные значения отображения данных по абсциссе;
- настроить параметры частотного фильтра;
- настроить оформление окна (цвет, толщина и стиль осей, толщина графиков, размер и цвет подписей).

4.3.4.3. Частотная фильтрация переменных

Для того чтобы осуществить частотную фильтрацию необходимо выделить в контейнере переменных соответствующие переменные и в контекстном меню выбрать команду **Фильтровать переменные**. Выделенные переменные будут отфильтрованы в соответствии с текущими настройками (команда контекстного меню **Параметры окна** – вкладка **Частотный фильтр**, рис. 4.57) и добавлены в список переменных с именем: *_ + имя переменной*. Доступны следующие типы фильтров:

- прямоугольный фильтр
- фильтр нижних частот;
- фильтр верхних частот;
- заграждающий фильтр;
- полосовой фильтр;
- фильтр нижних частот Баттерворта.

Строки ввода **Нижняя частота** и **Верхняя частота** задают полосу частот фильтров. Фильтр нижних частот пропускает частотную информацию в полосе частот от 0 Гц до значения **Верхняя частота** (значение в строке **Нижняя частота** игнорируется). Фильтр верхних частот пропускает частоты в полосе от значения **Нижняя частота** до частоты Найквиста (значение в строке **Верхняя частота** игнорируется). Заграждающий фильтр вырезает соответствующую полосу частот. Полосовой фильтр пропускает частоты только в заданной полосе. Частоты можно задавать как **Абсолютным значением** (в Гц), так и **Долей от частоты Найквиста**.

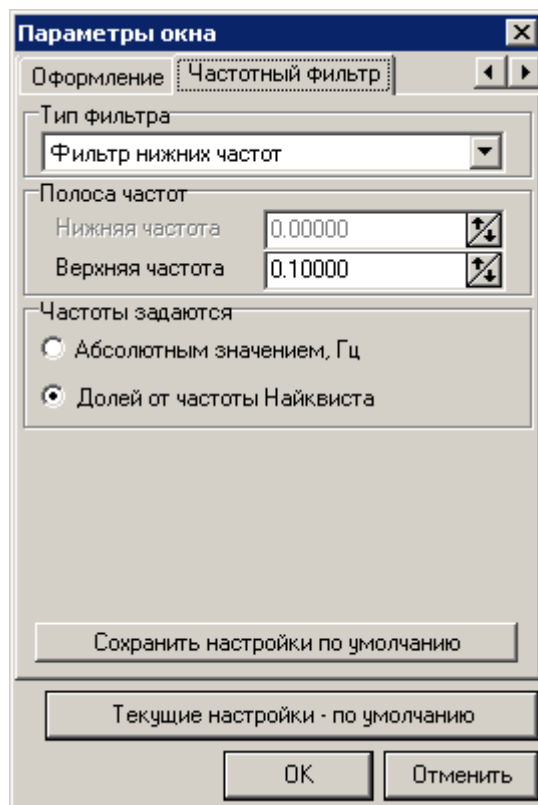


Рис. 4.57. Параметры частотного фильтра

4.3.4.4. Статистическая обработка переменных

Нередко возникает задача определить закон изменения статистического функционала по всей длине переменной (а не только его величину для переменной в целом, как это реализовано в инструменте Статистика (п. 4.3.8. "Статистика", с. 4-95)). Переменную необходимо разбить на N число одинаковых отрезков и рассчитать значение функционала для каждого отрезка по отдельности.

Для этого необходимо выделить в контейнере переменных соответствующие переменные и в контекстном меню выбрать команду Статистика (рис. 4.58)

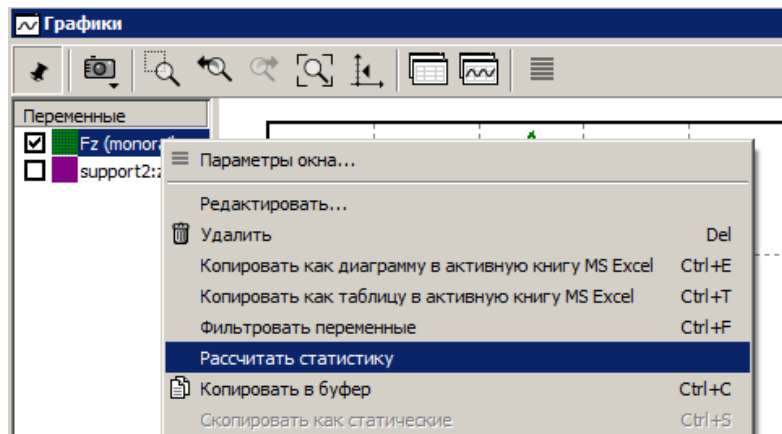


Рис. 4.58. Вызов команды Статистика

Выделенная переменная будет разбита на конечное число интервалов – в соответствии с текущими настройками (команда контекстного меню Параметр окна – вкладка Статистика, рис. 4.59). Для каждого из отрезков будет вычислено значение функционала и результаты в виде зависимости значения функционала от времени будут занесены в новую переменную с именем: функционал + (параметры разбивки) + имя переменной.

Параметры разбивки:

- Расстояние между центрами интервалами a (в метрах)
- Ширина интервала b (в метрах)

Рассчитываемый функционал:

- Среднее значение
- СКО
- Минимальное значение
- Максимальное значение
- $F(0)$

Значение функционала рассчитывается в центре интервала.

На рис. 4.60 показан пример расчета среднего значения по всей длине переменной с параметрами $a = 0,13$ м, $b = 0,2$ м.

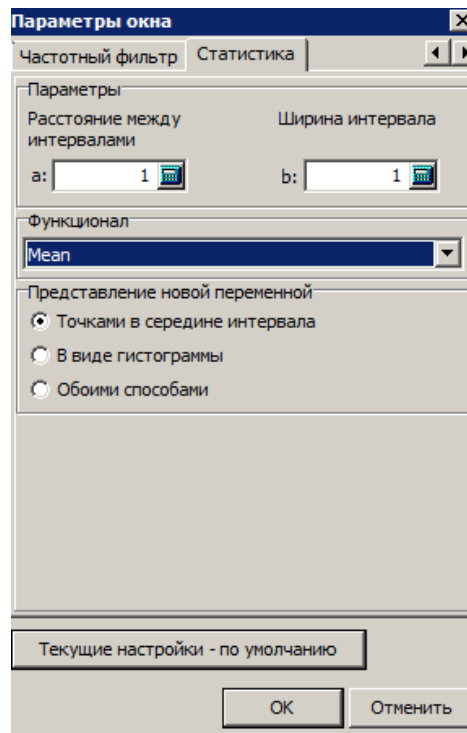


Рис. 4.59. Параметры вкладки Статистика

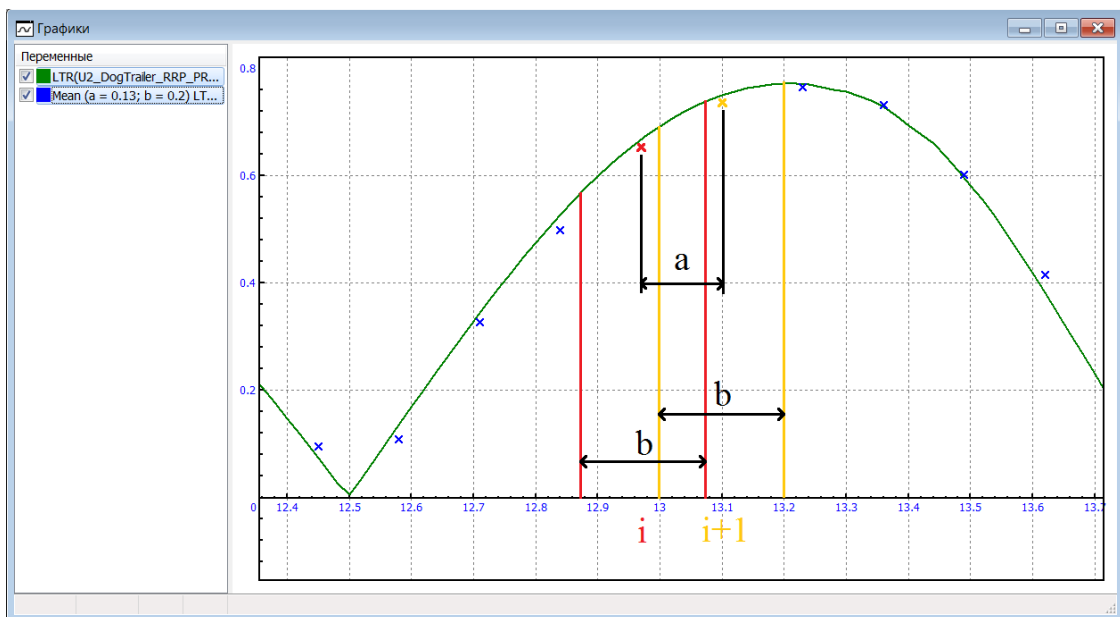


Рис. 4.60. Пример статистической обработки переменной (функционал – среднее значение, $a = 0,13$ м, $b = 0,2$ м)

4.3.4.5. Изменение параметров переменной

Вызов диалога изменения параметров *переменной* (рис. 4.61) осуществляется двойным щелчком на соответствующей переменной в *контейнере переменных* или выбором команды **Редактировать** из контекстного меню – в этом случае настраиваются параметры для выделенных переменных.

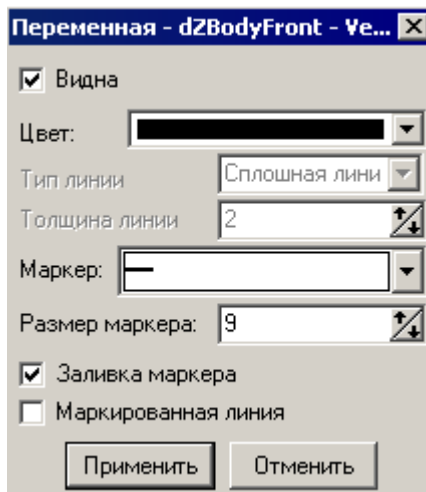


Рис. 4.61. Параметры переменной в графическом окне


При помощи этого диалога вы можете:

- установить режим видимости графика переменной в окне;
- установить цвет графика переменной;
- установить тип и толщину линии;
- выбрать форму и размер маркера, установить признак заливки маркера и признак маркированной линии. По умолчанию любой график рисуется сплошной линией.

4.3.4.6. Копирование графиков в MS Excel

Графики из графического окна можно экспортировать в программу MS Excel. Для этого необходимо выделить нужные переменные в контейнере и в контекстном меню выбрать пункт **Копировать в активную книгу MS Excel**. Выделенные графики будут скопированы в активную книгу MS Excel в соответствии с настройками на вкладке **Экспорт графиков в MS Excel** окна **Настройки интегратора** (п. 4.1.4. "Экспорт графиков в MS Excel", стр. 4-11).

4.3.5. Окно гистограмм

Окно гистограмм (рис. 4.62) представляет собой инструмент для визуализации результатов моделирования. Для открытия окна гистограмм выберите пункт меню **Инструменты | Гистограмма...** из главного меню программы или нажмите кнопку  на панели инструментов. Количество гистограмм в окне также как и количество самих окон не ограничено. Положение окна на рабочем столе и список добавленных в него переменных (за исключением переменных перенесенных из *списка рассчитанных переменных*) хранятся в конфигурационном файле (пункт меню **Файл | Записать конфигурацию**).

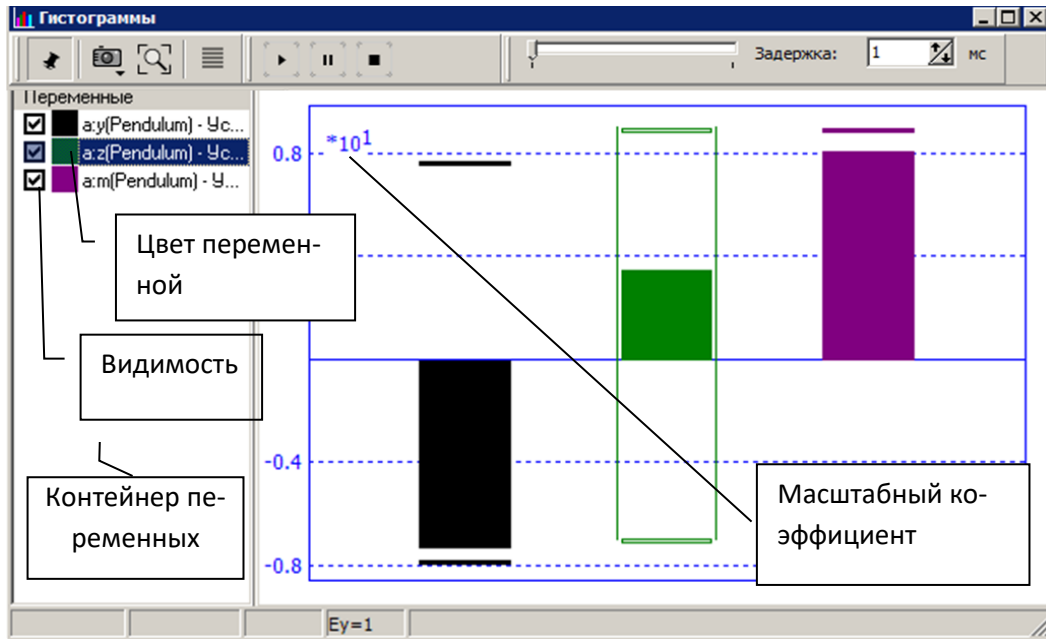
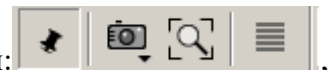






Рис. 4.62. Окно гистограмм

Структура окна гистограмм аналогична графическому окну. Оно состоит из следующих элементов:

- контейнер переменных,
- панель инструментов,
- поле построения гистограмм.

Добавить переменную в контейнер пользователь может из **Мастера переменных** (п. 4.3.2. *Мастер переменных*, стр. 4-21) или из **Списка переменных** (п. 4.3.3. *"Список переменных"*, стр. 4-61).



На панели инструментов окна расположены следующие кнопки: , , , , позволяющие зафиксировать панель; копировать поле построения гистограмм в буфер, записать в файл, записать анимацию; показать все; открыть диалоговое окно настроек **Параметры окна**.

Рассчитанные переменные можно анимировать с помощью кнопок на панели инструментов (рис. 4.63):

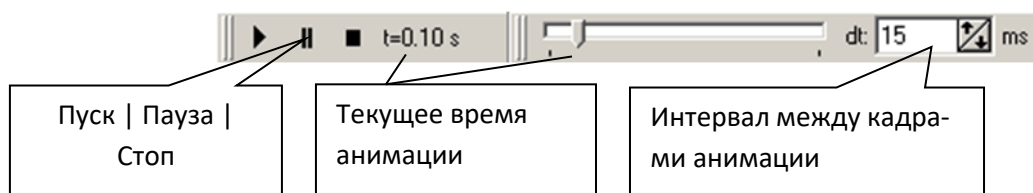


Рис. 4.63. Панель инструментов анимации переменных

Замечание. Для анимации уже рассчитанной переменной ее надо положить в контейнер до старта моделирования.

Непосредственно гистограмма строится в области построения, где каждый отдельный столбец гистограммы (рис. 4.64) соответствует переменной из контейнера переменных. Высота столбца соответствует текущей величине переменной. Для каждой переменной отображается следующая информация:

- Текущее значение – высота столбца,
- Текущий максимум – верхняя линия,
- Текущий минимум – нижняя линия.

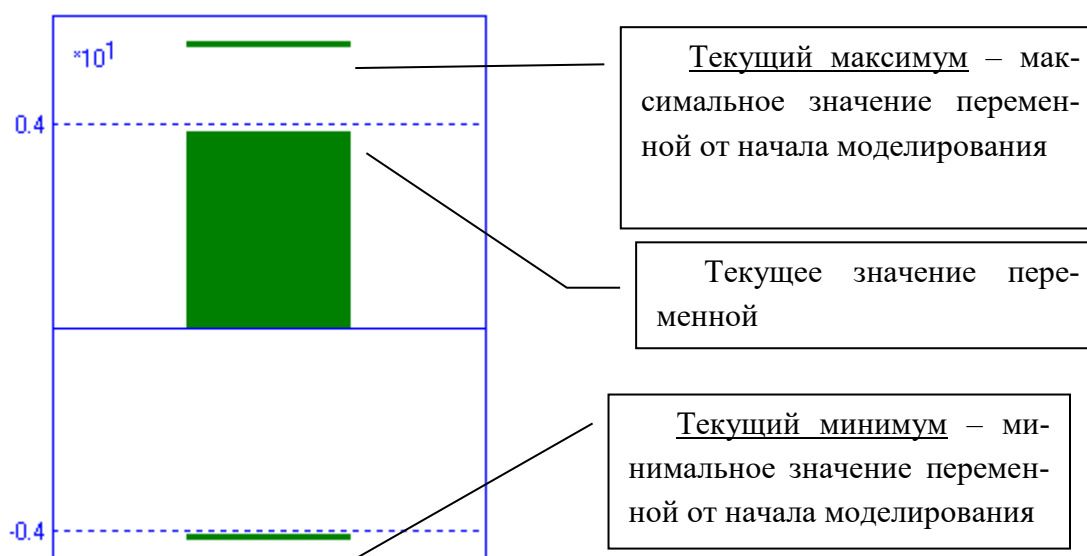


Рис. 4.64. Представление переменной в окне гистограмм

Работа с переменными окна гистограмм аналогична работе с переменными в графическом окне (п. 4.3.4. "Окно для построения графиков", стр. 4-68).

Контекстное меню контейнера переменных выглядит следующим образом:

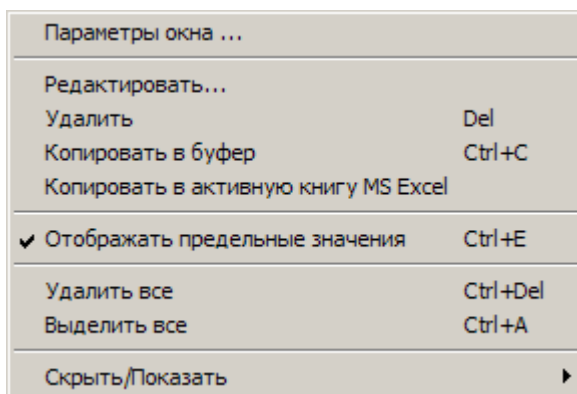


Рис. 4.65. Контекстное меню контейнера переменных

Пункт **Отображать предельные значения** указывает надо ли отображать линии максимума и минимума переменной. Остальные пункты меню описаны в п. 4.3.4.1. *"Работа с графиками в графическом окне"*, стр. 4-71.

4.3.6. Анимационное окно программы моделирования

4.3.6.1. Основные операции и инструментальная панель

Базовые операции

Общий вид анимационного окна в программе **UM Simulation** показан ниже на рис. 4.66. По умолчанию основные операции в окне выполняются следующим образом:

- перемещение – с помощью нажатия левой кнопки мыши;
- поворот – с помощью нажатия средней кнопки мыши (колёсика);
- приближение/удаление – с помощью прокручивания колёсика мыши.

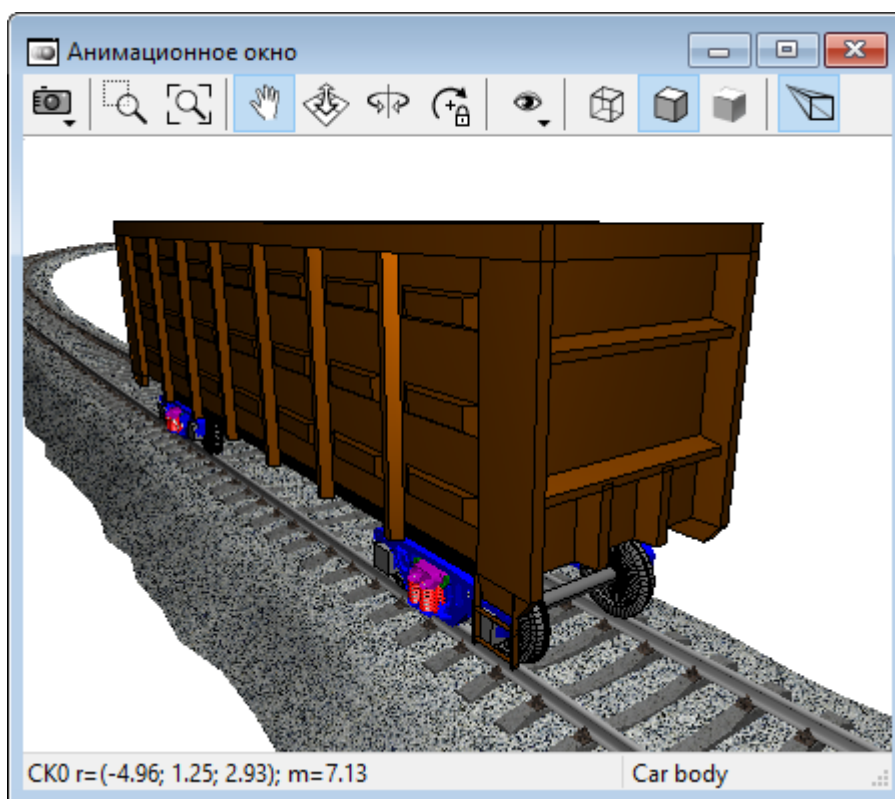


Рис. 4.66. Анимационное окно в программе UM Simulation

Реакция на нажатие левой кнопки мыши зависит от текущей установки на панели инструментов окна: перемещение, поворот, приближение/удаление, см. рис. 4.67.



Рис. 4.67. Кнопки выбора режима работы левой кнопки мыши

Центр поворота

Базовые операции с мышью в анимационном окне (перемещение, поворот, приближение/удаление) используют понятие *точки интереса/центра поворота*. Точка интере-

са/центр поворота – это точка под мышкой в начале операции перемещения, поворота или приближения/удаления. Для более чёткой обратной связи эта точка визуализируется при каждой операции и выглядит как небольшая сфера. Последний выбранный центр поворота можно закрепить соответствующей кнопкой на панели инструментов, см. рис. 4.68.



Рис. 4.68. Кнопка фиксации последнего выбранного центра поворота

Координаты и скорости точек тел под мышкой

При перемещении мыши в анимационном окне в строке статуса появляется информация о кинематических характеристиках точки тела под мышкой. Сведения о клавишах-модификаторах смотрите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Клавиши-модификаторы в анимационном окне

Клавиша	Отображаемая информация
нет	Координаты точки тела в глобальной системе координат (СК)
Shift	Координаты точки тела в локальной СК тела
Ctrl	Вектор скорости точки тела в глобальной СК
Ctrl+Shift	Вектор скорости точки тела в локальной СК тела

Панель инструментов

Рассмотрим кнопки на панели инструментов анимационного окна, см. рис. 4.69.

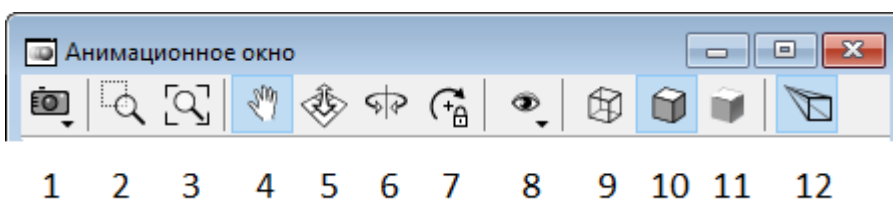


Рис. 4.69. Кнопки панели инструментов

1 – при нажатии на эту кнопку открывается подменю, с помощью которого можно скопировать изображение окна в буфер, сохранить в файл или записать анимацию движения модели в окне.

2 – приближение рамкой, альтернативно для приближения рамкой нажмите и удерживайте клавишу *Shift* и с помощью левой кнопки мыши выделите нужный прямоугольник в окне.

3 – вписать в окно весь объект целиком (показать всё).

4, 5, 6 – кнопки установки реакции на нажатие левой кнопки мыши: перемещение (4), поворот (5) или приближение/удаление (6).

7 – кнопка закрепления центра поворота.

8 – переключение между стандартными видами.

9, 10, 11 – переключение между режимами изображения модели в окне (проволочный/каркас, полутонный с каркасом, полутонный).

12 – переключатель ортогональной/перспективной проекции.

4.3.6.2. Режимы изображения объектов в окне

Каждому визуальному объекту модели (телу, графическому образу силы и т.д.) может быть назначен один из следующих режимов отображения: *невидимый*, *проволочный*, *полупрозрачный*, *"как у окна"*.

Режим отображения тела можно задать, наведя на него курсор и вызвав контекстное меню. Далее нужно выбрать пункт **Режимы изображения** и установить нужный режим в подменю, см. рис. 4.70. Установить режимы изображения для нескольких объектов можно с помощью диалога, который появляется при выборе пункта **Настройка отображения объектов** в том же меню, см. рис. 4.71.

Если у тела выбран режим изображения **Как у окна**, то при переключении режимов отображения окна на панели инструментов (см. кнопки 9-11 на рис. 4.69), телу будет назначен такой же режим изображения. В остальных случаях установленные режимы изображения для отдельных объектов имеют приоритет над режимом изображения, установленным в окне.

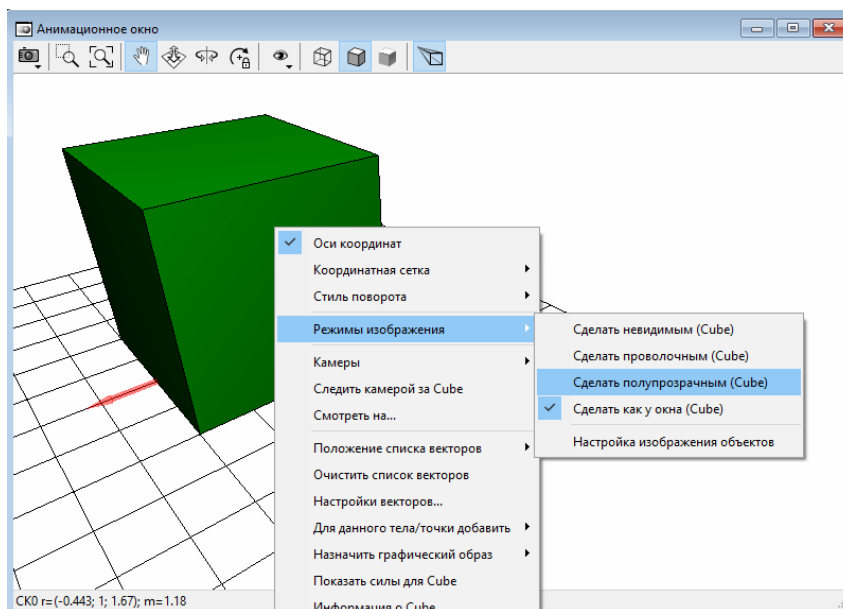


Рис. 4.70. Выбор режима изображения тела из контекстного меню

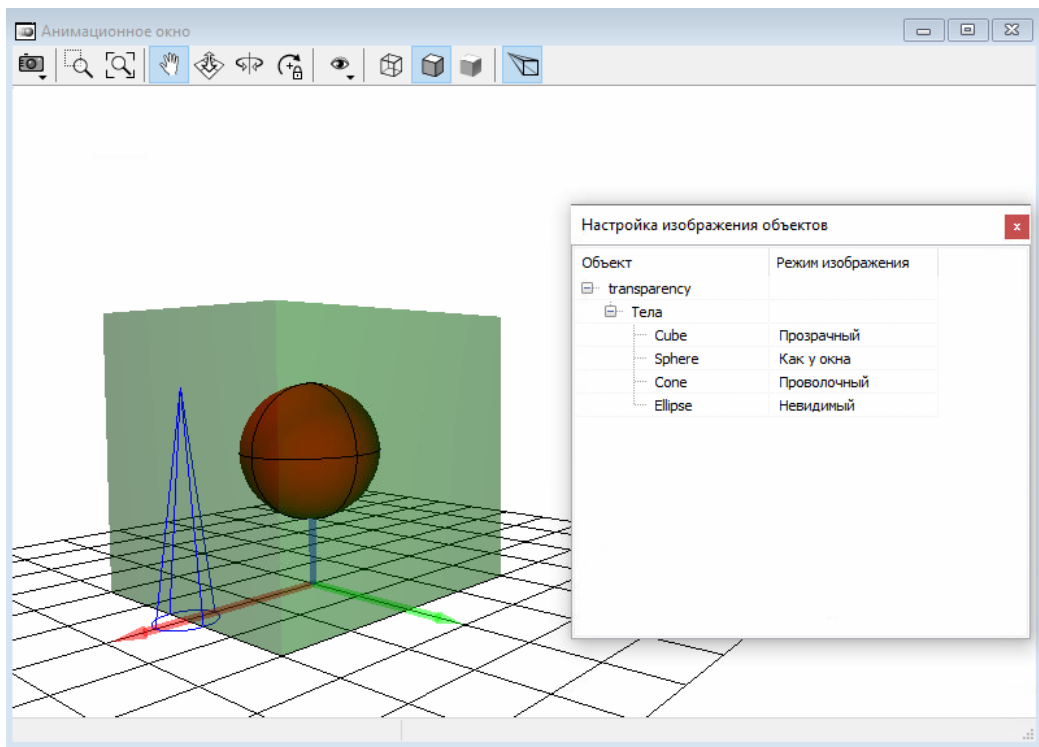


Рис. 4.71. Диалоговое окно настройки отображения объектов

4.3.6.3. Контекстное меню

На рис. 4.72 приведено контекстное меню анимационного окна. Рассмотрим это меню подробнее.

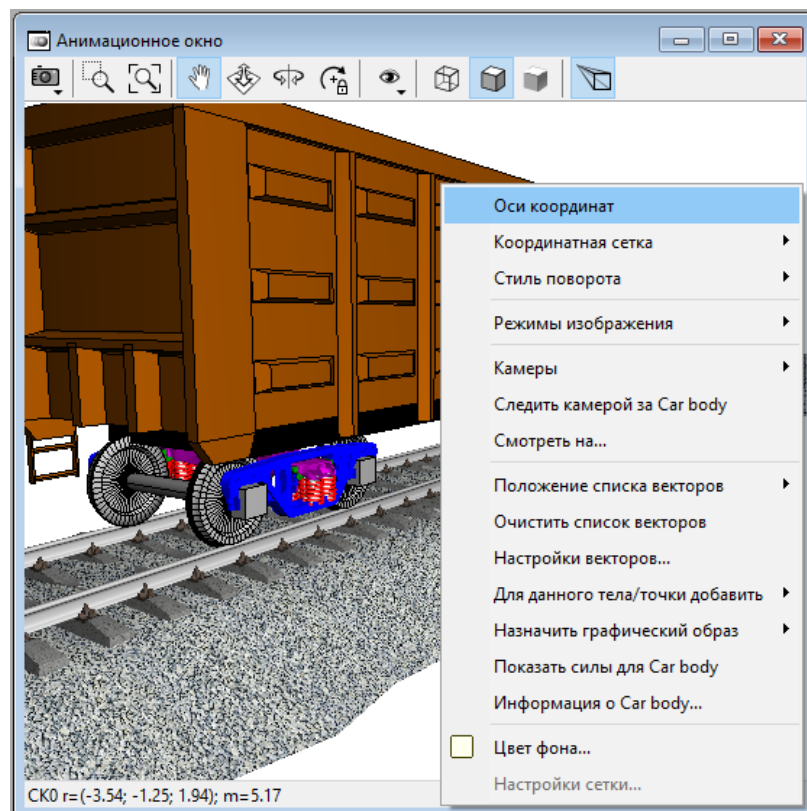


Рис. 4.72. Контекстное меню анимационного окна

Оси координат – переключатель, который включает/выключает рисование осей глобальной системы координат.

Для идентификации осей координат используется цветовой принцип (RGB-XYZ):

- ось X – красная (Red);
- ось Y – зеленая (Green);
- ось Z – синяя (Blue).

Координатная сетка. С одной из координатных плоскостей связывается координатная сетка, положение, шаг и размер которой могут быть изменены с помощью пункта **Настройки сетки** контекстного меню.

Стиль поворота: X-стиль, Y-стиль, Z-стиль. Стиль поворота задаёт ось, которая остаётся вертикальной при повороте модели в окне. По умолчанию установлен Z-стиль, который подходит для большинства моделей.

Режимы изображения рассмотрены выше в п. 4.3.6.2 "*Режимы изображения объектов в окне*", стр. 4-83.

Камеры – создание, настройка и переключение между камерами. Подробнее см. п. 4.3.6.6 "*Работа с подсистемой "Камеры"*", стр. 4-88.

Следить камерой за <имя тела> – при выборе этого пункта меню, создаётся камера, прикреплённая к выбранному телу, которая перемещается за ним при моделировании. Пункт меню доступен только если в данный момент курсор мыши находится над каким-нибудь телом.

Смотреть на – вызывает диалоговое окно с деревом всех объектов в модели. При выборе объекта в этом диалоговом окне к нему приближается камера.

Положение списка векторов задаёт расположение списка векторов и траекторий в окне (слева, справа, сверху, снизу, спрятать). Работа с векторами и траекториями подробно рассмотрена ниже в п. 4.3.6.4 "*Визуализация векторов/траекторий*", стр. 4-86.

Настройки векторов – вызывает диалоговое окно настройки масштаба и размера (толщины) векторов. Подробнее см. п. 4.3.6.4 "*Визуализация векторов/траекторий*", стр. 4-86.

Для данного тела/точки добавить – возможность добавления траектории, вектора скорости и вектора ускорения для текущей точки тела, на которую указывает курсор мыши, а также вектора угловой скорости, углового ускорения для тела.

Назначить графический образ – для любого тела можно изменить назначенный в программе UM Input графический образ (ГО) на любой другой ГО, существующий в модели. Это может быть полезно, например, для замены кузова грузового вагона с цистерны на хоппер, или для смены кабин в модели грузовика. Обратите внимание, что заменить графический образ тела можно только на графический образ, который есть в модели.

Показать силы для <имя тела> – в список векторов для данного окна добавляется переменная типа *Все силы*, включающая активные силы, силы реакции и силы инерции, действующие на выбранное тело. Такую же переменную можно создать штатными средствами в **Мастере переменных**.

Информация о <имя тела> – появляется окно с инерционными параметрами и текущей кинематикой тела

4.3.6.4. Визуализация векторов/траекторий

В программе **UM Simulation** в анимационных окнах можно отображать векторы сил, скоростей, ускорений и траектории точек тел.

По умолчанию список отображаемых в окне векторов/траекторий не виден. Для того чтобы показать его в окне и установить ему нужное положение, используйте пункт контекстного меню **Положение списка векторов**. Пример окна с траекторией и векторами приведен на рис. 4.73.

Для добавления векторов и траекторий в анимационное окно используйте **Мастер переменных**, см. п. 4.3.2. "*Мастер переменных*", стр. 4-21).

Двойной щелчок на соответствующем векторе в списке позволит вам изменить цвет вектора и траектории и установить нужную длину траектории.

Замечание Радиус-вектор точки всегда рисуется траекторией.

Одинаковые по размерности векторы рисуются с одинаковым масштабом. Для изменения *масштаба* и *размера* векторов используйте пункт контекстного меню **Настройки векторов**, см. рис. 4.73.

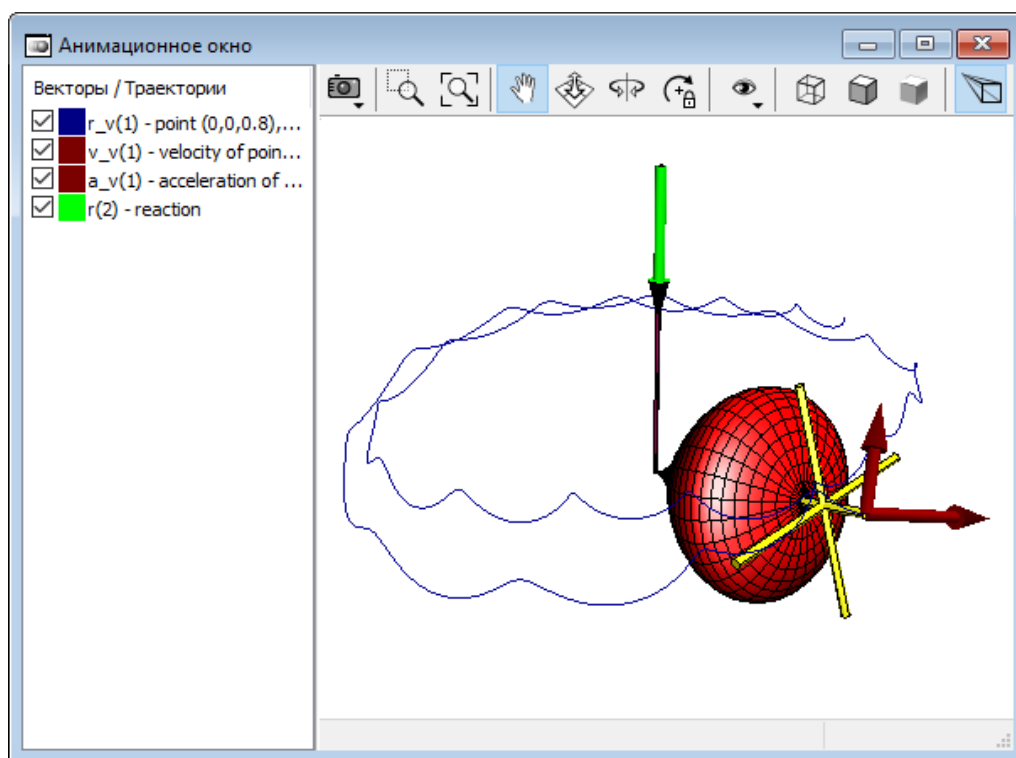


Рис. 4.73. Векторы и траектории в анимационном окне

Для изменения масштаба доступны следующие типы векторов:

- скорость (м/с);
- ускорение (м/с²);
- поворот (радиан);
- угловая скорость (рад/с);
- угловое ускорение (рад/с²);

- сила (Н);
- МОМЕНТ (Н·м).

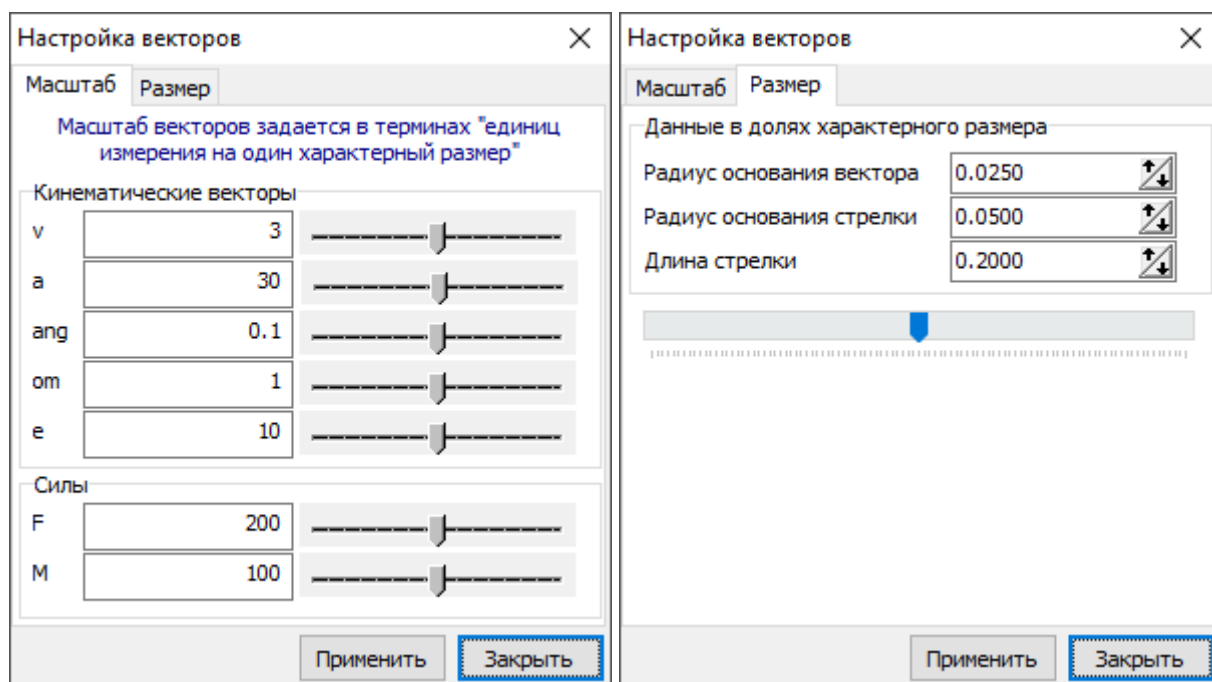


Рис. 4.74. Окно настройки векторов

4.3.6.5. Создание анимационных файлов

В процессе моделирования движения механической системы можно сохранять анимацию в виде AVI файла. Для этого нажмите кнопку 1 на рис. 4.69 и далее в выпадающем меню выберите пункт **Записать анимацию**, см. рис. 4.75.

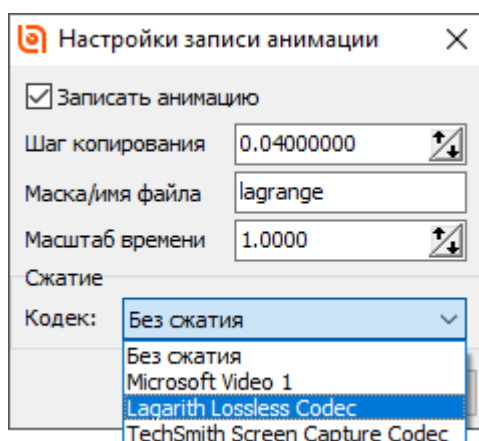


Рис. 4.75. Настройка параметров сохранения анимации

Для сохранения анимации из данного анимационного окна поставьте флажок в поле **Записать анимацию**.

Поле **Шаг копирования** задает промежуток времени модели (в секундах), через который будут добавляться новые кадры в файл с анимацией.

Поле **Маска/имя файла** задает имя AVI файлов.

Поле **Масштаб времени** предназначено для замедления или ускорения проигрывания AVI файлов. Это бывает необходимо при анимации процессов происходящих в модельном времени очень быстро или, наоборот, медленно. Для замедления анимации в AVI файле установите масштаб времени больше единицы, для ускорения – меньше единицы.

Поле **Кодек** задает кодек для сжатия кадров анимации.

Замечание. Обратите внимание на то, что файл будет создан только после выхода из режима паузы процесса интегрирования, см. п. 4.4.2.2. *"Текущие параметры процесса интегрирования"*, стр. 4-143.

4.3.6.6. Работа с подсистемой "Камеры"

Подсистема "Камеры" предназначена для работы с расположением камер в окне. Подсистема позволяет создавать, редактировать и удалять камеры. Список созданных камер сохраняется в файле текущей конфигурации.

Создать камеру можно вызвав команду контекстного меню окна **Камеры** -> **Добавить камеру в текущем положении**, см. рис. 4.76). Будет создана и добавлена в список камера с текущим положением и ориентацией.

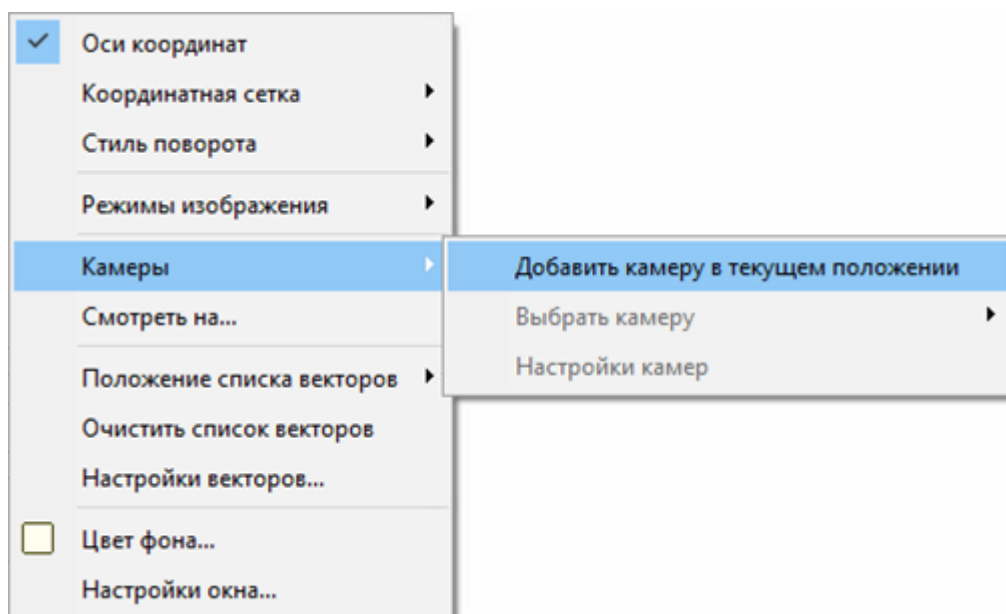


Рис. 4.76. Пункт контекстного меню создания камеры из значений активного вида

Из контекстного меню окна можно открыть диалоговое окно настройки камер, рис. 4.77. Диалоговое окно будет доступно, если создана хотя бы одна камера.

Рассмотрим некоторые настройки камеры.

- **Привязать камеру к объекту** – в этом поле можно выбрать любое из тел модели. Положение камеры будет зафиксировано в системе координат этого тела. Таким образом на виде с этой камеры тело, к которому она привязана, будет неподвижно.
- **Положение и ориентация** – нажимая на стрелки, расположенные на изображении в центре окна, можно менять положение и ориентацию камеры во всех плоскостях.

- **Направить на** – устанавливает направление взгляда из текущего положения. Необходимо ввести необходимые значения в соответствующие поля и применить их. Значения задаются в глобальной системе координат.

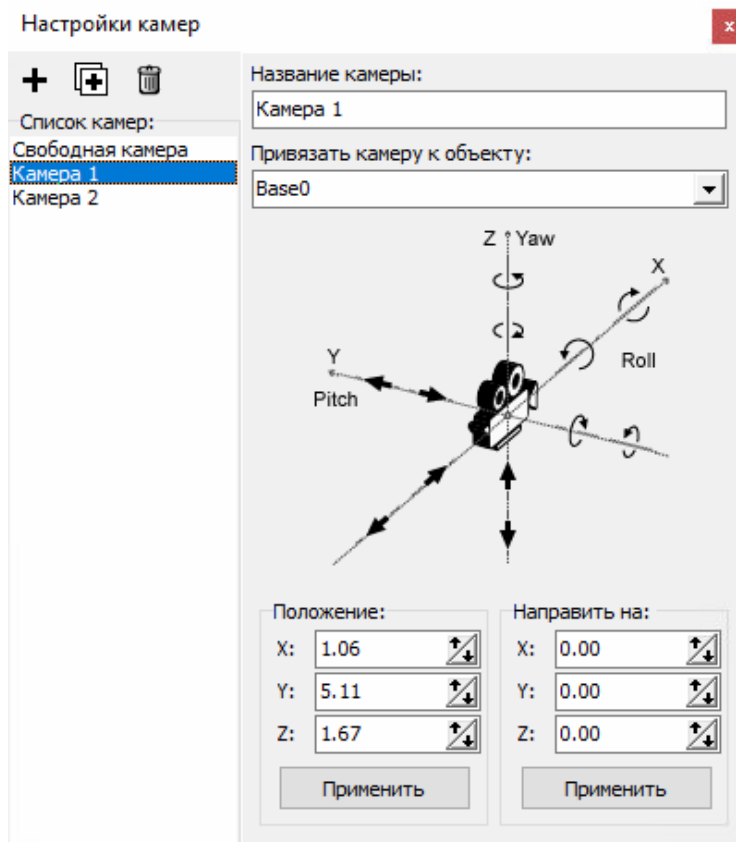


Рис. 4.77. Диалоговое окно настройки камер

Переключение между камерами можно выполнить следующими способами:

- в списке, находящимся в левой части диалогового окна настроек камер, выбирая необходимую камеру левой кнопкой мыши,
- из списка в контекстном меню анимационного окна, см. рис. 4.78.

