Программная система для анализа роторной динамики турбомашин

DYNAMICS R4

Руководство пользователя

2021

Научно-технический центр
“Альфа-Транзит”

Спасибо за покупку программы DYNAMICS R4, разработанной нашей компанией ООО “Альфа-Транзит” для решения многих практических задач, которые Вы можете встретить при проектировании и эксплуатации роторных систем различного назначения

ООО “Альфа-Транзит” и ее инженеры делают все, чтобы наша программная система была лучшей среди аналогичных программ для решения задач роторной динамики и максимально соответствовала Вашим требованиям.

Мы готовы рассмотреть любые Ваши предложения по улучшению программной системы, повышению ее функциональности и реализовать их в будущих версиях.

Успехов Вам в освоении программы DYNAMICS R4 и в Вашей работе. Мы всегда готовы помочь Вам!

Web-site: www.alfatran.com
support@alfatran.com

СОДЕРЖАНИЕ

1 ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ 1-9

1.1 Общие характеристики 1-11
1.2 Функциональные свойства 1-11
1.3 Задачи линейной динамики 1-12
1.4 Задачи нестационарной и нелинейной динамики 1-12
1.5 Интерфейс пользователя 1-12

2 РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ 2-14

3 УСТАНОВКА DYNAMICS R4 3-16

3.1 Инструкция по работе с Dynamics R4 (плавающая лицензия) 3-17

4 ЗАПУСК ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ 4-20

4.1 Запуск в графическом режиме 4-20
4.2 Запуск в режиме командной строки 4-23

5 ЗАГРУЗКА И СОХРАНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ 5-25

6 ПРОЕКТ 6-26

6.1 Данные проекта 6-26
6.2 Системы единиц измерений 6-28
6.3 Предупреждения и ошибки 6-28

7 АРХИТЕКТУРА МОДЕЛИ 7-31

7.1 Основные структурные единицы 7-31
7.2 Элемент Сборка [Assembly] 7-33
7.3 Элемент Субмодель [Submodel] 7-34
7.4 [Shaft] элемент 7-36

8 ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПАРАМЕТРЫ 8-38

8.1 Общие свойства элементов и их параметры 8-38
8.2 Типовой элемент [Kinematic joint] 8-43
8.3 Типовой элемент [Beam] 8-47
8.4 Типовой элемент [Beam Bimetal] 8-48
8.5 Типовой элемент [Beam MKD] 8-50
8.6 Типовой элемент [Shell] 8-52
8.7 Типовой элемент [Shell with flange] 8-53
8.8 Типовой элемент [Disk] 8-53
8.9 Типовой элемент [Mass] 8-54

8.10 Типовой элемент [Mass pedestal] 8-54
8.11 Типовой элемент [Generalized element] 8-55
8.12 Визуализация элементов [Disk], [Mass], [Generalized element] 8-59
8.13 Типовой элемент [Coupling] 8-61

9 ЛИНЕЙНЫЕСВЯЗИ МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ 9-63

9.1 Упруго-демпферная связь общего вида [Link] 9-64
9.2 Абсолютно-жесткая связь общего вида [Rigid link] 9-67
9.3 Связь с несимметричной матрицей жесткости и демпфирования [Elastic nonsymmetric link] 9-68
9.4 Шестеренчатая связь общего вида [Gear set] 9-72
9.5 Упругодемпферная связь [Беличье колесо] 9-75
9.6 Элемент [Connection point] 9-79

10 СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ 10-80

10.1 Дисбалансная нагрузка[Unbalance load] 10-81
10.2 Осевая статическая сила [Axial force] 10-82
10.3 Внезапное изменение дисбаланса [Blade loss] 10-83
10.4 Динамическая нагрузка общего вида [Dynamic Load] 10-84
10.5 Динамический крутящий момент [Torque Load] ...10-86

11 НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЯЗИ 11-88

11.1 Программируемая пользовательская связь (User link) 11-89
11.2 Шаблоны программируемого пользовательского элемента [User link] 11-91
11.3 Нелинейная опора (Non-linear support) 11-94
11.4 Цилиндрический подшипник скольжения [Plain journal bearing] 11-94
11.5 Шарикоподшипник [Ball bearing support] 11-95
11.6 Радиально-упорный шарикоподшипник [Angular contact ball bearing] 11-96
11.7 Роликовый подшипник [Roll bearing support] 11-99
11.8 Гидродинамический демпфер [Damper support] 11-100
11.9 Зазор [Clearance] 11-101
11.10 Подшипник сухого трения [Dry bush] 11-103
11.11 Активный магнитный подшипник [Active magnetic bearing support] 11-104
11.12 Сейсмическое воздействие [Seismic Excitation] ...11-106

11.13 Односторонее магнитное притяжение [Unbalanced Magnetic Pull] 11-109
11.14 Щелевое уплотнение [Annular seal]] 11-111
11.15 Расчет жесткости и демпфирования в нелинейных элементах 11-111
11.16 Плавающие кольцо [Floating ring] 11-112
11.17 Трещина [Crack] 11-115
11.18 Несоосность валов [Shaft misalignment] 11-117

12 ГРУППЫ 12-119

12.1 Группа элементов [Group] 12-119
12.2 Группа переменных[Variables] 12-121
12.2.1 Численная переменная [Value variable] 12-121
12.2.2 Текстовая переменная [String variable]..... 12-124