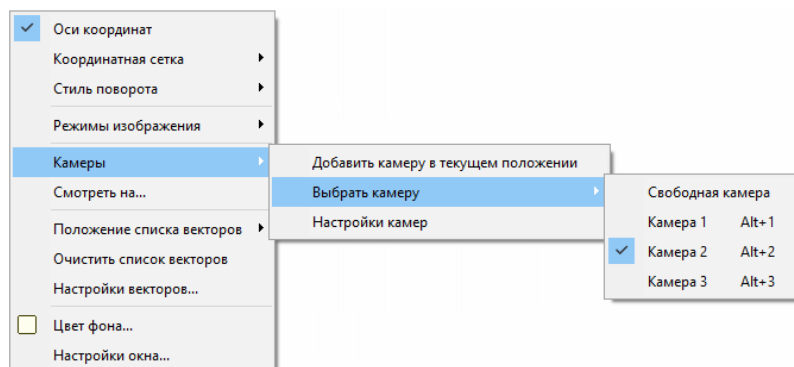


Рис. 4.78. Переключение камер из контекстного меню

4.3.7. Процессор переменных

Процессор переменных включает в себя два инструмента обработки рассчитанных переменных: *табличный процессор* и инструмент *преобразования переменных*. Остановимся на этих инструментах подробнее.

4.3.7.1. Табличный процессор

Табличный процессор (см. рис. 4.79) используется для статистической обработки рассчитанных переменных. Для вызова окна процессора используется пункт меню **Инструменты | Табличный процессор...**

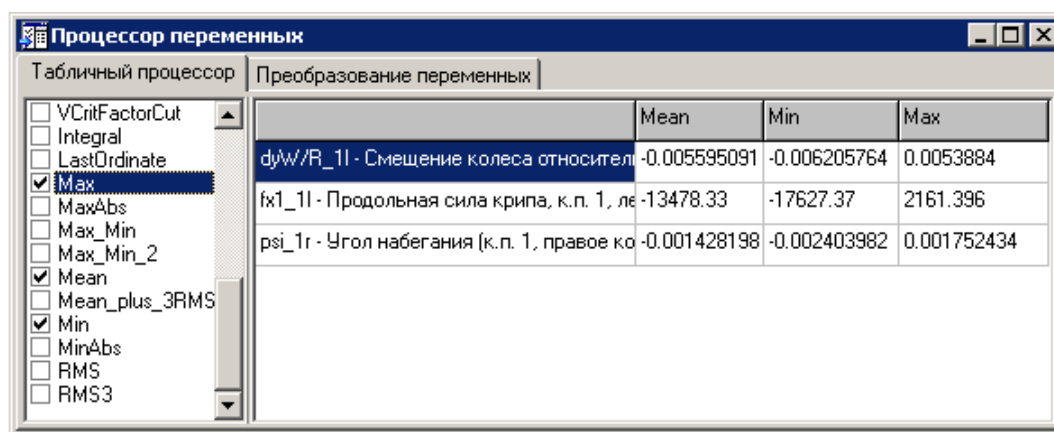


Рис. 4.79. Табличный процессор

В левой части окна находится список всех доступных функционалов, при помощи которых можно обработать рассчитанные переменные. Для анализа одной или группы переменных (файловые переменные из *списка рассчитанных переменных*, п. 4.3.3.3. "Обработка данных в списках рассчитанных переменных", стр. 4-65, или переменные из *графического окна*, п. 4.3.4. "Окно для построения графиков", стр. 4-68) перенесите их с помощью мыши в поле процессора. Для включения/выключения функционала используйте галочку возле его имени.

Для выключения функционала из табличного процессора поместите курсор на столбец с этой функционалом и нажмите клавиши **Shift+Del**. Для удаления переменной из табличного процессора поместите курсор на строку с этой переменной и нажмите клавишу **Del**.

При помощи контекстного меню (см. рис. 4.80) можно очистить список переменных или список функционалов, упорядочить переменные по каждому критерию по возрастанию и убыванию, а также копировать таблицу в MS Word целиком или выделенную часть.

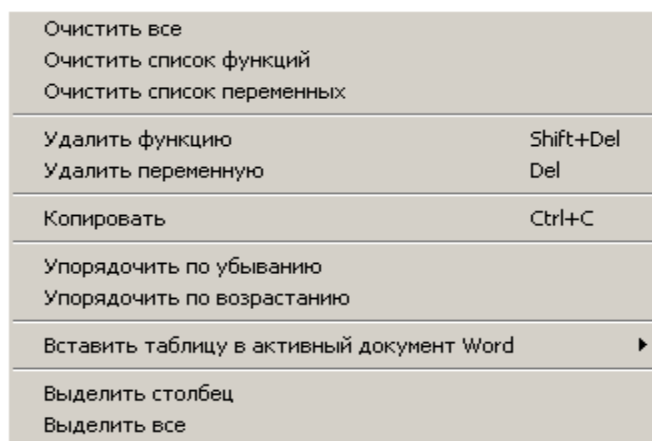


Рис. 4.80. Контекстное меню табличного процессора

Вместе с УМ поставляются некоторые стандартные функционалы, см. табл. 4.2.

Таблица 4.2

Функционалы стандартной поставки

Функционал	Комментарий
Percentile_0_point_1 (0,1%) Percentile_0_point_15 (0,15%) Percentile_1 (1%) Percentile_99 (99%) Percentile_99_point_85 (99,85%) Percentile_99_point_9 (99,9%)	Процентиль. Процентиль N – это такое значение, ниже которого расположено N процентов значений данной переменной. Значения переменной упорядочиваются в порядке возрастания; отбрасываются N % значений с начала ряда; минимальное значение среди оставшихся есть значение функционала.
Integral	Интеграл от переменной по независимой переменной с учетом знака переменной. Площади под кривой с положительным значением ординаты берутся с положительным знаком, площади над кривой с отрицательным значением абсциссы берутся с отрицательным знаком. Для периодических функции типа sin(t) на целом числе периодов данный функционал равен нулю.
IntegralAbs	Интеграл от переменной по независимой переменной без учета знака переменной. Все площади берутся с положительным знаком, без учета знака ординаты.
LastAbscissa	Последнее значение абсциссы
LastOrdinate	Последнее значение ординаты
Max	Максимальное значение переменной
MaxAbs	Максимальное значение модуля переменной
Max_Min	Разность между максимальным и минимальным значениями переменной, Max_Min = Max-Min , удвоенная амплитуда процесса

Max_Min_2	Разность между максимальным и минимальным значениями переменной, поделенная пополам, Max_Min = (Max-Min)/2 , амплитуда процесса
Mean	Среднее
Mean_plus_Std_Dev3	Сумма среднего и утроенного среднеквадратического отклонения, Mean_plus_Std_Dev3 = Mean + Std_Dev3
Min	Минимальное значение переменной
MinAbs	Минимальное значение модуля переменной
Std_Dev	Среднеквадратическое отклонение (root mean square deviation/standard deviation), корень квадратный из дисперсии, считается по формуле $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$, где N – число точек на графике, \bar{X} – среднее.
Std_Dev3	Утроенное среднеквадратическое отклонение, Std_Dev3 = 3*Std_Dev
Eff_Freq_0	Оценка центральной (эффективной) частоты процесса по числу пересечений с нулевым значением. $f_{\text{э}} = \frac{n_0}{2 \cdot T_p}$, где n_0 – число пересечений нулевой линии осциллограммы на интервале T_p .
Eff_Freq_Mean	Оценка центральной (эффективной) частоты процесса по числу пересечений со средним значением для реализации: $f_{\text{э}} = \frac{n_0}{2 \cdot T_p}$, где n_0 – число пересечений линии математического ожидания осциллограммы на интервале T_p .
Integral_Eff_Freq	Оценка центральной (эффективной) частоты процесса, рассчитанная по интегралу спектральной плотности процесса. Для вычисления строится функция спектральной плотности, и берется интеграл: $f_{\text{э}} = \sqrt{\int_0^{\infty} f^2 \cdot g(f) \cdot df}$, где $g(f)$ – нормированная функция спектральной плотности.
Integral_Eff_Freq_25	Оценка центральной (эффективной) частоты процесса, рассчитанная по интегралу спектральной плотности процесса с отсечением по 25 Гц: $f_{\text{э}} = \sqrt{\int_0^{f_{\text{max}}} f^2 \cdot g(f) \cdot df}$, где f_{max} – частота отсечения (25 Гц).

Реализация функционалов, которые используются в табличном процессоре, вынесена в файлы DLL, которые находятся в каталоге *Plugins*. Вместе со стандартной версией UM поставляется файлы **standard.dll** и **percentile.dll**, в которых находятся стандартные функции, описанные выше. При запуске программы **UM Simulation** все внешние функции, находящиеся во всех DLL каталога **Plugins**, автоматически подгружаются как функционалы.

Таким образом, разработка дополнительных функционалов может осуществляться независимо от UM самим пользователем или разработчиками по заказу пользователя.

Шаблон процедуры функционала для языка Pascal можно найти в файле *..\com\Plugin.pas*, а пример реализации DLL на языке Pascal (Delphi) – в файле *..\Plugins\standard.dpr*.

4.3.7.2. Преобразование переменных

Инструмент **Преобразование переменных** (см. рис. 4.81) используется для совершения операций над уже рассчитанными переменными. Этот способ полезен тогда, когда численный эксперимент(ы) уже проведен, а необходимая переменная-выражение предварительно не сформирована (см. **Мастер переменных | Выражение**). На рис. 4.81 в графическом окне построены две рассчитанные переменные. При помощи инструмента **Преобразование переменных** сформирована новая переменная – сумма двух исходных, которая также построена в графическом окне. Сформированная таким образом переменная не будет рассчитываться при выполнении последующих численных экспериментов.

Замечание. Для формирования переменной-выражения, которую можно будет поместить в список переменных и которая будет рассчитываться при каждом численном эксперименте, воспользуйтесь конструктором выражений в **Мастере переменных**, вкладка **Выражение**. Этот способ рекомендуется как более универсальный и позволит исследователю сократить время обработки результатов при проведении многих численных экспериментов.

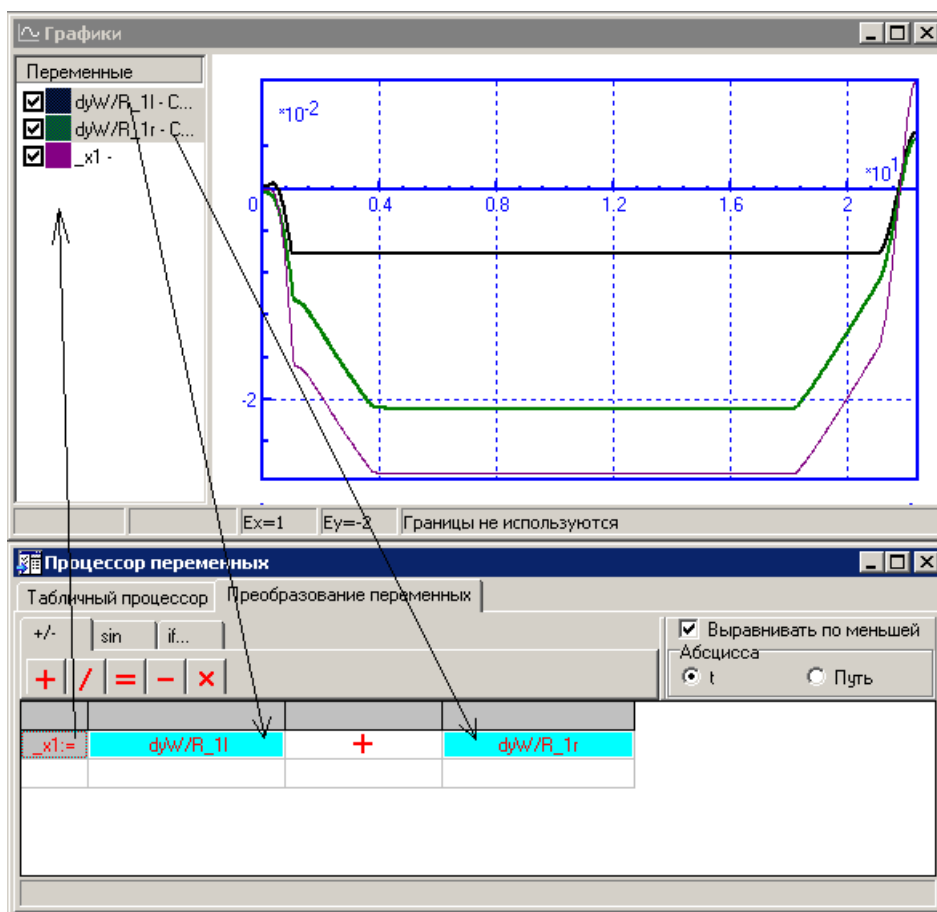



Рис. 4.81. Операции над рассчитанными переменными

4.3.8. Статистика

Инструмент **Статистика** используется для статистического анализа рассчитанных переменных с возможностью отображения различных характеристик в виде гистограмм и графиков. Вызов этого окна осуществляется с помощью команды меню **Инструменты | Статистика...** или нажатием кнопки  на панели инструментов. Число окон не ограничено. Окно **Статистика** (см. рис. 4.82) разделено на две части: контейнер переменных (слева), поле построения графиков (справа). Анализируемые переменные переносятся в окно либо из графического окна, либо из списка рассчитанных переменных (п. 4.3.3.3. "Обработка данных в списках рассчитанных переменных", стр. 4-65).

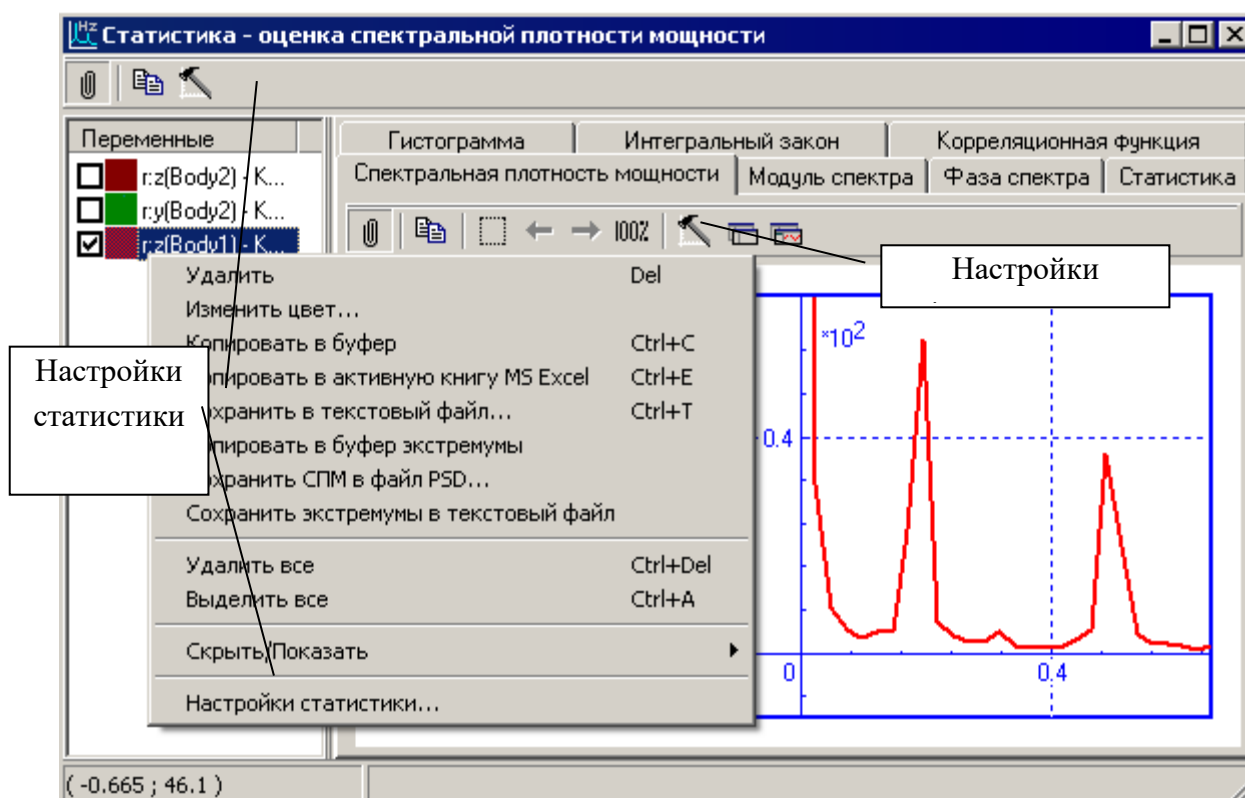



Рис. 4.82. Окно статистики

Поле графиков представляет собой набор вкладок, на которых отображаются различные гистограммы и графики, а также статистическая информация. На вкладках представлены следующие статистические характеристики:

- **Гистограмма** – гистограммы плотности распределения вероятностей;
- **Интегральный закон** – гистограммы распределения вероятностей;
- **Корреляционная функция** – графики оценки автокорреляционной функции;
- **Спектральная плотность мощности** – графики оценки спектральной плотности мощности;
- **Действительная и мнимая части спектра (модуль и фаза спектра)** – комплексная спектральная плотность временного ряда (спектр);
- **Статистика** – таблица статистических характеристик.

Гистограммы и графики выводятся только для активных переменных (отмеченных галочкой в контейнере переменных). Графики строятся с помощью графических окон, работа с которыми описана в руководстве пользователя п. 4.3.4. "Окно для построения графиков", стр. 4-68.

Диалоговое окно **Настройки статистики...** (рис. 4.83), вызываемое при помощи контекстного меню или кнопки  на панели инструментов окна **Статистика** (см. рис. 4.82), позволяет изменять параметры отображения статистической информации. На вкладке **Общие** настраиваются формат выводимых чисел и вид гистограмм:

- **Количество столбцов** – количество столбцов гистограмм (Авто – количество будет рассчитано программой).
- **Выноска** – на гистограммах отображаются выноски со значениями выборочной вероятности.

На той же вкладке настраивается способ формирования выборки для алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ):

- **Дополнение нулями** – выборка дополняется нулями до ближайшего большего значения 2^n .
- **Усечение до ближайшего** – выборка усекается до ближайшего меньшего значения 2^n .

Замечание. Обратите внимание, что значения корреляционной функции и спектральной плотности при использовании разных способов формирования выборки несколько отличаются друг от друга.

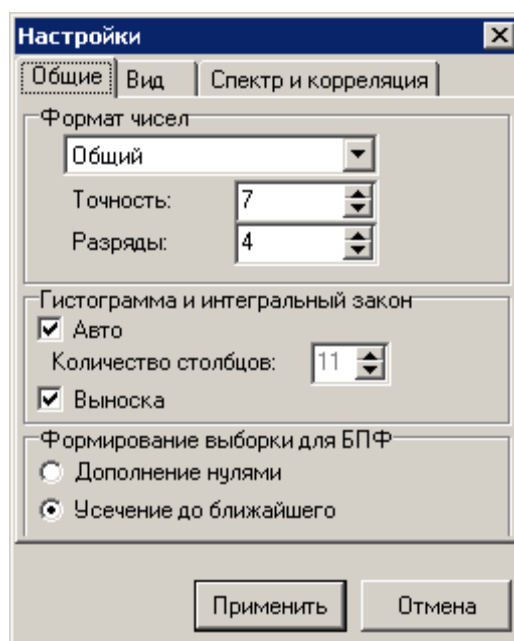


Рис. 4.83. Окно настроек статистики

Указать отображаемые статистические характеристики, а также настроить вид отображения комплексной спектральной плотности (спектра) можно с помощью вкладки **Вид**. Комплексная спектральная плотность (спектр) вычисляется прямым преобразованием Фурье. Используемая пара дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с условиями нормировки записывается так:

$$x(i) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} a(n) \cdot e^{j \cdot 2\pi \frac{in}{m}}, \quad a(n) = \sum_{i=0}^{m-1} x(i) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \frac{in}{m}}.$$

Комплексная спектральная плотность может быть представлена на графиках в двух видах: отображаются действительная и мнимая части спектра или модуль и фаза спектра.

Вкладка **Спектр и корреляция** используется для выбора функции спектрального окна, вида оценки автокорреляционной функции и указания отношения m/N .

График спектральной плотности мощности, представляет собой оценку односторонней спектральной плотности мощности с использованием различных функций спектрального окна. Доступны следующие функции спектральных окон: Бартлетта, Хэннинга, Парзена, Хэмминга и усечённая.

При расчете спектральных и корреляционных характеристик для вычисления ДПФ используется алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Для автокорреляционной функции применяются несмещенная и смещенная оценки.

Отношения m/N определяет отношение количества точек оценки корреляционной функции, используемое для определения спектральной плотности мощности, к размеру выборки.

4.3.9. Пульт управления

4.3.9.1. Использование пульта управления

Пульт управления позволяет пользователю интерактивно изменять значения параметров модели, влияя на поведение модели, в том числе в процессе численного моделирования. Это позволяет, например, учесть в модели действия человека-оператора (водителя транспортного средства).

Порядок работы с пультом управления следующий. Запустите **Редактор пульта управления** (см. рис. 4.86, пункт меню **Инструменты | Пульт управления | Редактор пульта управления...**) и в нем создайте пульт управления для модели. Затем сохраните этот пульт управления в файл. После этого сохраненный пульт управления можно запустить на выполнение выбрав пункт меню **Инструменты | Пульт управления | Открыть пульт управления...**, см. рис. 4.84.

В каждый момент времени может быть открыто неограниченного число редакторов пульта управления и только один активный пульт управления.

На рис. 4.84 приведен пульт управления, при помощи которого пользователь может интерактивно управлять транспортным роботом: выбирать направление движения (вперед, назад, налево, направо) и управлять движущим моментом на колесах, а также устанавливать амплитуду неровностей и коэффициент трения между колесами и поверхностью.

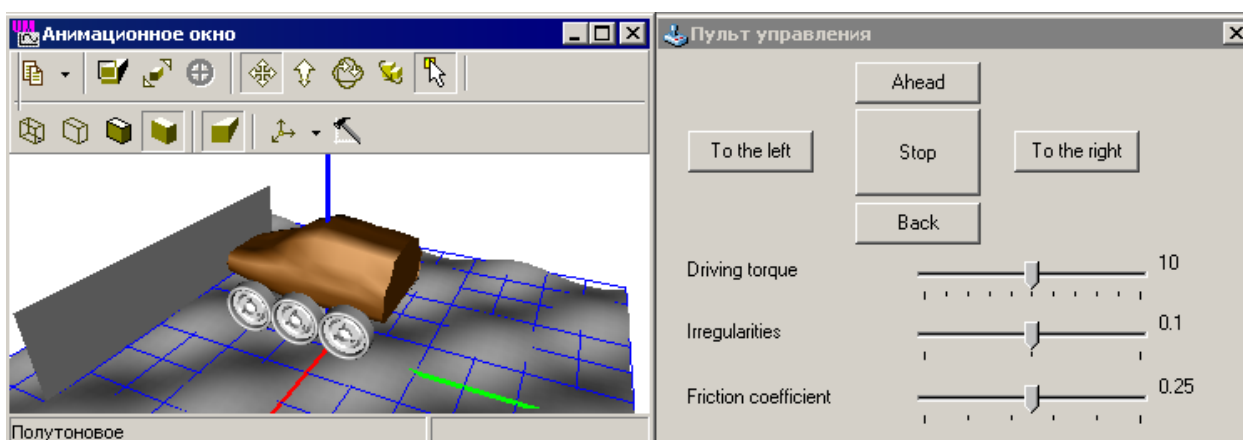


Рис. 4.84. Пульт управления

Изменять с пульта управления можно только идентификаторы, параметризующие силовые элементы любых типов, в том числе и шарнирных сил, и графические объекты. Запрещается изменять с пульта управления идентификаторы, параметризующие характеристики тел (масса, момент инерции, положение центра масс) и шарниров.

4.3.9.2. Редактор пульта управления

Редактор пульта управления (см. рис. 4.86) представляет собой визуальный конструктор, позволяющий разместить в окне пульта управления различные элементы управления и связать их со значениями идентификаторов.

Редактор пульта управления поддерживает следующие элементы управления:

- статический текст;
- поле ввода численных величин;
- переключатель (флажок);
- ползунок;
- кнопку;
- радио-группу;
- двухкоординатный джойстик.

Для добавления нового элемента управления нажмите нужную кнопку в меню быстрого доступа (см. рис. 4.85) а затем щелкните в поле редактирования пульта управления и в месте щелчка появится выбранный элемент управления.

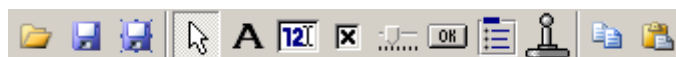


Рис. 4.85. Меню редактора пульта управления

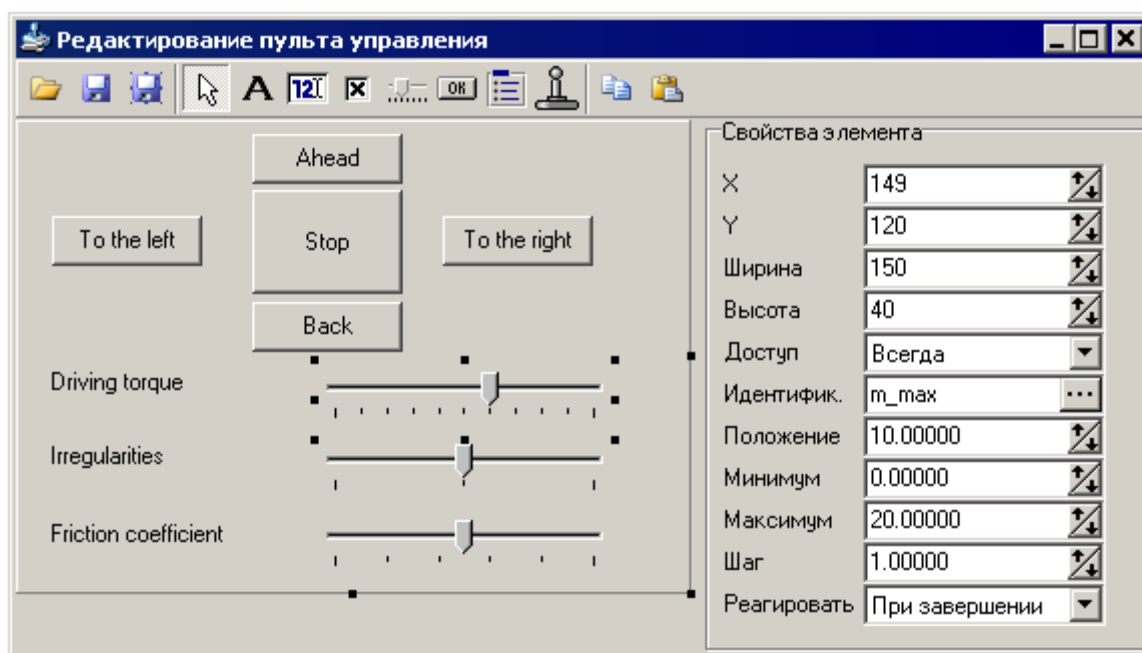


Рис. 4.86. Редактор пульта управления

Рассмотрим значения и смысл свойств элементов управления. Итак, общими для всех элементов являются следующие свойства:

- **X** – расстояние от левого края элемента до левой границы окна пульта управления;
- **Y** – расстояние от верхнего края элемента до верхней границы окна пульта управления;

- **Ширина** – ширина элемента;
- **Высота** – высота элемента.

Все элементы, кроме статического текста имеют следующие свойства:

- **Доступ** – регулирует доступность элемента управления. Может принимать следующие значения: **Всегда**, **Перед моделированием**, **Только при моделировании**, **В режиме паузы**.
- **Идентифик.** – задает один или несколько параметров модели, с которым связан элемент управления, а также связанные с ними числовые значения. Конкретная реализация зависит от элемента управления.

Ниже рассмотрим специфические свойства элементов управления.

Статический текст

- **Текст** – текст элемента;
- **Переносы** – поддержка переносов (для многострочных меток, Да/Нет);
- **Выравнивание** – выравнивание текста внутри заданного размера: **слева**, **по центру**, **справа**.

Поле ввода

- **Значение** – текущее (начальное) значение идентификатора;
- **Минимум** – минимально возможное значение для ввода;
- **Максимум** – максимально возможное значение для ввода;
- **Приращение** – шаг приращения величины при использовании кнопок визуального изменения величины.

Переключатель

- **Состояние** – текущее (начальное) состояние переключателя (включено/выключено);
- **Идентификаторы** – в диалоговом окне можно указать один или несколько идентификаторов модели с указанием значений на «включено» и «выключено».

Ползунок

- **Минимум**, **Максимум** – предельные величины для изменения связанного параметра;
- **Шаг** – шаг изменения параметра;
- **Реагировать** – устанавливает режим изменения величины связанного параметра. Может принимать значения **Всегда** и **При завершении**. Установка этого свойства в значение **Всегда** приведет к тому, что величина связанного параметра будет обновляться в процессе перемещения указателя. В некоторых случаях затраты на изменение величины параметра могут быть относительно велики, и тогда рекомендуется выбирать режим реагирования **При завершении**. Это приведет к тому, что ве-

личина связанного параметра будет меняться только при завершении операции с указателем ползунка.

Кнопка

- **Идентификаторы** – в диалоговом окне можно указать один или несколько идентификаторов модели с указанием значений, которые будут устанавливаться этим идентификаторам при нажатии на кнопку.

Радио-группа

- **Значения** – связывает название пунктов и численные значения идентификаторов, см. рис. 4.87;
- **Заголовок** – общий заголовок радио-группы;
- **Столбцы** – число столбцов в радио-группе;
- **Активный** – индекс активного (выделенного элемента), -1 если нет активного элемента.

Замечание. Идентификаторы модели, связанные с переключателем или радио-группой, при активном пульте управления могут принимать только значения, предусмотренные в соответствующем переключателе или радио-группе. При попытке изменить значение такого параметра из **Инспектора моделирования объектов** (см. п. 4.4.1.5. "Изменение, сохранение и чтение значений идентификаторов", стр. 4-116) его значение будет автоматически округлено до ближайшего значения из списка радио-группы.

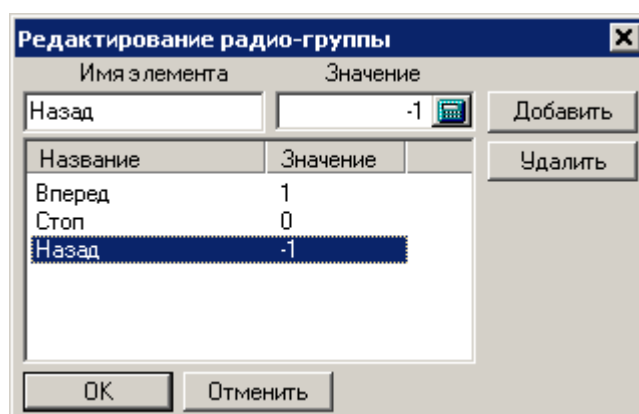


Рис. 4.87. Окно редактирования радио-группы

Двухкоординатный джойстик

- **Идент.(ификатор) по X** – идентификатор модели, с которым связывается отклонение джойстика по горизонтали; идентификатор может принимать значения от минус единицы для крайнего левого положения джойстика, до единицы для крайнего правого положения.
- **Идент.(ификатор) по Y** – идентификатор модели, с которым связывается отклонение джойстика по вертикали. Крайнее нижнее положение соответствует минус единице, крайнее верхнее – плюс единице.

- **Идентификатор режима** – идентификатор модели, которому назначается значение в поле **Старт** на начало управления джойстиком, а значение в поле **Стоп** – на окончание управления. Обычно применяется для управления двигателями роботов и манипуляторов с автотормозами, где на начало управления нужно выключить автотормоза, а на конец управления – включить.

Замечание. Любой идентификатор для джойстика (идентификатор по X, по Y и идентификатор режима) можно не указывать. Если, например, опустить идентификатор по X или Y, то двухкоординатный джойстик превратится в однокоординатный.

4.3.10. Макросы идентификаторов

Макросы идентификаторов – это инструмент для назначения численных значений группе идентификаторов с помощью одной операции.

Для конкретной модели пользователь может создать список макросов. Каждый макрос содержит список идентификаторов, назначенных пользователем, а также таблицу значений идентификаторов из группы, каждый столбец которой имеет имя и содержит численное значение каждого идентификатора.

Созданный пользователем список макросов модели содержится в текстовом файле с именем *Macros* и автоматически подгружается при открытии модели в программе **UM Simulation**.

Перед началом моделирования пользователь может назначить нужные значения идентификаторов, выбирая макрос и столбец значений идентификаторов, п. 4.4.1.5. "Изменение, сохранение и чтение значений идентификаторов", стр. 4-116.

Для создания макросов используется окно редактирования списка макросов. Окно открывается с помощью команды меню **Инструменты | Макросы идентификаторов...** При первом открытии окна предварительно появляется окно выбора группы идентификаторов для первого макроса, рис. 4.88.

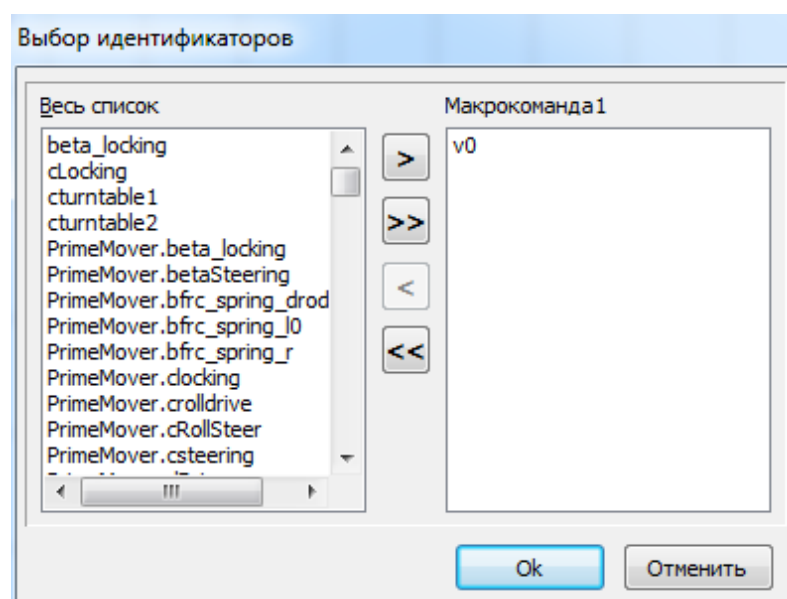


Рис. 4.88. Окно выбора списка идентификаторов

Инструменты верхней панели инструментов используются для добавления, удаления, переименования макросов и выбора текущего макроса.

⊕ Кнопка добавляет новый макрос. Одновременно появляется окно, с помощью которого пользователь назначает макросу список идентификаторов, рис. 4.89.

⊖ Кнопка удаляет текущий макрос из списка.

📄 кнопка вызывает окно для редактирования списка идентификаторов в текущем макросе, рис. 4.89.

Макрокоманда 1

Выпадающее меню содержит список макросов и используется для выбора текущего макроса с целью редактирования. В редактируемом поле окна пользователь задает имя текущего макроса.

Правая панель инструментов используется для редактирования таблицы численных значения идентификаторов текущего макроса.

+ Кнопка добавляет новый столбец таблицы.

ab Кнопка вызывает окно редактирования названия столбца.

- Кнопка удаляет текущий столбец таблицы.

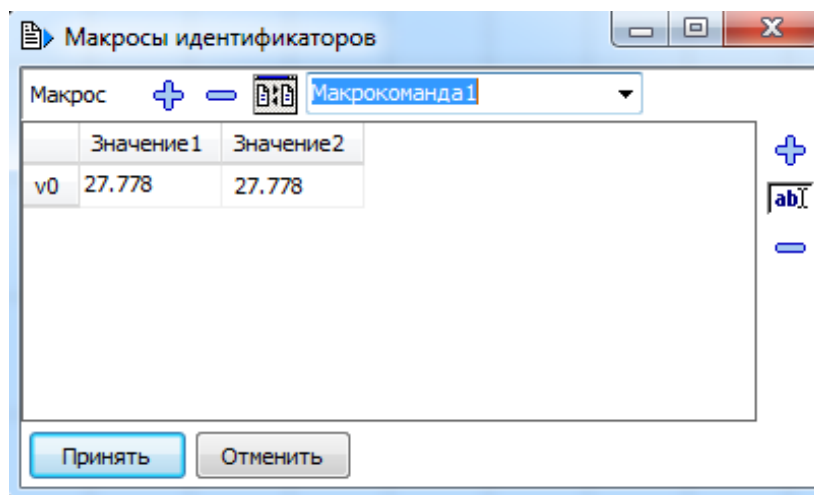


Рис. 4.89. Окно редактирования списка макросов

Примеры:

[{Данные УМ}\Samples\Library\Planetary gear](#). Пример содержит один макрос с тремя группами значений идентификаторов, соответствующих различным значениям передаточного отношения планетарной передачи, см. рис. 4.90. Макрос содержит идентификаторы, параметризующие число зубьев и некоторые геометрические размеры шестеренок.

[{Данные УМ}\Samples\Library\ElastFriction](#)

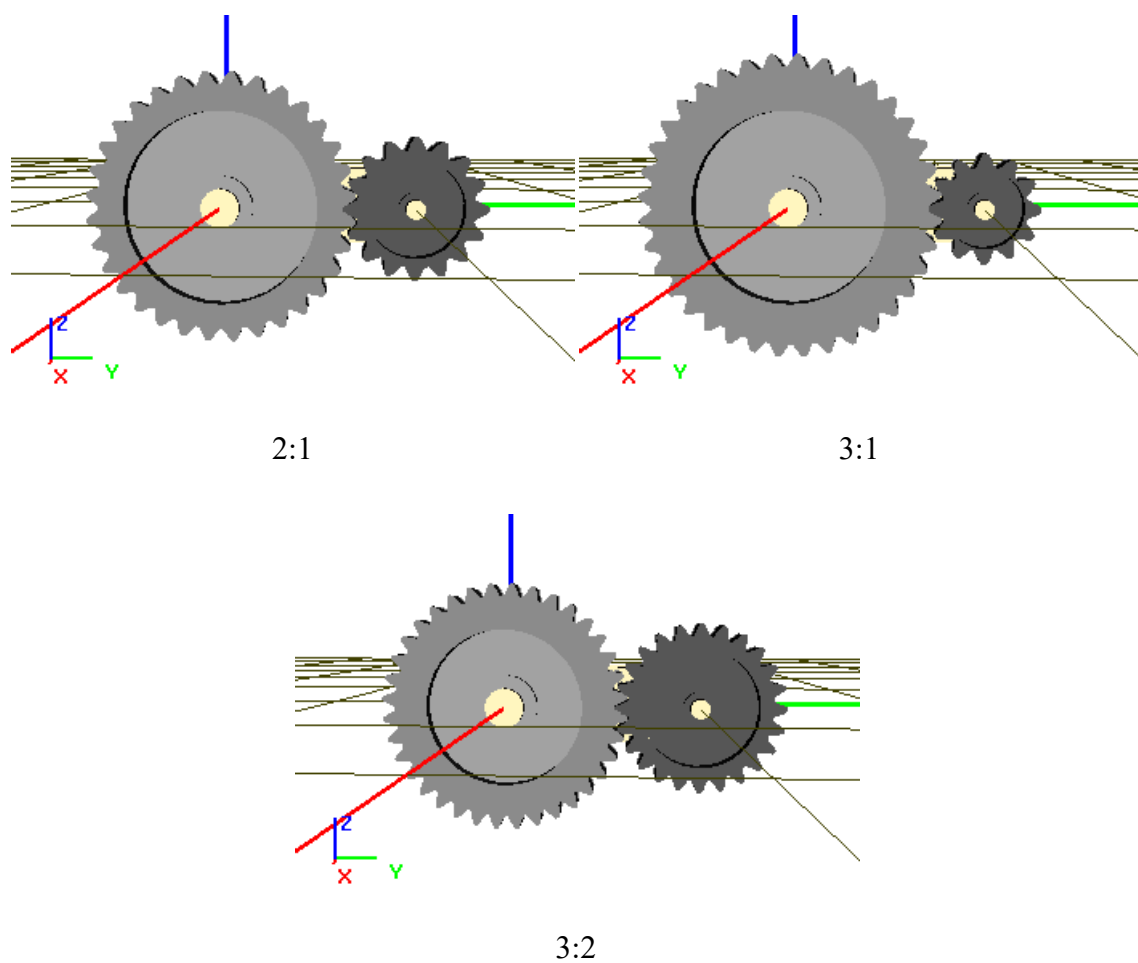


Рис. 4.90. Изменение передаточного отношения с помощью макроса идентификаторов

4.4. Режим однократного интегрирования уравнений движения

Процесс численного интегрирования уравнений движения является одним из основных инструментов исследования свойств механической системы с использованием УМ. Пользователь может использовать режимы *однократного расчета* движения или выполнять *многовариантные расчеты* (доступно при наличии модуля многовариантных расчетов и оптимизации, см. [Главу 6](#)).

В данном разделе мы остановимся на описании режима однократного расчета. Переход к данному режиму осуществляется с помощью пункта меню **Анализ | Моделирование...**

Перед стартом процесса интегрирования уравнений движения пользователь имеет возможность:

- задать численный метод и точность интегрирования, шаг представления и записи результатов;
- задать начальные условия (начальные значения координат и их первых производных по времени);
- изменить значения параметров задачи, заданных с использованием идентификаторов;
- задать файлы для сохранения результатов моделирования.

В процессе моделирования можно:

- контролировать процесс интегрирования с использованием любого числа анимационных окон, выводить результаты в графические окна;
- сохранять результаты моделирования в файл автоматически рассчитываемых переменных;
- прерывать процесс интегрирования в любой момент времени, влиять на процесс в интерактивном режиме путем использования прерываний.

4.4.1. Подготовка процесса интегрирования

Диспетчером подготовки механической системы к процессу однократного интегрирования является диалоговое окно, представленное на рис. 4.91.

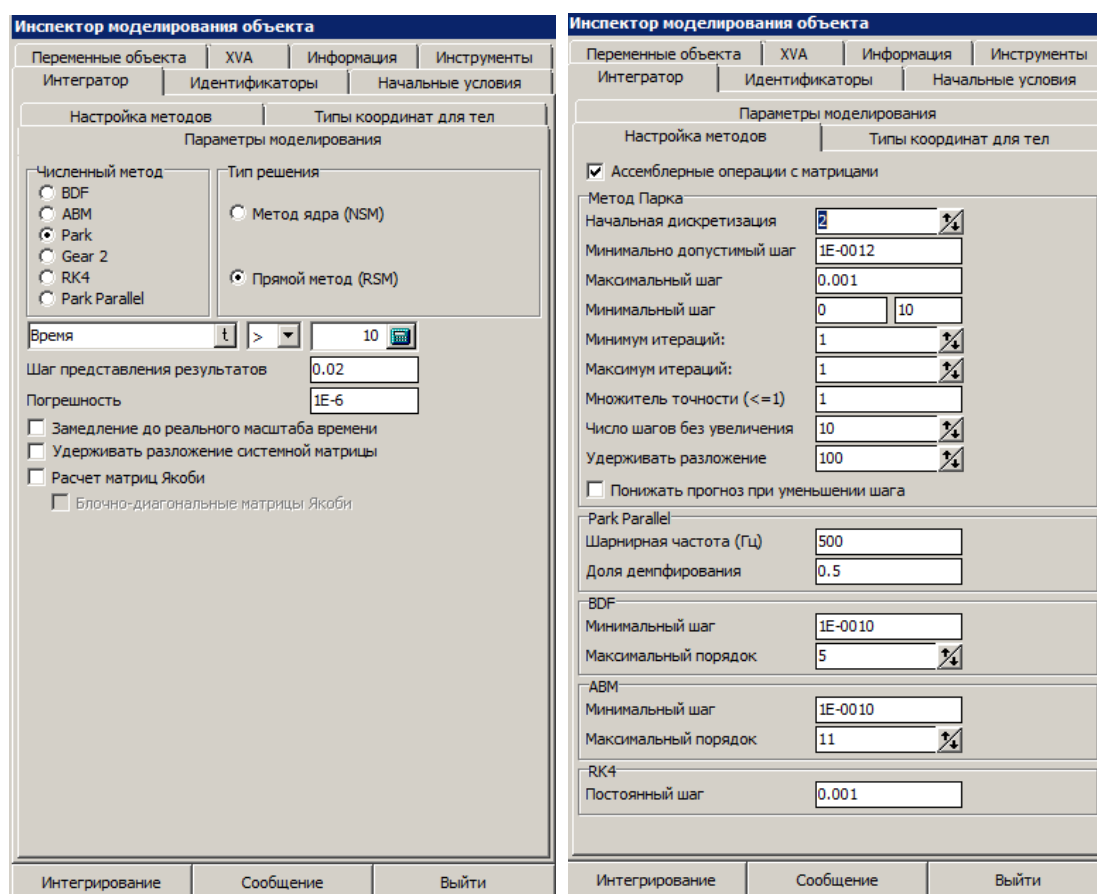


Рис. 4.91. Настройки численных методов в инспекторе

4.4.1.1. Численные методы

В случае систем, имеющих структуру дерева, уравнения движения являются обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ). При наличии замкнутых кинематических цепей или использовании кватернионов уравнений движения имеют вид дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). Рассмотрим численные методы решения нелинейных уравнений движения.

Для интегрирования нелинейных ОДУ и ДАУ в УМ предлагается несколько численных методов:

- **BDF**

(The Backward Differentiation Formula – формула дифференцирования назад), явный метод в форме PEC (т.е. прогноз-оценивание-коррекция), до 5-го порядка включительно, переменный шаг и порядок, только для жестких уравнений.

- **ABM**

(The Adams-Bashfort-Moulton method – метод Адамса-Бэшфорта-Моултона), явный метод в форме PECЕ (прогноз-оценивание-коррекция-оценивание); до 11-го порядка включительно, переменный шаг и порядок, только для жестких уравнений.

- **Метод Парка**

Неявный метод второго порядка с переменным/постоянным шагом, наиболее эффективен для жестких ОДУ и ДАУ.

- **GEAR2**

Неявный метод второго порядка с переменным/постоянным шагом, наиболее эффективен для жестких ОДУ и ДАУ.

- **RK4**

Метод Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом. Не используется для решения ДАУ.

- **Park Parallel**

Численный метод, основанный на конечно-разностной схеме метода Парка, который использует специальный численно-итерационный метод составления уравнений движения и реализует эффективные параллельные вычисления на многоядерных компьютерах. Наиболее эффективен для систем с особо большим числом степеней свободы, таких как гусеничная машина или железнодорожный состав, включающий несколько трехмерных моделей экипажей.

Для нежестких уравнений методы DBF и ABM показывают примерно одинаковую эффективность при интегрировании с не очень высокой точностью. При интегрировании с высокой точностью метод ABM часто более эффективен.