13 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ . 13-128

13.1 Управление изображением..... 13-128
13.2 Создание модели из одной подсистемы 13-130
13.3 Создание модели, состоящей из нескольких подсистем 13-136
13.4 Разнесение по сборкам и субмоделям..... 13-139
13.5 Диалог импорта параметризованных данных по жесткости и демпфированию в подшипниках скольжения.... 13-141

14 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ 14-145

14.1 Введение 14-145
14.2 Математическая модель гидродинамического подшипника 14-145
14.3 Основные допущения математической модели гидродинамического подшипника 14-147
14.4 Математическая модель газодинамического подшипника 14-147
14.5 Основные допущения математической модели газодинамического подшипника..... 14-149
14.6 Результаты расчета 14-150
14.7 Общие исходные данные..... 14-152
14.8 Plain journal bearing. Цилиндрический подшипник скольжения..... 14-154
14.9 Axial groove journal bearing. Цилиндрический подшипник с осевыми проточками..... 14-155

14.10 OFFSET HALF JOURNAL BEARING. ПОДШИПНИК СО СМЕЩЕННЫМИ СЕГМЕНТАМИ 14-156
14.11 ELLIPTICAL AND MULTYLOBE JOURNAL BEARING. ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ И МНОГОКЛИНОВЫЙ ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ.... 14-157
14.12 TAPERED LAND JOURNAL BEARING. ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ С КЛИНОВИДНОЙ ВЫБОРКОЙ В СЕГМЕНТАХ 14-158
14.13 PRESSURE DAM JOURNAL BEARING. ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ С ПОРОГОМ 14-159
14.14 GAS BEARING. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК 14-165
14.15 MULTILOBE GAS BEARING. МНОГОКЛИНОВЫЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК 14-166
14.16 AIR FOIL BEARING. ЛЕПЕСТКОВЫЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК 14-167
14.17 TILTING PAD JOURNAL BEARING. ПОДШИПНИК С САМОУСТАНАВЛИВАЮЩИМИСЯ СЕГМЕНТАМИ 14-160
14.18 ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ 14-170

15 АЛГОРИТМЫ СТАЦИОНАРНОГО АНАЛИЗА 15-174

15.1 БАЗИС[BASIS] 15-175
15.2 УПРАВЛЕНИЕ ВЫВОДОМ И ОТОБРАЖЕНИЕМ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ 15-179
15.3 ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ [NATURAL FREQUENCIES] 15-182
15.4 КАРТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ[NATURAL FREQUENCY MAP] . 15-184
15.5 КРИТИЧЕСКИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ[CRITICAL SPEEDS] .. 15-188
15.6 ДИСБАЛАНСНОЕ ПОВЕДЕНИЕ [UNBALANCE RESPONSE] ... 15-190
15.7 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ [PARAMETER ANALYSIS] 15-202
15.7.1 Одномерный параметрический анализ 15-202
15.7.2 Двухмерный параметрический анализ 15-208
15.8 МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ 15-209
15.8.1 Уравнение Алфорда 15-210
15.8.2 Модифицированное уравнение Алфорда 15-211
15.8.3 Уравнение Уочела 15-212
15.8.4 Скрипты для расчета перекрестных коэффициентов и подготовки связи 15-212

16 НЕСТАЦИОНАРНЫЙ АНАЛИЗ 16-215

16.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 16-215
16.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИЙ 16-220

16.3 Сообщения в процессе интегрирования 16-222
16.4 Рекомендации по определению допусков при интегрировании 16-224
16.5 Формы вынужденных колебаний..... 16-225
16.6 Учет гироскопических моментов при эволюциях летательных аппаратов 16-227

17 ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ..... 17-229

17.1 Алгоритмы расчета средних значений [Mean value] . 17-229
17.2 Алгоритм быстрого преобразования Фурье 17-231
17.3 Каскадная диаграмма 17-233
17.4 Орбиты движения 17-234
17.5 Подшипники качения..... 17-235

18 ПРОТОКОЛ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЕЕ АНАЛИЗА. 18-239

19 БАЗА ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ 19-244

20 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА “PYTHON” ПРИ СОЗДАНИИ СКРИПТА ЭЛЕМЕНТА “USER LINK”..... 20-247

20.1 Связь скрипта с программой Dynamics R4..... 20-247
20.2 Дополнительные параметры..... 20-248
20.3 Функции объекта exchangeContainer 20-249
20.4 Печать отладочной информации в “логе” программы 20-250
20.5 Ускорение работы скриптового элемента 20-250

21 КОМАНДНЫЙ ИНТЕРФЕЙС МОДЕЛИРОВАНИЯ 21-252

21.1 Конвертеры 21-253

22 КАЛЬКУЛЯТОР МАТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ 22-257

23 ЗАМЕНА ЭЛЕМЕНТОВ [ЖЕСТКАЯ СВЯЗЬ] 23-260

24 ЛИТЕРАТУРА..... 25-263

1 ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ

DYNAMICS R4.* - новое поколение программных систем для анализа роторной динамики вращающихся машин.

Версии программной системы разрабатывались на протяжении многих лет учеными и инженерами, работавшими в различное время в Московском авиационном институте, а также в ряде других организаций – с 1963 года и по настоящее время.

.

Первая версия программы была создана в 1969 году для осесимметричных многовальных роторных систем газотурбинных двигателей с учетом корпуса и подвески. (Хронин Д.В. профессор МАИ, Иванов А.В. к.т.н., доцент МАИ). Язык программирования – машинный код.

Вторая версия программы для решения сложных задач роторной динамики была создана в 1974 году. Ее назначение было исследовать динамику анизотропных роторных систем газотурбинных двигателей (Хронин Д.В., Иванов А.В., Леонтьев М.К. профессор МАИ, доктор технических наук). Позже эта программа была развита для анализа нелинейных и нестационарных роторных систем (Леонтьев М.К.). Программа получила широкое распространение и в течение 20 последующих лет была основной программной системой для двигателестроительных КБ СССР. Язык программирования - Fortran-4.

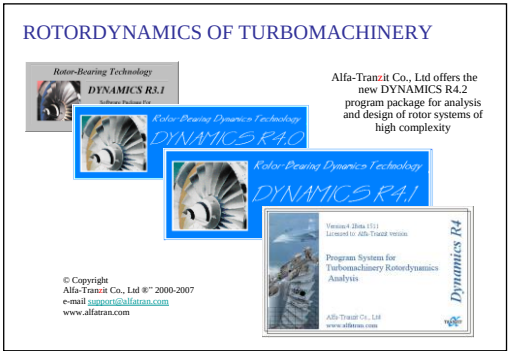
В начале 90-х годов **вторая версия программной системы** была перепрограммирована для нового поколения вычислительной

техники (PC компьютеры) и названа **DYNAMICS** (Леонтьев М.К.). Язык программирования – Ms DOS-Fortran. Операционная система - DOS.

Разработка программной системы **DYNAMICS R3.0®** была проведена компанией Альфа-Транзит (Россия) – Леонтьев М.К., Иванов А.В., Дегтярев А.А. к.т.н., инженер. Язык программирования - C++ для операционной системы Windows® 95/98/2000/NT.

Широко известная в России программная система **DYNAMICS R3.1**. ® была запрограммирована в 2001 году и по настоящее время используется рядом двигателестроительных компаний России.

DYNAMICS R4.*® - новый программный продукт ООО"Альфа-Транзит". Программная система (ее различные версии) может быть использована для решения широкого круга линейных и нелинейных задач роторной динамики. Позволяет решать большинство практических задач роторной динамики, которые встречаются не только на ранних этапах проектирования турбомашин, но и на этапах их доводки и эксплуатации. Высокая точность моделирования позволяет также использовать программную систему для создания математически обоснованных алгоритмов вибрационного диагностирования вращающихся машин.



Предметом анализа с помощью программной системы DYNAMICS R4® являются авиационные и судовые газотурбинные двигатели, турбонасосные агрегаты, стационарные турбины для энергетики, компрессоры, нагнетатели, стартеры, турбодетандеры, вспомогательные силовые установки, редукторы и мультипликаторы и т.д.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

DYNAMICS R4 – программный комплекс, предназначен для использования при проектировании новых машин, для определения возможных причин ухудшения состояния или появления дефектов в процессе их эксплуатации, а также для моделирования их динамических свойств в целях создания алгоритмов вибрационной диагностики

1.1 Общие характеристики

- Широкий спектр решаемых задач динамики вращающихся машин
- Анализ линейных и нелинейных роторных систем
- Высокая точность и скорость расчетов
- Адаптивные методы интегрирования в нестационарном анализе
- Модульная открытая архитектура программного комплекса, позволяющая вести ее постоянное совершенствование и развитие
- Возможность самостоятельного создания пользователем моделирующих элементов и включения их в библиотеку программного комплекса
- Развитая информационная система, включающая справочную информацию, предупреждения, сообщения об ошибках
- Примеры, демонстрирующие возможности программы, с результатами расчетов, упражнениями и комментариями для обучения работе с программой
- Возможность использования для глубокого изучения динамики линейных и нелинейных роторных систем
- Дружественный русскоязычный и англоязычный интерфейс

1.2 Функциональные свойства

- Моделирование многовальных и многоуровневых роторных систем, в том числе с корпусами и подвеской
- Моделирование динамических систем с различной ориентацией осей роторов (соосных, разнесенных, пересекающихся)
- Большое количество различных типов опорных узлов роторов
- Возможность одномерного и двухмерного параметрического анализа исследуемой модели (варьируемые параметры - скорость, размеры, положение, жесткость, демпфирование, нагрузка)
- Любые циклограммы режимов работы вращающихся машин
- Различные виды стационарных и нестационарных нагрузок

- Возможность расчета многовальных систем с различными видами шестеренчатых передач

1.3 Задачи линейной динамики

- Расчет частот и форм собственных колебаний невращающихся и недемпфированных систем
- Демпфированные частоты и формы колебаний вращающихся роторных систем
- Карты собственных частот
- Распределение потенциальной и кинетической энергии колебаний по элементам модели для каждой формы
- Расчет критических частот вращения
- Карты критических частот вращения
- Дисбалансное поведение
- Карты устойчивости
- Статические деформации и реакции в опорах

1.4 Задачи нестационарной и нелинейной динамики

- Расчет роторных систем на переходных режимах
- Расчет динамических систем от действия различных нестационарных нагрузок
- Расчет роторных систем с нелинейными опорами и уплотнениями общего вида
- Расчет систем с зазорами и касаниями
- Расчет роторных систем с различными типами подшипников скольжения
- Определение границ устойчивости
- Расчет с упруго-демпферными опорами
- Расчет с шариковыми и роликовыми подшипниками