Если уравнения жесткие, то метод Парка значительно более эффективный. Иногда эффективности повышается, при условии, что при синтезе уравнений движения включена опция вычисления матриц Якоби.

Метод RK4 для нежестких систем проигрывает методам ABM и BDF, а для жестких систем – методам Park и Park Parallel.

Для моделирования динамики технических объектов, таких как автомобиль, рельсовый экипаж, гусеничная машина или гибридная модель, включающая упругие тела, наиболее эффективными численными методами являются Метод Парка и Park Parallel. Ниже эти методы будут рассмотрены более подробно.

4.4.1.2. Общие параметры интегрирования

Поля вкладки для выбора метода и параметров интегрирования (рис. 4.91) содержат следующую информацию.

- **Численный метод**, п. 4.4.1.1. "*Численные методы*", стр. 4-107.
- **Время моделирования** – интервал моделирования движения системы. Начальный момент времени при моделировании считается равным нулю.
- **Шаг представления результатов** моделирования задает частоту смены изображения объекта в анимационных окнах, постановки новых точек на графиках, расчета и записи в файл автоматически рассчитываемых переменных. Данная величина непосредственно не связана с шагом интегрирования, который является переменным и устанавливается автоматически.
- **Погрешность** – задаваемая точность численного метода. Для BDF и ABM методов: это абсолютная погрешность на интервале времени 1 с. Шаг интегрирования выбирается так, чтобы обеспечить заданную погрешность в вычислении координат. Для **метода Парка и Гира** – локальная погрешность одного шага интегрирования, поэтому для метода Парка следует задавать большую точность вычислений.
- Флаг **Замедление до реального масштаба времени** активируется, если моделирование происходит быстрее реального времени, и пользователь хочет видеть в анимационных окнах движение в реальном масштабе времени.
- Флаг **Расчет ускорений и сил реакций** обычно должен быть включен. В этом случае пользователю доступны рассчитанные значения ускорений и реакций. В некоторых случаях, в основном для приложений, требующих моделирование в реальном масштабе времени, расчет этих переменных можно выключить для ускорения процесса моделирования.
- **Тип решения**: RSM (Range Space Method) или NSM (Null Space Method).

Замечание. NSM и RSM различаются только для систем с замкнутыми кинематическими цепями (то есть при решении ДАУ). Пользователь должен попробовать моделирование обоими путями и выбрать быстрееший. Подробная информация о методах содержится в Научном Руководстве [1].

Дополнительная информация о методах NSM, RSM

NSM основан на переходе к локальным обобщенным координатам системы и более эффективен, если система имеет большое число замкнутых цепей и, соответственно, малое число степеней свободы.

RSM соответствует переходу к обобщенным силам реакций в разрезанных шарнирах, что более эффективно, если анализируется составной объект, содержащий большое число подсистем и длинные кинематические цепи. Например, для цепочки тел, моделируемой по методу подсистем, можно с использованием данного подхода достичь линейной зависимости времени выполнения одного шага от числа подсистем, в то время как для прямой реализации эта зависимость кубическая.

Вместе с тем, оба метода имеют особенность, которую следует учитывать. Поясним ее на простом примере кривошипно-ползунного механизма (см. рис. 4.92).

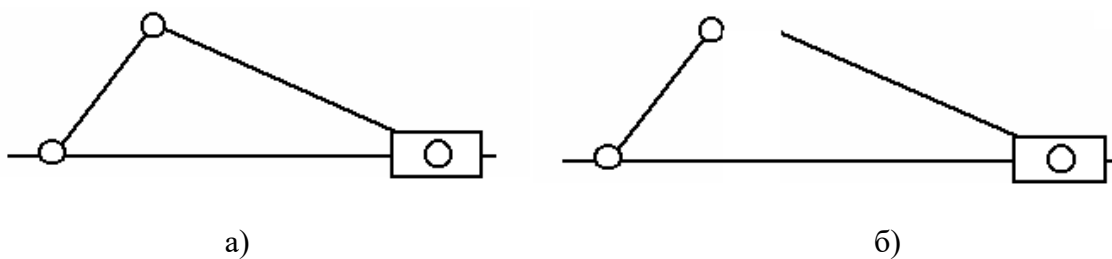


Рис. 4.92. Кривошипно-ползунный механизм

Предположим, что масса кривошипа мала по сравнению с массами шатуна и ползуна, и при описании объекта пользователь задал нулевыми массу и момент инерции этого тела. Поскольку механизм имеет замкнутую кинематическую цепь, то шарнир, соединяющий кривошип с шатуном будет разрезан. В результате механизм разделяется на две независимые части, для одной из которых, а именно для кривошипа, матрица масс будет вырожденной. В этом случае моделирование движения становится невозможным (требуется обращение матриц масс). Таким образом, не рекомендуется задавать нулевые массы и моменты инерции тел.

4.4.1.3. Метод Парка

Рекомендуемые значения параметров Метода Парка показаны на рис. 4.91, справа. Для уточненных расчетов рекомендуется установить нулевое значение для параметра **Минимальный шаг**. Этот параметр используется исключительно для ускорения процесса моделирования. Ненулевое значение параметра означает, что после достижения этого значения программа пытается удержать шаг на этом уровне, даже в ущерб точности решения. Если число последовательных шагов с нарушением условия точности превзойдет значение, указанное в соседнем поле (5 на рис. 4.91, справа), то происходит уменьшение шага.

При расходимости численного метода (наличие “бороды” на некоторых графиках, в основном – ускорений) следует включить расчет матриц Якоби, либо увеличить точность (уменьшить погрешность) до исчезновения “бороды”. Также следует использовать матрицы Якоби, если при этом повышается скорость моделирования динамики.

Использование матриц Якоби позволяет значительно ускорить процесс моделирования в следующих ситуациях:

- движение экипажа с малой скоростью (меньше 8-10 м/с); в этом случае следует включить как **расчет матриц Якоби**, так и ключ **Матрицы Якоби для контакта колеса/рельс**;
- наличие жестких сил, то есть сил, в описании которых присутствуют большие коэффициенты жесткости и/или демпфирования, дающие большие парциальные частоты и демпфирование; например, контактные силы при взаимодействии тел, масса одного из которых много меньше массы другого; силовой элемент типа последовательного соединения пружины с демпфером.

Для некоторого ускорения процесса моделирования при включенных матрицах Якоби рекомендуются следующие действия:

- использовать блочно-диагональные матрицы Якоби;
- выключить расчет матриц Якоби нежестких сил на вкладке инспектора **Инструменты | Силы** (как правило – это пружины, гасители колебания и пр., рис. 4.93).

Флаг **Удерживать разложение системной матрицы**, как правило, не используется при моделировании динамики рельсовых экипажей и автомобилей.

Замечание. Использование матриц Якоби и остальные рекомендации имеют смысл только в том случае, если они повышают устойчивость процесса интегрирования и/или ускоряют его. Рекомендуется оптимизировать параметры метода интегрирования для каждой новой модели рельсового экипажа.

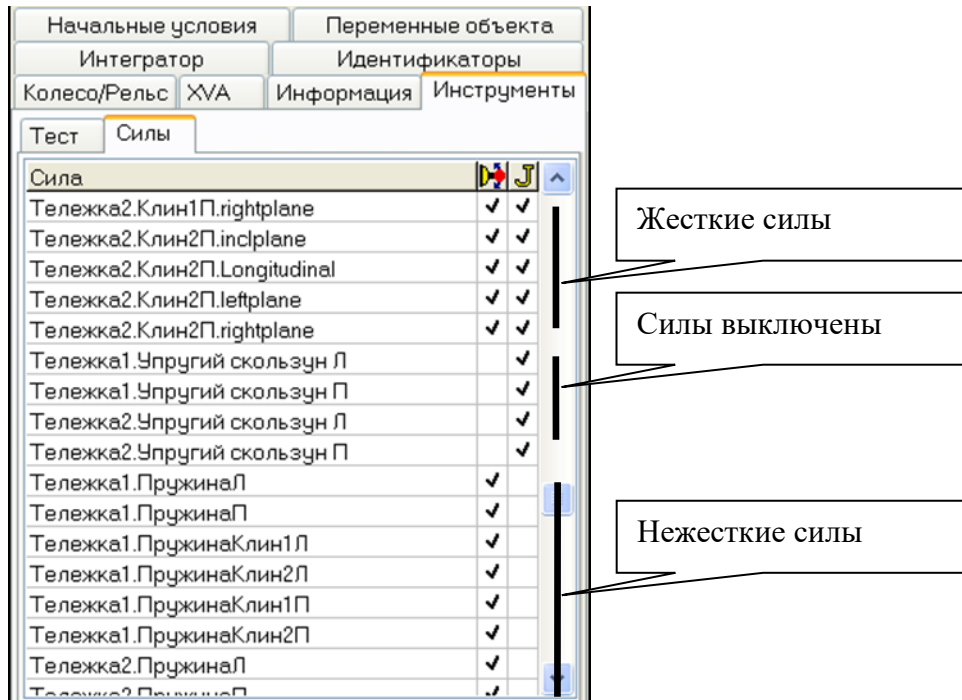


Рис. 4.93. Включение/выключение расчета матриц Якоби отдельных силовых элементов

4.4.1.4. Численный метод: Park Parallel

В UM, начиная с версии 6.0, реализован алгоритм **Park Parallel** для формирования уравнений движения модели и их решения. Важнейшей особенностью алгоритма является возможность использования многопоточных режимов расчета на многоядерных компьютерах, что часто позволяет значительно ускорить процесс моделирования.

Для оценки эффективности метода для компьютера с многоядерным процессором рекомендуется обратиться к следующим примерам:

[{Данные УМ}\Samples\Tracked_Vehicles\gsTV](#) (гусеничный транспортер)

[{Данные УМ}\Samples\Tracked_Vehicles\M1A1](#) (танк)

[{Данные УМ}\Samples\Tracked_Vehicles\FH200](#) (гусеничный экскаватор)

[{Данные УМ}\Samples\Rail_Vehicles\TGV_KTX](#) (поезд TGV с десятью вагонами)

[{Данные УМ}\Samples\Rail_Vehicles\HeavyHaulTrain](#) (грузовой состав с десятью экипажами)

[{Данные УМ}\Samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#) (упрощенная модель грузового вагона с тележками 18-100)

Рекомендуется исследовать, каким образом влияет на быстродействие число параллельных процессов. Для моделей поездов и рельсового экипажа полезно сравнить быстродействие метода Park Parallel с методом Парка. При выполнении сравнительных расчетов рекомендуется минимизировать или закрыть анимационные окна.

4.4.1.4.1. Условия, при которых можно использовать метод Park Parallel

Метод накладывает некоторые незначительные ограничения на подготовку модели, без удовлетворения которых метод недоступен.

- В программе ввода **UM Input** модели и всем внешним подсистемам должен быть установлен численно-итерационный метод синтеза уравнений, рис. 4.94.
- Массы и моменты инерции относительно осей X, Y, Z всех тел должны быть отличны от нуля.

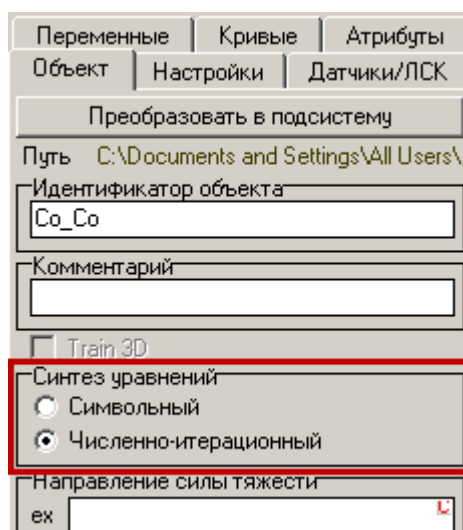


Рис. 4.94. Метод синтеза уравнений, вкладка Объект инспектора программы ввода

- Метод не используется при наличии в модели сопряжений и в некоторых других случаях.
- Игнорируются силовые взаимодействия 3D Контакт (см. [Главу 3](#) руководства).

Если эти условия не выполнены, то при попытке выбрать данный метод появляется сообщение об ошибке и ссылка на текстовый файл с перечнем невыполненных условий, рис. 4.95.

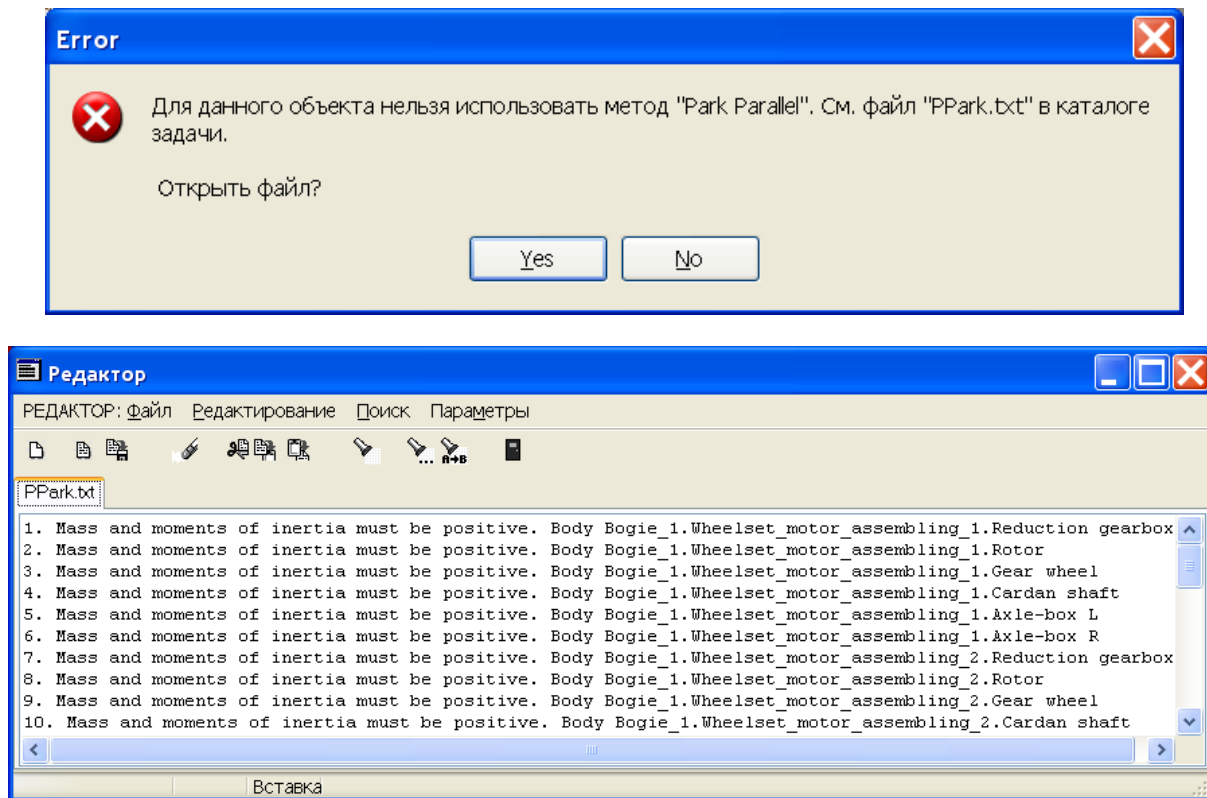


Рис. 4.95. Сообщение о невозможности использовать метода и список нарушений

4.4.1.4.2. Параметры метода

Дополнительно к методу Парка метод Park Parallel использует следующие параметры, рис. 4.96.

Численный метод	Тип решения	
<input type="radio"/> BDF	<input type="radio"/> Метод ядра (NSM)	
<input type="radio"/> ABM	<input checked="" type="radio"/> Прямой метод (RSM)	
<input type="radio"/> Метод Парка		
<input type="radio"/> Gear 2		
<input type="radio"/> RK4		
<input checked="" type="radio"/> Park Parallel		
Время моделирования	25.000	
Шаг представления результатов	0.01	
Погрешность	4E-7	
<input type="checkbox"/> Замедление до реального масштаба времени		
<input checked="" type="checkbox"/> Расчет ускорений и сил реакций		
Метод решения		
<input type="radio"/> BDJ	<input checked="" type="radio"/> CGM	<input type="radio"/> Cholesky
Погрешность МСГ	0.1	
<input checked="" type="checkbox"/> Использовать потоки		
Число потоков (max=2)	2	

Рис. 4.96. Параметры метода Park Parallel

Итерационный метод сопряженных градиентов используется для уточнения решения жестких уравнений. При использовании МСГ следует задать **погрешность** итерационного процесса. Как правило, результаты хорошие даже при низкой точности, порядка 0,1.

Использование потоков

Использование потоков возможно только для многоядерных компьютеров. При активном ключе расчет динамики производится параллельно на указанном числе потоков.

Максимально допустимое число потоков равно числу ядер на процессоре локальной машины и определяется автоматически. В это число включаются как физические, так и логические ядра.

Оптимальное число потоков зависит от модели и определяется пользователем опытным путем.

В настоящее время наиболее эффективным является использование 4- и 8-ядерных процессоров. В некоторых случаях за счет распараллеливания удается достичь ускорения в 2,5-3 раза.

4.4.1.5. Изменение, сохранение и чтение значений идентификаторов

Изменение параметров механической системы, заданных идентификаторами, позволяет проводить оперативное исследование влияния этих параметров на динамическое поведение системы без дополнительного вывода уравнений движения. Для изменения значений параметров используется вкладка **Идентификаторы** (см. рис. 4.97).

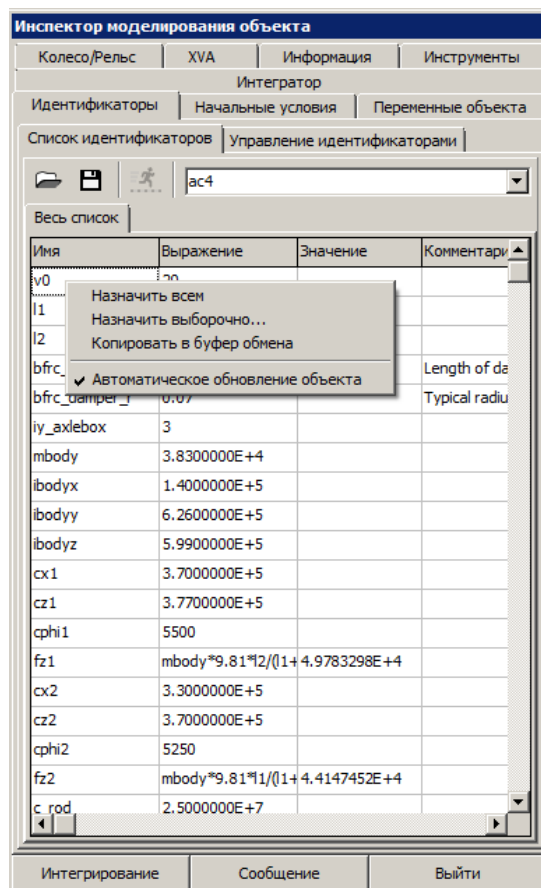





Рис. 4.97. Изменение значений идентификаторов

Значение столбца **Выражение** для идентификаторов, заданных числом, можно изменять. Текущие значения идентификаторов можно записать в файл, а также прочитать из файла ранее сохраненные значения.

Замечание. Не допускается изменение значений зависимых параметров, то есть идентификаторов, выраженных через другие идентификаторы.

Кнопки на панели инструментов:

-  запись в файл (*.par);
-  назначение значений группе идентификаторов с помощью заранее созданных макросов (команда меню **Инструменты | Макросы идентификаторов...**);
-  чтение значений идентификаторов из файла *.par.

Идентификаторы могут быть прочитаны из *.par файла любой модели. До изменения значения идентификаторов появляется вспомогательное окно, рис. 4.98. Левая часть окна

содержит список идентификаторов, текущие значения которых (в скобках) отличаются от значений в файле. Если снять галочки у некоторых идентификаторов в этом списке, то им новые значения назначаться не будут. Правая часть окна содержит список идентификаторов в файле, которые не содержатся в текущей модели.

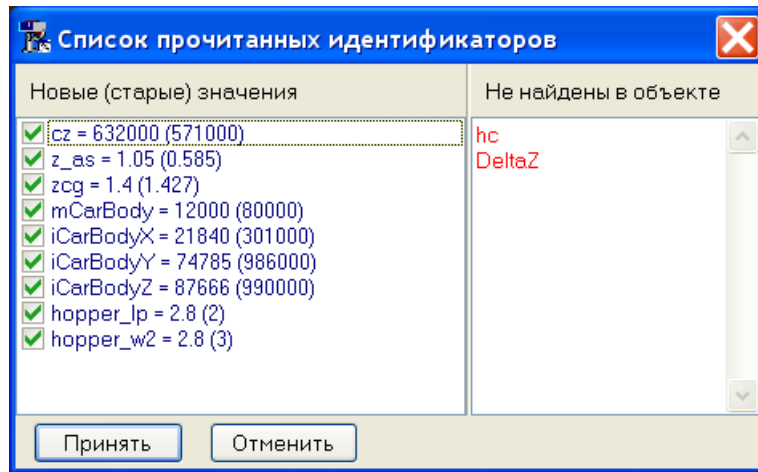
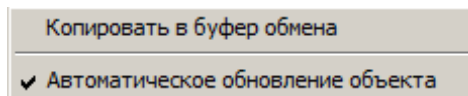


Рис. 4.98. Чтение идентификаторов из файла

Включение и выключение режима автоматического обновления элементов объекта после каждой модификации идентификаторов происходит с помощью контекстного меню; режим следует выключить, если обновление происходит слишком медленно.



Изменение значений одноименных идентификаторов в подсистемах

Если имеются идентификаторы в подсистемах, имеющие то же самое имя, что и модифицируемый идентификатор, то при изменении его значения появляется окно со списком одноименных идентификаторов, с помощью которого можно назначить новое значение всем или некоторым идентификаторам в подсистемах, рис. 4.99. Будут обновлены значения только тех идентификаторов, которые помечены галочками. Так, в примере на рис. 4.99 всем идентификаторам, кроме последнего, будет присвоено новое значение 73000.

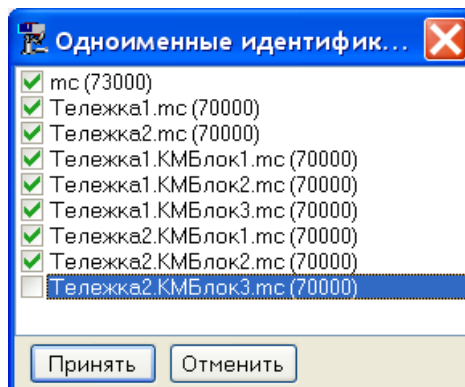


Рис. 4.99. Пример списка одноименных идентификаторов

Контекстное меню списка идентификаторов, рис. 4.97:

- **Назначить всем** назначает значение выделенного идентификатора всем одноименным идентификаторам в подсистемах модели;
- **Назначить выборочно** назначает значение идентификатора выделенным одноименным идентификаторам с помощью окна на рис. 4.99;
- **Копировать в буфер обмена** копирует текущую вкладку идентификаторов в текстовом режиме в буфер обмена.

Доступ к идентификаторам в подсистемах

Для изменения значений идентификаторов в подсистемах модели следует воспользоваться выпадающим списком в верхней части вкладки для выбора нужной подсистемы, рис. 4.100.

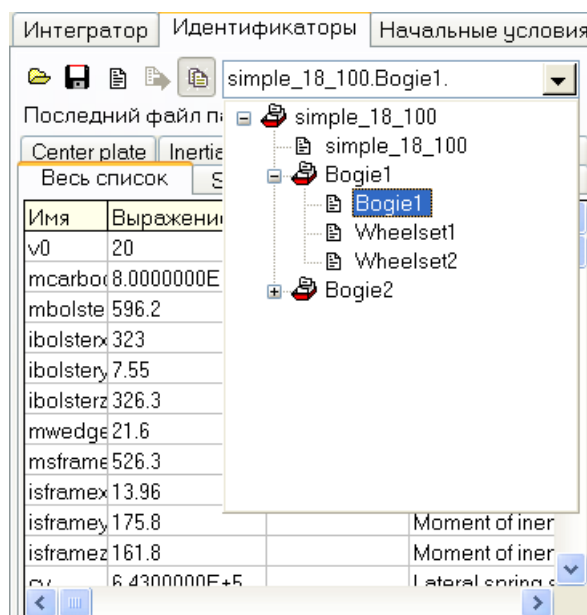



Рис. 4.100. Назначение списка идентификаторов по дереву подсистем

Назначение идентификаторов с помощью макросов

Если текущая модель содержит список макросов идентификаторов, созданных пользователем (п. 4.3.10. "Макросы идентификаторов", стр. 4-103), то кнопка  становится активной, и щелчком на кнопке пользователь получает доступ к отдельным макросам и значениям идентификаторов, рис. 4.101. Выбор значения группы идентификаторов из меню приводит к одновременному изменению значений.

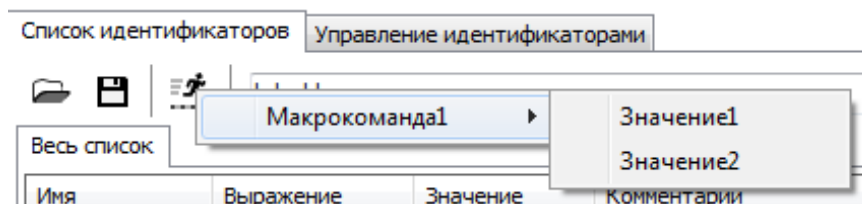


Рис. 4.101. Выбор значений идентификаторов с помощью макроса

Автосохранение идентификаторов

При загрузке модели в программу **UM Simulation** значения параметров модели загружаются из файла `last.par`, если такой найден в каталоге модели, либо из файла данных `input.dat`, как они заданы в программе подготовки моделей **UM Input**. В файл `last.par` сохраняются текущие значения идентификаторов при выходе из программы **UM Simulation**. Файл создается только если включена опция автосохранения идентификаторов, см. п. 4.1.2. "Автосохранение", стр. 4-8. Таким образом, если включена опция автосохранения идентификаторов, то файл `last.par` будет создан при первом же выходе из программы **UM Simulation** и будет загружаться при дальнейшей работе с этой моделью в **UM Simulation**. Обратите внимание, что при дальнейшем изменении значений идентификаторов в программе **UM Input** новые значения параметров будут сохранены в файле `input.dat`, но при открытии модели в **UM Simulation** из `last.par` будут загружены старые значения идентификаторов. Для загрузки моделей в **UM Simulation** со значениями параметров из `input.dat` необходимо удалить или переименовать файл `last.par`.

4.4.1.6. Управление идентификаторами

4.4.1.6.1. Общая информация

Для управления моделью может быть использовать инструмент "Управление идентификаторами", рис. 4.102. Инструмент позволяет задавать значения идентификаторов как функций времени или переменных, созданных с помощью мастера переменных, п. 4.3.2 "Мастер переменных", стр. 4-21. Управление идентификаторами является одним из основных инструментов управления трансмиссией при моделировании автомобилей и гусеничных машин, а также для управления продольным движением поезда.

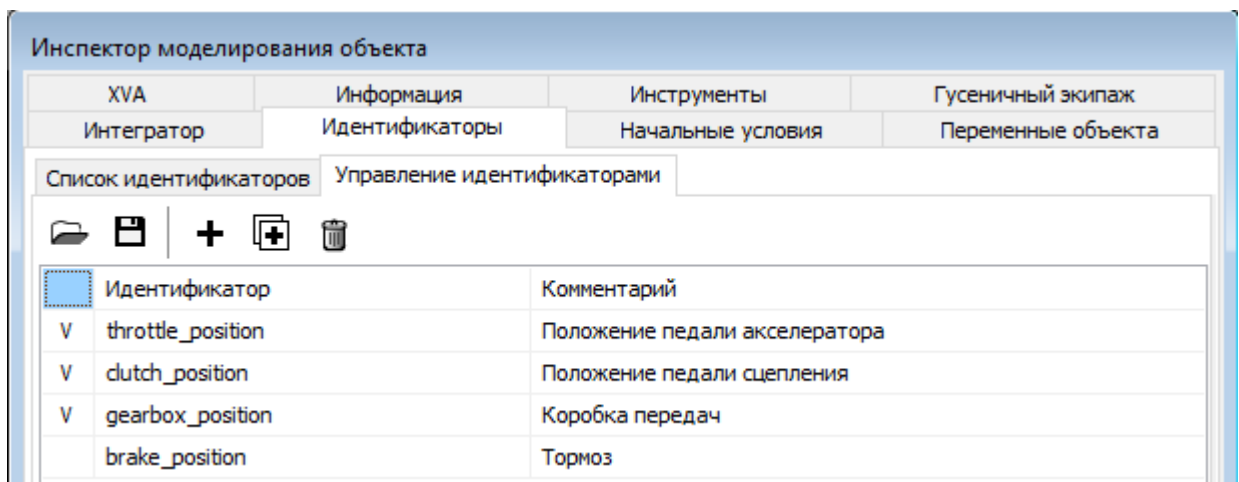


Рис. 4.102. Инструмент управления идентификаторами

С помощью данного инструмента создается список управляемых идентификаторов, который автоматически сохраняется в файле конфигурации модели `*.icf`. Для создания

списка используются кнопки , позволяющие

- сохранять список в файл `*.fic`;
- читать список из ранее созданного файла `*.fic`;

- добавлять новый элемент к списку;
- дублировать текущий элемент;
- удалять текущий элемент.

4.4.1.6.2. Деактивация элемента управления

Элементы списка управления могут деактивироваться и активироваться пользователем щелчком мыши на ячейке в первой левой колонке списка. Активные элементы помечаются галочкой. Например, в списке на рис. 4.102 первые три элемента активны, а четвертый – деактивирован. В процессе моделирования движения активным идентификаторам назначаются численные значения в соответствии с заданными функциями, а деактивированные элементы игнорируются.

4.4.1.6.3. Создание и модификация управления идентификатором

Управление идентификатором

Активен

Обновлять зависимые элементы

Идентификатор

throttle_position

Назначать значение одноименным идентификаторам

Нет Всем В подсистемах

Комментарий

Положение педали акселератора

Ордината

Редактирование кривой

Точек: 8

Тип задания

Точки Переменная

Абсцисса

Переменная

Время

Тип


Время Переменная

Принять Отменить

Рис. 4.103. Параметры элемента управления идентификатором

Окно задания управления появляется после создания нового элемента списка с помощью кнопки **+** или при двойном щелчке правой кнопки мыши на существующем элементе с целью просмотра параметров и/или их модификации, рис. 4.103.

- **Выбор идентификатора**

Для выбора идентификатора из выпадающего списка следует щелкнуть на кнопке , рис. 4.104.

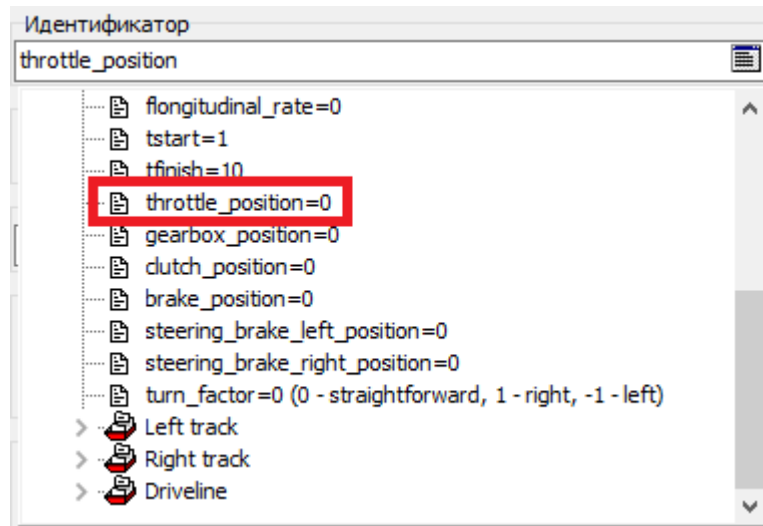


Рис. 4.104. Список идентификаторов модели

• **Поточечное задание идентификатора**

При поточечном задании идентификатора функция строится в окне редактора кривых, рис. 4.105, появляющемся при щелчке на кнопке . При таком задании идентификатора в качестве абсциссы может выбираться либо время, либо переменной, например, пройденный экипажем путь рис. 4.106. Во втором случае переменная, от которой зависит идентификатор, создается с помощью мастера переменных и перетаскивается мышкой в поле переменной, как это указано на рис. 4.106 внизу.

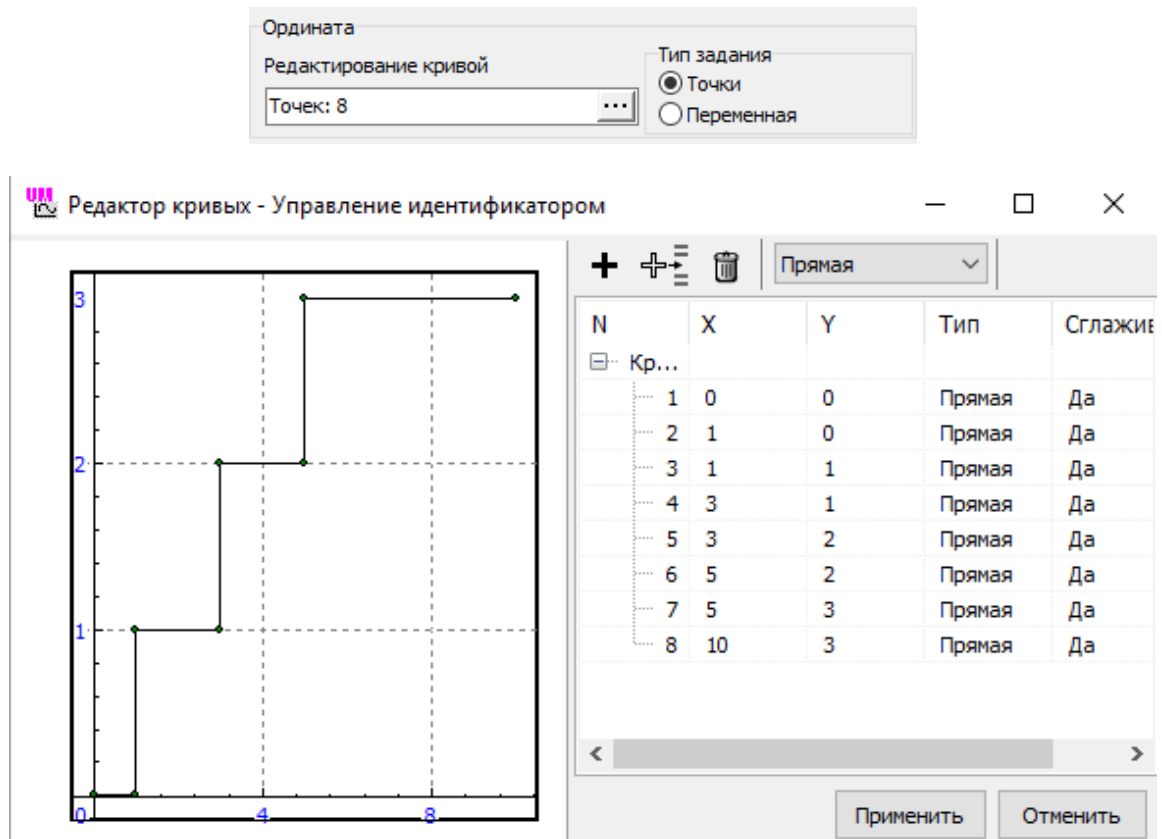


Рис. 4.105. Пример поточечного задания идентификатора

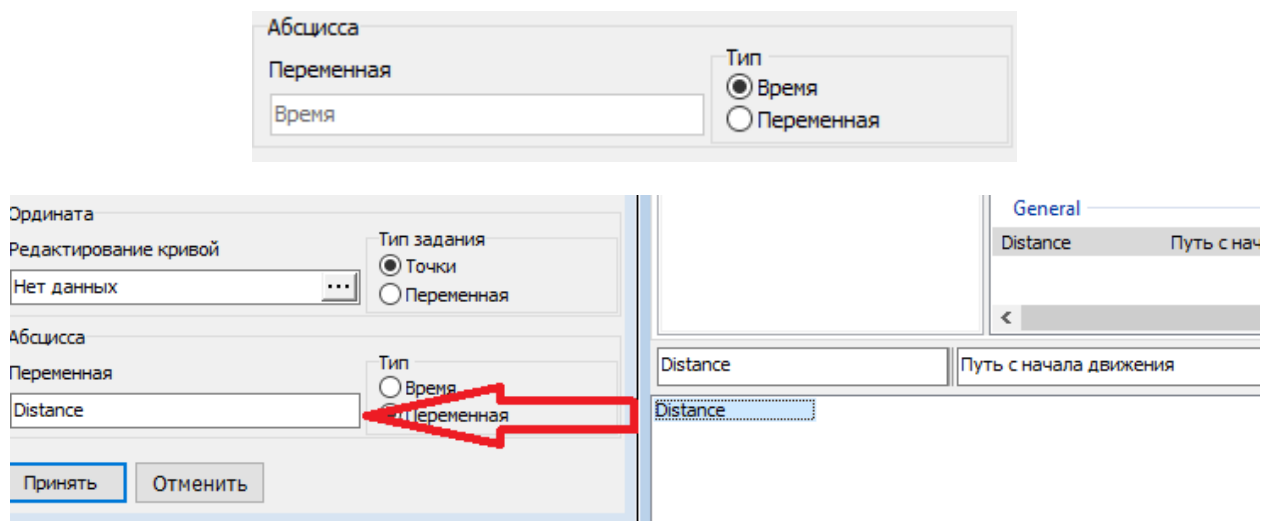


Рис. 4.106. Тип задания абсциссы

- **Задание идентификатора с помощью переменной**

В этом случае идентификатор может быть функцией положений и скоростей тел модели, а также других идентификаторов. Зависимость формируется с помощью мастера переменных и перетаскивается мышкой в поле **Назначенная переменная**, аналогично рис. 4.106. При таком задании идентификатора абсцисса может быть только временем, рис. 4.107.

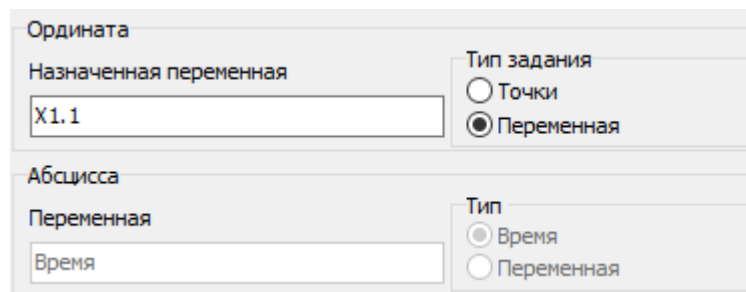


Рис. 4.107. Задание идентификатора с помощью переменной

- **Обновление зависимых элементов**

Если идентификатор входит в параметризацию силовых элементов, то следует включить опцию обновления.

- **Работа с одноименными идентификаторами**

При наличии в модели подсистем могут присутствовать идентификаторы, имеющие то же самое имя, что и выбранный идентификатор. С помощью радиогруппы пользователь может выбрать режим работы с одноименными идентификаторами, рис. 4.108:

- **Нет** – назначается только значение выбранного идентификатора
- **Всем** – значение задается всем идентификаторам модели с таким же именем;
- **В подсистемах** – задаются значения выбранного идентификатора и всех одноименных идентификаторов, входящих в подсистемы, которые включены в подсистему выбран-

ного идентификатора. Например, модель включает три подсистемы, каждая из которых соответствует вагону. С помощью этого режима можно одновременно управлять одноименными идентификаторами только одного вагона.

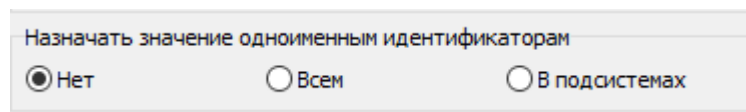


Рис. 4.108. Варианты работы с одноименными идентификаторами

4.4.1.7. Выбор и автоматическое вычисление начальных условий

4.4.1.7.1. Общие понятия

Выбор начальных условий является важной частью подготовки механической системы к процессу интегрирования. Для систем, имеющих структуру дерева, эта операция не представляет особых проблем, поскольку в этом случае все шарнирные координаты являются независимыми (исключением являются системы, содержащие *кватернионные шарниры*, в которых элементы *кватерниона* связаны известным алгебраическим соотношением). Для систем с замкнутыми кинематическими цепями подбор начальных значений координат и скоростей осложнен тем, что координаты и их производные по времени не являются независимыми, а удовлетворяют уравнениям связей. Поскольку алгебраические уравнения связей являются нелинейными, нахождение их решения представляет определенную проблему.

Программа предоставляет возможность автоматического определения начальных условий при наличии уравнений связей, используя метод Ньютона-Рафсона для решения нелинейных уравнений связей. Однако ситуация усложняется тем, что система нелинейных уравнений может не иметь решения а может иметь несколько. Кроме того, метод Ньютона-Рафсона в некоторых случаях может не найти решения, если неудачно задано начальное приближение. Тем не менее, определение начальных условий возможно, если руководствоваться изложенным ниже подходом, и задача определения начальных условий вообще корректна (то есть если моделируемый механизм технически реализуем).

Введем основные понятия.

Объект имеет *избыточные координаты*, если он имеет замкнутые кинематические цепи (замкнутые контуры), контактные или фиктивные шарниры. Избыточность координат означает, что они не могут принимать произвольные значения, то есть являются *зависимыми*. Уравнения, которым удовлетворяют избыточные координаты, называются *уравнениями связей*. Как правило, это сложные нелинейные алгебраические уравнения. Для систем с замкнутыми кинематическими цепями часть шарниров *«разрезается»*, и уравнения связей являются условиями замыкания разрезанных шарниров. Локальные координаты в неразрезанных шарнирах называются *основными*, в разрезанных – *вспомогательными*. Решать уравнения связей аналитически в большинстве случаев невозможно из-за трансцендентности уравнений. Поэтому точные значения координат являются заранее неизвестными и могут быть получены только численным путем. Расчет конфигурации механизма и означает автоматизированное решение уравнений связей.

Для решения уравнений связей, то есть для расчета конфигурации механизма, в УМ используется итерационный метод Ньютона-Рафсона, использующий в качестве начального приближения значения координат, заданные пользователем. Численное решение систем нелинейных алгебраических уравнений является нетривиальной задачей: уравнения могут иметь несколько решений, часть из которых может не устраивать пользователя, уравнения могут вообще не иметь решения (в этом случае пользователь ошибся либо при описании кинематической схемы объекта, либо при задании его геометрических парамет-

ров). Сходимость метода Ньютона-Рафсона в значительной степени определяется близостью начального приближения к точному решению. Перечисленные проблемы в большинстве случаев можно легко решить, если следовать изложенным ниже инструкциям.

4.4.1.7.2. Окно задания начальных условий

Работа с мастером автоматизированного выбора начальных данных (см. рис. 4.109) требует определенных навыков.

Рассмотрим группы полей и кнопок мастера.

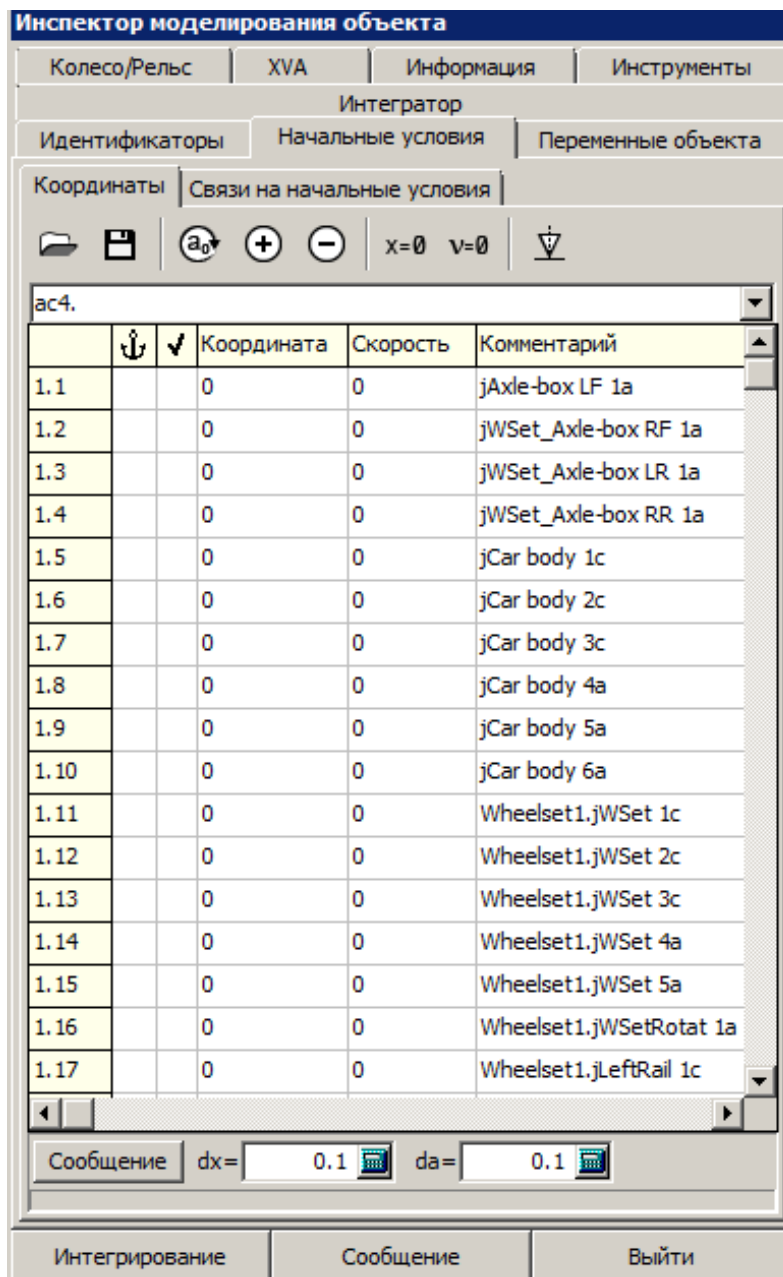


Рис. 4.109. Задание начальных условий

Параметры и значки таблицы значений координат и скоростей

Столбец – столбец ключей фиксации координат. Пользователь может *фиксировать* одну или несколько координат, щелкнув мышкой на поле с идентификатором координаты. Признаком фиксации – в соответствующем поле. Фиксировать можно только *основные координаты*. Фиксация игнорируется для систем без избыточных координат. Для систем с

избыточными координатами фиксация переменной означает, что запрещается изменение ее значения в процессе решения уравнений связей.

Значком **✗** помечаются координаты в разрезанных шарнирах, рис. 4.109.

Столбец **✓** – одна или несколько *основных* координат могут быть *выделены*. Выделение используется для пошагового изменения значений координат с автоматическим расчетом конфигурации и перерисовкой объекта в анимационных окнах при щелчке на кнопках **+** и **-**. Шаг изменения координаты устанавливается для линейных и угловых координат в полях **da** (для угловой переменной) и **dx** для линейной.

Столбцы **Координата**, **Скорость** содержат текущие значения координат и их первых производных по времени. Допускается прямое внесение значений в поля таблицы. Координаты упорядочены по их номерам в списке координат объекта.

			Coordinate	Velocity	Comment
1.1			2.03858431631E-7 20		jCar body 1c
1.2			-4.74035578186E-60		jCar body 2c
1.3			-0.000163869403450		jCar body 3c
1.4			-7.71374304487E-60		jCar body 4a
1.5			-6.98408015903E-60		jCar body 5a

Рис. 4.110. Комментарии к координатам

Столбец **Комментарий** содержит имена шарниров и некоторые сведения о координатах. Например, угловая степень свободы отмечается буквой *a*, а поступательная - буквой *c*. Дополнительно указывается порядковый номер координаты в пределах шарнира. Например, 4a соответствует четвертой по порядку координате, угловой степени свободы.

- Задание нулевых значений координатам и скоростям**

Кнопки устанавливают нулевые значения координатам и скоростям.



- Расчет координат в положении равновесия**

Кнопка вызывает функцию расчета положения равновесия модели.

- Расчет текущих значений координат**

Кнопки используются для отображения в анимационном окне конфигурации объекта при текущих значениях координат (кнопка) , а также с пошаговым уменьшением () или увеличением () выделенных координат. При наличии избыточных координат предварительно производится решение уравнений связей с использованием текущих значений координат в качестве первого приближения.

- Запись начальных условий в файл и чтение из файла**

Кнопки   осуществляют чтение из файла и запись в файл значений координат и скоростей. Бинарные файлы со значениями данных величин имеют расширение *.xv.


- **Автоматическое сохранение начальных условий в файле last.xv**


При включении соответствующей настройки, значения координат и скоростей на момент закрытия модели автоматически сохраняются в файле last.xv, п. 4.1.2. "Автосохранение", стр. 4-8.

- **Список команд контекстного меню, рис. 4.109**

Сохранить фиксацию. Команда записывает в файл *.fix (файл фиксации) индексы координат, для которых установлен признак фиксации. Инструмент используется, главным образом, для автоматизации расчета начальных условий моделей, включающих силовые элементы – зубчатые зацепления, п. 4.4.1.7.5. "Расчет начальных условий при наличии зубчатых зацеплений. Файл фиксации", стр. 4-130.

Прочитать фиксацию. Читает ранее созданный файл фиксации.

Обнулить координаты. Задаёт нулевые значения координатам, как и кнопка .


Обнулить скорости. Задаёт нулевые значения скоростям, как и кнопка .



Координаты из файла данных. Устанавливает значения координат из файла описания модели input.dat.

Сообщение INITIAL_MESSAGE. Подает сообщение в файл управления с указанным ключом, так же как и верхняя кнопка **Сообщение** на рис. 4.109. Используется только при программировании в файле управления, см. [Главу 5](#).

Замечание. При автоматическом решении уравнений связей значения координат будут изменены. Если требуется оставить неизменными некоторые координаты, их следует фиксировать.

4.4.1.7.3. Задание начальных условий для систем без избыточных координат






Рассмотрим процедуру задания начальных условий для простого объекта без замкнутых кинематических цепей. В соответствующие поля следует внести численные значения координат и нажать кнопку . В анимационном окне после этого действия объект будет изображен при новых значениях координат. Можно перерисовывать объект с пошаговым изменением одной или нескольких координат. Для этого *выделите* нужные координаты.

После этого при нажатии кнопки  будет происходить пошаговое уменьшение, а кнопки  – увеличение выделенных координат. Шаг изменения угловой $d\alpha$ и линейной dc координаты задается в соответствующих полях.

4.4.1.7.4. Расчет начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями

Расчет начальных условий для систем с замкнутыми цепями происходит значительно сложнее, чем для систем со структурой дерева. В этом случае для численного решения нелинейных уравнений связей используется итерационный метод Ньютона-Рафсона

(Глава 2, п. *Теоретические основы расчета начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями*).

Для старта используется кнопка . После того, как программа успешно рассчитала конфигурацию механизма, можно использовать функцию пошагового увеличения/уменьшения координат. Рекомендуется изменять пошагово только одну координату. Для этого *выделите* и *зафиксируйте* координату (в соответствующей строке должны стоять  и ) и щелкните мышью на одну из кнопок , .

В процессе расчета можно фиксировать (то есть запрещать изменяться) несколько координат, *но не больше, чем число степеней свободы объекта*.

Кратко рассмотрим действия, которые пользователю рекомендуется предпринять в ситуации, когда программа сообщает о неудаче при попытке рассчитать конфигурацию объекта.

Уравнение связей не имеет решения. При ошибочном описании механизма с замкнутыми кинематическими цепями или при неудачном задании геометрических размеров может возникнуть ситуация, когда уравнения замыкания разрезанных шарниров (уравнения связей) не имеют решения, то есть механизм не может быть реализован. УМ не может отличить такую ситуацию от случая, когда решение системы уравнений методом Ньютона-Рафсона не определяется из-за неудачно заданного начального приближения и посылает стандартное сообщение о том, что итерации не сходятся. Пользователь должен самостоятельно разобраться в такой ситуации и выполнить корректировку описания модели или численных значений параметров.

Решение уравнений связей не найдено из-за неудачно выбранного начального приближения. Измените значения координат с использованием окна на рис. 4.109, приблизив конфигурацию к желаемой, и выполните расчет конфигурации заново.

Уравнения связей не имеют решения при заданном наборе фиксированных координат. Если пользователь зафиксировал некоторый набор координат, то они не могут изменяться в процессе итераций при решении уравнений связей. При этом может возникнуть ситуация, которая описана в первом пункте, то есть уравнения связей не имеют решения. Снимите фиксацию и заново проведите расчет конфигурации. В общем случае рекомендуется сначала рассчитать конфигурацию без фиксации координат, определить число степеней свободы и в дальнейшем следить за тем, чтобы число зафиксированных координат не превосходило число степеней свободы.

Программа рассчитала конфигурацию, которая не устраивает пользователя. Эта проблема связана с неоднозначностью решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Используя мастер задания начальных условий (рис. 4.109), подберите значения координат, близкие к желаемой конфигурации механизма и повторите расчет.

Текущая конфигурация механизма является вырожденной. Некоторые положения механизма с избыточными координатами могут быть *вырожденными*. В этих положениях понижается ранг матрицы Якоби уравнений связей, и метод Ньютона-Рафсона не может найти решение, если начальное приближение соответствует вырождению. Измените произвольным образом значения всех координат, выводя тем самым механизм из вырожденного положения, и проведите расчет конфигурации.

Замечание. В случае сложного объекта с большим числом замкнутых кинематических цепей рекомендуется записать в файл удачно найденную начальную конфигурацию для дальнейшего использования.

4.4.1.7.5. Расчет начальных условий при наличии зубчатых зацеплений. Файл фиксации

Если модель содержит зубчатые зацепления, в частности, планетарные механизмы, то в ряде случаев для автоматизации корректного расчета угловых скоростей тел удобно использовать так называемых **файл фиксации**, то есть файл, содержащий индексы координат, фиксируемых при расчете начальных условий.

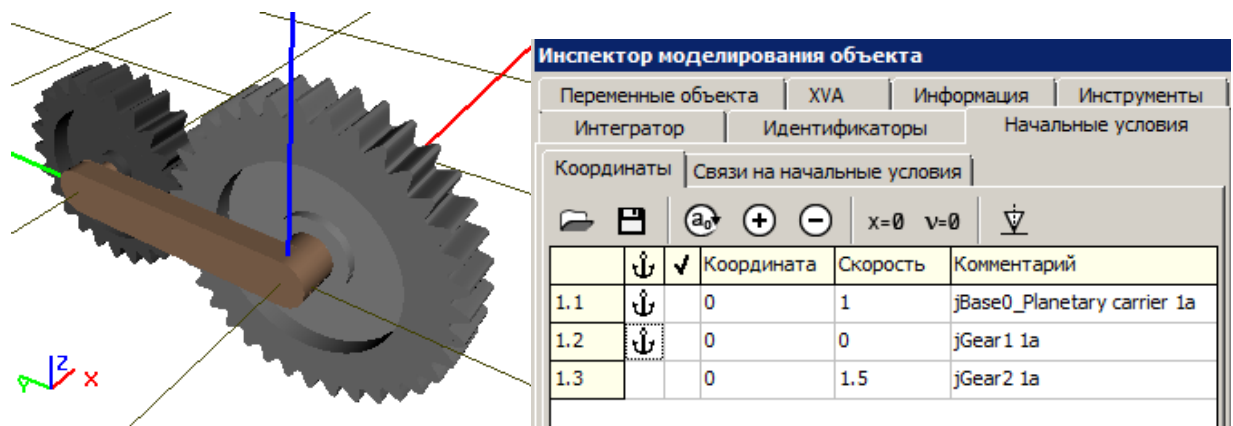


Рис. 4.111. Модель планетарной передачи и список координат

Приведем простой пример для пояснения смысла файла фиксации. Рассмотрим простейший планетарный механизм, содержащий водило и две шестерни, находящие в зацеплении, рис. 4.111, модель [{Данные УМ}\Samples\Library\Planetary gear](#). Три шарнира вводят три вращательные степени свободы:

- вращение водила относительно СК0 (jBase0_Planetary carrier 1a),
- вращение центральной шестерни относительно СК0 (jGear1 1a),
- вращение сателлита шестерни относительно водила (jGear2 1a).


Производные от шарнирных координат связаны соотношениями

$$\omega_1 r_2 - \omega_2 r_2 - \omega_3 r_3 = 0,$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – угловые скорости (ω_3 – это угловая скорость сателлита относительно водила), индексы соответствуют положению соответствующей координат в списке на рис. 4.111, r_2, r_3 – радиусы центральной шестерни и сателлита.

Программа пытается автоматически решить это уравнение, выразив одну из угловых скоростей через две другие. Если не указать программе, какую угловую скорость из трех рассчитывать, то она сделает это произвольным образом. Например, выразит угловую скорость водила через угловые скорости шестеренок.

Как правило, рассчитываться должна конкретная угловая скорость, например, угловая скорость сателлита ω_3 по заданной угловой скорости водила ω_1 и центральной шестерни ω_2 . Фактически это означает, что при решении уравнения для скоростей две скорости

ω_1, ω_2 не должны меняться. Для этого следует их зафиксировать значком  в первой колонке таблицы координат, как это и сделано на рис. 4.111.

После выбора зафиксированных координат индексы фиксации следует сохранить в файл с именем задачи и с расширением fix (файл фиксации) с помощью команды контекстного меню **Сохранить фиксацию**, рис. 4.109. При наличии такого файла в каталоге модели программа будет автоматически подгружать его при определении начальных условий и корректно рассчитывать угловые скорости тел.

Замечание 1. Использование файла фиксации при расчете начальных скоростей локомотива см. в [Главе 8](#), п. *"Расчет начальных угловых скоростей с помощью файла фиксации"*.

Замечание 2. При изменении числа координат в модели ранее созданный файл фиксации будет игнорироваться, и его следует создать заново.

4.4.1.7.6. Связи на начальные условия

Вкладка позволяет задать соотношения для расчета значений координат и скоростей, в том числе в зависимости от идентификаторов, рис. 4.112.

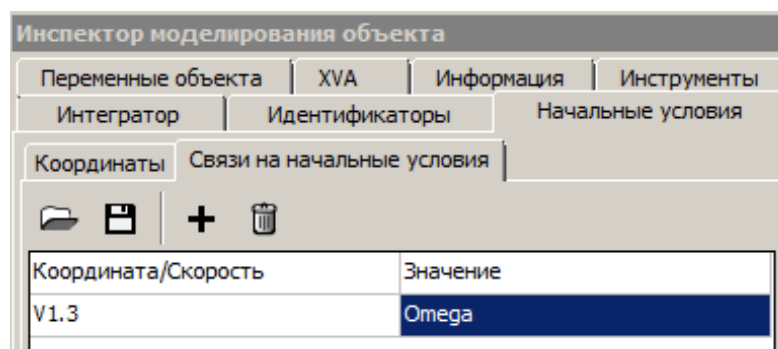


Рис. 4.112. Список связей на начальные условия

Для создания списка связей, его сохранения в файл и чтения из файла используется набор кнопок в верхней части таблицы. Таблица содержит две колонки, в которые пользователь вносит переменные, созданные с использованием мастера переменных, п. 4.3.2. *"Мастер переменных"*, стр. 4-21:

- в левую колонку вносятся переменные, соответствующие шарнирным координатам и скоростям, п. 4.3.2.1. *"Координаты"*, стр. 4-23;
- в правую колонку вносится переменная, являющаяся начальным значением координаты или скорости, помещенной в правую колонку.

В качестве примера рассмотрим альтернативный файлу фиксации способ задания начального значения скорости спутника, рассмотренного в п. 4.4.1.7.5. *"Расчет начальных условий при наличии зубчатых зацеплений. Файл фиксации"*, стр. 4-130.

Угловая скорость ω_3 рассчитывается по формуле

$$\omega_3 = (\omega_1 - \omega_2) \frac{r_2}{r_3}.$$

С помощью вкладки **Выражение** мастера переменных (рис. 4.113) эта формула программируется в виде переменной Omega и переносится в правый столбец на рис. 4.112. В качестве операндов в выражениях использованы

- переменные V1.1, V1.2 – шарнирные скорости;
- переменные – идентификаторы радиусов шестеренок r2, r3, п. 4.3.2.9. *"Идентификаторы"*, стр. 4-49.

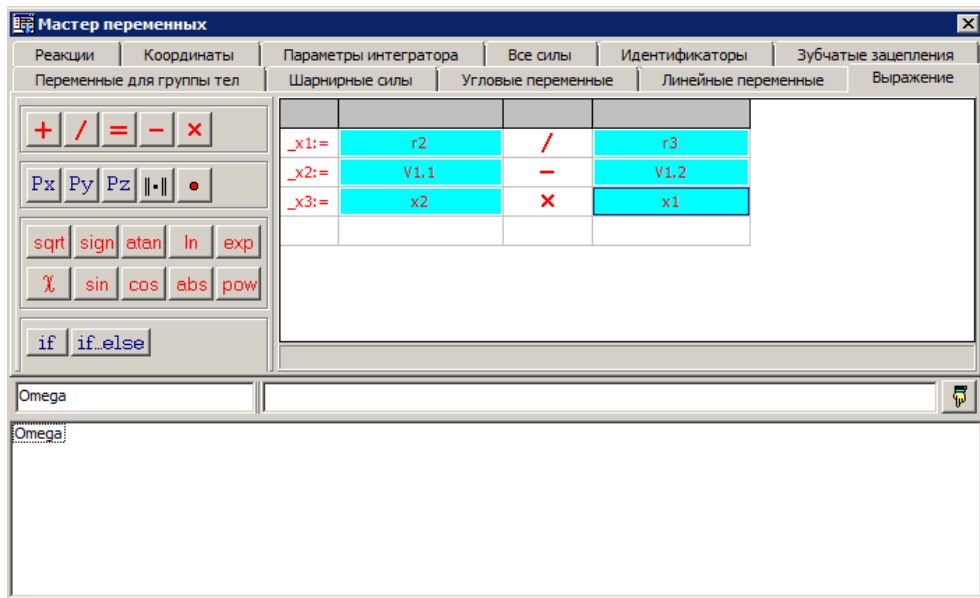


Рис. 4.113. Выражение для расчета угловой скорости спутника

Замечание 1. Использование связей на начальные условия при расчете начальных скоростей локомотива см. в [Главе 8](#), п. "Расчет начальных угловых скоростей с помощью связей на начальные условия".

4.4.1.7.7. Расчет интервала допустимых значений координат

Автоматический расчет конфигурации может быть использован для определения границ интервала изменения координат. Поясним методику на примере кривошипно-ползунного механизма (рис. 4.92). Угол поворота шатуна относительно ползуна (то есть локальная координата в соответствующем шарнире) является ограниченным. Рассчитайте конфигурацию в некотором произвольном положении. Затем зафиксируйте и выделите координату, соответствующую исследуемому углу. Выполняйте расчет конфигурации с увеличением (а затем – с уменьшением) значения координаты, щелкая на одну из кнопок **+**, **-** до тех пор, пока программа не сообщит о невозможности решения уравнения связей (в этом случае угол перейдет за границу области определения). При необходимости уменьшите шаг приращения угла, чтобы получить более точные граничные значения.

Замечание. Описанный метод может быть использован только для *основных* координат, то есть для координат в неразрезанном шарнире.

4.4.1.8. Тест для начальных значений сил


Для проверки корректности модели и ее параметров используется инструмент **Тест сил**. С помощью этого инструмента пользователь получает возможность определить значения сил во всех силовых элементах на момент старта моделирования с заданными начальными условиями. Для проведения этого теста необходимо зайти в Инспекторе моделирования объекта на вкладку **Инструменты | Тест** и щелкнуть на кнопке **Выполнить**, рис. 4.114. Корректность модели определяется сравнением значений сил полученных при тесте и ожидаемых значений.


Идентификаторы		Начальные условия		Переменные объекта	
Интегратор					
Колесо/Рельс		ХВА		Информация	
Инструменты					
Тест					
Силы					
Сила	Fx	Fy	Fz		
Объект: OW_UWZ					
Пятник11	0	0	0		
Пятник12	0	0	0		
Пятник13	0	0	0		
Пятник14	0	0	0		
Пятник21	0	0	0		
Пятник22	0	0	0		
Пятник23	0	0	0		
Пятник24	0	-9.935E0004	-0.001425		
Тележка1.кБукса1Л	-0.0001653	2.862	-5.527E0004		
Тележка1.кБукса1П	-3.912E-0005	0.6774	-1.308E0004		
Тележка1.кБукса2П	0	0	0		
Тележка1.кБукса2Л	-6.646E-0005	1.151	-2.196E0004		
Тележка1.ПятникВерт	0	0	0		
Тележка1.СкользунЛ	0	0	0		
Тележка1.СкользунП	0	0	0		

Выполнить

Рис. 4.114. Тест для сил

4.4.1.9. Включение и выключение сил. Ключ жесткости силовых элементов

Пользователь может **выключить из расчета любые силы**. Для этого на вкладке **Инструменты | Силы** следует снять галочки у выключаемых сил в первом столбце с маркером , рис. 4.115. Список выключенных сил сохраняется в файле конфигурации модели *.icf.

При включенной опции расчета матриц Якоби рекомендуется для ускорения процесса моделирования выключать расчет этих матриц для нежестких силовых элементов, которыми обычно являются пружины и гасители системы подвески, характеристики тяговых двигателей, индикаторные диаграммы и т.д. Для этого следует снять галочки у нежестких сил во втором столбце с маркером . Список нежестких сил сохраняется в файле конфигурации модели *.icf.

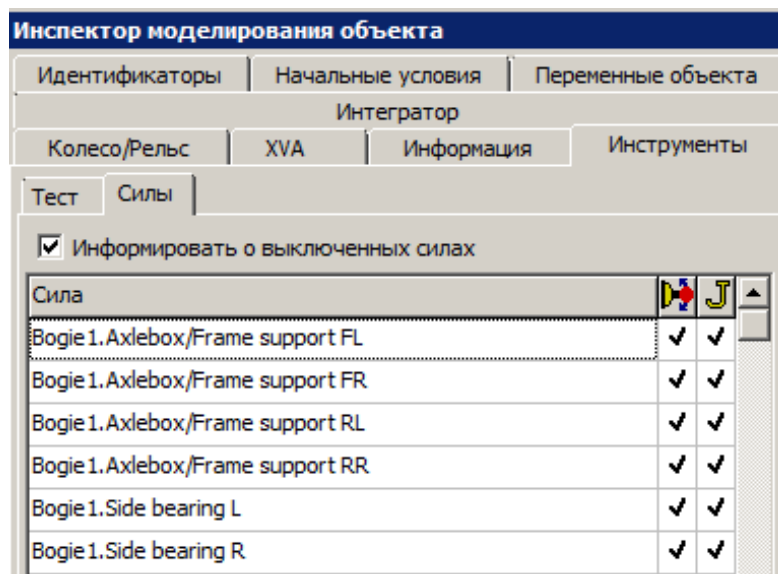


Рис. 4.115. Список сил для включения/выключения и задания признака жесткости

4.4.1.10. Назначение и использование списка автоматически рассчитываемых переменных

С использованием *автоматически рассчитываемых переменных* (**Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта**) пользователь получает доступ к одной из основных форм хранения и обработки результатов численного моделирования движения объекта.

Для автоматического сохранения переменных в процессе моделирования поставьте галочку в поле **Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта | Автоматическое сохранение** переменных и наполните список как обыкновенный **Список переменных** (п. 4.3.3.2. "*Наполнение списка переменных*", стр. 4-64).

В процессе интегрирования уравнений движения значения всех переменных из списка **Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта** будут сохранены в файлах *.sgr и *.tgr. Первый файл с расширением tgr содержит текстовую информацию о типах переменных, второй (расширение sgr) – файл значений переменных.

Используйте функцию **Сохранить в файл** для задания имени файла.

В процессе интегрирования и после его окончания переменные доступны для их отображения в виде графика и для анализа с помощью табличного процессора (п. 4.3.7.1. "*Табличный процессор*", стр. 4-90). Более того, рассчитанные переменные могут быть проанализированы в любой момент, в том числе и при моделировании *другой задачи* (пользователь должен помнить или записать, какой расчет содержится в файлах, для этого может быть использовано смысловое задание имя файла с рассчитанными переменными).

Опишем методику работу со списком автоматически рассчитываемых переменных.

Список выбирается, модифицируется или создается перед стартом процесса численного интегрирования уравнений движения. Созданный список рекомендуется записать под именем, который в последующем позволит восстановить смысл текущего расчета.

После старта процесса интегрирования модификация и удаление списка становится невозможным вплоть до прерывания процесса.

В процессе численного интегрирования, а также после его окончания переменные из списка могут быть перенесены в графическое окно или проанализированы во встроенном *табличном процессоре*. В графическом окне переменные, перенесенные из списка автоматически рассчитываемых переменных, приобретают статус рассчитанных переменных.

При последующих стартах процесса интегрирования можно использовать ранее открытый список автоматически рассчитываемых переменных, но при этом пользователь должен следить за привязкой списка к имени файла и при необходимости (чтобы не перекрыть предыдущий расчет) сохранять его под новым именем.

Списки ранее рассчитанных переменных можно использовать для сравнения результатов расчетов одной модели при различных значениях параметров, начальных условий или для сравнения результатов моделирования различных объектов. Для этого используются списки переменных (команда меню **Инструменты | Список переменных**). Открыв список, прочитайте соответствующий файл с расширением tgr. Переменные списка будут доступны для переноса как в графические окна, так и в табличный процессор.

4.4.1.11. Настройка параметров 3D контакта

Вкладка **3D Контакт** появляется в **Инспекторе моделирования объекта** если модель механической системы включает по крайней мере два тела с описанным контактным многообразием (рис. 4.116). Подробнее об описании контактных многообразий см. *Ввод тел/Контактов* [Главе 3](#) руководства пользователя.

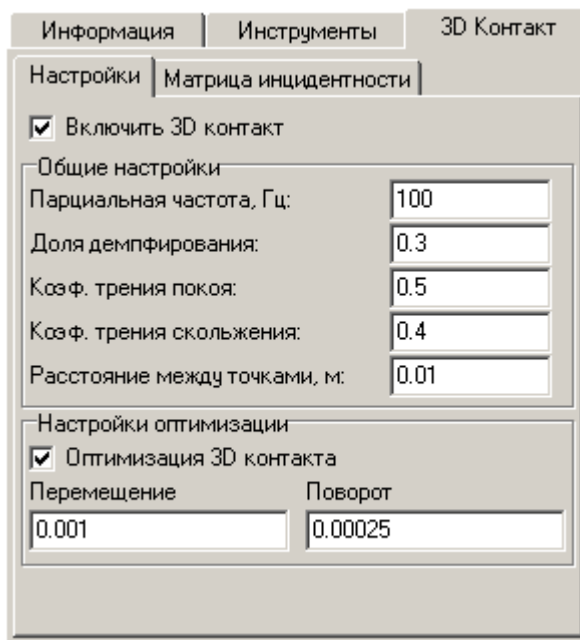


Рис. 4.116. Настройки параметров контактного взаимодействия

Общие настройки.

Через параметры **Парциальная частота** и **Доля демпфирования** вычисляются величины жесткости и демпфирования в контакте между парой тел по следующим формулам:

$$c = 4\pi^2 k^2 m, \quad v = 2\beta\sqrt{ct}, \quad \text{где}$$

c – контактная жесткость, Н/м; k – парциальная частота, Гц; m – масса меньшего из пары тел, кг; v – коэффициент демпфирования в контакте, Нс/м; β – доля демпфирования от критического. Подробную информацию о выборе парциальной частоты и доли демпфирования см. в [Главе 2](#), *Методика расчета параметров контакта*.

Коэффициент жесткости и демпфирования вычисляется для каждой пары тел. Рекомендуемые значения для **парциальной частоты** лежат в интервале 50÷500 Гц. Малые значения этого параметра могут привести к большим контактным внедрениям тел. Высокие значения парциальной частоты приведут к замедлению процесса численного интегрирования уравнений движения. Рекомендуемые значения для доли демпфирования составляют от 0,05 до 0,5. Малые значения соответствуют упругому, большие – неупругому удару.

Параметр **Расстояние между точками** (м) имеет смысл расстояния между соседними контактными точками на ребре. Рекомендуется выбирать такое значение этого параметра, чтобы на ребре характерной длины помещалось от 2 до 6 контактных точек.

При выборе величин **парциальной частоты и доли демпфирования** следует учитывать значение параметра **Расстояние между точками**. Чем больше одновременно работающих контактных точек между парой тел, тем выше эффективная контактная жесткость между ними. Контактные точки фактически работают как параллельно установленные пружины и демпферы. Поэтому при уменьшении расстояния между точками рекомендуется пропорционально снижать парциальную частоту. Вместе с тем следует помнить, что при увеличении количества контактных точек эффективный коэффициент диссипации между двумя телами увеличивается быстрее количества контактных точек ввиду нелинейной зависимости между коэффициентами диссипации и жесткости, см. формулы выше.

Настройки оптимизации

Суть **Оптимизации 3D контакта** заключается в том, что если относительное положение пары тел не изменилось или мало изменилось с момента предыдущего вызова процедуры ближнего контакта, то этот этап, затратный с точки зрения вычислительных ресурсов, можно пропустить. Действительно, процедура расчета ближнего контакта выполняет трехмерное отсечение по алгоритму Сайруса-Бека и расставляет контактные точки на внедренных ребрах каждого тела. Вместе с тем процедура расчета контактных сил выполняется на каждом шаге численного метода, независимо от того, был или нет выполнен расчет ближнего контакта. Таким образом, малые изменения относительно положения тел при включенной **оптимизации 3D контакта** будут корректно обработаны в процедуре расчета контактных сил.

Параметры **Перемещение** и **Поворот** имеют смысл пороговых значений, при которых выполняется пересчет ближнего контакта. **Перемещение** ограничивает изменение любого элемента вектора относительного положения пары тел, **Поворот** – изменение любого элемента относительной матрицы поворота.

Большие значения этих параметров могут приводить к артефактам при расчете контактных сил – контактные точки появляются с уже значительным внедрением, что скачками меняет главный вектор контактных сил. Малые значения параметров приводят к неоправданно большим вычислительным затратам на расчет ближнего контакта.

Матрица инцидентности.

По умолчанию устанавливается режим контакта **Все со всеми**, при котором применяются **Общие настройки**. При необходимости для некоторых пар тел можно отключать контактное взаимодействие, а также индивидуально менять параметры этого взаимодействия. Для этого в выпадающем списке **Режим взаимодействия контактных примитивов** необходимо выбрать пункт **Ручные настройки**, после чего в диалоговом окне, представленном на рис. 4.117, можно указать параметры контактного взаимодействия для любой пары тел.

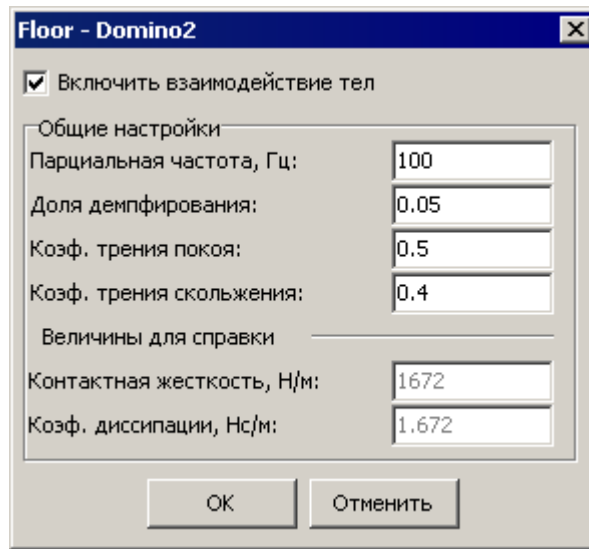


Рис. 4.117. Настройки параметров контактного взаимодействия между парой тел

Настройки

Если в начале моделирования взаимодействующие контактные многообразия имели заметное относительное внедрение, в таком случае будет иметь место «взрыв» контактных сил, при котором большое взаимное проникновение приведет к большим контактным силам, которые скорее всего приведут систему в нерабочее состояние. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо либо четко контролировать начальное взаимное положение тел механической системы, либо отключать взаимодействие контактирующих пар тел.

Для автоматизации подобных действий предназначены следующие кнопки быстрого доступа на вкладке **Матрица инцидентности**:



– выдает список пар тел, контактирующих в данный момент;




– переводит режим взаимодействия контактных примитивов в ручной режим и отключает взаимодействие у тех пар тел, которые контактируют в данный момент.

Этими возможностями следует пользоваться до запуска процесса моделирования для предотвращения ситуации, приводящей к «взрыву» контактных сил.


Еще одна возможность предотвращения «взрыва» контактных сил заключается в том, что все контактные взаимодействия в течение первых T секунд моделирования будут игнорироваться, а контакт между взаимодействующими парами тел будет отключаться, подробнее см. группу настроек **Контакт | Матрица инцидентности | Настройки**.

Рекомендации

Для лучшего понимания процессов, протекающих в модели при расчете 3D контакта, для определения положения точек контакта, величины и направления контактных сил и т.д. рекомендуется пользоваться следующими возможностями программы.

- Контактные силы, рассчитанные по модели 3D контакта можно визуализировать в анимационном окне программы **UM Simulation**. Для этого (1) наведите мышку на тело (убедитесь, что **Режим выбора элементов с помощью мыши** включен, ) и выберите в контекстном меню пункт **Показать силы для [Имя_тела]**, либо (2) в Ма-

стере переменных перейдите на вкладку **Все силы | Множества векторов**, выберите интересующее вас тело в списке слева и необходимые опции в группах **Типы сил** и **Действуют**, см. рис. 4.118. Обратите внимание, что контактные силы относятся к **Активным** силам, поэтому для визуализации в анимационном окне необходимо включить только флажок **Активные** из группы **Типы сил**. Вместе с тем, в этом случае будут показаны все активные силы, действующие на тело, а не только контактные силы, в том числе, например, силы тяжести и т.д. Подробнее о построении векторов сил в анимационных окна см. п. 4.3.6.4. "Визуализация векторов/траекторий", с. 4-86.

- Выключать отображения графических образов тел с помощью пункта «**Режимы изображения тел**→**Видимые/Невидимые**» контекстного меню анимационного окна, см. рис. 4.119.
- Используйте кнопку *Каркас*  на панели инструментов анимационного окна для включения каркасного изображения тел, которое позволит видеть векторы контактных сил, действующих на тело, находящиеся полностью или частично внутри графического образа тела, сравните изображения фрикционного клина на рис. 4.119 снизу.

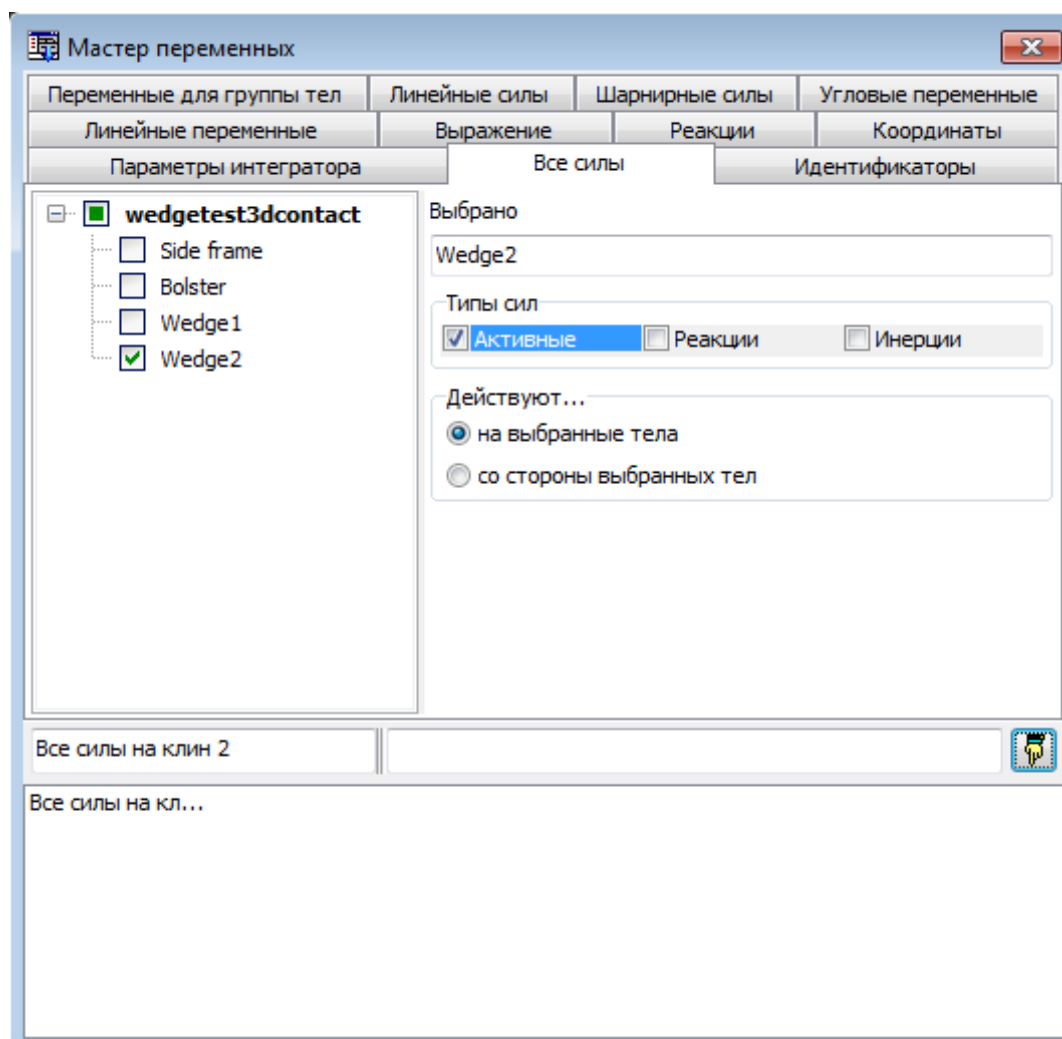


Рис. 4.118. Создание множества векторов сил, действующих на тело Wedge2

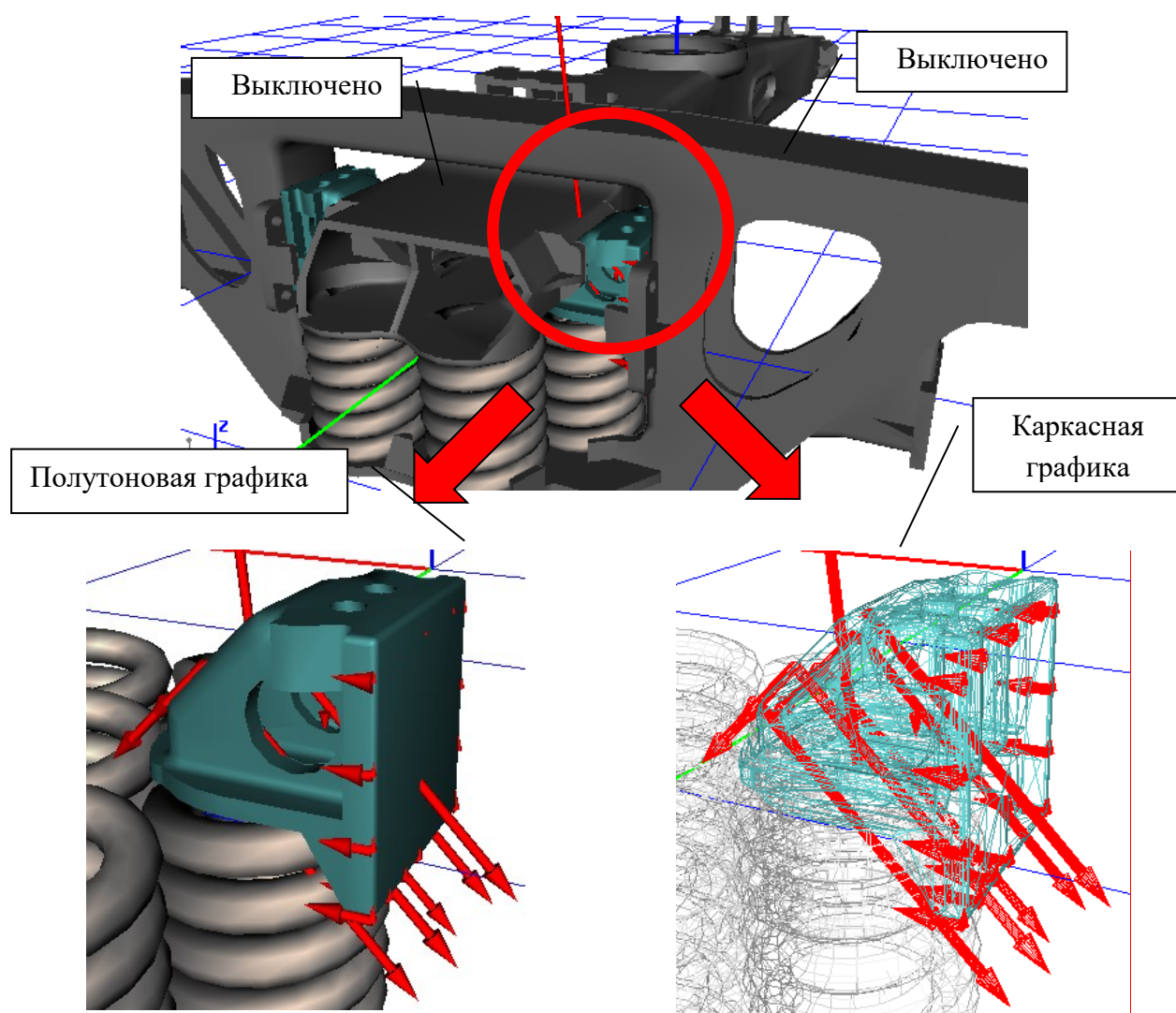


Рис. 4.119. Приемы работы в анимационном окне

4.4.2. Интегрирование уравнений движения

Переход к процессу интегрирования уравнений движения осуществляется через кнопку **Инспектор моделирования объекта | Интегрирование** (см. рис. 4.91).

Обновление графической информации, то есть смена положения объекта в анимационном окне и добавление новых точек на графиках, а также определение значений автоматически рассчитываемых переменных и запись их в файл, происходит не после выполнения каждого шага интегрирования, а через равные интервалы времени, которые задаются в поле **Инспектор моделирования объекта | Интегратор | Шаг представления результатов**.

4.4.2.1. Режим паузы в процессе интегрирования

Нажатие пробела или клавиши **Esc** в процессе интегрирования уравнений движения приведет к переходу системы в режим паузы (рис. 4.120).

В режиме паузы можно:

- изменить параметры процесса интегрирования: время, точность и все остальные параметры интегрирования, и продолжить с новыми данными (кнопка **Продолжить**),
- прервать процесс интегрирования (кнопка **Прервать**),
- записать текущие значения координат объекта и их первых производных по времени; в последующем эти переменные могут быть использованы в качестве начальных данных (кнопка **Записать**),
- обработать в файле управления сообщение с ключом PAUSE_MESSAGE (кнопка **Сообщение**).

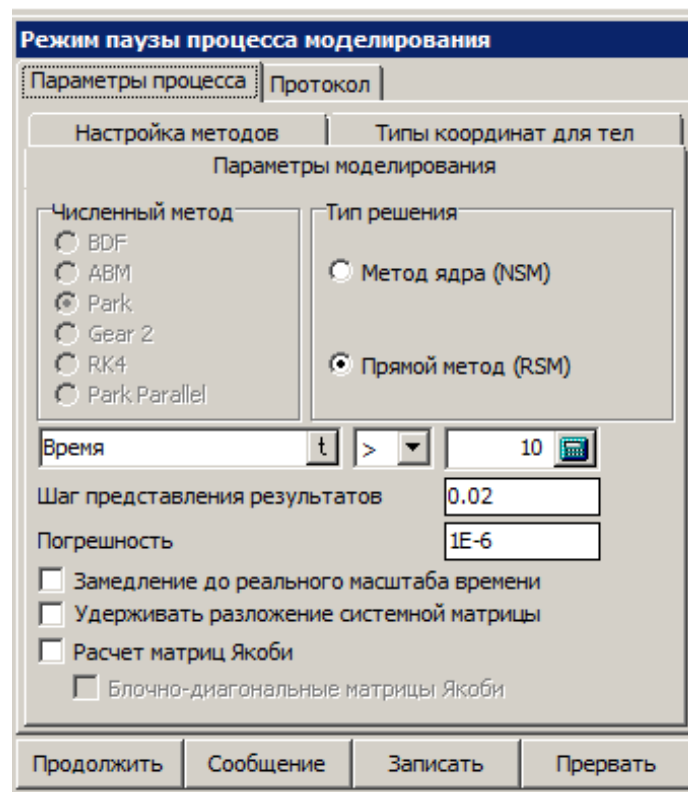




Рис. 4.120. Режим паузы процесса моделирования

4.4.2.2. Текущие параметры процесса интегрирования

В процессе численного интегрирования уравнений движения автоматически появляется информационная панель с текущими данными процесса (см. рис. 4.121). Кнопка  вызывает переход в режим паузы. В режиме паузы с помощью кнопки  программа продолжает процесс интегрирования.

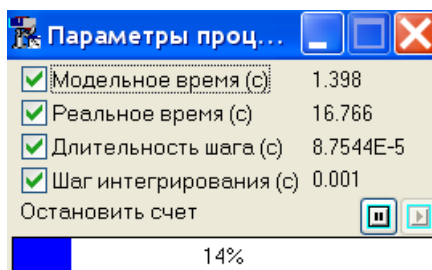


Рис. 4.121. Параметры процесса интегрирования

В окне отображаются следующие данные.

- **Модельное время** – время модели с момента старта процесса.
- **Реальное время** – время ЦПУ с момента старта процесса.
- **Длительность шага (с)** – среднее время ЦПУ, затраченное на один шаг интегрирования без затрат на отображение результатов в графические и анимационные окна.
- **Шаг интегрирования (с)** – шаг численного метода интегрирования. Шаг интегрирования нелинейных уравнений движения является переменным, то есть подбирается автоматически с целью достижения заданной точности численного решения.

4.4.2.3. Режим XVA-анализа результатов моделирования

Анализ XVA-файлов во многих чертах аналогичен процессу интегрирования. Основное отличие заключается в том, что новые значения координат и их производных по времени определяются не из решения уравнений движения, а считываются из предварительно созданного файла с расширением *.xva*, что, как правило, гораздо быстрее.

Данный тип анализа используется для демонстраций заранее просчитанных движений в случае, когда процесс интегрирования идет медленно из-за дробления шага. В процессе «прокрутки» файла возможно построение графиков любых переменных, что позволяет использовать данную функцию для дополнительного анализа ранее просчитанного процесса.

Для того, чтобы создать файл XVA в процессе моделирования включите флажок **Инспектор моделирования объекта | XVA | XVA-файл для текущего интегрирования | Включить** (рис. 4.122). Там же задается имя для создаваемого XVA-файла.

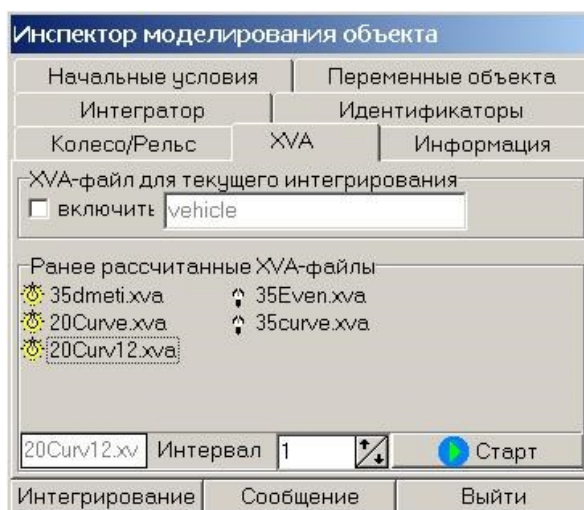




Рис. 4.122. XVA анализ


На вкладке **Инспектор моделирования объекта | XVA** находится список ранее рассчитанных XVA-файлов.

Обратите внимание, что анализ проводится на базе текущей структуры объекта, характеризуемой файлом исходных данных *input.dat*. Это означает, что если структура объекта изменена, например, добавлены новые степени свободы или внесены существенные изменения в файл управления, то использовать ранее созданный XVA-файл не рекомендуется. Это автоматически проверяется программой, и XVA-файлы, созданные после последней модификации файла *input.dat*, изображаются в списке со значком , а созданные до – со значком .

Для запуска ранее рассчитанного XVA-файла выделите его в **Списке рассчитанных XVA-файлов** и нажмите кнопку **Старт**, или просто дважды щелкните мышкой по нужному файлу. Изменение значение параметра **Интервал** позволяет пропускать кадры и тем самым ускорять процесс.

Используйте контекстное меню для выполнения ряда служебных команд со списками XVA-файлов.

4.5. Статический и линейный анализ

Статический и линейный анализ направлен на решение задач численного определения положения равновесия объекта, линеаризации уравнений и анализа полученных линейных дифференциально-алгебраических уравнений (Глава 2, п. "Линеаризация уравнений движения и линейный анализ"). Для перехода в режим линейного анализа используйте команду меню **Анализ | Статический и линейный анализ...** или кнопку , рис. 4.123.