1.5 Интерфейс пользователя

- Текстовый и графический редакторы для создания сложных многоуровневых динамических моделей.
- Библиотека стандартных элементов для моделирования роторных систем
- База данных материалов
- 2D и 3D визуализация динамических моделей

- Взаимозаменяемые и удаляемые группы элементов для проведения вариантных расчетов
- Вывод результатов в любой точке или сечении динамической модели в виде таблиц, 2D и 3D графиков
- Параметры для вывода – перемещения, скорости, ускорения, деформации, силы, реакции, моменты и т.д.
- Постпроцессор для обработки временных характеристик, полученных в нестационарном анализе
- Анимация динамических процессов
- Возможность настройки пользователем формы и содержания протоколов для вывода результатов моделирования

ЗАМЕЧАНИЕ: Программная система **DYNAMICS R4** находится в постоянном развитии. Создаются новые математические модели, алгоритмы и программные блоки. В связи с этим эта версия руководства пользователя может иметь некоторые отличия с программным продуктом.

ЗАМЕЧАНИЕ: Поставочная версия программы может не содержать некоторых элементов и алгоритмов, которые имеются в данном руководстве пользователя

2 РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

При выпуске новых версий пользователям рассылаются уведомления о возможности скачивания новой версии. В уведомлениях представлен полный перечень новой функциональности и исправленных проблем. Также пользователь может ознакомиться со списком изменений на нашем сайте по адресу:
http://www.rotordynamics.ru/dynamics4_new.shtml.

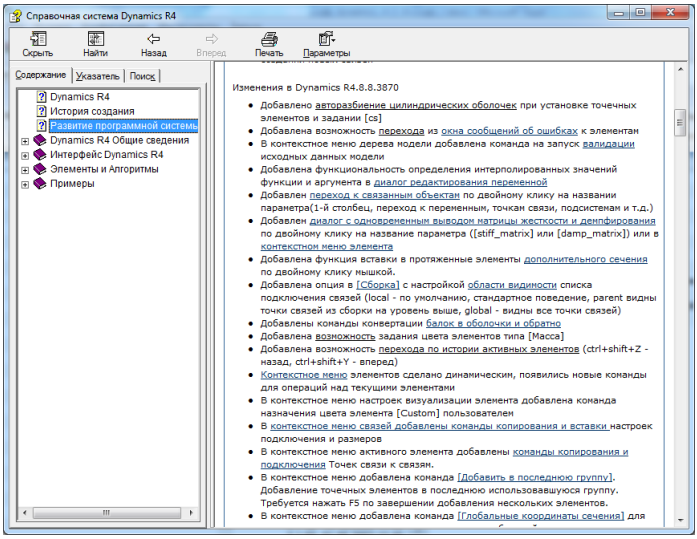


Рис. 2.1

Также пользователь может ознакомиться с историей изменений в справочной системе (**Рис. 2.1**). Следует отметить, что пользователь

может быстро найти дополнительную информацию по сделанным изменениям перейдя по гиперссылке. В пункте "Изменения в справочной системе" представлены ссылки на перечень новых материалов в справочной системе (**Рис. 2.2**).

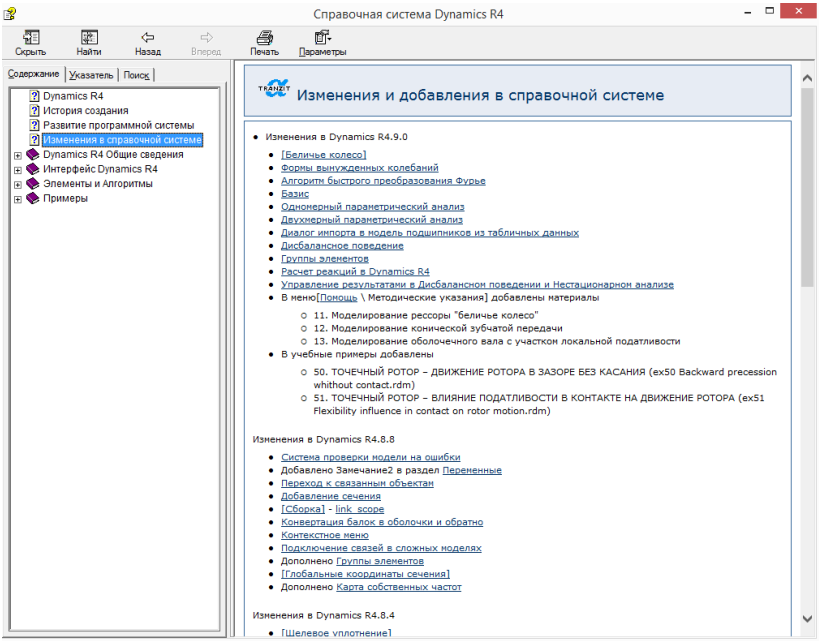


Рис. 2.2

3 УСТАНОВКА DYNAMICS R4

Установка программной системы **DYNAMICS R4** проводится следующим образом:

Вставьте установочный CD в устройство считывания.

Запустите файл **setup_x64.exe**. На машине, на которой ранее не устанавливалась DYNAMICS R4, не следует запускать на установку файл dynamics_r4_x64.msi.

Далее следуйте инструкциям, появляющимся на экране в процессе установки. После окончания установки в выбранной пользователем директории будет создана новая программная группа **DYNAMICS R4** с иконкой на рабочем столе.

Программа может работать **только при наличии на Вашем компьютере ключа электронной защиты**. Для продолжения установки вставьте защитное электронной устройство в USB порт.Windows автоматически установит новое оборудование.