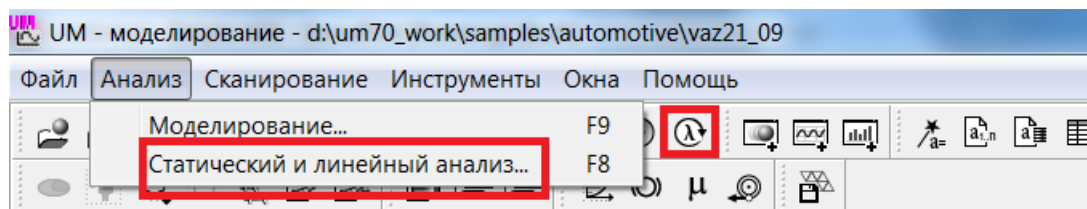


Рис. 4.123. Переход к режиму статического и линейного анализа

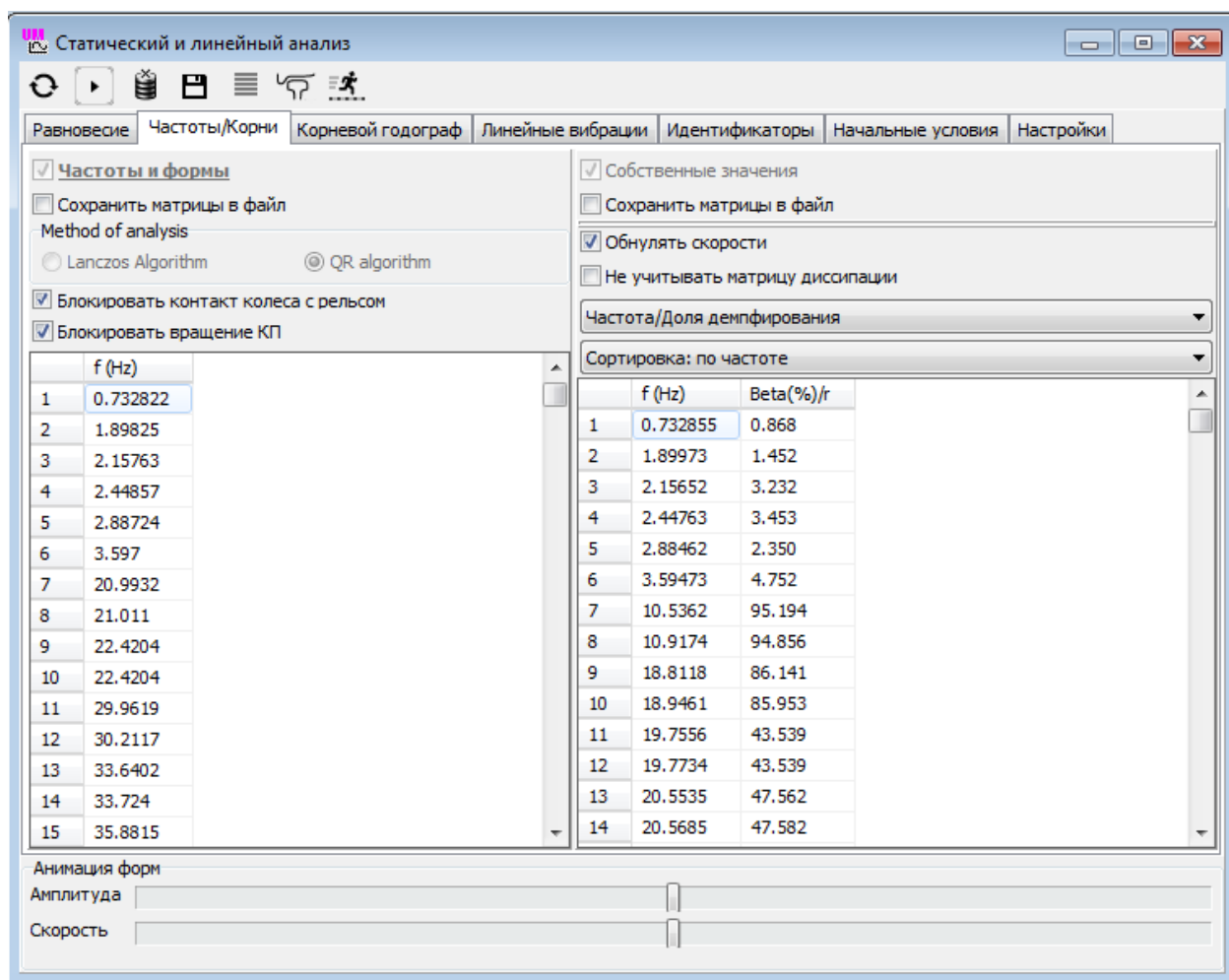


Рис. 4.124. Окно статического и линейного анализа

Инструменты и настройки анализа размещены в окне на рис. 4.124. Решаются следующие задачи:

- расчет положения равновесия в зависимости от параметров модели, вкладка **Равновесие**, п. 4.5.2. *"Инструмент статического анализа"*, стр. 4-158;
- линеаризацию уравнений движения;
- расчет собственных частот и форм колебаний модели без учета неконсервативных сил (трения, диссипации и т.п.), вкладка **Частоты/Корни**, п. 4.5.3. *"Инструмент расчета собственных частоты и собственных значений"*, стр. 4-160;
- расчет собственных значений и собственных векторов модели с учетом неконсервативных сил, вкладка **Частоты/Корни**, п. 4.5.3. *"Инструмент расчета собственных частоты и собственных значений"*, стр. 4-160;
- построение корневых годографов и зависимостей собственных частот от параметров модели, вкладка **Корневой годограф**, п. 4.5.4. *"Построение корневых годографов и зависимостей частот от параметров"*, стр. 4-165;
- расчет вынужденных гармонических колебаний с построением амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, вкладка **Линейные вибрации**, п. 4.5.5. *"Вынужденные гармонические колебания линеаризованной модели"*, стр. 4-172.

Для управления процессами используются кнопки на панели инструментов:



– выполнить расчет;



– включить/выключить анимацию форм колебаний;



– сбросить результаты предыдущего расчета перед началом следующего;



– записать результаты расчета в текстовый файл;



– вызов окна настройки параметров численного интегрирования, п. 4.4.1.

"Подготовка процесса интегрирования", стр. 4-107;



- вызов окна настройки железнодорожного экипажа (только в случае модели железнодорожного экипажа);



- вызов окна настройки параметров модели водителя (только для моделей автомобилей);



– выйти из режима статического и линейного анализа.

При выполнении статического и линейного анализа следует отключить силы, линеаризация которых невозможна.

Замечание. Функции линейного анализа не поддерживаются для моделей, содержащих шарниры кватернионного типа.

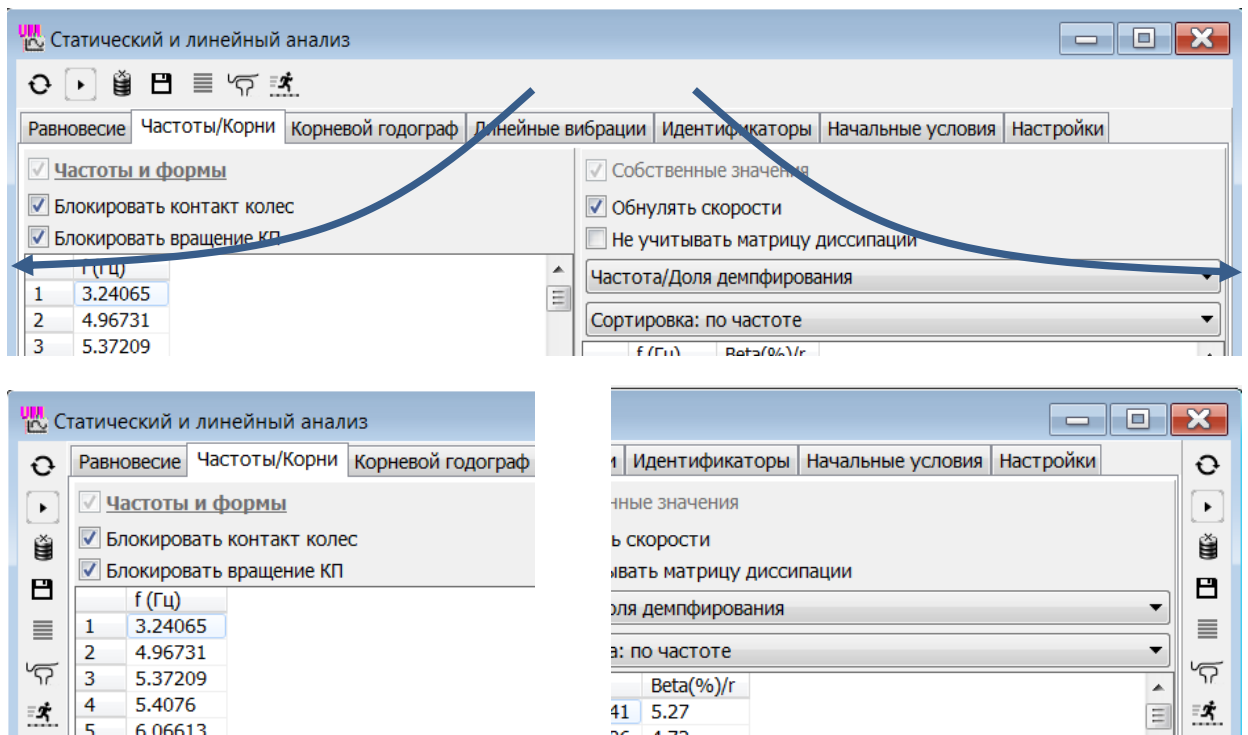


Рис. 4.125. Изменение положения панели инструментов

Для изменения положения панели инструментов перетащите мышкой панель к левой или правой границе окна, рис. 4.125. Измененное положение сохраняется программой в файле конфигурации last.la.

4.5.1. Основные соотношения статического и линейного анализа

Рассмотрим упрощенные соотношения, связанные с проблемой расчета равновесия, линеаризации уравнений движения и их последующего анализа. Линеаризация точных уравнений движения системы тел рассмотрена в [Главе 2](#), п. "Линеаризация уравнений движения и линейный анализ". Здесь мы рассмотрим упрощенный случай, когда в системе отсутствуют замкнутые кинематические цепи. В этом случае шарнирные координаты независимы и уравнения движения имеют вид обыкновенных дифференциальных уравнений

$$M(q)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}, t), \tag{4.1}$$

$$q = (q_1, \dots, q_n)^T.$$

Здесь q – обобщенные координаты объекта (матрица – столбец шарнирных координат), M – матрица масс, k , Q – столбцы сил инерции и обобщенных активных сил, n – число степеней свободы, определяющее размер матриц в уравнениях (4.1). Предполагается также, что связи стационарны, то есть отсутствуют шарнирные координаты, значения которых заданы как явные функции времени.

4.5.1.1. Уравнения равновесия

Если активные силы, действующие на систему, не зависят явным образом от времени, то положения равновесия могут быть найдены из условия равенства нулю обобщенных сил

$$Q_i(q, 0) = 0, i = 1, \dots, n. \quad (4.2)$$

Значения обобщенных координат q_0 в положении равновесия можно найти двумя способами (рис. 4.126):

- численное решение уравнений равновесия (4.2),
- численное интегрирование уравнений движения (4.1) с целью максимально приблизиться к положению равновесия (т.е. приближение к положению равновесия в режиме моделирования движения).

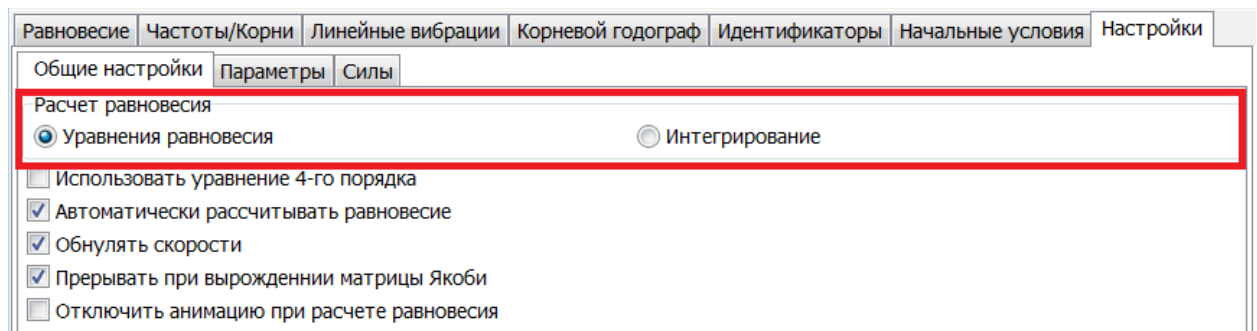


Рис. 4.126. Выбор метода определения положения равновесия

Первый способ, как правило, более быстрый и дает более точный результат. Кроме того, путем численного интегрирования уравнений движения можно приблизиться только к асимптотически устойчивому положению равновесия, в то время как первый метод позволяет найти также неустойчивые положения равновесия, а также равновесие консервативных систем (систем без рассеяния энергии, у которых все активные силы потенциальны, то есть имеют потенциальную энергию).

Поскольку для определения положения равновесия с помощью первого подхода численно решается система нелинейных алгебраических уравнений, то требуется достаточно хорошее начальное приближение координат, которое, в частности, можно получить с помощью второго метода. В некоторых случаях программа не может автоматически решить уравнения равновесия (4.2), и в этом случае второй способ является единственной возможностью получить положение равновесия и выполнить линейный анализ модели. Такие ситуации возникают при наличии сил с разрывной производной (наиболее распространенный пример – контактные силы). Наличие большого числа контактных сил в моделях гусеничных машин и буровых колонн не позволяют в большинстве случаев автоматически решить уравнения равновесия (4.2), и положения равновесия почти всегда определяются по второй методике.

4.5.1.1.1. Расчет устойчивого положения равновесия методом интегрирования уравнений

Перед началом расчета выключаются все силы, которые препятствуют равновесию модели (например, силы – функции времени). В качестве контроля близости системы к положению равновесия используется кинетическая энергия. Интегрирование продолжается до тех пор, пока кинетическая энергия (КЭ) T не опустится ниже некоторого достаточно малого значения T_{min} . Чтобы исключить осцилляции функции $T(t)$, при которых КЭ кратковременно принимает малое значение, оценивается значение КЭ на заданном интервале времени Δt_T (в окне), и процесс прерывается, если на интервале времени Δt_T выполнено условие $T(t) < T_{min}$. Чтобы исключить вариант, когда КЭ мала в начале интегрирования, а потом растет, время интегрирования ограничивается снизу заданным пользователем значением t_{start} . Время моделирования ограничивается сверху величиной t_{max} .

С целью ускорения процесса сходимости при расчете положения равновесия автоматически добавляются дополнительные диссипативные силы. Обобщенные силы добавочной диссипации пропорциональны произведению матрицы масс на столбец скоростей

$$Q_{diss} = -\alpha M(q)\dot{q}$$

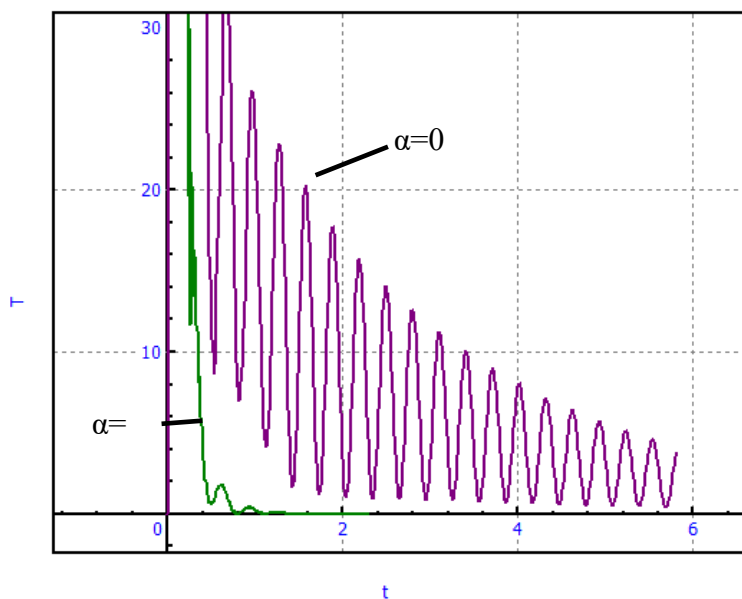


Рис. 4.127. Падение кинетической энергии при расчете равновесия

Коэффициент демпфирования α задается пользователем. Для выключения дополнительного демпфирования следует задать нулевое значение параметру α . На рис. 4.127 сравнивается падение КЭ при $\alpha=0$ и $\alpha=5$ для модели автомобиля. Обратим внимание, что чрезмерно большое значение параметра α может привести к неверным результатам, поскольку скорости в этом случае быстро падают, и система слишком медленно стремится к положению устойчивого равновесия. Кроме того, при больших значениях α процесс интегрирования замедляется в силу высокой жесткости уравнений движения.

Параметры, настраивающие процесс расчета равновесия, указываются на вкладке **Настройки | Параметры**, рис. 4.128:

- T_{\min} – КЭ для прекращения интегрирования (Дж);
- Δt_T – Ширина окна расчета КЭ (с);
- t_{start} – минимальное время расчета (с);
- t_{\max} – максимальное время расчета (с);
- α – параметр дополнительного демпфирования (1/с).

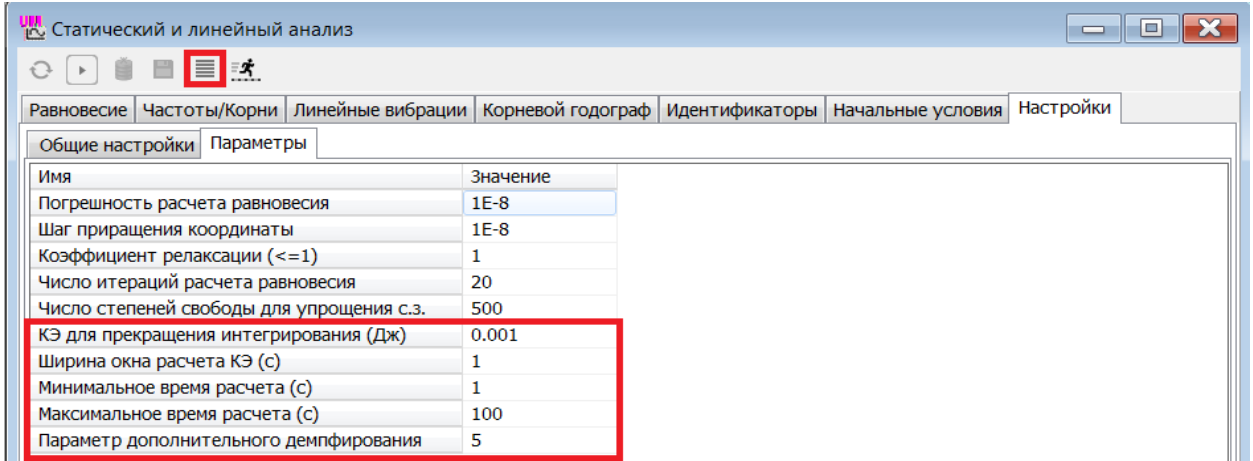



Рис. 4.128. Параметры расчета равновесия путем интегрирования

Для установки параметров интегратора используется кнопка , открывающая соответствующее окно, п. 4.4.1. "Подготовка процесса интегрирования", стр. 4-107.

4.5.1.1.2. Численное решение уравнений равновесия

Точное изложение метода решения уравнений равновесия дано в [Главе 2](#), п. "Линеаризация уравнений движения и линейный анализ". Здесь мы рассмотрим упрощенные уравнения (4.2). Для решения этой системы уравнений в программе используется метод Ньютона–Рафсона, на каждой итерации которого решается система линейных уравнений

$$\begin{aligned} Q_q(q_0^k)\Delta q_0^{k+1} &= -Q(q_0^k), \\ q_0^{k+1} &= q_0^k + R\Delta q_0^{k+1} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Здесь Q_q – матрица Якоби уравнений равновесия,

$$Q_q = \frac{\partial Q(q)}{\partial q^T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial q_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial q_n} \end{pmatrix},$$

R – коэффициент релаксации, обычно принимаемый равным 1.

Итерации прерываются, когда выполняется условие достаточной малости приращения координат

$$\sum_i |\Delta q_{0i}^{k+1}| < \varepsilon, \tag{4.4}$$

где ε – заданная погрешность решения.

В качестве начального приближения $q_0^0 = q^0$ используются значения координат q^0 , заданные пользователем или полученные в результате выполнения расчета равновесия методом интегрирования. Матрица Якоби Q_q определяются численно на каждой итерации методом конечных разностей в соответствии с формулами

$$Q_{qij}(q_0^k) = (Q_i(q_0^k + \delta q_j) - Q_i(q_0^k)) / \delta. \quad (4.5)$$

Здесь δ – малый шаг приращения координаты, столбец δq_j содержит нулевые элементы, за исключением j -го, равного δ .

На вкладке **Настройки | Параметры**, рис. 4.129 задаются параметры численного метода решения уравнений равновесия:

ε – погрешность расчета равновесия;

δ – шаг приращения координаты;

R – коэффициент релаксации;

N – число итераций расчета равновесия, при превышении которого пользователь получает запрос о продолжении итераций.

Общие настройки		Параметры	
Имя	Значение		
Погрешность расчета равновесия	1E-8		
Шаг приращения координаты	1E-8		
Коэффициент релаксации (<=1)	1		
Число итераций расчета равновесия	20		
Число степеней свободы для упрощения с.з.	500		

Рис. 4.129. Параметры решения уравнений равновесия

4.5.1.2. Линеаризация уравнений равновесия

Линеаризация уравнений движения в УМ используется для расчета собственных частот и форм колебаний системы, определения собственных значений и собственных векторов, а также для исследования линейных вынужденных колебаний под действием гармонических возмущений.

Линеаризация уравнения осуществляется в окрестности значений координат q_0^0 , которые в большинстве случаев соответствуют положению равновесия модели. Предусматривается также линеаризация уравнений относительно произвольного положения и линеаризация в окрестности стационарного движения. В случае стационарного движения часть координат изменяется с постоянной скоростью $\dot{q} = \dot{q}(0) = v_0$ (например, транспортное средство движется с постоянной скоростью).

Линеаризованные уравнения имеют вид

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = f(t), \quad (4.6)$$

где M, C, K – постоянные матрицы, M – симметричная, положительно определенная матрица масс, рассчитанная при значениях координат q_0^0 .

Матрицы C , K рассчитываются методом конечных разностей по формулам вида (4.5), т.е. являются матрицами Якоби обобщенных сил. При расчете матрицы позиционных сил (т.е. сил, зависящих от положения) K приращение получают координаты, а для матрицы сил, зависящих от скорости C , приращения даются скоростям.

Для управления линеаризацией в настройках используются ключи (рис. 4.130):

- **Автоматически рассчитывать равновесие** – при включенной опции перед каждым расчетом матриц линеаризованных уравнений программа рассчитывает положение равновесие. Эту опцию следует отключать только в том случае, когда положение равновесия не существует или уравнения надо линеаризовать относительно заданных значений координат.
- **Обнулять скорости** – опция отключается только в том случае, когда линеаризация осуществляется в окрестности стационарного движения, то есть часть скоростей отлична от нуля.

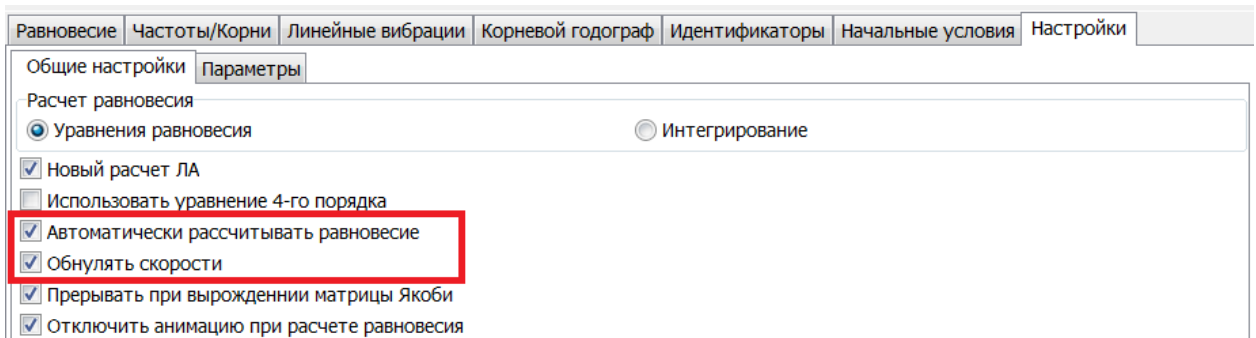


Рис. 4.130. Ключи управление процессом линеаризации

4.5.1.3. Запись матриц линеаризованных уравнений в файлы

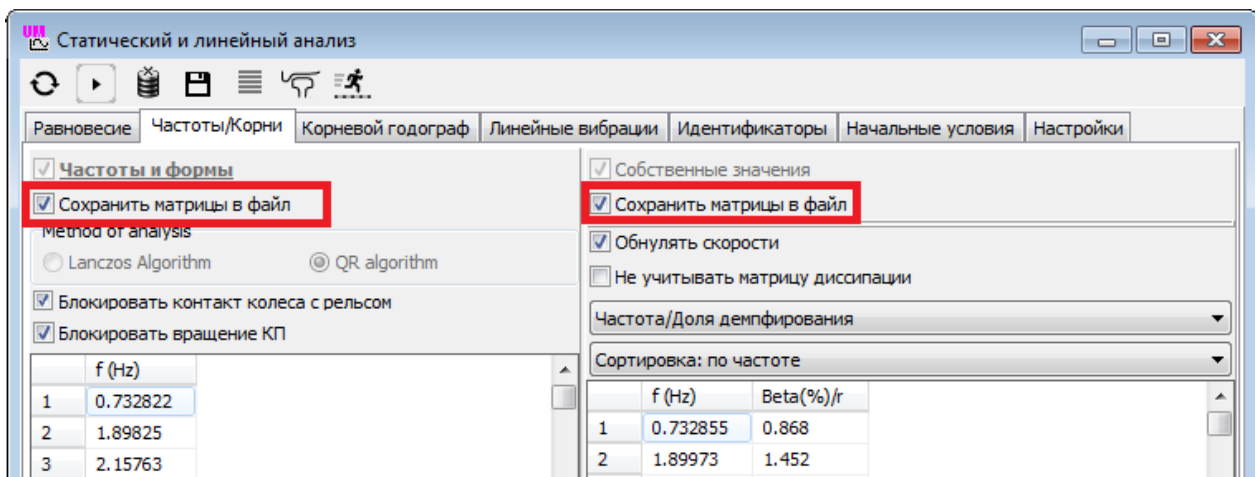



Рис. 4.131. Запись матриц в файлы

Матрицы M , C , K , K_n , входящие в линеаризованные уравнения движения (4.6), (4.7), могут опционально сохраняться в отдельных текстовых или бинарных файлах. Для записи следует перед вычислением матриц (т.е. перед щелчком на кнопке ) включить опции **Сохранить матрицы в файл**, рис. 4.131. Файлы с матрицами записываются в каталог мо-

дели. При включении левой опции на рис. 4.131 сохраняются матрицы M, K_n , а правой - матрицы M, C, K .

Имя файла содержит название матрицы и опционально - **маску файла**, задаваемую пользователем на вкладке **Настройки | Запись в файл**, рис. 4.132. Например, если в поле **Маска файлы** ввести текст `_1`, то имена файлов будут `M_1, C_1, K_1, Kn_1`. Используется расширение `*.txt` для текстового файла и `*.lam` для бинарного.

По умолчанию, для моделей с числом координат до 100 предлагается сохранить матрицы в текстовый файл, для моделей, имеющих число степеней свободы больше 100, - в бинарный файл. Пользователь может изменить тип записываемого файла, рис. 4.132.

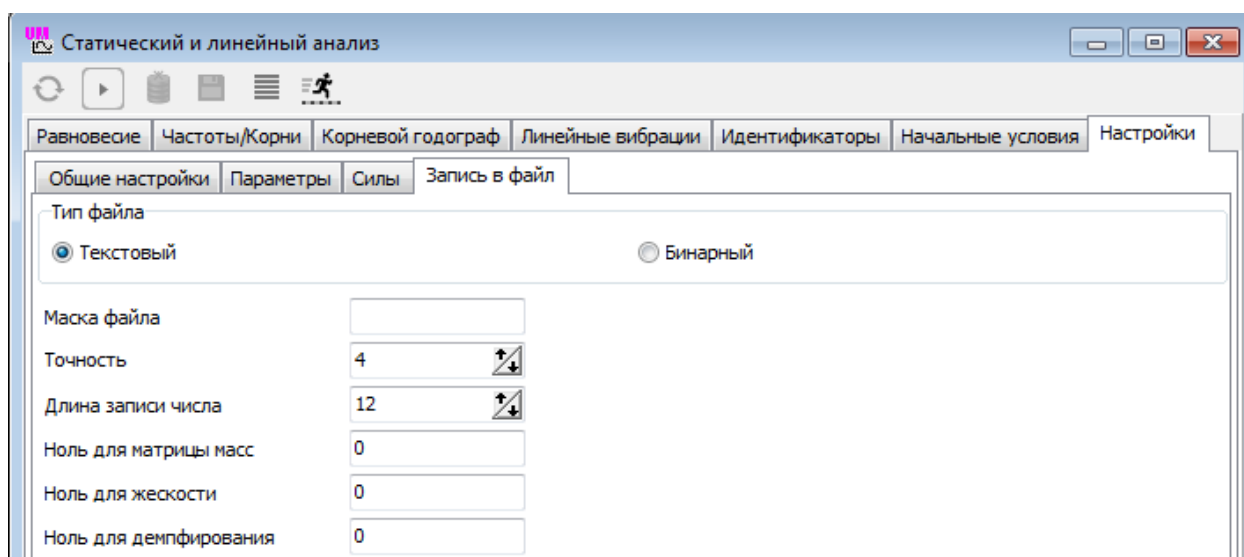


Рис. 4.132. Настройки записи матриц в файлы

4.5.1.3.1. Формат текстового файла

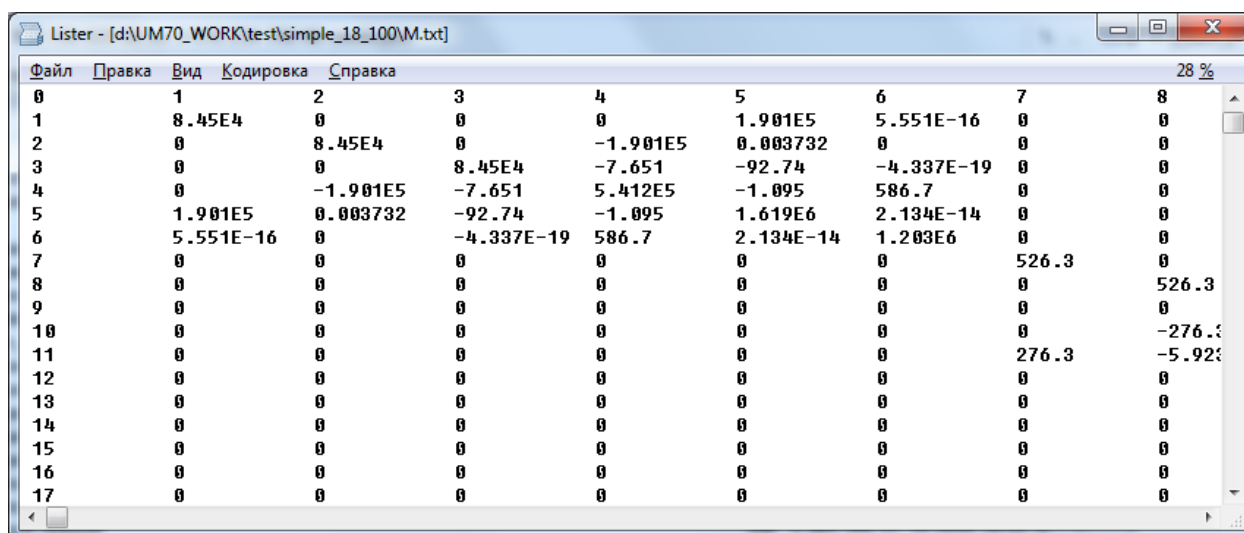


Рис. 4.133. Пример текстового файла с матрицей масс

Первая строка файла содержит номер столбца матрицы, а первый столбец файла соответствует номеру строки матрицы, рис. 4.133. Стиль записи чисел может быть изменен на вкладке **Настройки | Запись в файл**, рис. 4.132:

- **Точность** - число значащих цифр в записи числа с плавающей точкой
- **Длина записи числа** - число символов, определяющих ширину столбца
- **Ноль для матрицы масс, Ноль для жесткости, Ноль для демпфирования** - позволяют исключить в текстовом файле малые элементы матриц масс, жесткости и демпфирования, заменив нулями числа, меньшие по абсолютной величине введенных значений. Например, если в поле **Ноль для жесткости** ввести значение 0.01, то в текстовых файлах для матриц K , K_n элементы по модулю меньше 0.01 будут заменены нулями.

4.5.1.3.2. Формат бинарного файла

Бинарные файлы содержат построчные записи матриц в 8-байтном представлении чисел с плавающей точкой (float для C и double для Delphi). Таким образом, размер файла N связан с размером матрицы n соотношением $N = 8n^2$.

4.5.1.4. Расчет собственных частот и форм колебаний

Рассматриваются свободные колебания системы тел без учета сил, зависящих от скорости, и неконсервативных сил. Уравнения движения имеют вид

$$M\ddot{q} + K_n q = 0 \quad (4.7)$$

При сформулированных условиях матрица K_n должна быть симметричной. Однако на практике из-за погрешностей метода численного определения или наличия не выключенных неконсервативных сил симметрия может нарушаться. Поскольку при расчете собственных частот матрица должна быть симметричной, выполняется процедура симметризации $K_n = (K + K^T)/2$, где K – матрица, полученная методом конечных разностей.

Задача на расчет собственных частот и собственных форм колебаний сводится к нетривиальному решению системы уравнений

$$(K_n - \omega^2 M)h = 0 \quad (4.8)$$

где ω^2 – квадрат собственной частоты, h – собственный вектор.

С помощью разложения Холецкого положительно определенной симметричной матрицы масс $M = LL^T$ задача (4.8) преобразуется к классической проблеме определения собственных значений и собственных векторов симметричной матрицы $A = L^{-1}K_nL^{-T}$

$$(A - \lambda E)u = 0, \quad u = L^T e \quad (4.9)$$

Решение классической проблемы собственных значений реализовано двумя методами.

- Используя преобразования Хаусхолдера, матрица A приводятся к трехдиагональной матрице, вещественные собственные значения которой определяются с помощью QR–алгоритма, а собственные векторы – методом обратных итераций [2].
- Применяется алгоритм Ланцоша [3], суть которого заключается в использовании процедуры Релея-Ритца к последовательности вложенных подпространств Крылова.

В отличие от QR–алгоритма, который находит сразу все N собственных значений матрицы A , метод Ланцоша осуществляет поиск некоторого количества собственных значе-

ний n , заданного пользователем. На практике, если n намного меньше N , то алгоритм Ланцоша для задач большой размерности сходится быстрее QR-алгоритма.

Наряду с положительными собственными значениями, соответствующими квадратам собственных частот системы, могут быть обнаружены нулевые или отрицательные собственные значения. Если имеются отрицательные собственные значения, то положение равновесия является неустойчивым. Этот факт позволяет выполнять исследования по устойчивости положений равновесия моделей.

4.5.1.5. Расчет собственных значений и собственных векторов

Рассматриваются свободные колебания системы тел. Уравнения движения имеют вид

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = 0$$

Задача сводится к расчету собственных значений (СЗ) и собственных векторов вещественной матрицы

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ -M^{-1}C & -M^{-1}K \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Используя преобразования Хаусхолдера, матрица (4.10) приводится к верхней хессенберговой матрице, СЗ которой определяются с помощью QR-алгоритма, а собственные векторы – методом обратных итераций [2].

4.5.1.6. Расчет приближенных собственных значений и собственных векторов

Для систем с большим числом степеней свободы трудоемкость задачи на собственные значения (СЗ) значительно выше, чем расчет частот. Во-первых, размерность матрицы (4.10) вдвое больше, чем в задаче (4.8). Во-вторых, матрица (4.10) несимметричная и расчет СЗ хессенберговой матрицы требует гораздо больше времени процессора, чем в случае трехдиагональной матрицы. Поэтому для систем с числом степеней свободы больше тысячи расчет СЗ может выполняться несколько часов.

Для ускорения этого процесса реализован расчет приближенных СЗ путем ограничения размерности пространства *главных координат* задачи. Напомним, что главными координатами консервативной задачи (4.7) являются переменные, соответствующие собственным формам колебаний. Выполняется замена переменных

$$q = Hw = w_1h_1 + w_2h_2 + \dots + w_nh_n, \quad (4.11)$$

где $w_i, h_i, i = 1 \dots n$ – главные координаты и собственные формы колебаний, соответствующие собственным частотам ω_i ; n – число степеней свободы механической системы. В главных координатах уравнения (4.7) становятся независимыми

$$\ddot{w}_i + \omega_i^2 w_i = 0.$$

Выполним сортировку собственных частот по величине

$$\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_n$$

И ограничим число собственных форм в замене (4.11), учитывая $m < n$ нижних частот

$$q = H^m w^m = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m. \tag{4.12}$$

Приближенные уравнения имеют следующий вид:

$$M_w^m \ddot{w}^m + C_w^m \dot{w}^m + K_w^m w^m = 0, \\ M_w^m = \text{diag}\{h_i^T M h_i\}, C_w^m = H^{wT} C H^w, K_w^m = H^{wT} K H^w.$$

Соответственно, приближенные СЗ исходной задачи рассчитываются как СЗ редуцированной матрицы

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ -(M_w^m)^{-1} C_w^m & -(M_w^m)^{-1} K_w^m \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

Вместо числа учитываемых собственных частот $m < n$ задается предельное значение учитываемой частоты ω_{\max} , а число m определяется программой из условия

$$\omega_m \leq \omega_{\max} < \omega_{m+1}.$$

Приближенный расчет доступен для моделей с числом степеней свободы, больше заданного значения n_s , значение по умолчанию $n_s = 500$, рис. 4.134. Если приближенный расчет доступен, пользователь должен указать значение максимальной частоты ω_{\max} (значение по умолчанию – 100 Гц). Если собственные частоты уже рассчитаны, то автоматически указывается размер редуцированной задачи m , рис. 4.135.

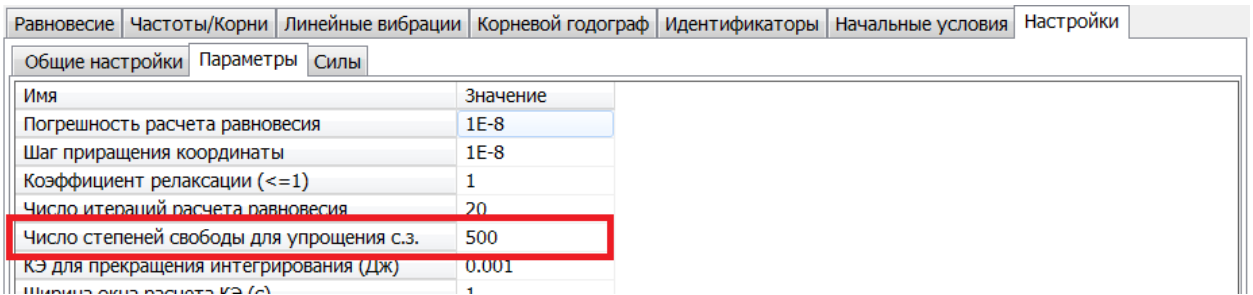


Рис. 4.134. Задание минимального значения числа степеней свободы для приближенного расчета СЗ

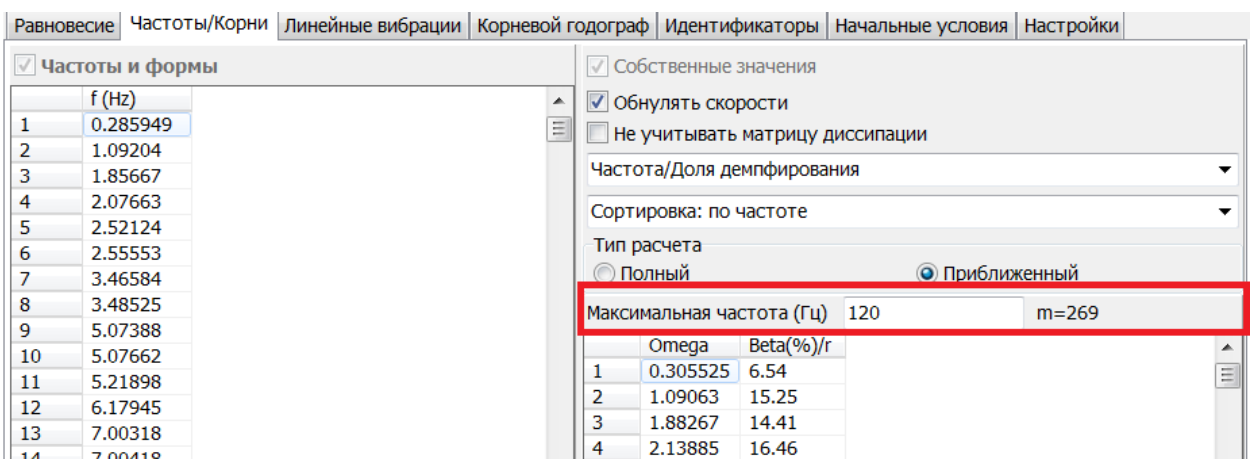


Рис. 4.135. Задание максимальной частоты для приближенного расчета СЗ

4.5.1.7. Вынужденные гармонические колебания

В математическом плане задача анализа гармонических возмущений линеаризованных уравнений сводится к решению уравнения

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = e^{i\omega t}r. \quad (4.14)$$

Решение уравнения (4.14) ищем в виде

$$q = ae^{i\omega t},$$

что приводит к системе линейных алгебраических уравнений с комплексной матрицей

$$(-\omega^2M + i\omega C + K)a = r. \quad (4.15)$$

Для решения уравнения (4.15) используется метод LU – разложения комплексной матрицы с учетом профиля.

Предусмотрены три типа гармонических возмущений, рис. 4.136.

Силовое возмущение: гармоническая сила \mathbf{F} (момент \mathbf{M}) действует на одно из тел модели, приложена в точке, заданной в СК тела проекциями вектора \mathbf{P} и имеет неизменное направление, заданное в СК тела единичным вектором \mathbf{e}

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= F_0 \sin(2\pi ft + \varphi)\mathbf{e}, \\ \mathbf{M} &= M_0 \sin(2\pi ft + \varphi)\mathbf{e}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Здесь F_0, M_0 – амплитуда силы и момента, f – частота возмущения в герцах, φ – начальная фаза возмущения.

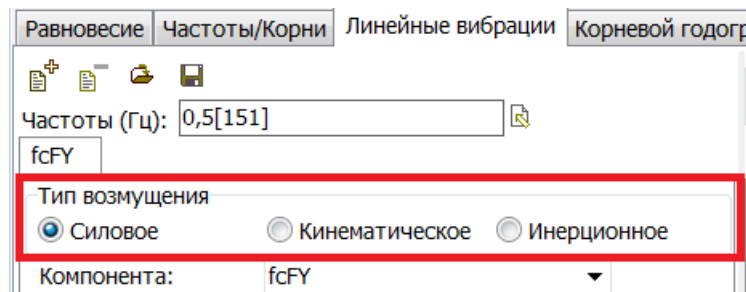


Рис. 4.136. Задание типа возмущения

Кинематическое возмущение: задается гармоническое колебание $\Delta\mathbf{r}$ точки тела, заданной вектором \mathbf{p} вдоль вектора \mathbf{e} , либо угловые колебания тела $\Delta\boldsymbol{\pi}$ по закону

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{r} &= a_0 \sin(2\pi ft + \varphi)\mathbf{e}, \\ \Delta\boldsymbol{\pi} &= \alpha_0 \sin(2\pi ft + \varphi)\mathbf{e}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Здесь a_0, α_0 – амплитуда линейных и угловых колебаний. При задании угловых колебаний координаты точки игнорируются, если тело абсолютно твердое.


Инерционное возмущение используется для имитации вращения несбалансированных роторов: задается постоянная по величине сила, приложенная к точке тела \mathbf{p} , равномерно вращающаяся вокруг вектора \mathbf{e} с угловой скоростью ω и пропорциональная квадрату угловой скорости вращения

$$\mathbf{F} = m_0 \omega^2 (\cos(\omega t + \varphi) \mathbf{e}_1 + \sin(\omega t + \varphi) \mathbf{e}_2). \quad (4.18)$$

Здесь m_0 (кг·м) – инерционный фактор возмущения, имеющий смысл произведения массы дисбаланса на эксцентриситет (отклонение центра масс от оси вращения), $\omega = 2\pi f$ угловая скорость в рад/с. Единичные векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ перпендикулярны друг другу и вектору \mathbf{e} , так что $\mathbf{e}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ образуют правую тройку ортогональных векторов. Например, если вектор \mathbf{e} направлен вдоль оси Z СК тела, то векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ – вдоль осей X и Y.

4.5.2. Инструмент статического анализа

Для расчета равновесия используется одноименная вкладка окна (рис. 4.137). Предусмотрено два режима расчета равновесия.

- Режим однократного расчета равновесия** при заданных значениях идентификаторов. С использованием вкладки **Идентификаторы** установите нужные значения идентификаторов и щелкните на кнопке . При однократном расчете, рассчитанные координаты становятся текущими начальными условиями. При однократном расчете векторы активных сил и сил реакций могут быть указаны в анимационном окне, если поместить в окно соответствующие переменные (п. 4.3.6.4. "Визуализация векторов/траекторий", стр. 4-86).
- Режим расчета зависимости положения равновесия от идентификатора.** В данном режиме определяется положение равновесия в зависимости от одного из идентификаторов. В процессе расчета могут быть получены зависимости от идентификатора значения в положении равновесия координат, сил реакций, активных сил.

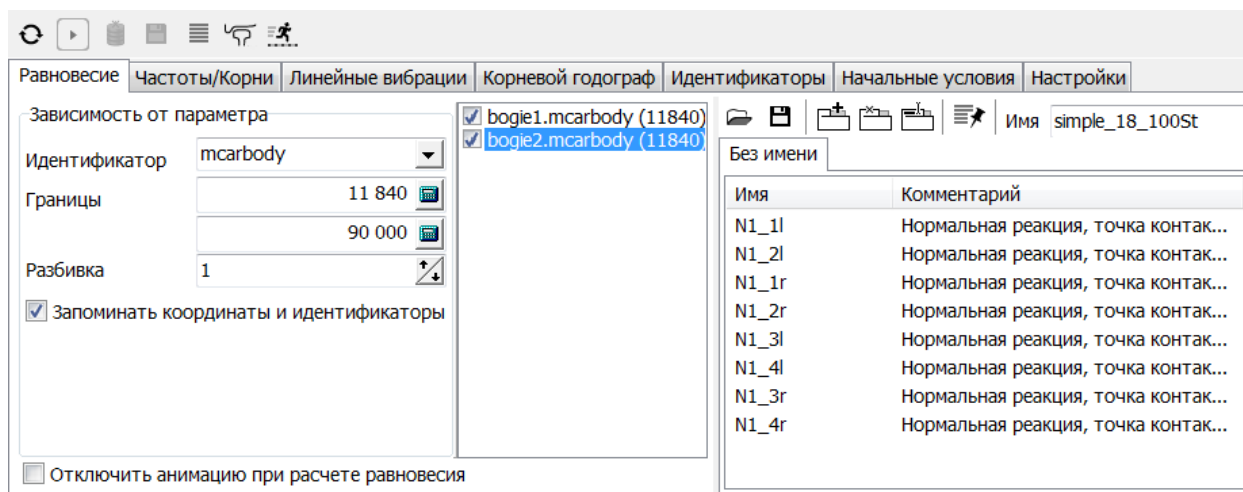



Рис. 4.137. Инструмент расчета равновесия в зависимости от параметра


Для задания параметров расчета:

- выберите идентификатор с использованием выпадающего списка; если в подсистемах объекта найдены одноименные идентификаторы, укажите, какие из них будут изменяться одновременно с выбранным идентификатором (на рис. 4.137 найдено 2 идентификатора, одноименные с выбранным идентификатором **mcarbody**);
- назначьте границы изменения идентификатора (начальное значение – в верхнем поле, конечное – в нижнем) и число расчетов с равным шагом (параметр **Разбивка**);

- используйте ключ **Запоминать координаты и идентификаторы**, если следует сделать текущими рассчитанные координаты и значение идентификатора в последнем расчете;
- если требуется получить анимацию значения в положении равновесия в зависимости от параметра векторной величины или траектории некоторой точки, поместите данные величины в открытое анимационное окно;
- для создания анимационного файла при изменении параметра используйте стандартную функцию анимационного окна (п. 4.3.6.5. "Создание анимационных файлов", стр. 4-87);
- после завершения процесса подготовки, запустите расчет с помощью кнопки .

4.5.2.1. Построение графиков статических значений переменных в зависимости от параметра

Для построения зависимости от данного параметра некоторых переменных в положении равновесия, создайте в правой части окна список переменных или прочитайте ранее созданный список *.var.

Если с использованием кнопки  (рис. 4.137) сохранить созданный список с именем [Имя модели]St.var, то при следующем открытии инструмента статического и линейного анализа список откроется автоматически.

Для построения графика после выполнения расчета равновесия перетащите мышкой переменные из списка (рис. 4.138) в графическое окно.

Подробная информация о создании и использовании списков переменных содержится в п. 4.3.3. "Список переменных", стр. 4-61.

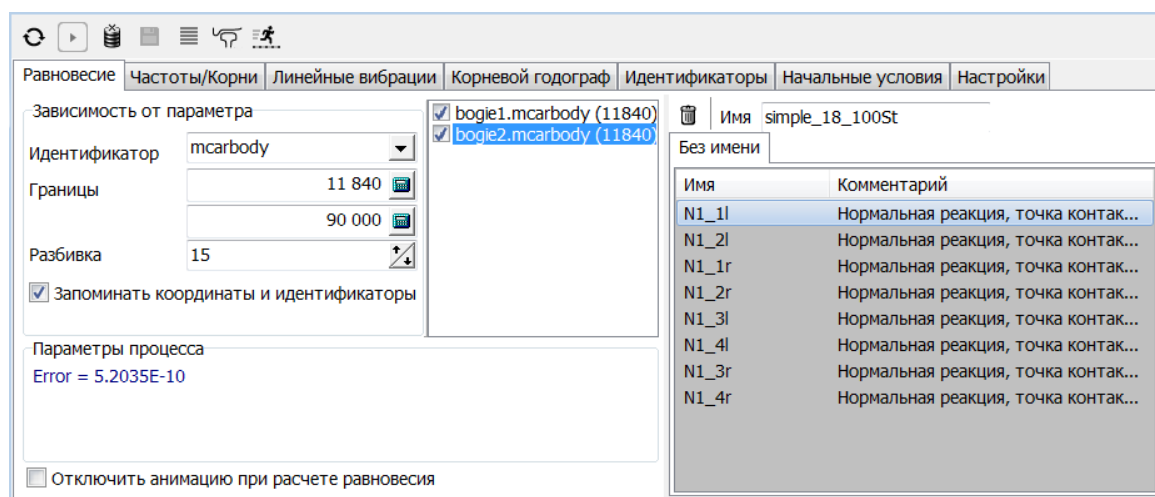


Рис. 4.138. Рассчитанный список переменных

Если программа не находит положение равновесия или находит не то положение, которое необходимо исследовать, используйте вкладку **Начальные условия** для того чтобы задать значения координатам, близкие к нужному положению. Если не удастся рассчитать равновесия путем решения уравнений методом Ньютона-Рафсона, то используйте опреде-

ление равновесия путем интегрирования уравнений движения, п. 4.5.1.1. "Уравнения равновесия", стр. 4-148, рис. 4.139.

См. также п. 4.5.6. "Настройки", стр. 4-177.

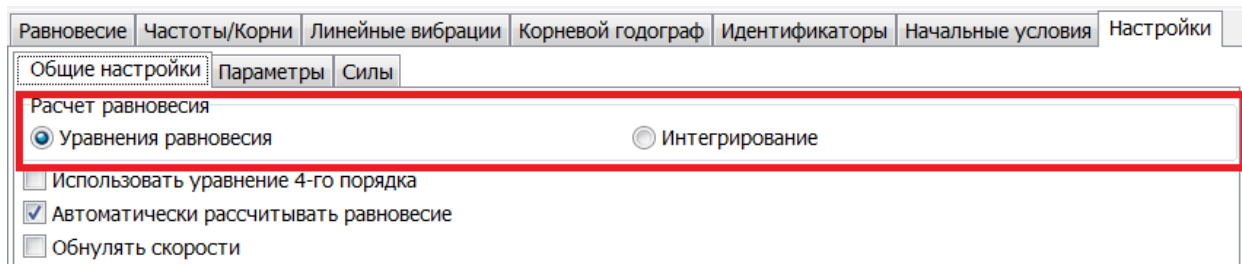


Рис. 4.139. Задание метода определения положения равновесия

4.5.3. Инструмент расчета собственных частоты и собственных значений

Для расчета собственных частот (СЧ) и собственных значений (СЗ) используется вкладка **Частоты/Корни** (рис. 4.140). Математическая модель проблемы и методика ее решения описана в п. 4.5.1.4. "Расчет собственных частот и форм колебаний", стр. 4-154 и п. 4.5.1.5. "Расчет собственных значений и собственных векторов", стр. 4-155.

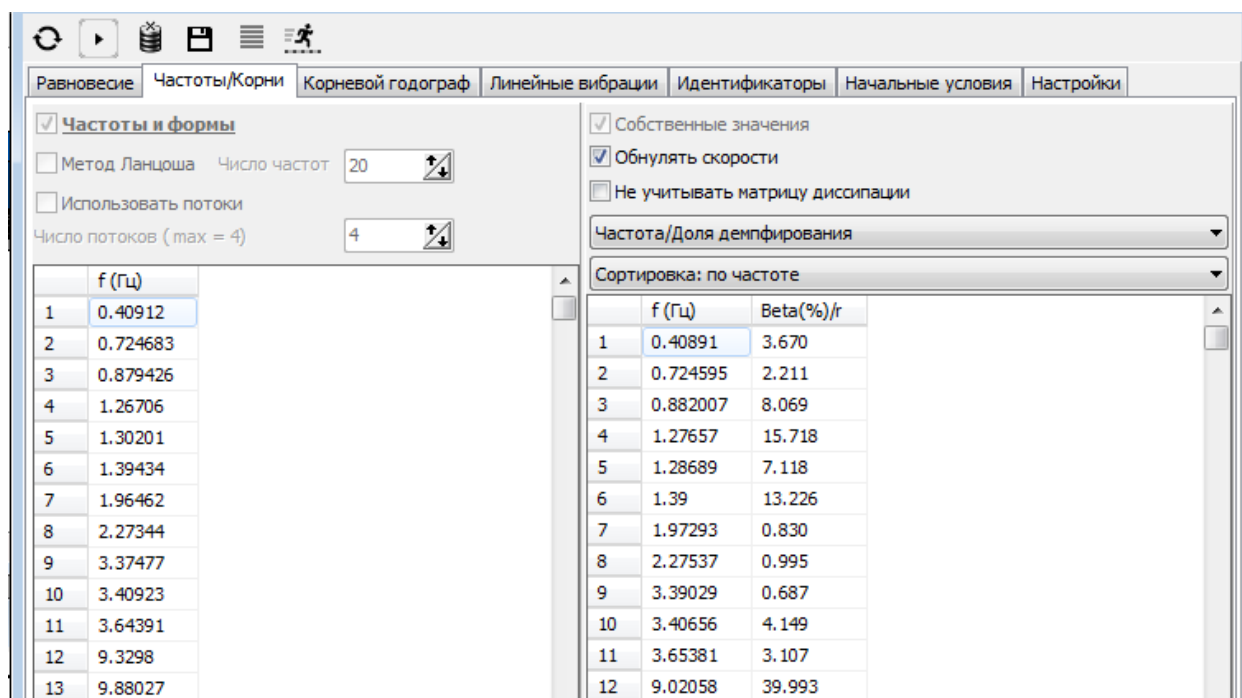


Рис. 4.140. Собственные частоты и собственные значения

Значения кнопок при расчете СЧ и СЗ:

- выполнение расчета
- сброс результатов
- анимация форм
- запись активной таблицы результатов в текстовый файл.

Активизация таблиц результатов

Если рассчитаны как СЧ, так и СЗ, то есть заполнены обе таблицы результатов, то для активной таблицы первый ключ в верхней части выделяется жирным шрифтом и подчеркиванием, рис. 4.141. Для активизации таблицы следует щелкнуть на ней мышкой.

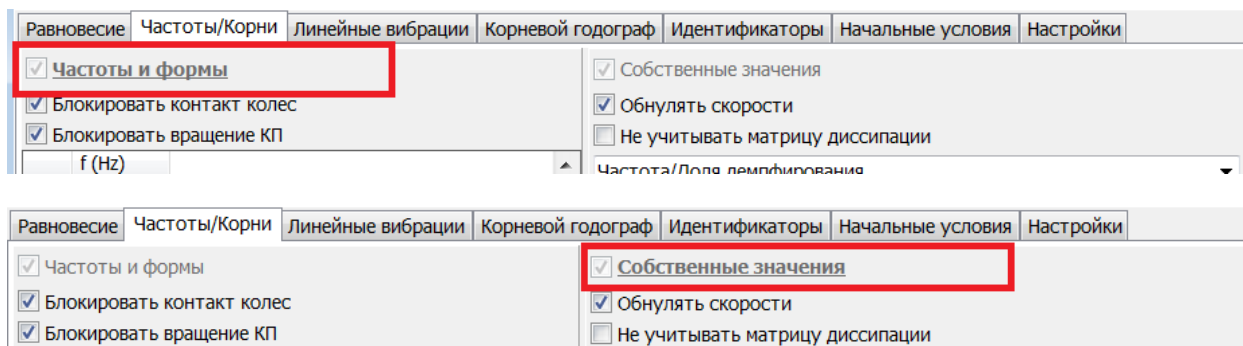
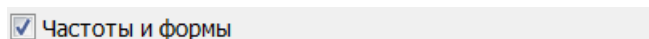


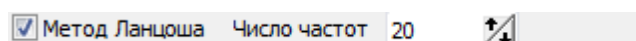
Рис. 4.141. Активизация таблиц результатов

4.5.3.1. Расчет собственных частот

- Для выполнения расчета СЧ должна быть включена опция "Частоты и формы"

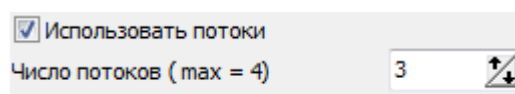


По умолчанию для расчета собственных частот и форм колебаний применяется QR–алгоритм. При установке опции "Метод Ланцоша", вместо QR–алгоритма будет использован метод Ланцоша. При этом QR–алгоритм вычислит все собственные частоты и формы колебаний, а алгоритм Ланцоша найдет *n* наименьших собственных частот, указанных в поле ввода "Число частот".



Замечание. Чтобы ускорить процесс расчета собственных частот и форм колебаний для моделей, насчитывающих большое число степеней свободы, рекомендуется использовать алгоритм Ланцоша.

Особенностью реализации алгоритма Ланцоша является возможность использования многопоточных режимов расчета на многоядерных компьютерах, что часто позволяет значительно ускорить процесс расчета. Количество используемых для работы алгоритма Ланцоша потоков задаётся в поле ввода "Число потоков" при включённой опции "Использовать потоки".



Для оценки эффективности метода Ланцоша для компьютера с многоядерным процессором рекомендуется обратиться, например, к следующим примерам:



[{Данные УМ}\Samples\Tracked_Vehicles\gsTV](#) (гусеничный транспортер)


[{Данные УМ}\Samples\Tracked_Vehicles\M1A1](#) (танк)

Рекомендуется исследовать, каким образом влияет на быстрдействие число параллельных потоков вычислений.

- Значения СЧ указываются в герцах
- СЧ в таблице результатов сортируются по величине частоты
- Отрицательные СЧ соответствуют неустойчивости положения равновесия; малые положительные или отрицательные рассчитанные значения могут соответствовать нулевым частотам в силу погрешности расчета
- Собственные формы

Все собственные формы колебаний рассчитываются автоматически непосредственно после расчета СЧ.

Для анимации собственной формы колебаний выделите нужную частоту в таблице и запустите процесс анимации либо двойным щелчком мыши, либо кнопкой ; для прерывания используйте кнопку  либо клавишу *Esc*.

- Для записи рассчитанных СЧ в текстовый файл *.txt активизируйте таблицу и используйте кнопку ; пример фрагмента текстового файла частот:

Список собственных частот (Гц)

f (Hz)

- 1 0.0196881
- 2 0.40913
- 3 0.724641
- 4 0.879745
- 5 1.26518

- Всплывающее меню используется также для записи частот в файл или в буфер обмена.

4.5.3.2. Расчет собственных значений (корней характеристического уравнения)

- Для выполнения расчета СЗ должна быть включена опция "Собственные значения"

Собственные значения

- *Формат СЗ*, рис. 4.142.

Собственные значения λ являются либо действительными числами

$$\lambda = r,$$

либо парами комплексно сопряженных чисел (рис. 4.142, слева)

$$\lambda = n \pm i\omega.$$

В последнем случае решению уравнений соответствует колебательный процесс

$$q = q_0 e^{nt} \sin(\omega t + \alpha),$$

который затухает при $n < 0$ и расходуется (то есть свидетельствует о неустойчивости) при $n > 0$. Затухающий колебательный процесс принято характеризовать параметрами частота

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ Гц}$$

и доля демпфирования (рис. 4.142, справа)

$$\beta = -\frac{n}{\sqrt{k^2 + n^2}} 100\% < 100$$

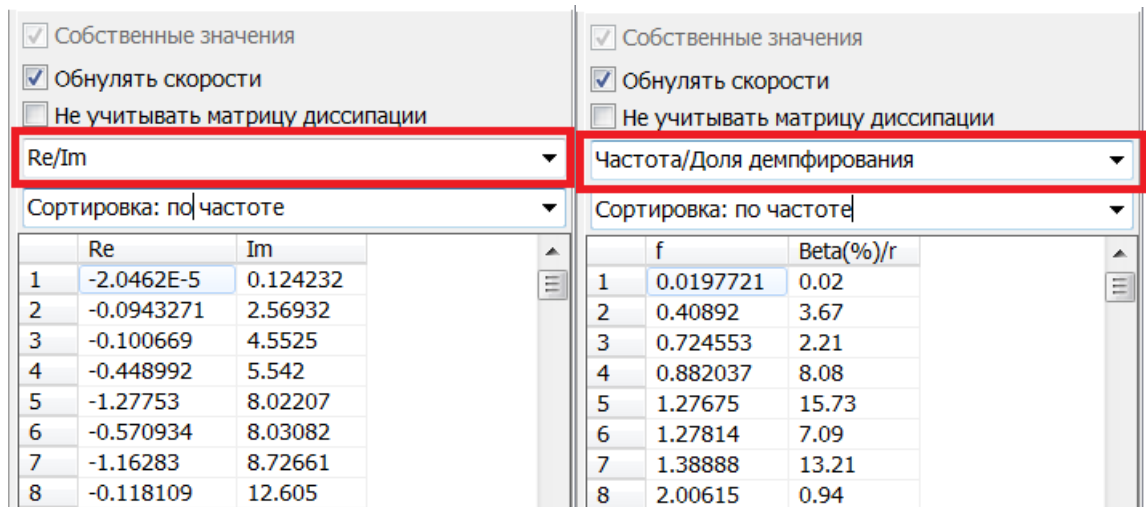


Рис. 4.142. Различные виды представления СЗ

- Положительные вещественные части СЗ соответствуют неустойчивости положения равновесия или стационарного движения; малые по модулю СЗ могут соответствовать нулевым корням в силу погрешности расчета.
- Собственные векторы рассчитываются только с целью анимации непосредственно после выбора соответствующего СЗ; при наличии кратных нулевых СЗ возможен некорректный расчет собственного вектора.

Для анимации собственного вектора выделите нужное СЗ в таблице и запустите процесс анимации либо двойным щелчком мыши, либо копкой ; для прерывания используйте кнопку либо клавишу Esc.

Используйте ползунки **Амплитуда** и **Скорость** для изменения амплитуды колебаний и скорости анимации

Для создания файла анимации собственного вектора используйте стандартную функцию анимационного окна (п. 4.3.6.5. "Создание анимационных файлов", стр. 4-87);

- Для записи рассчитанных СЗ в текстовый файл *.txt активизируйте таблицу и используйте кнопку ; пример фрагмента текстового файла СЗ:

Список корней

	F (Гц)	Beta(%) / r
1	0.0197721	0.02
2	0.40892	3.67
3	0.724553	2.21
4	0.882037	8.08
5	1.27675	15.73
6	1.27814	7.09

- Всплывающее меню используется также для записи СЗ в файл или в буфер обмена.

- Для расчета СЗ при стационарном движении (при ненулевых значениях скоростей) следует отменить обнуление скоростей (рис. 4.142).
- Ключ **Не учитывать матрицу диссипации** (рис. 4.142) отключает при расчете силы, зависящие от скорости, то есть матрица C полагается равной нулю, п. 4.5.1.5. "Расчет собственных значений и собственных векторов", стр. 4-155. При этом, если отсутствуют неконсервативные силы, то собственные значения будут совпадать с частотами, а собственные векторы – с формами колебаний. Возможные небольшие отличия в значениях частот связаны с погрешностью расчетов матриц конечно-разностным методом. Если в системе присутствуют неконсервативные силы (например – следящие силы), то результаты расчета частот и СЗ при отключении диссипативных сил будут различными.

4.5.3.3. Расчет приближенных собственных значений

Если модель имеет число степеней свободы, более граничного значения (рис. 4.143, по умолчанию 500), предоставляется возможность приближенного расчета СЗ.

Для приближенного расчета СЗ следует выбрать соответствующий тип расчета и назначить граничного значения учитываемой частоты, рис. 4.144 (см. п. 4.5.1.6. "Расчет приближенных собственных значений и собственных векторов", стр. 4-155).

Приближенный расчет СЗ требует предварительного определения собственных частот и собственных форм колебаний модели.

Методика получения, отображения и сохранения результатов аналогична описанной в предыдущем разделе руководства.

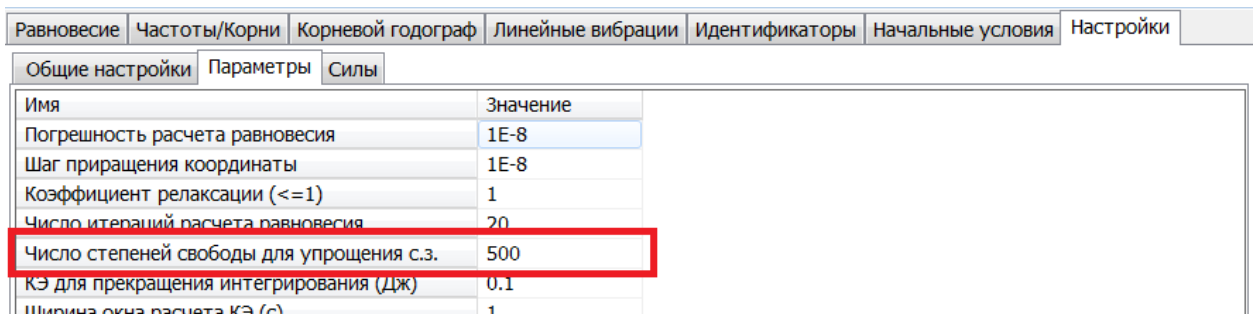


Рис. 4.143. Задание граничного значения числа степеней свободы для приближенного расчета СЗ

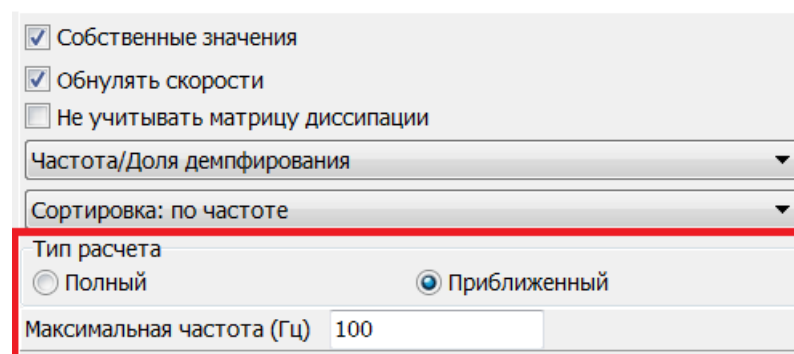


Рис. 4.144. Задание приближенного расчета СЗ и нижней частоты

4.5.4. Построение корневых годографов и зависимостей частот от параметров

Для расчета используется вкладка **Корневой годограф**, рис. 4.145. Математическая модель проблемы и методика ее решения описана в п. 4.5.1.4. "Расчет собственных частот и форм колебаний", стр. 4-154, п. 4.5.1.5. "Расчет собственных значений и собственных векторов", стр. 4-155.

Значения кнопок при расчете СЧ и СЗ:



– выполнение расчета,



– запись результатов в текстовый файл,



– построение корневого годографа или зависимости частот от параметра в графическом окне,



– удаление результатов перед новым расчетом.

Производится серия расчетов для различных значений выбранного идентификатора:

- Выберите **идентификатор** с использованием выпадающего списка; если в подсистемах объекта найдены одноименные идентификаторы, укажите, какие из них будут изменяться одновременно с выбранным идентификатором (на рис. 4.145 найдено 2 идентификатора, одноименные с выбранным идентификатором cz).
- Назначьте **границы** изменения идентификатора (начальное значение – в верхнем поле, конечное – в нижнем) и число расчетов с равным шагом (параметр **Разбивка**).

Если положение равновесия зависит от значения идентификатора, рекомендуется включить опцию **Автоматически рассчитывать равновесие**, рис. 4.146.

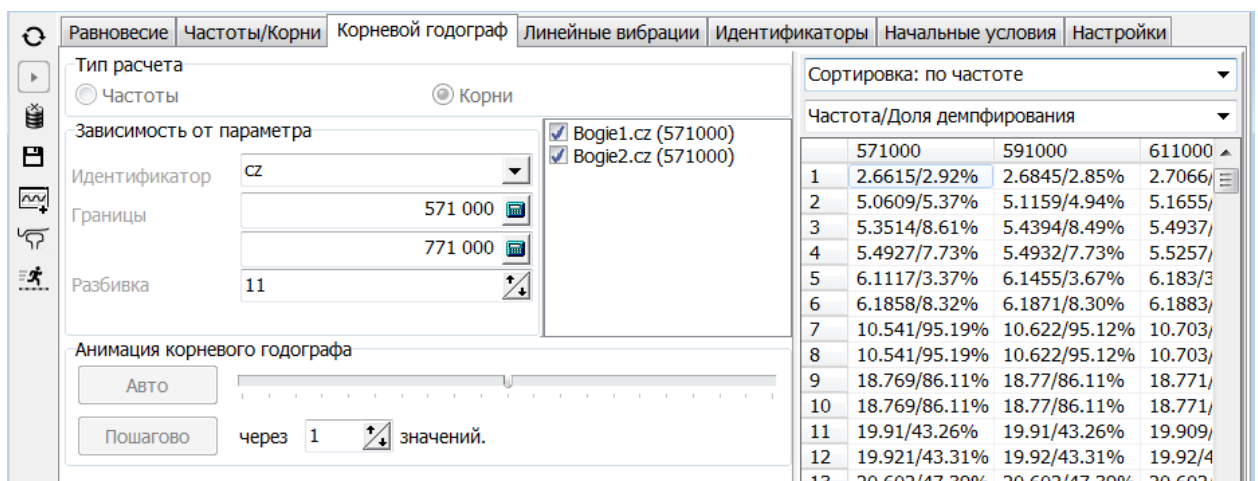


Рис. 4.145. Зависимость частот от значения идентификатора cz

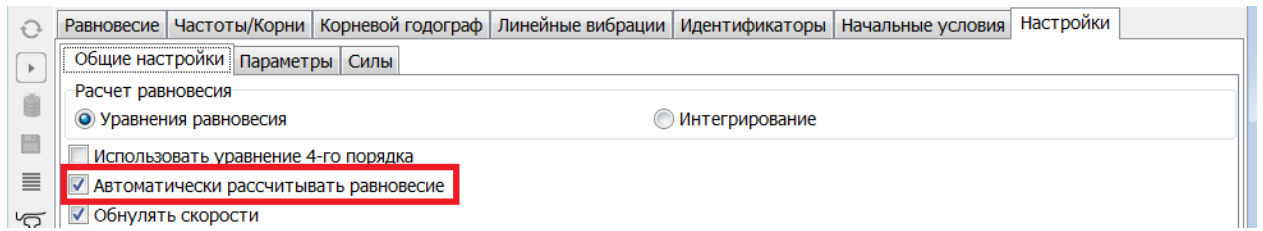


Рис. 4.146. Настройка автоматического расчета равновесия

4.5.4.1. Зависимость частот от параметров

- Для выполнения расчета установите тип расчета **Частоты**, рис. 4.147.
- Выполните расчет с помощью кнопки . Полный список рассчитанных частот при различных значениях параметров указывается в виде таблицы в правой части окна, рис. 4.147.
- Для построения графиков зависимости указанного списка частот от параметра после выполнения расчетов укажите **список частот** (рис. 4.147) и используйте кнопку (рис. 4.148).

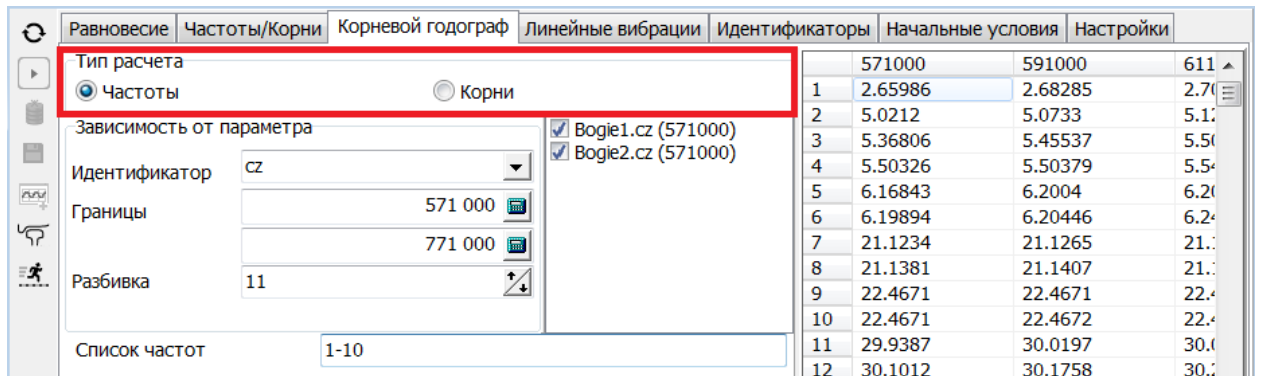


Рис. 4.147. Расчет зависимости частот от значения идентификатора cz

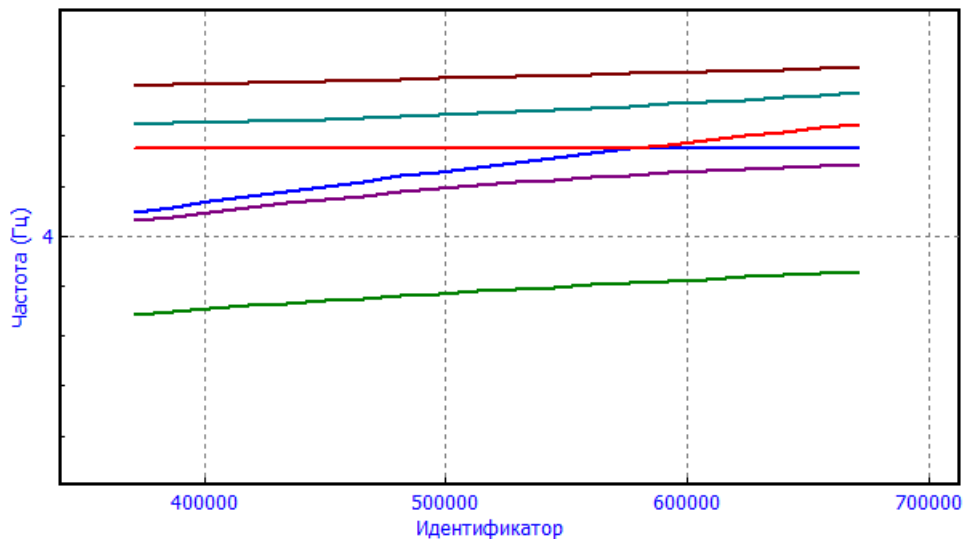


Рис. 4.148. График зависимости заданного списка частот от значения идентификатора cz

Примеры задания списка частот для построения графика:

1-12

1..12,15

1,2,3,7,9,11-14

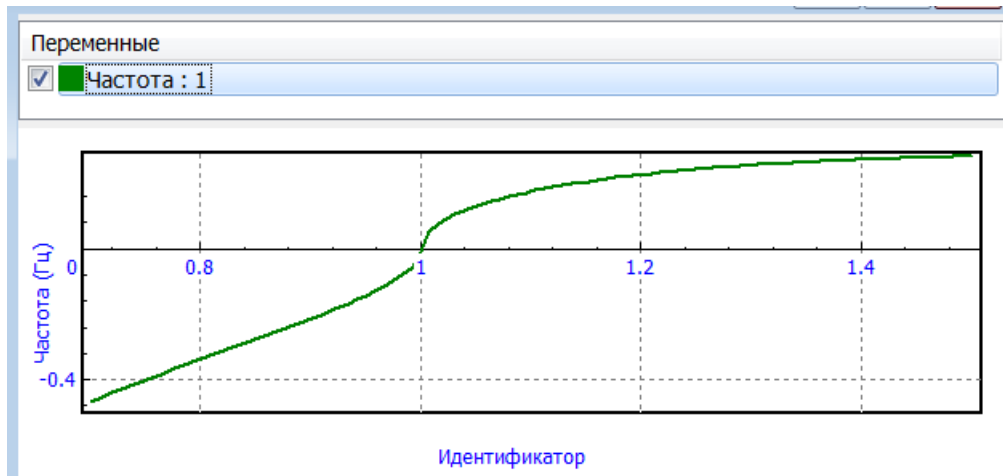


Рис. 4.149. Определение области неустойчивости равновесия

Поскольку отрицательные значения соответствуют неустойчивости, то график можно использовать для определения областей неустойчивости положения равновесия, п. 4.5.1.4. "Расчет собственных частот и форм колебаний", стр. 4-154. Например, в соответствии с рис. 4.149, положение равновесия неустойчиво при $h < 1$. Заметим, что на основании данного расчета делать вывод об устойчивости при $h > 1$ нельзя. В случае консервативных систем для этого следует исследовать потенциальную энергию на наличие строгого изолированного минимума в положении равновесия, либо добавить диссипацию и исследовать равновесие по первому приближению с использованием корневых годографов.

4.5.4.2. Корневые годографы

- Для расчета корневых годографов (зависимость собственных значений от параметра) установите тип расчета **Корни**, рис. 4.150.

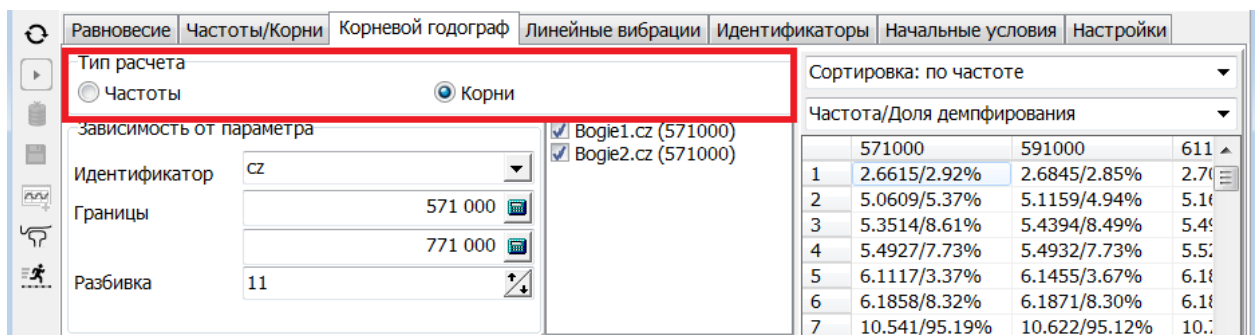


Рис. 4.150. Задание типа расчета – корневой годограф

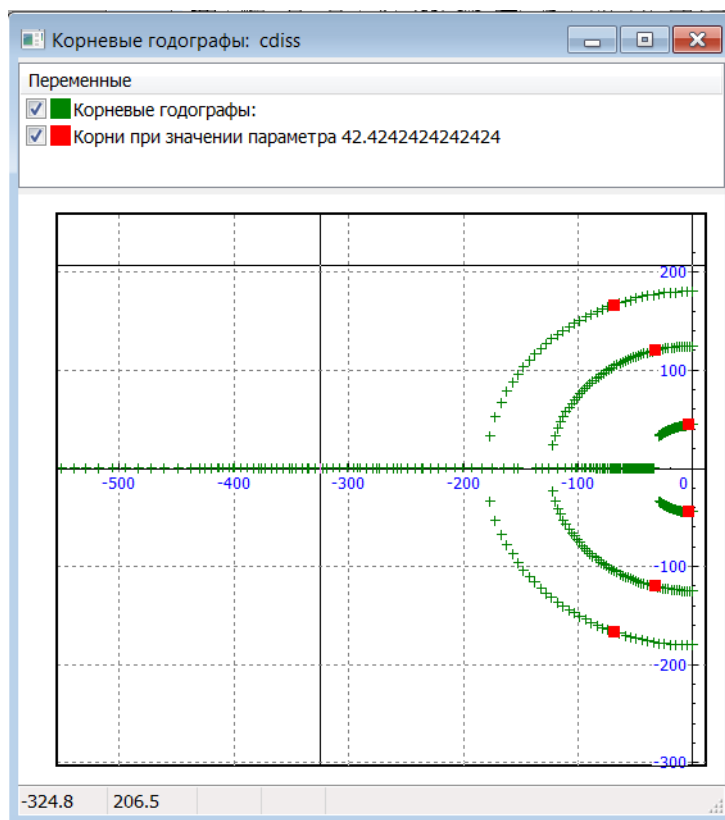




Рис. 4.151. Пример корневого годографа в формате Re/Im

- Выполните расчет с помощью кнопки . Полный список рассчитанных СЗ при различных значениях параметров указывается в виде таблицы в правой части окна, рис. 4.150.
- Для построения графиков корневых годографов на комплексной плоскости после выполнения расчетов используйте кнопку .

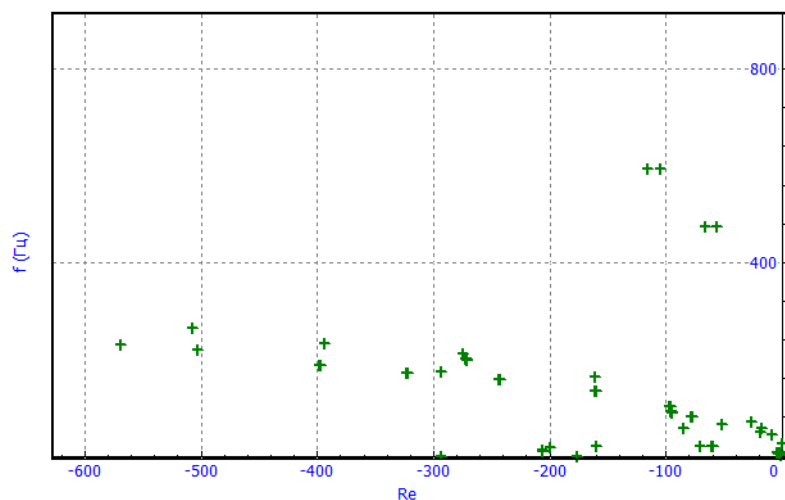


Рис. 4.152. Пример корневого годографа в формате Частота/Доля демпфирования

По оси абсцисс откладывается действительное значение корней, по оси ординат – либо частота f в герцах (выбрано представление результатов **Частота/Доля демпфирования**

вверху справа), либо мнимые значение корней мнимое значение корней $\omega = 2\pi f$ (выбрано представление результатов **Re/Im**).

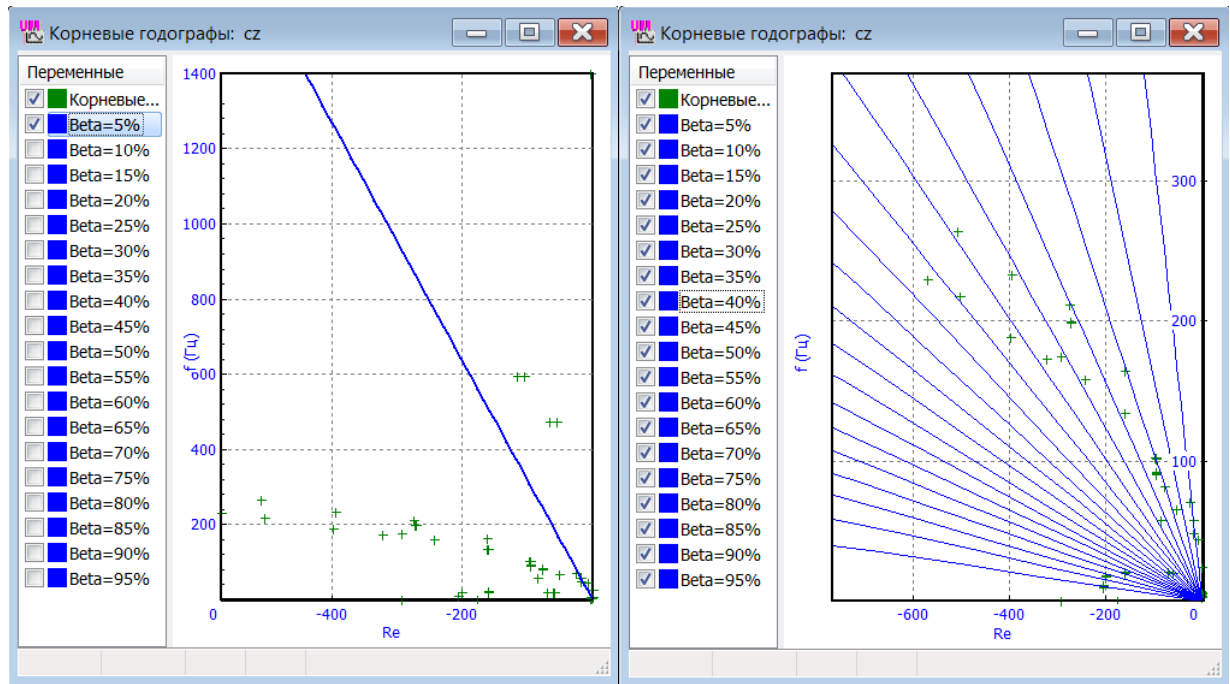


Рис. 4.153. Шкала доли демпфирования

В случае представление результатов **Частота/Доля демпфирования** в окно корневых годографов вносится шкала доли демпфирования. По умолчанию шкала не видна, как на рис. 4.152, однако пользователь может сделать их видимыми. Отсутствию демпфирования соответствует ось ординат, отрицательное направление оси абсцисс соответствует демпфированию 100%. Например, если корни попадают между вертикальной осью и прямой Beta=5%, то их демпфирование лежит в интервале $\beta \in [0,5\%]$. Прямые линии шкалы определяются соотношением

$$n = -\frac{2\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}f, \quad \beta \in [0,1],$$

где n – вещественная часть корня. Шаг шкалы задается в настройках, рис. 4.154.

- Используйте анимацию корневого годографа для отображения значений корней для отдельных значений идентификатора, рис. 4.155.

Корневые годографы могут использоваться для определения границ области устойчивости положения равновесия или стационарного движения. Неустойчивость наступает при переходе одного из корней в область положительности вещественной части. Так, на рис. 4.157 переход корня в положительную область вещественной части наступает приблизительно при значении идентификатора $v_0=35,75$ м/с, что определяет критическую скорость данного экипажа, оцененную по линеаризованным уравнениям. Для определения границы области устойчивости следует использовать пошаговую анимацию корневых годографов, рис. 4.156.

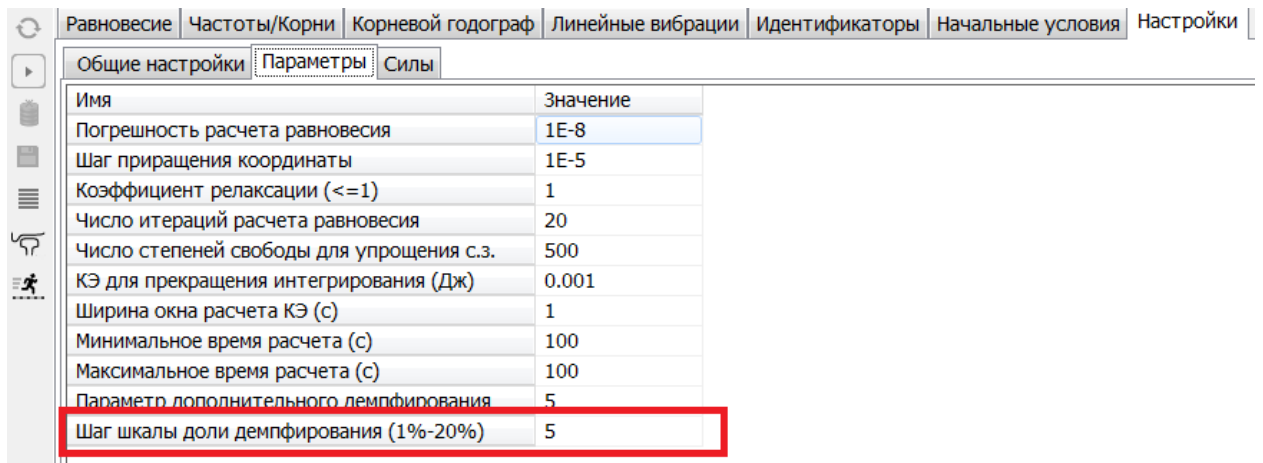


Рис. 4.154. Задание шага шкалы демпфирования

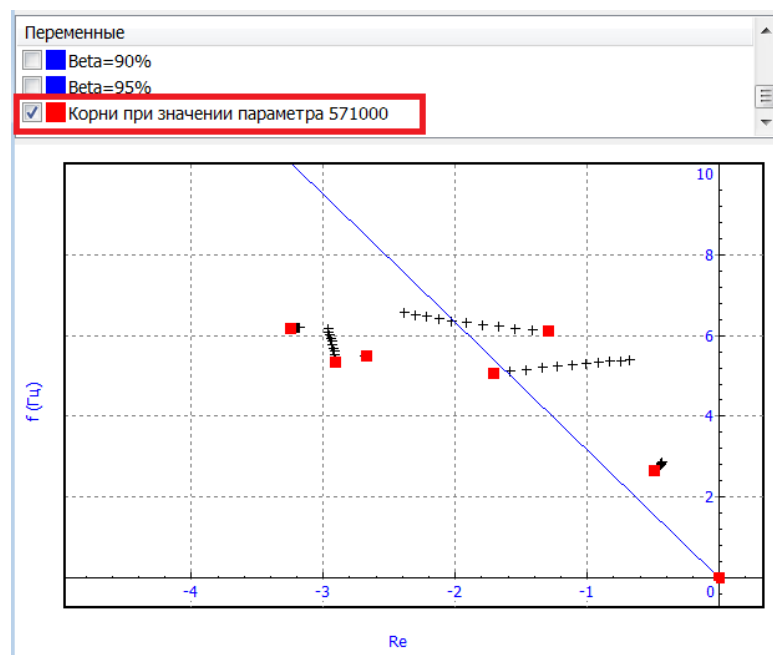


Рис. 4.155. Выделенное значение корней

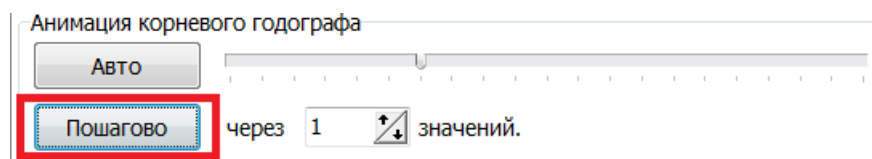


Рис. 4.156. Инструмент анимации корневых годографов

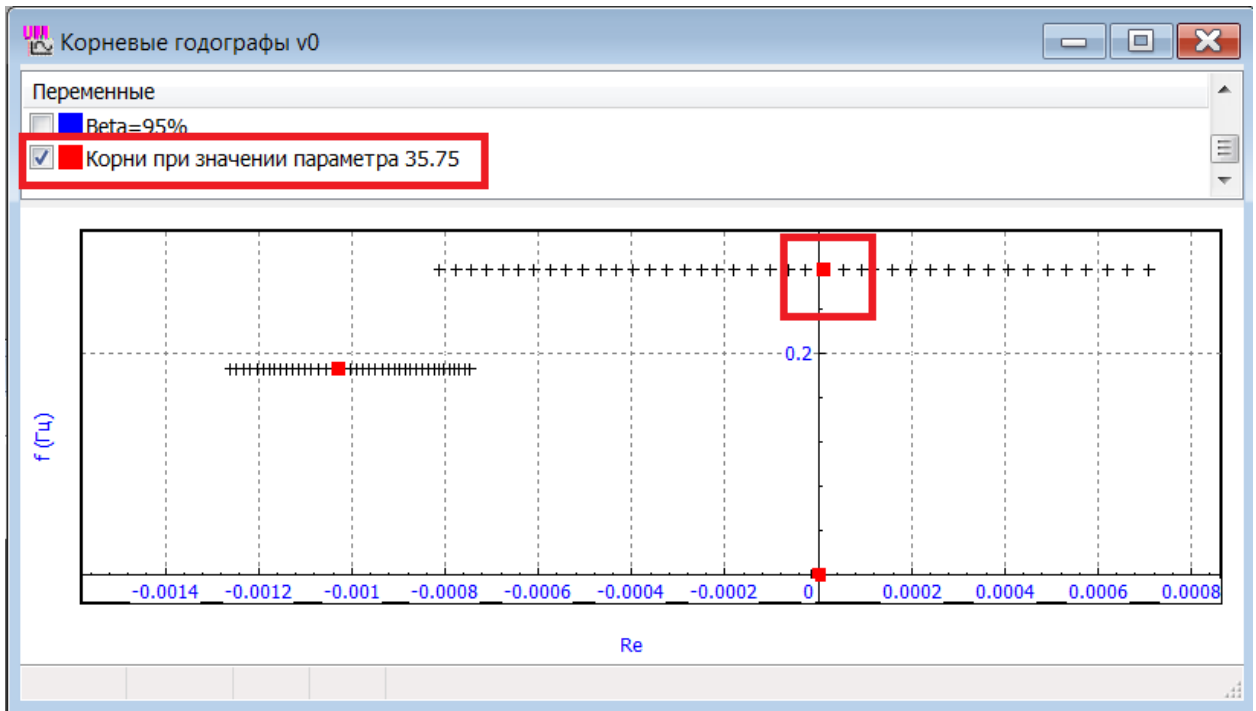


Рис. 4.157. Определение границы области устойчивости для идентификатора v0

4.5.5. Вынужденные гармонические колебания линейризованной модели

Для исследования вынужденных колебаний линейризованных уравнений модели используется вкладка Линейные вибрации, рис. 4.158. Теоретические основы расчета изложены в п. 4.5.1.7. "Вынужденные гармонические колебания", стр. 4-157.