После установки программы пользователь может просмотреть некоторую информацию о программе, выполнив команду **[About DYNAMICS R4** и, в частности, Рис. 3.1:

- номер программной системы, установленной на компьютер **(пожалуйста, используйте этот номер при обращении в техническую поддержку)**
- наименование Лицензиата

- текст лицензии
- неустановленные в версии Лицензиата опции программной системы **DYNAMICS R4**
- информация о технической поддержке

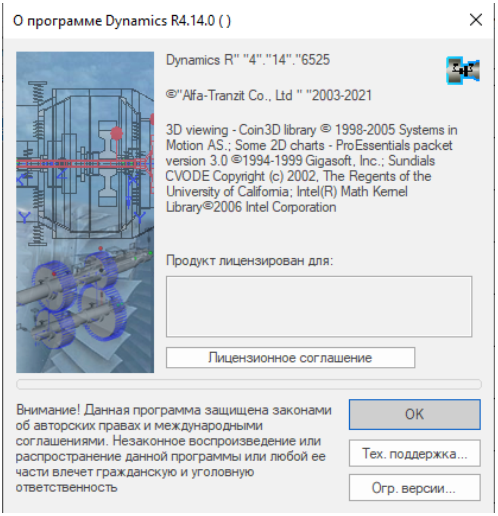


Рис. 3.1

3.1 Инструкция по работе с DYNAMICS R4 (плавающая лицензия)

Сервер - компьютер с установленным ключом Guardant Net и ПО Сервер Guardant Net.

Клиент – рабочая станция с установленной DYNAMICS R4. (сервер может быть запущен и на клиентской машине)

Подробное руководство по настройке ПО содержится в «Руководстве системного администратора Guardant Net» (файл admins_manual.pdf)

1. Настройки на стороне сервера

1.1 Установить с установочного диска драйверы ключа . (также может быть скачано с сайта технической поддержки ключей Guardant - http://www.guardant.ru/support/download/drivers/)

1.2 Скопировать в любую папку (определяется системным администратором) с установочного диска ПО Сервер Guardant Net. (или с сайта- http://www.guardant.ru/support/download/drivers/)

1.3 В комплект поставки сервера Guardant Net входят следующие файлы:

- **GrdSrv.exe** — сервер Guardant Net;
- **GrdSrv.ini** — файл настроек сервера Guardant Net. Должен находится в одном каталоге с GrdSrv.exe;
- **GnClient.ini** — файл настроек клиента Guardant Net. Должен находится в одном каталоге с файлом Dynamics_x64.exe ;
- **GrdMon.exe** — сетевой монитор Guardant Net. Служит для диагностики состояния сервера ключа устанавливается вместе с DYNAMICS R4 (может быть использован только в ЛВС);
- **Admins_Manual.pdf** — руководство по настройке и эксплуатации сервера Guardant Net в pdf-формате.

1.4 **Для работы DYNAMICS R4 на рабочей станции необходимо настроить маршрутизаторы для возможности доступа клиентской машины к серверу по протоколу TCP/IP (порты TCP 3182, UDP 3183, UDP 3184; для доступа по http 3185)**

1.5 Запустить сервер ключей (Пуск\Все программы\Dynamics R4\Сервер ключа плавающей лицензии)

Для работы GrdSrv.exe в качестве сервиса необходимо запустить в режиме консоли (cmd.exe) со следующими опциями **GrdSrv.exe /s [q]** **(**более подробно расписано в разделе Сервис Windows Vista/2003/XP/2000 - admins_manual.pdf**)**

2. Настройки на стороне клиента

2.1 Установить с установочного диска DYNAMICS R4

2) Отредактировать в папке установки файл gnclient.ini (в текстовом редакторе)

Например" c:\Program Files (x86)\Alfatran\DynamicsR4\Bin\ gnclient.ini"

```
BC_ADDR=255.255.255.0
IP_NAME=192.168.0.144
```

В IP_NAME устанавливается адрес компьютера с установленным сетевым ключом и запущенным сервером.

Если настройка сети не соответствует режиму "Частная" или "Рабочая", а установлена "Общедоступная", то следует настроить правила для Windows Firewall разрешающие компьютеру клиента отправлять запросы

4 ЗАПУСК ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Запуск в графическом режиме

При старте открывается главное рабочее окно программной системы, как показано на **Рис. 4.1**.

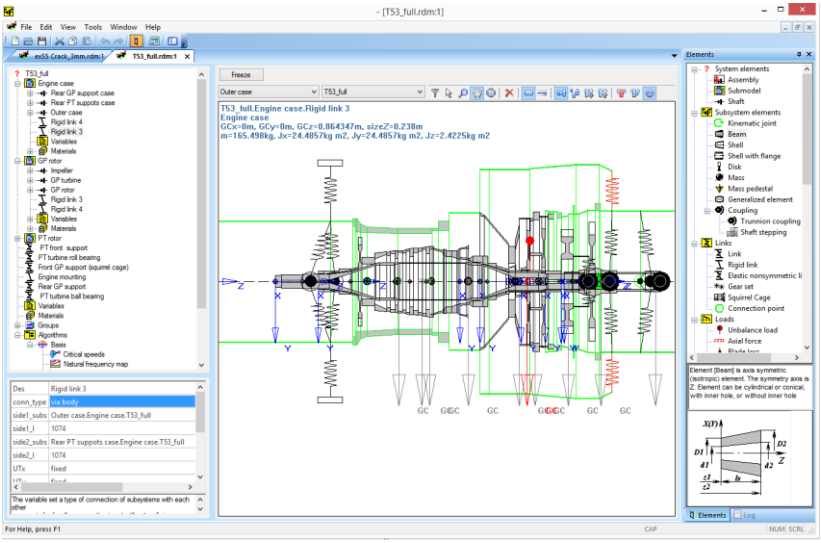


Рис. 4.1

Стартовое окно состоит из нескольких окон ввода-вывода, размеры которых могут изменяться:

- Центральное окно, в котором проводится создание модели, ее отображения, а также выводятся результаты моделирования

- Панель, которая включает две закладки - **[Elements]** и **[Log]**, которые могут быть размещены в любом месте экрана

Панель **[Elements]** предоставляет пользователю средства для создания проекта и моделей - библиотеку элементов для моделирования, алгоритмы для проведения анализа моделей, базу данных материалов, **Рис. 4.2**.

Панель **[Log]** отображает текущую информацию о работе алгоритмов, полученных результатах, сообщения об ошибках и предупреждения.

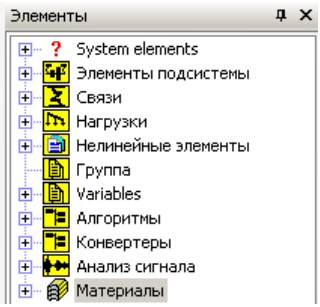


Рис. 4.2

Левое верхнее поле содержит данные о проекте – все структурные единицы, элементы, алгоритмы, включенные пользователем для анализа моделей, материалы и.т.д.

Левое нижнее поле предназначено для ввода параметров модели или параметров настройки алгоритмов, используемых для анализа.

ЗАМЕЧАНИЕ: Пользователь может изменить размеры всех полей или их местоположениес помощью курсора, используя функции технологии **“Drag & Drop”**. Текстовая или графическая информация может быть изменена обычным путем

В верхнем правом углу программа сопровождается стандартными строчками **Windows** программ - меню и панелью инструментов, **Рис. 4.3.**

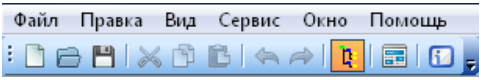


Рис. 4.3

Команда **[File]** включает в себя, помимо стандартных команд, команду **[Reload subsystems]**. Она позволяет обновлять модель всей системы после редактирования субмоделей, входящих в нее, без перезагрузки. Команда **[Tools]** открывает команды**[Options]** и **[Edit Materials DB]**.

Команда **[Options]** позволяет провести предварительную настройку программной системы на опции конкретного пользователя, **Рис. 4.4.**

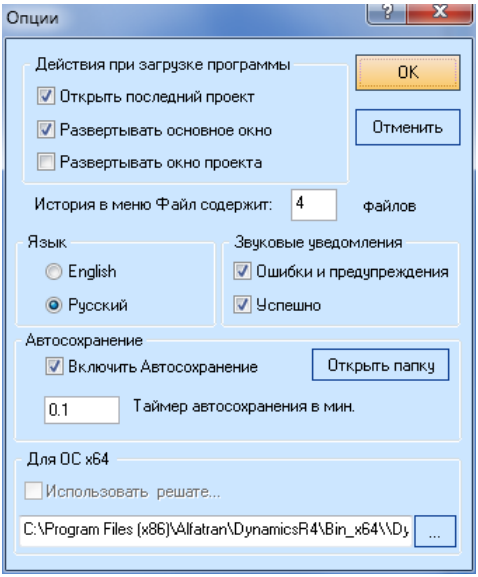


Рис. 4.4

Среди этих опций:

- Загрузка последнего проекта, с которым работал пользователь при запуске программы
- Восстановление максимального размера основного окна программы при ее запуске
- Восстановление максимального размера окна проекта при запуске программы
- Число запоминаемых имен файлов в истории программной системы
- Выбор языка интерфейса программы – английский или русский
- Настройка звуковых уведомлений по окончании расчета.
- Настройка параметров автосохранения модели

- Настройка запуска консольного решателя использовалась ранее для систем с большим количеством сечений (>700-800, расчет базиса). Начиная с версии DYNAMICS R4.14 интерфейс программы 64битный.

В строчке панели инструментов используются также кнопки:

- управляет отображением панелей **[Elements]** и **[Log]**

- кнопка формирования и вывода протокола проекта – исходные данные, результаты анализа и т.д.

- отмена последнего действия

- восстановление отмененного действия

- окно с информацией от текущей версии программы и установленных модулях

4.2 Запуск в режиме коммандной строки

Программа DYNAMICSR4 может быть запущена в режиме командной строки. Для этого в комнадной строке Windows необходимо запустить файл DynConsole.exe. Программа DynConsole.exe принимает следующие аргументы: [model file name] [-option1] [-option2] … , где [model file name] – имя файла проекта *.rdm. При запуске без опций произойдет запуск набора алгоритмов, выбранных пользователем для проведения исследований и сохранённых в *.rdm файле (подробнее о структуре проекта смотри **п. 6.1**). После завершения расчета запустится диалоговое окно выбора данных для вывода в протокол. Запуск DynConsole.exe с дополнительными опциями может изменить это поведение, список доступных опций:

- [-script] – после завершения расчета диалог формирования протокола вызван не будет
- [-script [-result_file output_file_name]] – после завершения расчета будет сгенерирован протокол и сохранен в файл с именем output_file_name, причем файл будет присвоено расширение txt.
- [-script [-result_file output_file_name] [-result_file_extension output_file_extension]] - после завершения расчета будет сгенерирован протокол и сохранен в

файл с именем output_file_name, причем файлу будет присвоено расширение output_file_extension.