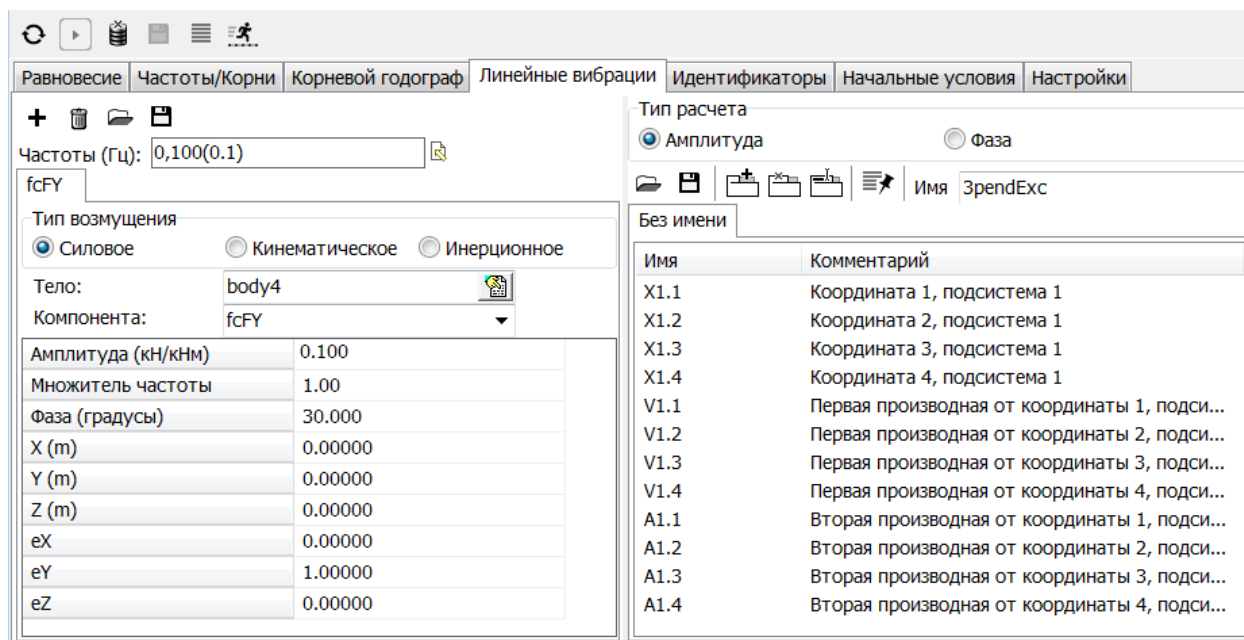


Рис. 4.158. Инструмент анализа вынужденных колебаний

4.5.5.1. Подготовка расчета

- Задание гармонических возмущений.

Расчет проводится для одного или нескольких гармонических возмущающих воздействий. Используйте кнопки

- + – добавление возмущения,
- 🗑 – удаление текущего возмущения,
- 📁 – запись списка возмущений в текстовый файл *.exc,
- 📖 – чтение списка возмущений из файла *.exc.

Для каждого возмущения следует задать

- Тип возмущения: силовое, кинематическое или инерционное, п. 4.5.1.7. "Вынужденные гармонические колебания", стр. 4-157.
- Тело, на которое действует возмущение, выбирается из полного списка тел модели по кнопке 📄.
- Амплитуду возмущения, см. (4.15)–(4.17); размерность: кН (сила), кН·м (момент), мм (линейное кинематическое возмущение), градус (угловое кинематическое возмущение).
- Фазу φ возмущения, в градусах. Этот параметр используется при наличии нескольких возмущений, у которых могут быть разные начальные фазы.

- Координаты точки приложения возмущающего воздействия к телу в СК данного тела (X, Y, Z) в метрах, вектор ρ . Если момент или вращательное кинематическое возмущение прикладываются к абсолютно твердому телу, то координаты игнорируются. Если тело упругое, координаты должны совпадать с координатами узла конечноэлементной разбивки.
- Проекции (e_X, e_Y, e_Z) на оси СК тела единичного вектора e , задающего возмущение, см. п. 4.5.1.7. "Вынужденные гармонические колебания", стр. 4-157. Стандартное направление вектора вдоль одной из осей СК тела можно задать с помощью выпадающего списка **Компонента**.

Для кинематического возмущения рекомендуется задавать только одно возмущающее воздействие, в противном случае результаты могут быть некорректны.

- Задание списка частот

Частоты возмущающих воздействий задаются в герцах и использованием следующего формата: список является последовательностью любого числа подписков, разделенных символом #:

Подсписок # Подсписок # ...

Каждый подсписок имеет один из следующих форматов:

1) Перечисление численных значений частот через запятую: $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3...$

2) Разбивка интервала на заданное число равноотстоящих частот:

$\Omega_1, \Omega_N [N]$

где Ω_1, Ω_N – границы интервала, N – число частот в интервале. Пример:

0,100[201]

задает последовательность 201 частот: 0, 0.5, 1, ... 100.


3) Разбивка интервала с заданным шагом изменения частоты:

$\Omega_1, \Omega_N (d\Omega)$,

где Ω_1, Ω_N – границы интервала, $d\Omega$ – шаг изменения частоты. Пример:

0,10(0.1)

задает последовательность частот: 0, 0.1, 0.2, 0.3, ... 10.

Для визуализации заданного списка частот используйте кнопку , рис. 4.159.

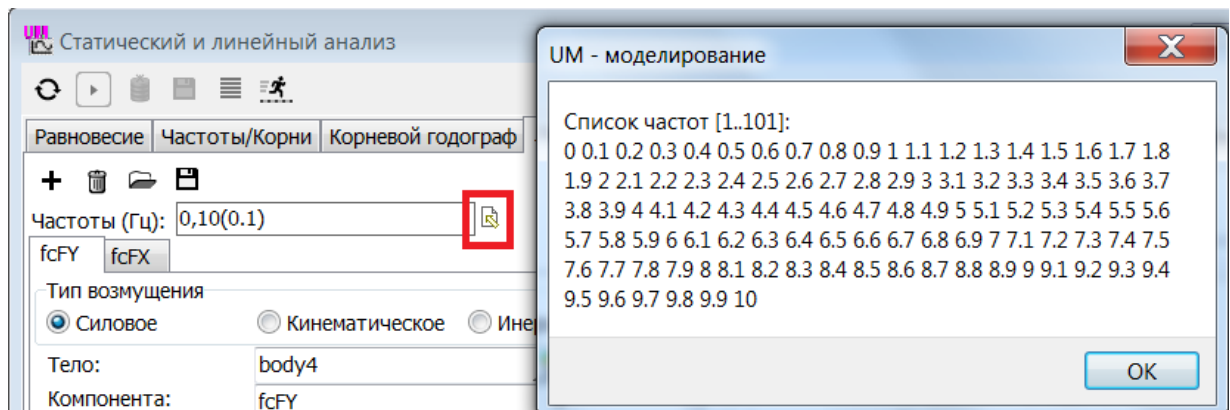



Рис. 4.159. Визуализация списка частот



- Подготовка списка переменных

Основным результатом расчета являются амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики вынужденных колебаний в зависимости от частоты возмущения. Фазочастотная характеристика рассчитывается только в том случае, когда задано *одно* возмущение. При наличии двух и более возмущений определяются только амплитудно-частотные характеристики.

Фаза рассчитывается относительно возмущения с первой частотой из списка, поэтому для получения корректного результата следует задавать нулевое значение первой частоте.

Характеристики рассчитываются для предварительно сформированного списка переменных, рис. 4.160.

Создайте в правой части окна список переменных или прочитайте ранее созданный список *.var с использованием кнопки .

Если с использованием кнопки  (рис. 4.137) сохранить созданный список с именем [Имя модели]Exc.var, то при следующем открытии инструмента статического и линейного анализа список откроется автоматически. Для кинематического возмущения к списку переменных автоматически добавляется переменная F(excitation), соответствующая возмущающей силе, которая вызывает гармоническое колебание заданной амплитуды, рис. 4.161. Переменная добавляется после щелчка на кнопке , означающем начало расчета вынужденных колебаний.

Подробная информация о создании и использовании списков переменных содержится в п. 4.3.3. "Список переменных", стр. 4-61.

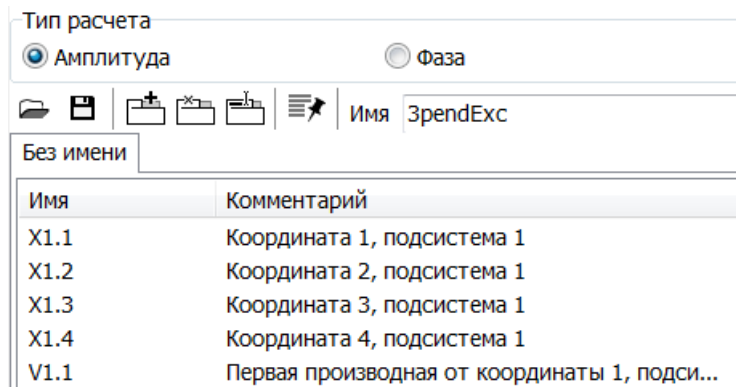


Рис. 4.160. Список переменных для расчета амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик

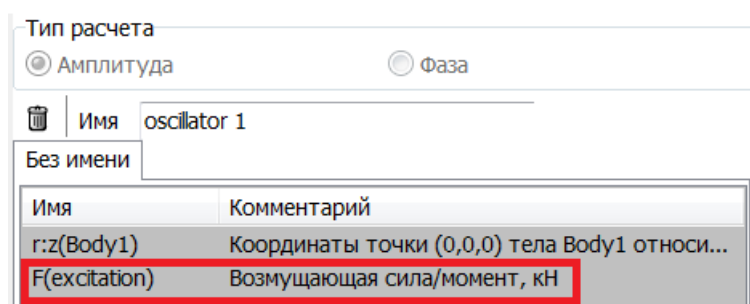




Рис. 4.161. Автоматически добавляемая переменная

4.5.5.2. Расчет вынужденных колебаний

Для выполнения расчета используется кнопка  на панели инструментов. При наличии списка переменных создается файл рассчитанных переменных, имя которого указано в поле **Имя**, рис. 4.162. Если в предыдущем расчете был создан файл переменных, то при новом расчете для его сохранения следует изменить имя файла.

Для выполнения повторного расчета следует удалить предыдущие результаты с помощью кнопки  на панели инструментов, рис. 4.163. При этом файл рассчитанных переменных не удаляется. Команда **Очистить с удалением уравнений** используется, если произведенные с момента последнего расчета изменения могут влиять на линеаризованные уравнения, например, при изменении идентификаторов. Команда **Очистить без удаления уравнений** используется, если произведенные изменения не влияют на уравнения, например, изменился список частот или параметры списка возмущений.

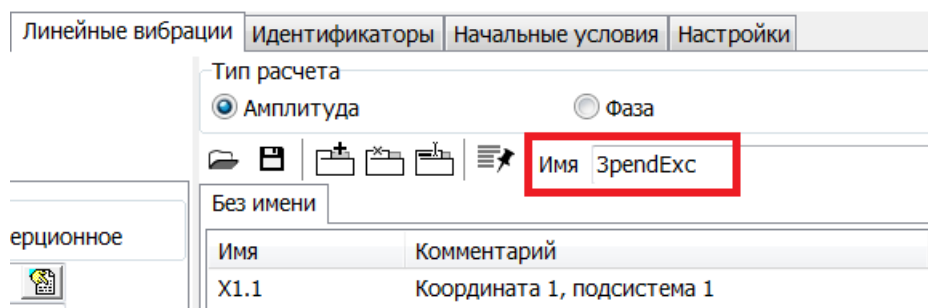


Рис. 4.162. Задание имени файла рассчитанных переменных

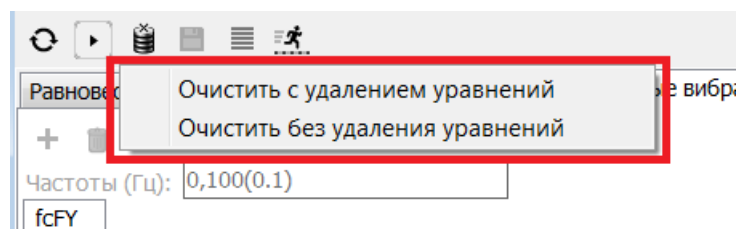


Рис. 4.163. Очистка результатов расчета

4.5.5.3. Результаты расчета вынужденных колебаний

Важнейшим результатом расчета вынужденных колебаний являются графики амплитудно–частотных и фазочастотных характеристик. Для построения графиков нужные поля из списка рассчитанных переменных перетаскиваются мышкой в графические окна, рис. 4.164.

Другой тип результатов – анимация вибрационных форм, рис. 4.165.

Для старта анимации используется кнопка  на панели инструментов.

Амплитуду колебаний можно увеличить или уменьшить по сравнению с расчетной, задав значение множителя в поле **Амплитуда**.

Значение частоты возмущения указывается либо с помощью выпадающего списка, либо с помощью движка.

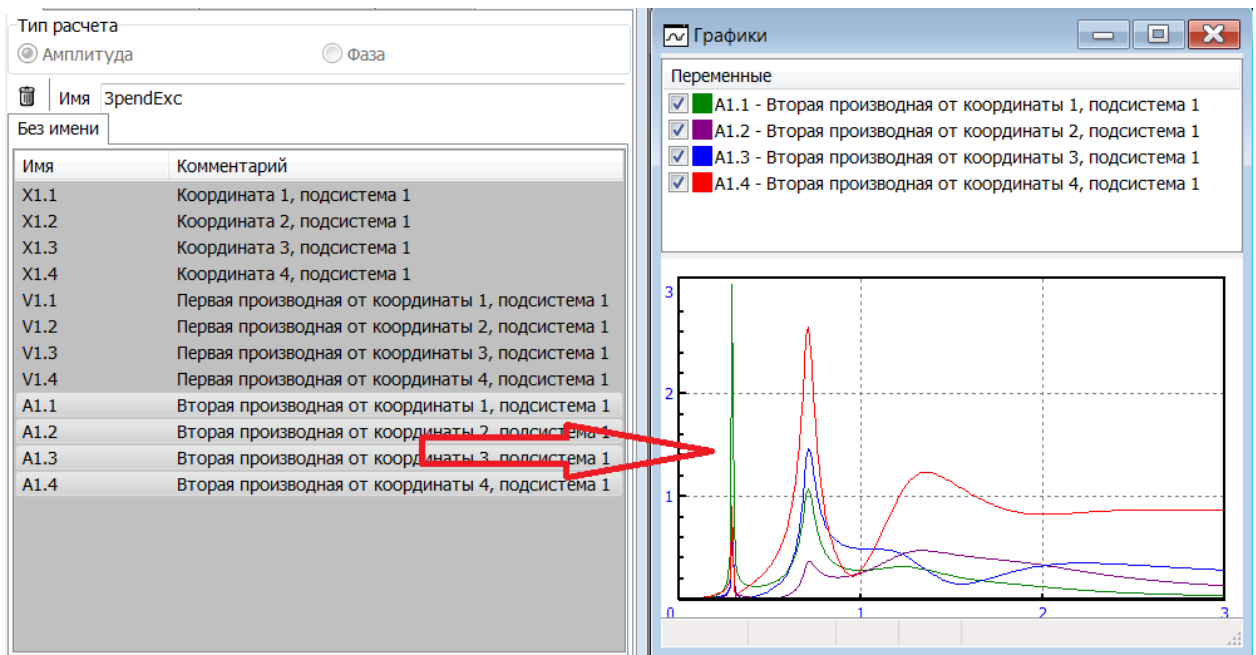


Рис. 4.164. Пример построения графиков амплитудно-частотных характеристик вторых производных от координат (ускорений)

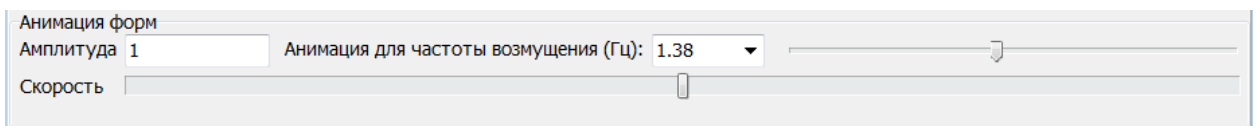


Рис. 4.165. Управление анимацией вибрационных форм

Вектор возмущающей силы анимируется совместно с вибрацией. Для изменения масштаба вектора используется команда **Масштаб векторов** контекстного меню анимационного окна, рис. 4.166.

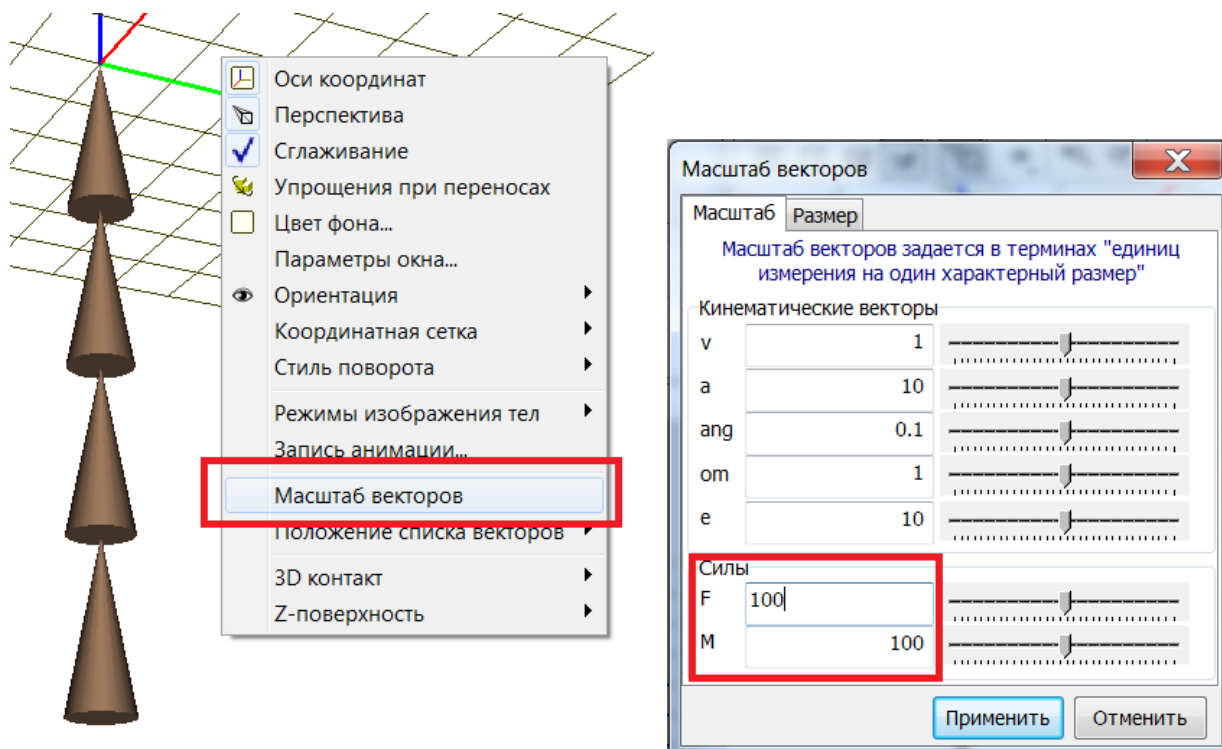


Рис. 4.166. Изменение масштаба векторов

4.5.6. Настройки статического и линейного анализа

Используйте вкладку **Настройки** для управления процессами статического и линейного анализа (рис. 4.167).

4.5.6.1. Общие настройки

Тип расчета равновесия (п. 4.5.1.1. "Уравнения равновесия", стр. 4-148):

Уравнения равновесия – положение равновесия определяется решением нелинейных уравнений равновесия методом Ньютона-Рафсона

Интегрирование – приближенное определение устойчивого положения равновесия путем интегрирования уравнений движения с добавленной диссипацией.

- **Автоматически рассчитывать равновесие**

При включенной настройке рассчитывается положение равновесие модели при каждом выводе линеаризованных уравнений движения. При выключенной настройке линеаризация производится относительно текущих значений начальных условий, п. 4.5.1.2. "Линеаризация уравнений равновесия", стр. 4-151.

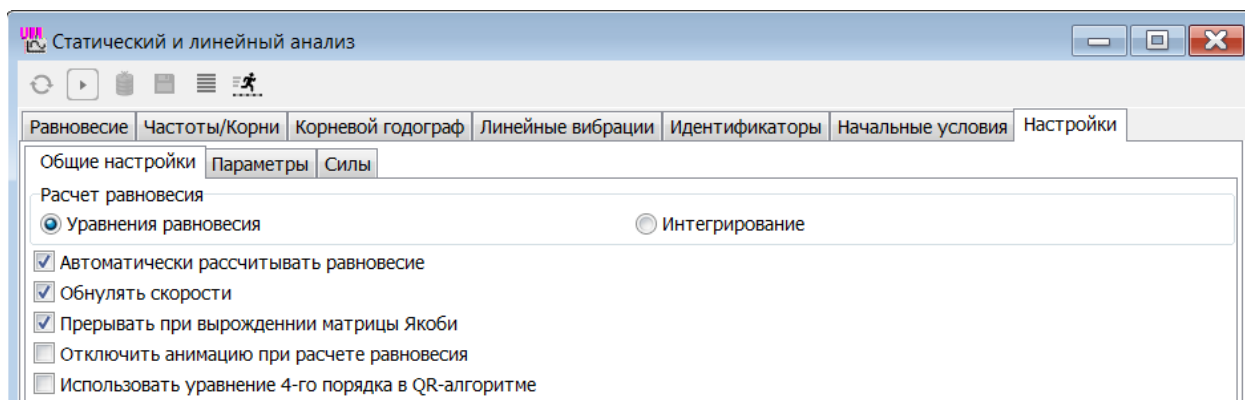


Рис. 4.167. Общие настройки статического и линейного анализа

- **Обнулять скорости**

Данная настройка выключается только в том случае, когда уравнения линеаризуются относительно ненулевых значений скоростей, как правило, в случае стационарного движения, п. 4.5.1.2. "*Линеаризация уравнений равновесия*", стр. 4-151.

- **Прерывать при вырождении матрицы Якоби**

Выключение ключа может помочь при расчете безразличного положения равновесия, например, при равновесии тела на гладкой горизонтальной плоскости.

- **Отключить анимацию при расчете равновесия**

В случае отключенной настройки при расчете равновесия происходит перерисовка модели в анимационных окнах после каждой итерации метода Ньютона-Рафсона или в процессе интегрирования уравнений (в зависимости от типа расчета равновесия). Включение настройки позволяет ускорить процесс для объектов со сложной графикой.

- **Использовать уравнение 4-го порядка**

Настройка относится к особенностям QR-алгоритма расчета собственных значений вещественной матрицы. При включении данной функции используется решение алгебраического уравнения четвертого порядка. В противном случае выполняются итерации до снижения порядка до второго, пока число итерации не превысит предельное значение. В теоретическом смысле, данная настройка не должна влиять на конечный результат.

4.5.6.2. Параметры статического и линейного анализа

Группа настроек численного расчета положения равновесия методом Ньютона–Рафсона, п. 4.5.1.1.2. *"Численное решение уравнений равновесия"*, стр. 4-150.

- **Погрешность расчета равновесия (ϵ)**

Итерации расчета координат прерываются, когда на данной итерации суммарное приращение координат становится меньше ϵ , см. (4.4).

- **Шаг приращения координаты (δ)**

Малое приращение координаты, используемое при расчете матриц Якоби уравнений равновесия (уравнение (4.5)), а также при линейзации уравнений движения (п. 4.5.1.2. *"Линеаризация уравнений равновесия"*, стр. 4-151) методом конечных разностей.

- **Коэффициент релаксации (R)**

Значение коэффициента релаксации меньше единицы может использоваться для стабилизации метода Ньютона–Рафсона (4.3) в случае его расходимости.

- **Число итераций расчета равновесия (N)**

При превышении числа итераций N пользователь получает запрос о продолжении итераций.

Общие настройки			Параметры	Силы
Имя			Значение	
Погрешность расчета равновесия			1E-8	
Шаг приращения координаты			1E-8	
Коэффициент релаксации (≤ 1)			1	
Число итераций расчета равновесия			20	
КЭ для прекращения интегрирования (Дж)			0.001	
Ширина окна расчета КЭ (с)			1	
Минимальное время расчета (с)			1	
Максимальное время расчета (с)			100	
Параметр дополнительного демпфирования			5	
Число степеней свободы для упрощения с.з.			500	
Шаг шкалы доли демпфирования (1%-20%)			10	

Рис. 4.168. Настройки численных параметров

Группа настроек расчета положения устойчивого равновесия методом интегрирования уравнений движения, п. 4.5.1.1.1. *"Расчет устойчивого положения равновесия методом интегрирования уравнений"*, стр. 4-149.

- **КЭ для прекращения интегрирования (Дж) T_{min}**
- **Ширина окна расчета КЭ (с) Δt_T**
- **Минимальное время расчета (с) t_{start}**
- **Максимальное время расчета (с) t_{max}**
- **Параметр дополнительного демпфирования (1/c) α**

Процесс расчета прекращается, если максимальная кинетическая энергия модели в пределах окна по времени шириной Δt_T , меньше заданного значения T_{min} . Время моделирования не меньше, чем t_{start} , и не больше t_{max} . При расчете к модели добавляется диссипация, задаваемая параметром α .

Дополнительные параметры

- **Число степеней свободы для упрощения с.з.**

Если число степеней свободы модели превышает заданное число, становится доступным приближенный расчет собственных значений и собственных векторов, п. 4.5.1.6. *"Расчет приближенных собственных значений и собственных векторов"*, стр. 4-155.

- **Шаг шкалы доли демпфирования (1%-20%)**

Параметр задает шаг изменения доли демпфирования в графическом окне при построения корневых годографов, п. 4.5.4.2. *"Корневые годографы"*, стр. 4-167. Шаг изменяется в пределах от 1% (100 делений шкалы) до 20% (5 делений шкалы).

4.5.6.3. Включение/выключение сил

Для включения и выключения отдельных силовых элементов используется вкладка **Настройки | Силы | Вкл./Выкл** (рис. 4.169). Список выключенных сил сохраняется в файле конфигурации линейного анализа Last.la.

При входе в режим анализа настройки включенных сил, созданные для моделирования динамики модели, сохраняются, и после выхода – восстанавливаются (см. п. 4.4.1.9. "Включение и выключение сил. Ключ жесткости силовых элементов", стр. 4-135). Т.е. выключение сил при линейном и статическом анализе не влияет на процесс численного моделирования динамики.

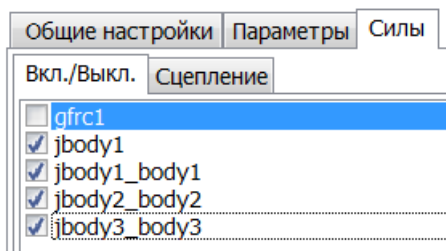


Рис. 4.169. Список сил

4.5.6.4. Силы трения

Поскольку силы кулоновского трения невозможно линеаризовать, при статическом и линейном анализе предусмотрено два состояния трения:

- сила трения равна нулю, т.е. выключена
- сила трения находится в режиме сцепления, и ее величина не ограничена сверху (абсолютное трение).

Для выключения трения или установки абсолютного трения используется вкладка **Настройки | Силы | Сцепление** (рис. 4.170). Галочками отмечают силы с абсолютным трением, в противном случае трение выключено. Список сил в режиме сцепления сохраняется в конфигурационном файле Last.la и автоматически подгружается при переходе в режим статического и линейного анализа.

В режиме сцепления трение заменяется упруго-диссипативным линейным элементом с большими значениями коэффициентов жесткости и диссипации.

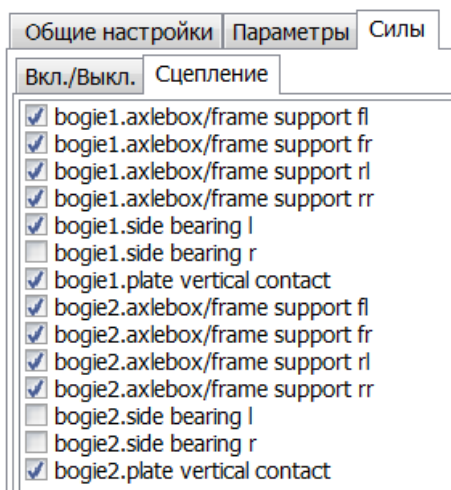


Рис. 4.170. Установка отключения трения и установки абсолютного трения

Ниже рассмотрены силовые элементы, для которых реализована указанная методика.

- Контакт точки-плоскость и точки-Z-поверхность

Особенностью контактного взаимодействия данного типа является тот факт, что при статическом и линейном анализе силы считаются *двухсторонними*, то есть при отрыве от плоскости ли поверхности появляется нормальная сила, притягивающая контактные точки к поверхности. Для силы сцепления используются коэффициенты жесткости и диссипации, задаваемые для нормальной силы.


- Скалярные силы и моменты следующих типов: фрикционная, упруго-фрикционная, упруго-фрикционная сила 2, см. [Главу 2](#), п. "Типы скалярных сил".

В качестве положения сцепления используются текущие координаты модели. Например, если во вращательном шарнире имеется трение, и на момент расчета равновесия шарнирная координата имеет значение x_0 , то упругая часть силы сцепления определяется в зависимости от отклонения координаты от данного значения $c*(x-x_0)$. Таким образом, перед расчетом равновесия при наличии сил трения в режиме сцепления, следует задать или рассчитать нужные значения координат.

4.5.7. Файл конфигурации статического и линейного анализа

Конфигурационный текстовый файл статического и линейного анализа Last.la автоматически создается при закрытии окна анализа и подгружается при открытии данного окна. Файл содержит настройки анализа (п. 4.5.6. "Настройки", стр. 4-177) и данные вибрационного анализа: список частот и возмущений (п. 4.5.5. "Вынужденные гармонические колебания линеаризованной модели", стр. 4-172).

4.5.8. Особенности анализа рельсовых экипажей

Особенности линейного и статического анализа рельсовых экипажей (РЭ) связаны с моделью контакта колеса с рельсом и возможной фиксацией колесных пар. Используйте кнопку  для изменения параметров моделирования рельсового экипажа.

При **расчете положения равновесия** РЭ силы крипа отсутствуют, то есть колесные пары стоят на абсолютно гладких рельсах; собственные вращения всех колесных пар, а также продольное смещение первой колесной пары блокируются упругими связями с большим коэффициентом жесткости.

В случае линейного анализа (расчет частот и собственных значений, вибрационный анализ) используются два ключа, рис. 4.171:

- **Блокировать контакт колеса с рельсом**

В контакте колеса с рельсом вводятся продольная и поперечная упругие связи. Коэффициент жесткости продольной связи большой (10^{10} Н/м). В случае поперечной связи коэффициент жесткости равен поперечной упругости рельса, если используется безынерционная модель рельса, а в случае инерционного рельса коэффициент полагается равным 10^{10} Н/м.

При расчете *собственных значений* блокировка контакта игнорируется, если исследуется стационарное движение экипажа, то есть выключена опция **Обнулять скорости**.

- **Блокировать вращение колесных пар (КП)**

Вращение колесных пар вокруг оси симметрии блокируются упругими связями с большим коэффициентом жесткости.

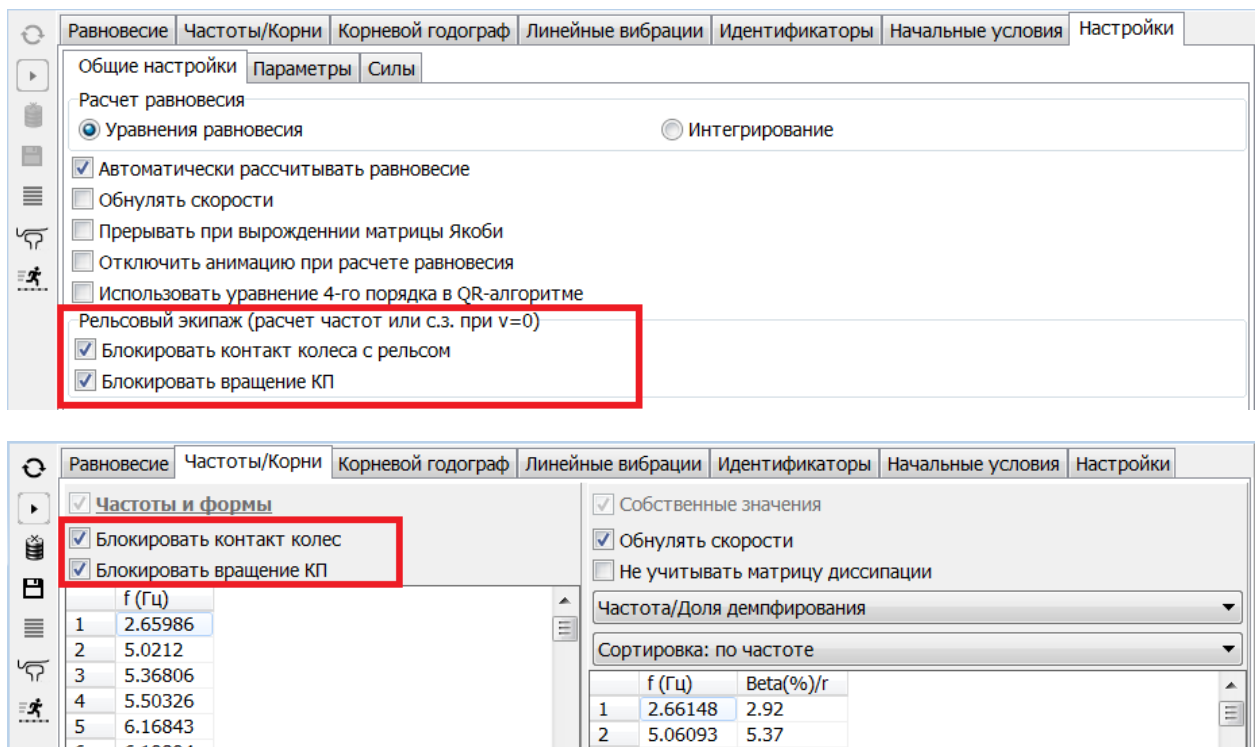


Рис. 4.171. Дополнительные настройки для рельсовых экипажей

Расчет критической скорости РЭ по линейному приближению

Построение корневых годографов позволяет определить потерю устойчивости РЭ по первому приближению, то есть оценить критическую скорость. Для оценки критической скорости РЭ по линейному приближению следует построить корневые годографы в виде зависимостей собственных значений от идентификатора v_0 , то есть продольной скорости. Тогда переход пары корней через ось ординат в область положительной вещественной части корней будет свидетельствовать о неустойчивости экипажа по Ляпунову, см. рис. 4.157.

При расчете *собственных значений* блокировка вращения игнорируется, если исследуется стационарное движение экипажа, то есть выключена опция **Обнулять скорости**.

Заметим, что при наличии в модели силовых элементов с кулоновским трением, как в случае грузового вагона с трехэлементной тележкой, не позволяет выполнить корректную оценку критической скорости РЭ. Кроме того, из-за нелинейных эффектов в системе колесо–рельс возможно возникновение автоколебаний на скоростях, меньших, чем критическая скорость, рассчитанная по линейному приближению. По этим причинам рекомендуется определять критическую скорость методами, описанными в документации к модулю моделирования РЭ, [Глава 8](#), п. "*Методика расчета критической скорости*".

Наличие нулевых корней при расчете собственных значений (СЗ)

Если при расчете СЗ выключена опция **Обнулять скорости**, рис. 4.172, то учитываются силы трения (силы крипа) в контакте колеса с рельсом. В линейном приближении силы крипа имеют диссипативную составляющую, но отсутствует упругая составляющая. Это приводит к появлению нулевых корней характеристического уравнения, точнее, близких к нулю в силу погрешности численных методов. В качестве примера рассмотрим уравнение вращающегося тела, на который действует диссипативный момент

$$J\ddot{\varphi} = -\alpha\dot{\varphi},$$

здесь φ – угол поворота, J – момент инерции, α – коэффициент диссипации. Характеристическое уравнение $J\lambda^2 + \alpha\lambda = 0$ имеет два корня: один отрицательный $\lambda = -J/\alpha$, характеризующий диссипацию, а второй – нулевой в силу отсутствия упругой силы.

The screenshot shows a software interface with several tabs: "Равновесие", "Частоты/Корни", "Корневой годограф", "Линейные вибрации", "Идентификаторы", "Начальные условия", and "Настройки". The "Частоты/Корни" tab is active.

On the left, under "Частоты и формы", there are checked options: "Блокировать контакт колеса с рельсом" and "Блокировать вращение КП". Below this is a table of frequencies (f) in Hz:

№	f (Гц)
1	2.65986
2	5.0212
3	5.36806
4	5.50326
5	6.16843
6	6.19894
7	21.1234
8	21.1381
9	22.4671
10	22.4671
11	29.9387
12	30.1012
13	33.6594
14	33.6601
15	35.8112
16	35.8797
17	35.8936
18	35.8955
19	38.0311
20	38.0312
21	40.9131

On the right, under "Собственные значения", the "Обнулять скорости" checkbox is checked. Below it, there are dropdown menus for "Частота/Доля демпфирования" and "Сортировка: по частоте".

At the bottom right, a table shows the results of the eigenvalue calculation:

№	f (Гц)	Beta(%) / r
52	217.963	34.46
53	230.298	36.23
54	230.298	36.23
55	233.867	26.16
56	233.867	26.16
57	263.911	29.42
58	263.913	29.42
59	298.525	29.40
60	303.123	29.90
61	0	2.79461E-8
62	0	1.58071E-9
63	0	2.67269E-10
64	0	2.67269E-10
65	0	-2.6727E-10
66	0	-2.6727E-10
67	0	-1.58071E-9
68	0	-2.79461E-8
69	0	-176.985

Рис. 4.172. Нулевые корни при расчете СЗ рельсового экипажа

4.5.9. Особенности анализа колесных экипажей

К колесным экипажам (КЭ) относятся модели автомобилей и монорельсовых экипажей.

- **Блокировать вращение колес**

При включенной настройке вращение колес вокруг своей оси блокируется линейным упругим с большой жесткостью или упруго–диссипативным силовым элементом с небольшими значениями коэффициентов жесткости и диссипации. Упруго-диссипативный элемент используется при нахождении положения равновесия путем интегрирования уравнений движения, п. 4.5.1.1.1. *"Расчет устойчивого положения равновесия методом интегрирования уравнений"*, стр. 4-149.

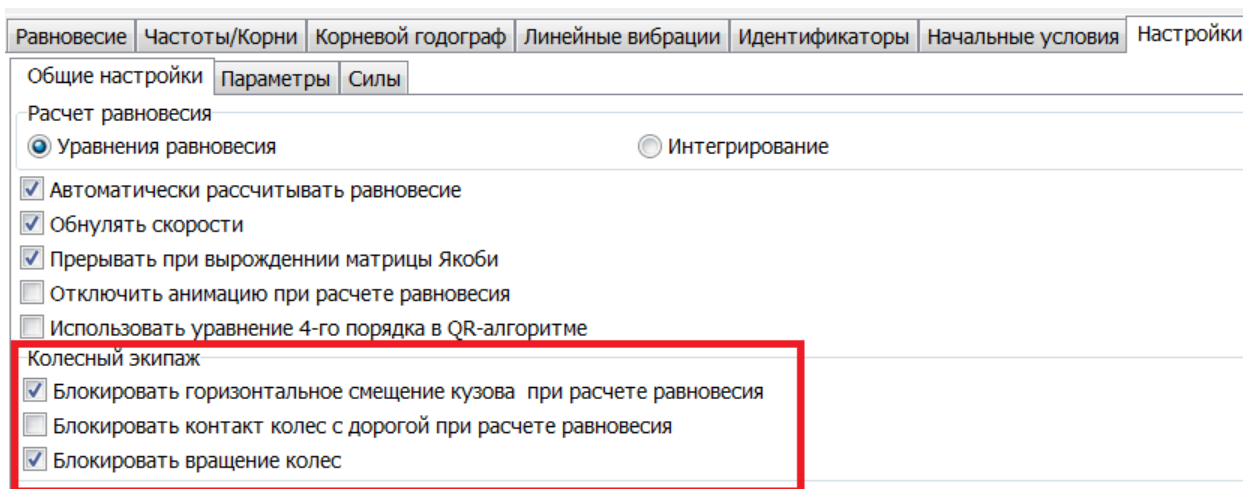


Рис. 4.173. Дополнительные настройки для колесных экипажей

При расчете равновесия используются два типа блокировок КЭ:

- **Блокировать горизонтальное смещение кузова при расчете равновесия**
- **Блокировать контакт колес с дорогой при расчете равновесия**

Если включена первая настройка и выключена вторая, то блокируется смещение центра масс и кузова и его поворот вокруг вертикальной оси. Если включена вторая настройка, то в контакте колеса с дорогой добавляется линейный упругий элемент, поперечная и продольная жесткость которого задаются в модели шины.

Заметим, что при любом расчете линейного анализа (частоты, корни, вынужденные колебания) используется блокировка контакта колес с дорогой.

4.5.10. Особенности анализа гусеничных машин

При определении положения равновесия ГМ используется исключительно метод интегрирования уравнений движения, п. 4.5.1.1.1. *"Расчет устойчивого положения равновесия методом интегрирования уравнений"*, стр. 4-149.

Для всех контактов траков с дорогой должен быть включен режим сцепления.

4.5.11. Тестирование и примеры

4.5.11.1. Статический анализ

4.5.11.1.1. Математический маятник

Рассмотрим пример математического маятника: материальной точки на невесомом стержне, имеющем одну вращательную степень свободы относительно горизонтальной оси, рис. 4.174. Модель находится по адресу

[{Данные УМ}\Samples\Static & Linear analysis\Pendulum.](#)

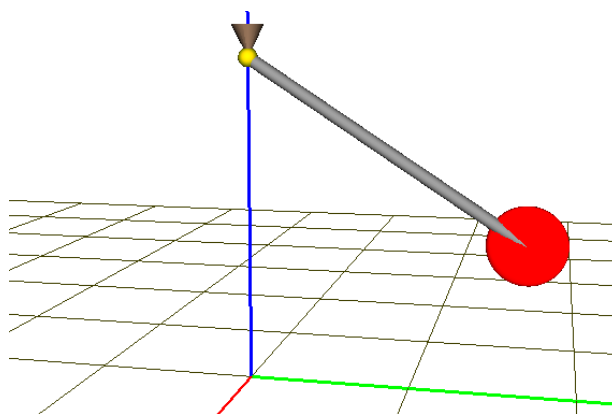


Рис. 4.174. Маятник с одной степенью свободы

Список идентификаторов модели включает:

- $l = 1\text{ м}$ – длина маятника,
- $m = 10\text{ кг}$ – масса маятника,
- $ForceY$ – активная сила, приложенная к маятнику вдоль оси Y СК0,
- $TorqueX$ – активный момент, приложенный к маятнику вокруг оси X СК0.

Статический тест 1

К маятнику приложен момент T_x (идентификатор $TorqueX$). Определяется угол поворота маятника в положении равновесия φ и проекции сил реакции на оси СК0 R_y, R_z .

Аналитическое решение:

$$\sin \varphi = \frac{T_x}{mgl}, \quad R_y = 0, \quad R_z = mg.$$

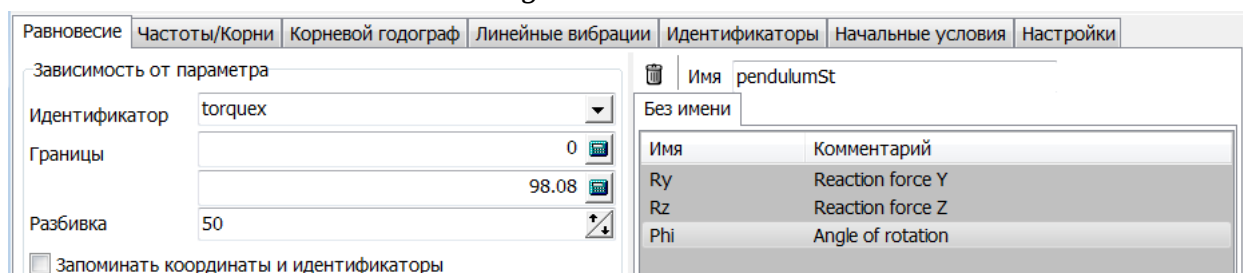


Рис. 4.175. Расчет равновесия в зависимости от идентификатора $TorqueX$

Статический тест 2

К маятнику приложена сила F_y (идентификатор $ForceY$). Определяется угол поворота маятника в положении равновесия φ и проекции сил реакции на оси СК0 R_y, R_z .

Аналитическое решение:

$$\sin \varphi = \frac{F_y}{mg}, \quad R_y = -F_y, \quad R_z = mg.$$

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
m	10		
l	1		
g	9.81		
Tx	20		
phi_Tx	arcsin(Tx/m/g/l)*rtod	11.763569	
Fy	0		
phi_Fy	arctan(Fy/m/g)*rtod	0	

Рис. 4.176. Расчет равновесия в символьном калькуляторе UM

Расчет положения равновесия по аналитическим зависимостям выполнен в символьном калькуляторе UM и сохранен в каталоге задачи в файле Static test.clc.

Результаты численного определения зависимости угла отклонения маятника от момента и силы, а также сил реакций от силы F_y приведены на рис. 4.177, 4.178. Сравнение аналитических и численных результатов в табл. 4.3 свидетельствует о совпадении результатов.