- [-run_script [script file name]] – программа применит скрипт на языке Python, использующий коммандный интерфейс моделирования (см п.п. 21), к модели [model file name], затем запустит расчет.

Для печати справки по опциям командной строки нужно запустить команду DynConsole.exe [-? | -help].
Для печати версии программы DynConsole.exe [-V]
Примеры:

```
DynConsole.exe –V
DynConsole.exe test_cfg.rdm
DynConsole.exe test_cfg.rdm –script
DynConsole.exe test_cfg.rdm -script -result_file
test.txt
DynConsole.exe test_cfg.rdm -script -result_file
testOutput -result_file_extension log
```

5 ЗАГРУЗКА И СОХРАНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Первым шагом в работе с проектом является выбор пользователем существующего проекта, либо создание нового:

1. Загрузка старого проекта. Любой существующий проект загружается командой **[File] [Open]**.

2. Создание нового проекта. Новый проект создается командой **[File] [New]**.

3. Новый или отредактированный проект сохраняется командой **[File]** [**Save]** или **[File] [Save as…]** в любой момент времени работы программы, в том числе при проведении расчетов.

ЗАМЕЧАНИЕ: Если включить опцию **[Reload last project]** в окне **[Options]**, то будет автоматически загружаться последний проект, с которым работал пользователь перед закрытием программы

Для того чтобы загрузить модель, разработанную в предыдущей версии программы **Dynamics R3.1**, ее необходимо перевести в формат программной системы **DYNAMICS R4**. Для этого модель необходимо сохранить в соответствующем конвертере (поставляется пользователям **Dynamics R3.1**).

6 ПРОЕКТ

6.1 Данные проекта

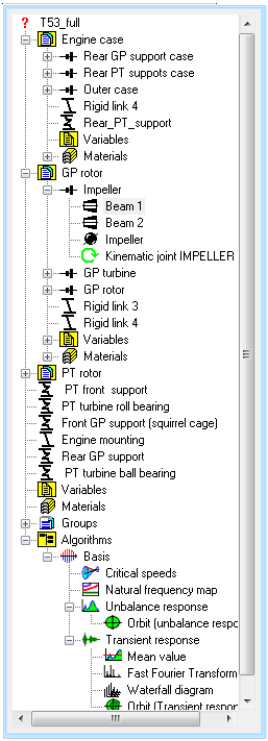


Рис. 6.1

Проект определяется как структура, которая содержит информацию об исследуемом объекте. Проект включает две основные части - исходные данные о модели и набор алгоритмов, выбранный пользователем для проведения исследований. Также в нем присутствует вспомогательная информация - база данных материалов и информация для проведения вариантных расчетов.

Весь проект представляется в виде иерархии основных структурных единиц (дерево проекта), из которых состоит модель, связей между ними, элементов, из которых состоят структурные единицы, нагрузок, набора материалов и переменных, списка алгоритмов для анализа модели и т.д.
Пример дерева проекта представлен на **Рис. 6.1.**

Дерево проекта открывается после загрузки файла с расширением ***.rdm**, соответствующим этому проекту.

Общие данные проекта могут быть открыты выделением первой строчки меню проекта. По умолчанию обозначение проекта **[System]**.

Пользователь может изменить это обозначение на любое другое. После выполнения команды в нижнем левом окне появляется окно с общими параметрами проекта и положения модели, **Рис. 6.2**.

Des	TS3_full		Designation
def_units	...		Default units for new model objects and output
title	TS3_full		Project title
description	...		Project description
name	Leontiev MK		User name
modified	12.11.2006 (10:52:39)		Date of last modification
x	0	mm	x coordinate
y	0	mm	y coordinate
z	0	mm	z coordinate
eps_x	0	deg	Rotation about x axis
eps_y	0	deg	Rotation about y axis
eps_z	0	deg	Rotation about z axis
show_IDs	No		Show internal IDs

Рис. 6.2

К данным проекта относятся:

- Обозначение проекта **[Des]**.Обозначение всегда отображается в первой строчке дерева проекта
- Система единиц измерений для выбора пользователем **[def_units]**
- Имя проекта **[title]** – может быть использовано для краткого описания модели
- Описание проекта **[description]** – предназначено для развернутого описания проекта
- Имя автора модели **[name]**
- Дата последнего изменения **[modified]**
- Значения линейных координат положения модели **[x,y,z]**
- Значения угловых координат **[eps_x, eps_y, eps_z]**

По умолчанию линейные и угловые координаты, определяющие положение системы координат, равны 0.

ЗАМЕЧАНИЕ: Все проектные данные используются в протоколах вывода данных модели и результатов расчетов

6.2 Системы единиц измерений

Система единиц выбирается и устанавливается пользователем. Пользователь может выбрать Международную систему единиц (СИ) или Английскую систему единиц. Также для СИ системы пользователь может произвести замену основной единицы длины **м** на **мм**.