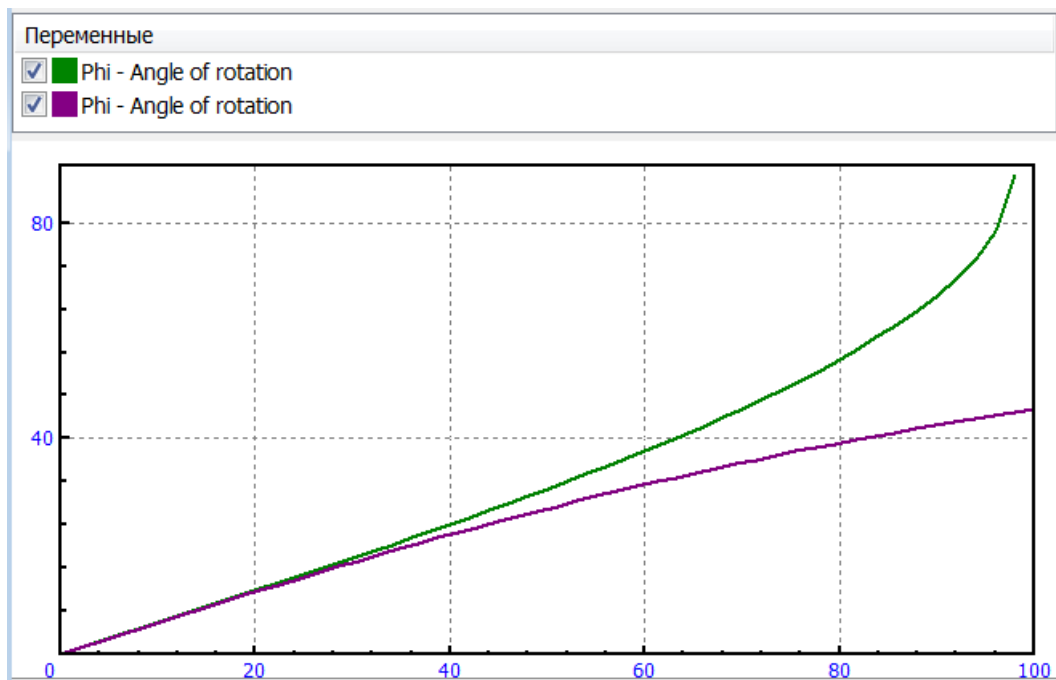


Рис. 4.177. Зависимость угла поворота маятника от момента (верхний график) и от силы

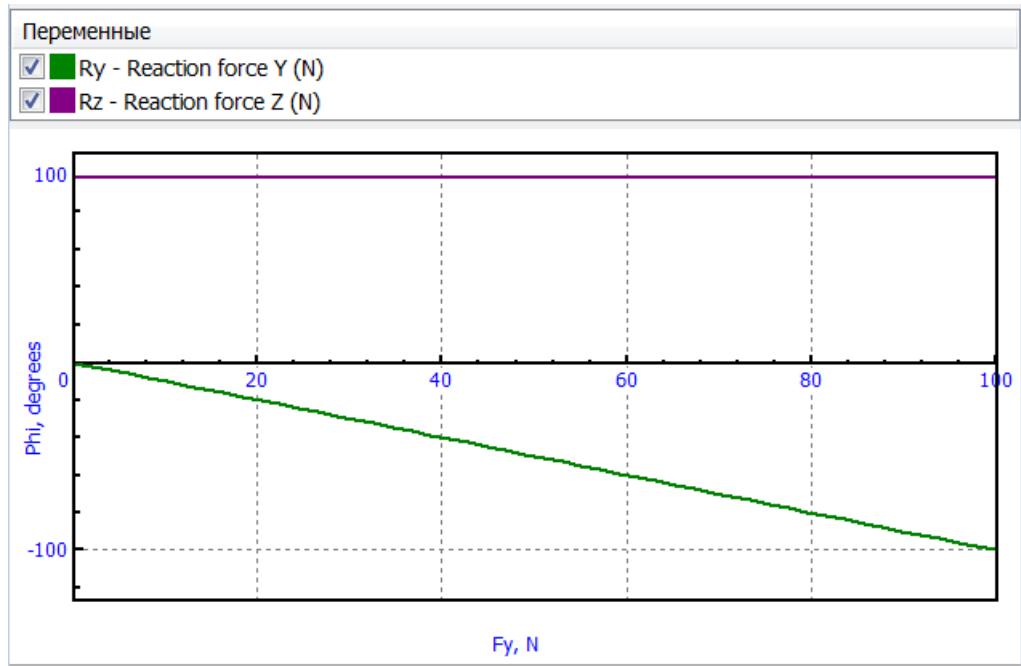


Рис. 4.178. Зависимость сил реакций маятника от силы

Таблица 4.3

Сравнение аналитических (А) и численных (Ч) результатов для маятника

N	Статический тест 1			Статический тест 2		
	TorqueX, Нм	Phi (А), °	Phi (Ч), °	ForceY, Н	Phi (А), °	Phi (Ч), °
1	20	11.7636	11.7636	20	11.5232	11.5232
2	50	30.6428	30.6428	50	27.0072	27.0072

4.5.11.1.2. Двухопорная балка

Балка опирается по концам на две линейные пружины и нагружена вертикальной силой, рис. 4.179. Модель находится по адресу

[{Данные УМ}\Samples\Static & Linear analysis\Beam](#)

Список идентификаторов модели включает:

- $l=1\text{м}$ – длина балки,
- $m=100\text{кг}$ – масса балки,
- $ForceZ=-1500\text{Н}$ – активная вертикальная сила, приложенная к балке,
- y_0 – поперечная координата точки приложения силы,
- $Cz=1.0\text{e}6\text{ Н/м}$, $Cy=1.0\text{e}5\text{ Н/м}$, $Cphi=10\text{ Нм}$ – коэффициенты продольной, поперечной и изгибной жесткости балки.

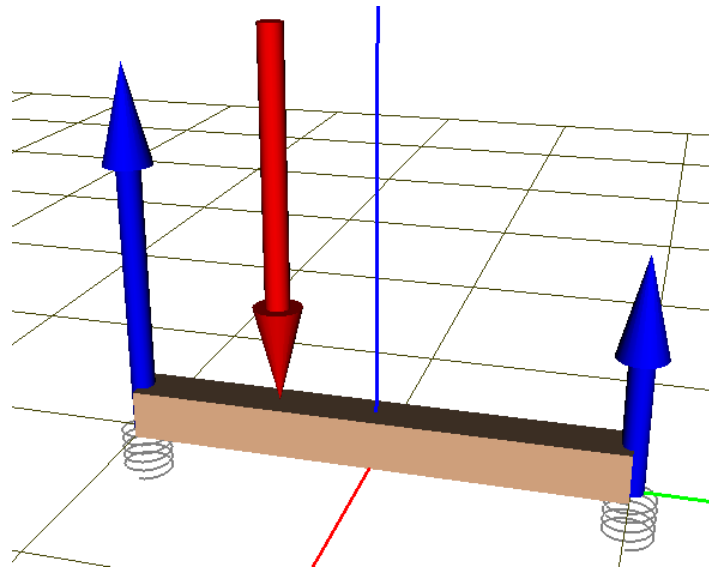


Рис. 4.179. Двухопорная балка

Статический тест

Изменяется координата y_0 точки приложения вертикальной силы. Определяются вертикальные реакции пружин $R_{z, left}$, $R_{z, right}$ при значении нагрузки $ForceZ=-1500\text{Н}$.

Приближенное аналитическое решение, не учитывающее влияние изгибной жесткости пружин и смещения балки в положении равновесия:

$$R_{z, left} = \frac{1}{2} \left(-F_z \left(1 + \frac{2y_0}{l} \right) + mg \right),$$

$$R_{z, right} = \frac{1}{2} \left(-F_z \left(1 - \frac{2y_0}{l} \right) + mg \right).$$

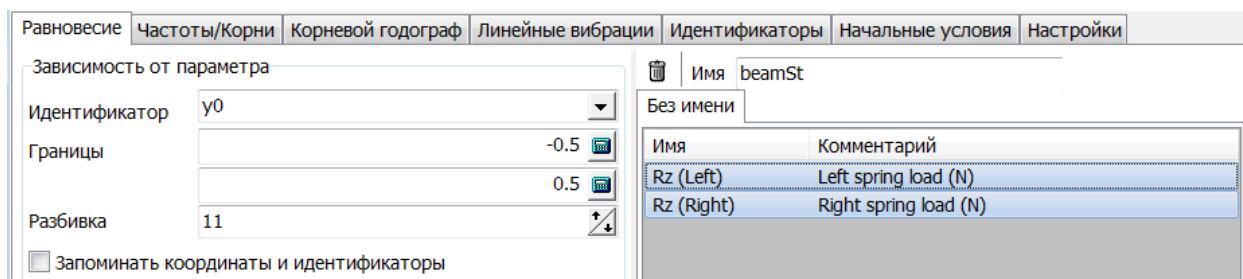


Рис. 4.180. Расчет равновесия в зависимости от положения нагрузки

Расчет положения равновесия по аналитическим зависимостям выполнен в символьном калькуляторе UM и сохранен в каталоге задачи в файле Static test.clc.

Результаты численного определения вертикальных усилий в пружинах от положения нагрузки приведены на рис. 4.181. Сравнение приближенных аналитических и численных результатов в табл. 4.4 свидетельствует об их близости.

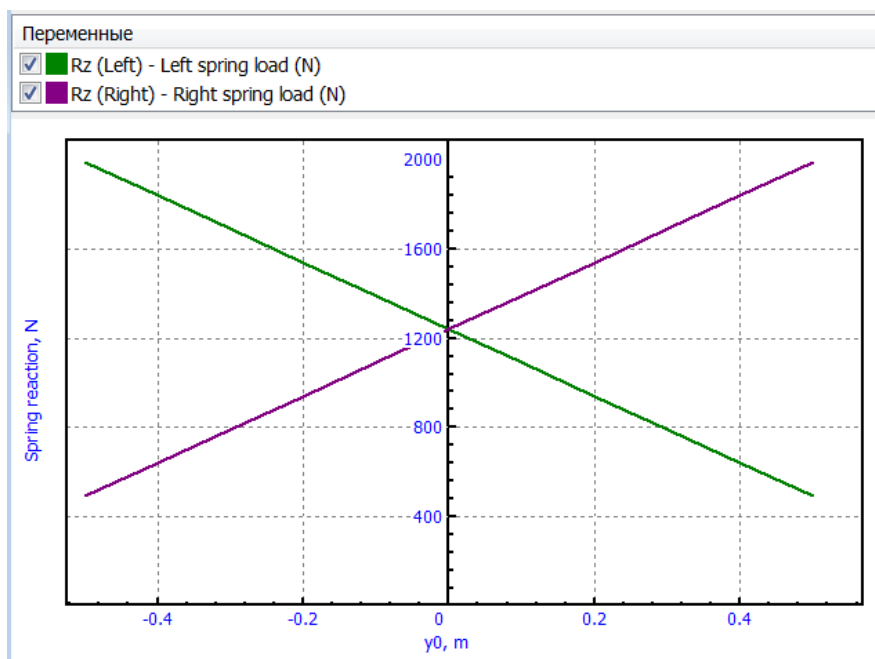


Рис. 4.181. Рассчитанные реакции пружин в зависимости от координаты точки приложения силы

Таблица 4.4

Сравнение аналитических (А) и численных (Ч) результатов для балки

	y_0 , м	R_z left(A), Н	R_z right (A), Н	R_z left(Ч), Н	R_z right (Ч), Н
1	0	1240.5	1240.5	1240.5	1240.5
2	0.5	1990.5	490.5	1991.5	489.6

4.5.11.2. Частоты и собственные значения

4.5.11.2.1. Цепочка материальных точек, связанных упруго–диссипативно

Рассмотрим цепочку материальных точек одинаковой массы m , связанных одинаковыми линейными упруго–диссипативными силовыми элементами с коэффициентами жесткости c и демпфирования v , рис. 4.182. Каждая материальная точка имеет единственную степень свободы вдоль цепочки. Действие силы тяжести не учитывается. Модель, состоящая из десяти точек, находится по адресу

[{Данные УМ}\Samples\Static & Linear analysis\10 points](#)

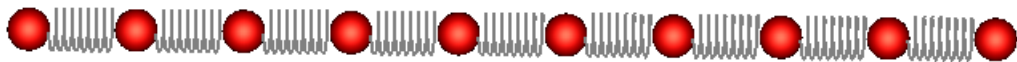


Рис. 4.182. Модель цепочки десяти материальных точек

Преимуществом такой модели является возможность аналитически проанализировать ее свободные колебания. Уравнения свободных колебаний цепочки имеют вид

$$m\ddot{q} + vA\dot{q} + cAq = 0,$$

где A – симметричная, положительно полуопределенная трехдиагональная матрица

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Собственные значения этой матрицы вычисляются по формуле [4]

$$k_s = 4 \sin^2 \frac{\pi s}{2n}, \quad s = 0, 1, \dots, n - 1,$$

где n – размер матрицы, равный числу материальных точек. Соответственно, частоты модели в герцах равны

$$f_s = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \sin \frac{\pi s}{2n}, \quad s = 0, 1, \dots, n - 1.$$

Поскольку матрица диссипации пропорциональна матрице жесткости, то переход к главным координатам в уравнениях свободных колебаний приводит к системе независимых дифференциальных уравнений

$$m\ddot{x}_s + vk_s\dot{x}_s + ck_sx_s = 0, \quad s = 0, 1, \dots, n - 1.$$

Характеристические уравнения

$$m\lambda_s^2 + vk_s\lambda_s + ck_s = 0, \quad s = 0, 1, \dots, n - 1$$

имеют корни, являющиеся собственными значениями (СЗ) исходной задачи

$$\lambda_s = -\frac{vk_s}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{vk_s}{2m}\right)^2 - \frac{ck_s}{m}}$$

При малой диссипации имеем пары комплексно-сопряженных корней

$$\lambda_s = a_s + ib_s = -\frac{vk_s}{2m} \pm i \sqrt{\frac{ck_s}{m} - \left(\frac{vk_s}{2m}\right)^2}$$

Таким образом, частота и доля демпфирования при наличии диссипации определяются по формулам

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ck_s}{m} - \left(\frac{vk_s}{2m}\right)^2} \text{ Гц}$$

$$\beta_s = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{k_s}{cm}} 100\%$$

Частоты и формы	Собственные значения
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Обнулять скорости
	<input type="checkbox"/> Не учитывать матрицу диссипации
	Частота/Доля демпфирования
	Сортировка: по частоте
f (Гц)	f (Гц) Beta(%) / r
1 -3.48957E-7	1 4.97885 1.56
2 4.97946	2 9.83162 3.09
3 9.83632	3 14.4361 4.54
4 14.451	4 18.6774 5.88
5 18.7098	5 22.4516 7.07
6 22.5079	6 25.6674 8.09
7 25.7518	7 28.2488 8.91
8 28.3616	8 30.1358 9.51
9 30.2731	9 31.2854 9.88
10 31.4391	10 0 1.03576E-6
	11 0 -1.03576E-6

Рис. 4.183. Расчетные значения частот и собственных значений цепочки точек

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
m	1		Mass
c	1.0000000E+4		Spring constant
nu	10		Damping constant
n	10		Number of points
s	1		Index or frequency 0...n
k	4*(sin(pi*s/n/2))^2	0.097886967	
f	sqrt(k*c/m)/2/pi	4.9794637	Frequency (Hz)
re	-nu*k/2/m	-0.48943484	Real part of eigenvalue
im	sqrt(k*c/m-re^2)	31.283065	Imaginary part of eigenvalue
f_	im/2/pi	4.9788544	Frequency of system with damping (Hz)
beta	-re/sqrt(sqr(re)+sqr(im))*100	1.5643447	Damping ratio %

Рис. 4.184. Аналитические зависимости для частот и СЗ в символьном калькуляторе UM

Расчет частот и СЗ (рис. 4.183) выполнен при значении параметров $m=1\text{кг}$, $c=10\ 000\text{Н/м}$, $\nu=10\text{Нс/м}$.

Аналитические зависимости для частот и СЗ запрограммированы в символьном калькуляторе UM и сохранены в каталоге задачи в файле Frequencies.clc, рис. 4.184. Сравнение аналитических и расчетных значений показывает совпадение результатов.

4.5.11.2.2. Колесная пара на безынерционном рельсе

Рассмотрим модель отдельной колесной пары (КП), контактирующей с безынерционными рельсами. Модель находится по адресу

[{Данные УМ}\Samples\Static & Linear analysis\WSet](#)

Колесная пара имеет шесть степеней свободы, соответствующие обобщенные координаты:

x, y, z – три декартовы координаты центра масс КП относительно СК0 (продольная, поперечная и вертикальная),

ψ, α, φ – углы ориентации КП в последовательности 3, 1, 2 (повороты вокруг вертикальной, продольной и поперечной осей)

Сначала остановимся на случае, когда силы крива выключены, т.е. КП находится на абсолютно гладких рельсах. Матрица жесткостей симметрична и имеет шесть ненулевых элементов

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{yy} & 0 & 0 & C_{\alpha y} & 0 \\ 0 & 0 & C_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{\psi\psi} & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha y} & 0 & 0 & C_{\alpha\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Если пренебречь влиянием силы тяжести на значения матрицы жесткости и ограничиться коническими профилями колес, то аналитические выражения для элементов матрицы жесткости имеют следующий вид:

$$C_{yy} = \frac{2C_y C_z \sin^2 \gamma}{C(\gamma)}, C_{zz} = \frac{2C_y C_z \cos^2 \gamma}{C(\gamma)}, C_{\alpha y} = \frac{2C_y C_z \cos^2 \gamma}{C(\gamma)} (r_w \sin \gamma - S \cos \gamma),$$

$$C_{\alpha\alpha} = \frac{2C_y C_z}{C(\gamma)} (r_w \sin \gamma - S \cos \gamma)^2, C_{\psi\psi} = 0.$$

$$C(\gamma) = C_y \cos^2 \gamma + C_z \sin^2 \gamma$$

Здесь C_y, C_z – поперечная и вертикальная жесткость рельса, γ – угол наклона конического профиля колеса в точке контакта, r_w – радиус круга катания колеса, S – половина поперечного расстояния между точками контакта на левом и правом рельсе.

Сравнение этих приближенных значений с численными значениями, полученными методом конечных разностей представлены в табл. 4.5 при значении параметров

$$C_y = 1,0 \times 10^7 \text{ Н/м}, C_z = 5,0 \times 10^7 \text{ Н/м}, \text{tg } \gamma = 0.05, r_w = 0,525 \text{ м}, S = 0,783 \text{ м}.$$

Таблица 4.5

Сравнение приближенных аналитических и численных коэффициентов матрицы жесткости

	C_{yy} Н/м	C_{zz} Н/м	$C_{\alpha y}$ Н	$C_{\alpha\alpha}$ Нм
Аналитические значения	$2,47 \times 10^5$	$9,88 \times 10^7$	$-3,79 \times 10^6$	$5,81 \times 10^7$
Численные значения	$2,46 \times 10^5$	$9,88 \times 10^7$	$-3,78 \times 10^6$	$5,86 \times 10^7$

Приближенные аналитические значения частот (т.е. без учета влияния силы тяжести) определяются выражениями

$$\omega_z = \sqrt{\frac{C_{zz}}{m}}, \omega_{\alpha y} = \sqrt{\frac{C_{yy}}{m} + \frac{C_{\alpha\alpha}}{I_x}},$$

где m, I_x – масса и момент инерции КП относительно продольной оси.

Приведем точное значение частоты гравитационных колебаний КП в поперечном направлении, которое получено при абсолютно жестком закреплении рельсов (т.е. при бесконечных значениях жесткостей C_y, C_z):

$$\omega_{gy} = \sqrt{\frac{mg \left(2 \frac{S}{s_\gamma c_\gamma} - r_w - S \tan \gamma \right)}{m(S \cot \gamma - r_w)^2 + I_x}}.$$

Положение равновесия КП на гладком рельсе неустойчиво, поскольку квадрат одной частоты, соответствующей повороту КП вокруг вертикальной оси, отрицателен. Таким образом, имеется пара вещественных корней характеристического уравнения, аналитические значения которых в случае абсолютно жестко закрепленных рельсов оцениваются выражением

$$\lambda_{1,2}^\psi = \pm \sqrt{mg(S c_\gamma - r_w s_\gamma) \tan \gamma / I_x},$$

$$\omega_\psi = -\frac{|\lambda_{1,2}^\psi|}{2\pi}.$$

Частоты/Корни		Собственные значения	
1	-0.109274	1	0.183548
2	0	2	35.2207
3	0	3	40.8403
4	0.183546	4	0
5	35.2207	5	0
6	40.8403	6	0
		7	0
		8	0
		9	-0.68659

Рис. 4.185. Расчетные значения частот и собственных значений КП

Name	Expression	Value	Comment
g	9.81		
m	1500		Mass
Ix	1200		Moment of inertia relative to longitudinal axis
rw	0.525		Whee radius
S	0.793		Half of distance between contacts
Cy	1.0000000E+7		Lateral rail stiffness
Cz	5.0000000E+7		Vertical rail stiffness
Lambda	0.05		Wheel profile conicity
gamma	arctan(Lambda)	0.049958396	
sg	sin(gamma)	0.049937617	
cg	cos(gamma)	0.99875234	
C_g	Cy*sqr(cg)+Cz*sqr(sg)	1.0099751E+7	
Cyy	2*Cy*Cz*sqr(sg)/C_g	2.4691358E+5	
Czz	2*Cy*Cz*sqr(cg)/C_g	9.8765432E+7	
Ca _y	2*Cy*Cz*sg*(S*cg-rw*sg)/C_g	3.7864198E+6	
Ca _a	2*Cy*Cz*sqr(S*cg-rw*sg)/C_g	5.8064747E+7	
Om _{ay}	sqrt((Cyy/m+Ca _a /Ix))/2/pi	35.068988	
Om _z	sqrt(Czz/m)/2/pi	40.839177	
Om _y	sqrt(m*g*(2*S/sg/cg-rw-S*sg/cg)/(m*sqr(S*cg/sg-rw)+Ix))/2/pi	0.18136426	
Lambda _{az}	sqrt(m*g*(S*cg-rw*sg)*lambda/Ix)	0.68522044	
Om _{az}	-Lambda _{az} /2/pi	-0.10905622	

Рис. 4.186. Аналитические зависимости для частот и СЗ КП в символьном калькуляторе UM

Сравнение аналитических и численных значений частот и собственных значений приведено на рис. 4.185, 4.186 и в табл. 4.6 при значении инерционных параметров $m = 1500$ кг, $I_x = 1200$ кгм. Высокая точность совпадения аналитических и численных результатов свидетельствует об их корректности.

Таблица 4.6

Сравнение приближенных аналитических и численных частот и собственных значений КП

	ω_z Гц	$\omega_{\alpha y}$ Гц	ω_{gy} Гц	$\lambda_{1,2}^\psi$ 1/с	ω_ψ Гц
Аналитические значения	40,84	35,07	0,181	$\pm 0,685$	-0,109
Численные значения	40,84	35,22	0,183	$\pm 0,686$	-0,109

4.5.11.3. Линейные вибрации

4.5.11.3.1. Осциллятор с одной степенью свободы

Рассмотрим осциллятор с одной степенью свободы, модель которого представлена грузом на линейной упруго-диссипативной пружине, рис. 4.187. Модель находится по адресу

[\Данные УМ\Samples\Static & Linear analysis\Oscillator 1](#)

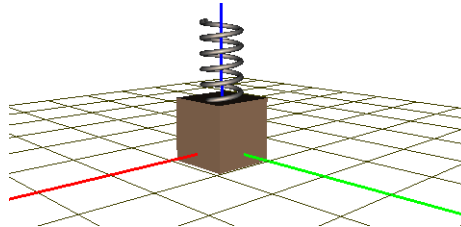


Рис. 4.187. Модель осциллятора

Модель параметризуют идентификаторы

$m=1\text{ кг}$ – масса,

$cstiff=100\text{ Н/м}$ – коэффициент жесткости,

β – доля от критического демпфирования,

$cdiss = 2*\beta*\sqrt{cstiff/m}$ – коэффициент демпфирования, обеспечивающий степень демпфирования, заданную идентификатором β .

Частота собственных колебаний равна

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = 10\text{ рад/с} = 1,59\text{ Гц.}$$

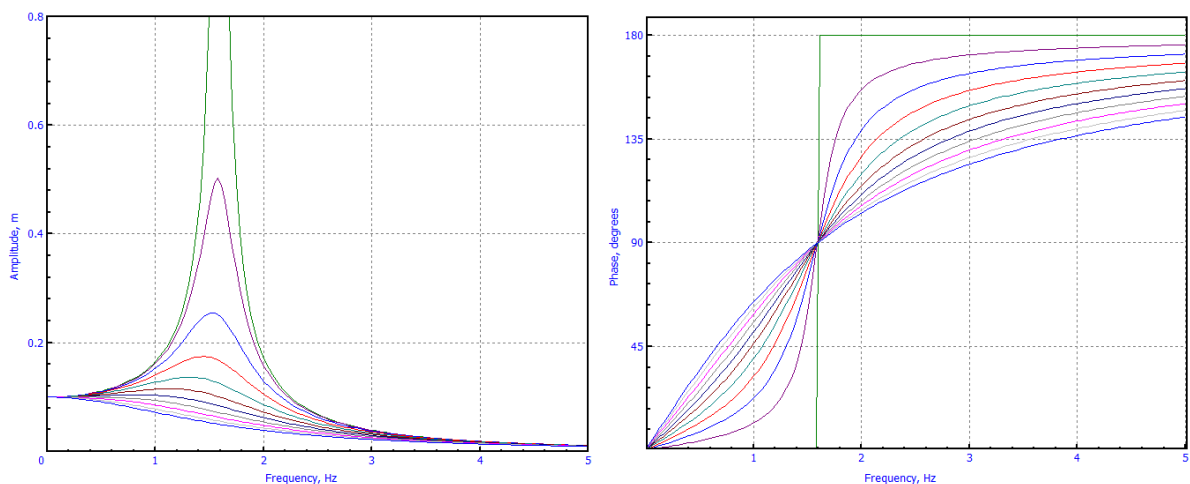


Рис. 4.188. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики осциллятора с одной степенью свободы

Сначала приведем результаты исследований вынужденных колебаний под действием вертикальной гармонической силы с амплитудой 10 Н. Результат представлен на рис. 4.188 и точно соответствует классической амплитудно-частотной и фазочастотной

характеристикам осциллятора. Графики построены для значений доли критического демпфирования 0, 0.1, 0.2, ... , 1.

Следующие результаты касаются расчета вибраций, заданных кинематически. Задана амплитуда колебаний груза Δ=10мм. Аналитическое значение амплитуды и фазы гармонической силы $F \sin(pt + \varepsilon)$, вызывающей данные колебания, определяется формулой

$$F = \Delta m \sqrt{(\omega^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2 p^2} = \Delta c \sqrt{(1 - z^2)^2 + 4\beta^2 z^2},$$

$$\tan \varepsilon = \frac{2\beta z}{1 - z^2},$$

$$z = \frac{p}{\omega},$$

где p – частота возмущения, рад/с. Таким образом, фаза совпадает со значением, приведенным на рис. 4.188, а график амплитуды приведен на рис. 4.189. Расчет амплитуды возмущающей силы в символьном калькулятора приведен на рис. 4.190 и содержится в файле Kinematic excitation.clc в каталоге модели.

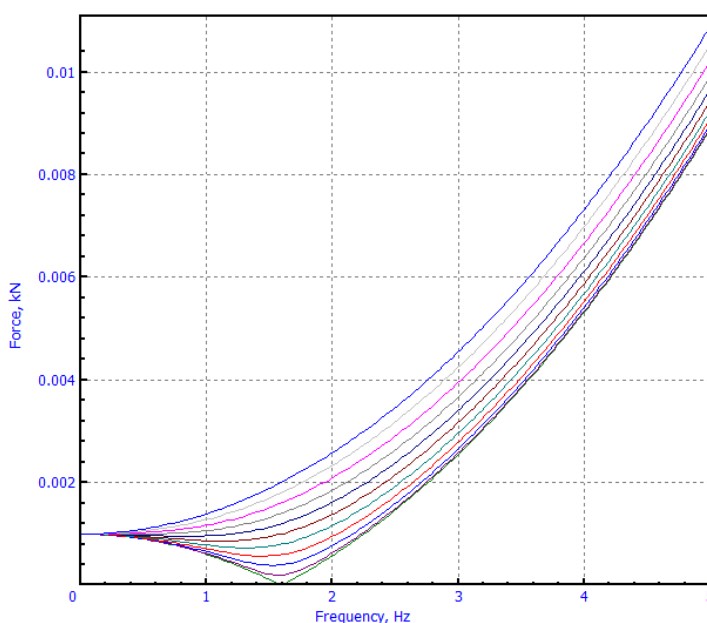


Рис. 4.189. Амплитудно-частотные характеристики возмущающей силы при кинематическом возмущении осциллятора

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
m	1		Mass
c	100		Spring constant
k	sqrt(c/m)	10	Natural frequency, rad/s
b	1		Damping ratio
freq	2		Excitation frequency, Hz
p	2*freq*pi	12.566371	Excitation frequency, rad/s
D	0.01		Oscillation amplitude, m
z	p/k	1.2566371	Frequency ratio
F	D*c*sqrt((1-z^2)^2+4*b^2*z^2)	2.5791367	Force amplitude

Рис. 4.190. Аналитические зависимости возмущающей силы в символьном калькуляторе UM

4.6. Использование УМ в качестве решателя в стороннем программном обеспечении

4.6.1. Введение

Существует целый ряд сценариев использования «Универсального механизма», когда он выступает в качестве отдельного решателя командной строки в стороннем коммерческом или корпоративном программном обеспечении. Так, например, «Универсальный механизм» может быть использован в качестве решателя задач динамики из-под специализированных программ многопараметрической многокритериальной мультидисциплинарной оптимизации, таких как IOSO (www.iosotech.com) или pSeven (www.datadvance.ru).

Ниже в этом разделе рассмотрим особенности использования УМ в таких сценариях: задание значений параметров, выполнения численных экспериментов и анализа полученных результатов.

В общем случае работа в УМ строится в следующем порядке:

- создаётся параметризованная модель механической системы;
- формируется «окружение» для запуска всех численных экспериментов: начальные условия, описывается, если применимо, железнодорожная или автомобильная конфигурацию и т.д;
- формируется список переменных (*.var), который будет использоваться для оценки результатов каждого расчёта в рамках будущего оптимизационного проекта; настраивается способ их обработки (фильтр и функционал);
- для подготовленного списка переменных создаёт текстовый *.out с описание выходных скалярных сигналов (файл *.out имеет формат XML-файла);
- затем пользователь переходит в стороннее ПО и настраивает проект оптимизации/идентификации там.

4.6.2. Особенности взаимодействия программ

Как запустить УМ в режиме внешнего решателя

В качестве внешнего решателя запускайте программу umsolver.exe, который по умолчанию устанавливается в каталог [C:\Program Files\UM Software Lab\Universal Mechanism\10\bin]. Исполняемый umsolver.exe – это специальная версия программы umsimul.exe (UM Simulation) без графического интерфейса пользователя. В отладочных целях в качестве внешнего решателя можно запускать и umsimul.exe – тогда будет видно главное окно программы, а также анимационные и графические окна, использованные в конфигурации.

Модель и её расчётная конфигурация передаются в umsolver.exe или umsimul.exe через аргументы командной строки. Аргументы командной строки для программы umsimul.exe описаны в п. 1.4.2. "Параметры командной строки программы моделирования" руководства пользователя УМ. Аргументы командной строки для программ umsimul.exe и umsolver.exe являются одинаковыми. Фактически umsolver.exe – это umsimul.exe с "вырезанным"

интерфейсом пользователя. При запуске `umsolver.exe` ключи `/s` и `/b` включены по умолчанию, их можно опускать.

Как передать в УМ-модель новые значения параметров

При запуске УМ в качестве внешнего решателя актуальный набор параметров передаётся через файл параметров `*.par` с помощью ключа `/p`, см. п. 1.4.2. "*Параметры командной строки программы моделирования*". Файл параметров (идентификаторов) имеет простой текстовый формат `[идентификатор]=[значение]`.

Вот содержимое файла параметров для модели `[excentric]`, которая обсуждается в п. 4.6.3 "*Модель для тестовых расчётов*", стр. 4-202:

```
par
r = 0.2
h = 0.1
dy = 0.01
dz = 0.01
m = 100
em = 10
re = 0.02
he = 0.02
dey = 0
dez = 0
```

Изменяемые параметры для оптимизации в этой модели: **dey** и **dez**. Меняя их значения в файле `*.par` можно подавать на вход решателю УМ разные комбинации параметров и получать соответствующие результаты моделирования.

Как получить значения показателей после окончания расчёта в УМ

При запуске УМ в качестве внешнего решателя список переменных, вычисляемый в процессе расчёта, указывается с помощью аргумента командной строки `/v`, см. п. 1.4.2. "*Параметры командной строки программы моделирования*". На вход подаётся заранее сформированный файл `*.var`. По окончании расчёта в каталоге модели формируются два файла с тем же именем и с расширениями `*.tgr` и `*.sgr`. Получившийся `*.tgr` файл – это копия файла `*.var`, заданного в аргументе командной строки, а `*.sgr` файл – это бинарный файл с результатами расчёта указанных величин. Формат SGR-файлов описан в п. 4.3.3.5 "*Формат файлов рассчитанных переменных*", стр. 4-67. Обратите внимание, SGR-файл не несёт в себе информацию о количестве сигналов, которые он содержит. Количество сигналов – это количество переменных, содержащихся в одноимённом TGR-файле.

Сразу после подготовки списка переменных и сохранения его в `*.var` файл этот файл можно экспортировать в виде файла выходных скалярных сигналов `*.out`. Это текстовый XML-файл со следующей структурой:

```
<?xml version="1.0"?>
<Outputs>
<Output Name="Имя1" Comment="Комментарий1" Filter="Фильтр1"
Functional="Функционал1" Value="Значение1"/>
<Output Name="Имя2" Comment="Комментарий2" Filter="Фильтр2"
Functional="Функционал2" Value="Значение2"/>
...
<Output Name="ИмяN" Comment="КомментарийN" Filter="ФильтрN"
Functional="ФункционалN" Value="ЗначениеN"/>
</Outputs>
```

Каждый узел **<Output>** соответствует одной переменной из списка переменных. При экспорте из VAR-файла у переменных ещё нет значений и атрибут **Value** отсутствует. Он появится при формировании out-файла в результате расчёта. Файл выходных скалярных сигналов содержит историю изменения каждого сигнала, пропущенную через фильтр и выбранный функционал. Параметры фильтра и функционал указываются для каждой вкладки списка переменных отдельно. Таким образом каждой переменной из списка переменных ставится в соответствие одно значение *Функционал(Фильтр(Реализация сигнала))*.

Для формирования *.out файла в результате расчёта в аргументе командной строки нужно включить флаг **-scalar_outputs=on**. По умолчанию этот флаг выключен и файлы *.out не формируются.

Замечание В УМ под функционалом понимается функция, которая на вход принимает числовой ряд, а в качестве значения возвращает одно число (скаляр). Поэтому файлы *.out называются файлами выходных скалярных сигналов. Функционалы в УМ используются в нескольких инструментах. Самый популярный из них – Табличный процессор, см. п. 4.3.7 "*Процессор переменных*", стр. 4-90. Функционалы в УМ имеют открытую архитектуру. Как добавить свой функционал в УМ см. п. 5.2. "*Программирование функционалов*".

Таким образом, анализ выходных значений показателей в стороннем программном обеспечении может быть выполнен на основе чтения SGR/TGR- или OUT-файлов.

Файлы *.out не являются обязательными. Они предназначены для более лёгкого доступа управляющей оболочки (IOSO, pSeven и т.д.) к списку выходных величин. XML – один из самых универсальных форматов, инструменты парсинга которого есть в большинстве инструментальных сред.

Альтернативой разбору *.out файла является разбор исходного *.var файла. Эти файлы также имеют типичный для УМ текстовый формат:

```
var
with page;
  name="Силы реакции";
  functional=Max_Min;
  unit=0;
  visible=true;
  selected=true;
  filtertype=low_pass;
  lowfreq=0;
  highfreq=20;
  passtype=absolutevalue;
  filterorder=0;
  with grvar;
    name=jRFm(jRotor);
    comment="Сила реакции в шарнире jRotor, величина";
    elementname=jRotor;
    subs=1; ielem=1;
    type=react;
    actson=1; loctype=0; bdref=0; subref=1; component=module;
  with end;
```

Под заголовком **with page** находится содержимое каждой вкладки списка переменных, а под заголовком **with grvar** находятся данные о каждой отдельной переменной.

4.6.3. Модель для тестовых расчётов: excentric

Модель ротора, вращающегося вокруг оси, не проходящей через центр масс, находится в каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\TUTORIAL\excentric](#).

Запустите программу **UM Simulation** и откройте эту модель. Далее рассмотрим структуру, параметры и другие настройки модели.

Модель представляет собой диск, вращающийся вокруг оси, которая не проходит вокруг центра масс и сдвинута на величины **dy=0.01** м и **dz=0.01** м по осям Y и Z, соответственно. Кроме того с ротором (тело Rotor) с помощью шарнира с нулём степеней свободы связана точечная масса (тело Point Mass), положение которой относительно ротора задаётся параметрами **dey** и **dez**, которые по умолчанию равны нулю. Нужно управляя положением точечной массы на роторе сбалансировать ротор и минимизировать биения силы реакции в шарнире ротора.

Действительно, при запуске моделирования мы видим, что при вращении ротора сильно меняется модуль силы реакции на его оси, см. рис. 4.191.

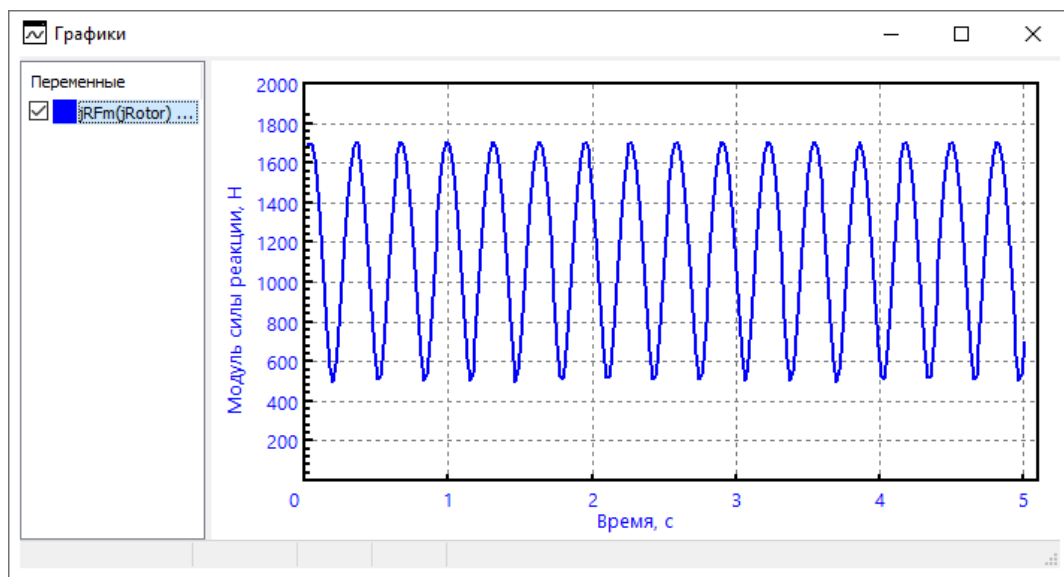


Рис. 4.191. Значения силы реакции в шарнире при $dey=dez=0$

Рассмотрим описание списка переменных для этой модели. Список переменных – это список величин, по которым будет строиться целевая функция при оптимизации модели. В этом конкретном случае в список переменных **optimization.var** добавлена единственная переменная – модуль силы реакции в шарнире на оси ротора. В настройках вкладки «Силы реакции» выбран функционал **Min_Max** – разница между минимальным и максимальным значением переменной, см. рис. 4.192. Для гармонических функций – это двойная амплитуда или размах. Этот функционал хорошо отражает физический смысл балансировки ротора. При идеальной балансировке ротора размах колебаний силы реакции должен быть равен нулю, а сам график силы реакции в шарнире должен превратиться в прямую линию.

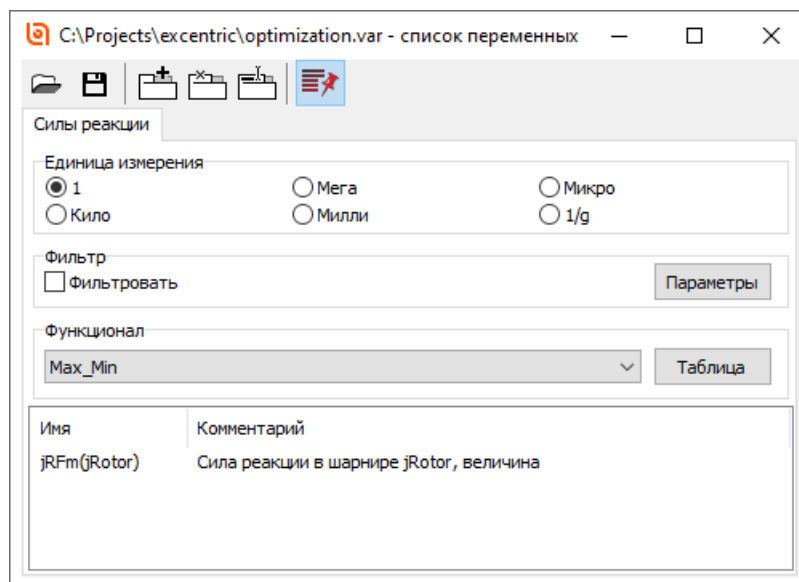


Рис. 4.192. Настройка списка переменных, фильтрации и функционала

Балансировка ротора достигается при значениях параметров **dey=0.11** и **dez=0.11**. На рис. 4.193 ниже приведены осциллограммы модуля сил реакции при значениях **dey = dez = 0, 0.06, 0.09** и **0.11**.

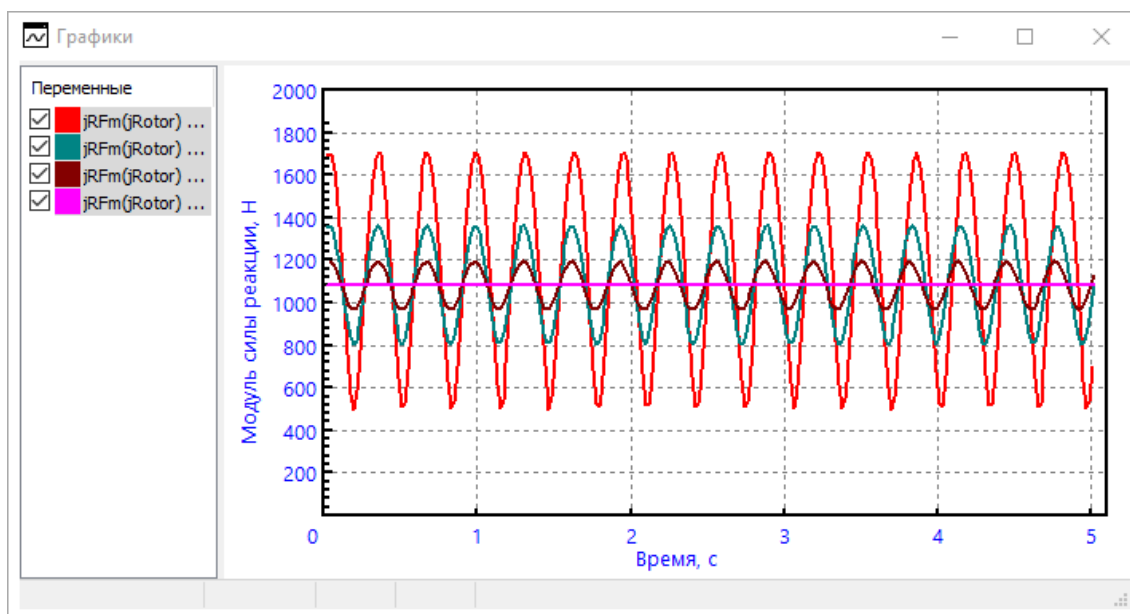


Рис. 4.193. Значения силы реакции в шарнире при различных значениях dey и dez

Подготовка модели к работе

Для формирования окружения для запуска всех численных экспериментов, настройте все вкладки в инспекторе моделирования объекта: идентификаторы (установите нужные значения всех идентификаторов, которые не участвуют в оптимизации – они описывают свойства модели); начальные условия, ж.-д. или автомобильные параметры и т.д. После завершения всех настроек выберите пункт главного меню **Файл/Сохранить конфигура-**

цию/Все настройки, см. рис. 4.194. Затем эти конфигурационные файлы подавайте на вход внешнему решателю с помощью аргументов командной строки.

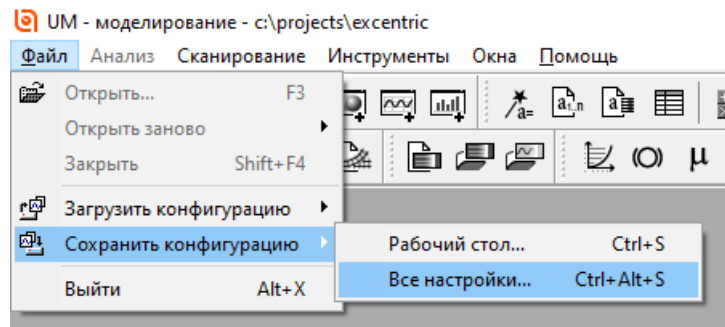


Рис. 4.194. Сохранение всех настроек в файлы конфигурации

После чего сформируйте список переменных, которые будут служить выходными сигналами для процесса оптимизации. Они будут рассчитываться для каждого численного эксперимента, и алгоритм оптимизации будет ориентироваться на их значения при движении в пространстве параметров. После того как список переменных сформирован вы можете экспортировать его в файл выходных скалярных сигналов (*.out), см. рис. 4.195.

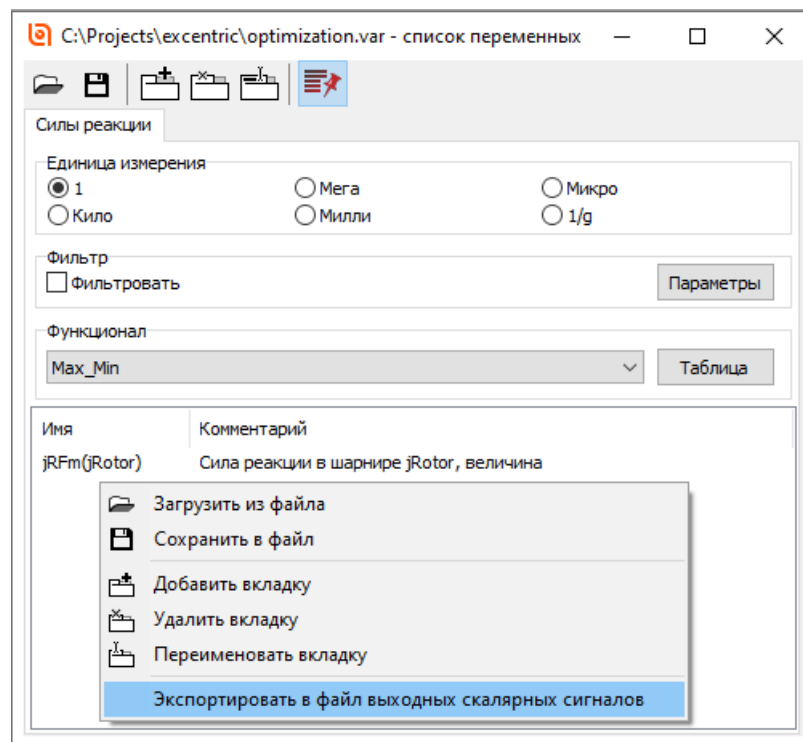


Рис. 4.195. Экспорт файла *.out с помощью контекстного меню в списке переменных

```
<Outputs>
  <Output Name="jRFm(jRotor)" Comment="Сила реакции в шарнире jRotor, величина" Filter="None" Functional="Max_Min"/>
</Outputs>
```

Рис. 4.196. Файл выходных скалярных сигналов с подсветкой XML синтаксиса

4.7. Список литературы

- [1] Погорелов Д.Ю., Введение в моделирование динамики систем тел: Учеб. пособие.- Брянск: БГТУ, 1997.-156 с.
- [2] Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков, Численные методы, Москва: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004.
- [3] Б. Парлет, Симметричная проблема собственных значений – М.: Мир, 1983.
- [4] В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов, Матрицы и вычисления – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1984. – 320 с.
- [5] Slavisa Salinic, Modeling of a light elastic beam by a system of rigid bodies // Theoret. Appl. Mech. – 2004.– V.31(3-4) – P.395-410.
- [6] James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, Mechanics of materials. Boston PWS Pub Co. 1997. 4th ed..
- [7] Euler–Bernoulli beam theory,
https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory.
- [8] Euler's critical load, https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_critical_load.
- [9] В. Л. Бидерман, Теория механических колебаний: Учебник для вузов – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
- [10] А. С. Вольмир, Устойчивость механических систем – М.: Наука, 1967. – 984 с.
- [11] С. П. Тимошенко, Дж. Гере, Механика материалов: Учебник для вузов. 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. – 672 с..