По умолчанию используется система единиц СИ. В соответствии с этой системой некоторые основные параметры модели имеют следующие единицы измерений, **Таблица 6.1**:

Таблица 6.1

длина (диаметр)	мм	**давление**	Па
зазор	мм	**плотность**	кг/м^3
масса	кг	**угол**	рад (град)
сила	Н	**частота**	об/мин(Гц)
момент	Нм	**перемещение**	мм
жесткость…	Н/м и т.д	**скорость**	мм/сек
податливость…	м/Н и т.д.	**ускорение**	мм/сек^2
демпфирование	Нсек/м	**момент инерции**	кгм^2
статический момент	кгм		

ЗАМЕЧАНИЕ: При смене единиц измерения в свойствах выделенного объекта происходит автоматический пересчет значений, соответствующих изменениям параметров

6.3 Предупреждения и ошибки

В **DYNAMICS R4** работает развитая система проверки корректности введенных и рассчитанных данных.

Пример сообщения об ошибке показан на **Рис. 6.3**.

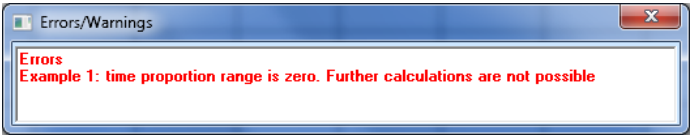


Рис. 6.3

Предупреждения носят информационный характер и не препятствуют проведению расчетов, в отличие от ошибок. Пример предупреждения показан на **Рис. 6.4.**

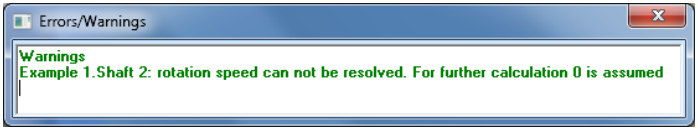


Рис. 6.4

Информация об ошибках высвечивается красным цветом, предупреждения – зеленым.

В режиме моделирования (активно окно 2D) есть возможность перехода от ошибок выдаваемых системой валидации параметров модели к проблемным элементам. Для перехода необходимо установить курсор на строчку с ошибкой или предупреждением и нажать кнопку [Перейти], **Рис. 6.5.**

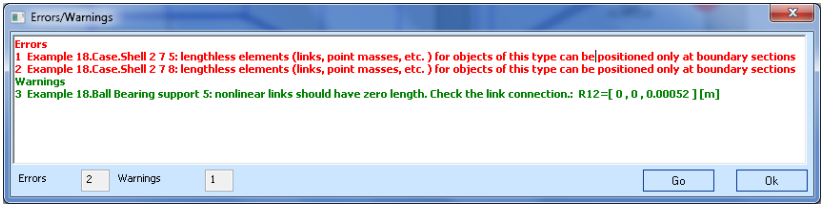


Рис. 6.5

Также проверить модель можно по команде "Валидация" контекстном меню дерева модели или меню программы [Сервис]\[Валидация], **Рис. 6.6.**

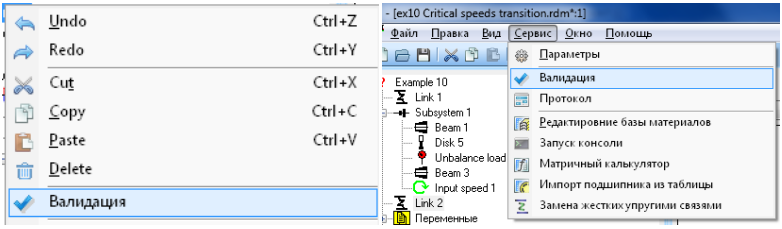

Undo Ctrl+Z
Redo Ctrl+Y
Cut Ctrl+X
Copy Ctrl+C
Paste Ctrl+V
Delete
Валидация
- [ex10 Critical speeds transition.rdm*:1]
Файл Правка Вид Сервис Окно Помощь
Example 10
Link 1
Subsystem 1
Beam 1
Disk 5
Unbalance load
Beam 3
Input speed 1
Link 2
Переменные
Параметры
Валидация
Протокол
Редактирование базы материалов
Запуск консоли
Матричный калькулятор
Импорт подшипника из таблицы
Замена жестких упругими связями

Рис. 6.6

7 АРХИТЕКТУРА МОДЕЛИ

7.1 Основные структурные единицы

В модель динамической системы могут входить следующие структурные единицы, **Рис. 7.1.**

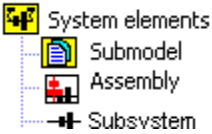


Рис. 7.1

Субмодели **[Submodel]**, Сборки **[Assembly]**, Подсистемы **[Subsystem]** формируются при создании модели динамической системы в среде программы **DYNAMICS R4**.

Сборки **[Assembly]**, подсистемы **[Subsystem]** принадлежат модели динамической системы **[System]**, формируемой в среде программы **DYNAMICS R4**.

Субмодели **[Submodel]** хранятся во внешних файлах и загружаются автоматически в динамическую модель при ее открытии. Пользователь может работать с этими структурными единицами, не загружая всю модель исследуемой динамической системы **[System]**.

Все структурные единицы в полной динамической системе соединяются между собой связями **[Link]**. Соединение происходит через точки связи **[Connection point]**, либо непосредственным указанием координат граничных сечений связей.

На следующих рисунках показаны возможные сочетания структурных единиц внутри иерархической модели исследуемой динамической системы.

В систему **[System]** могут входить субмодели **[Submodel]**, подсистемы, сборки и связи между ними, **Рис. 7.2**.

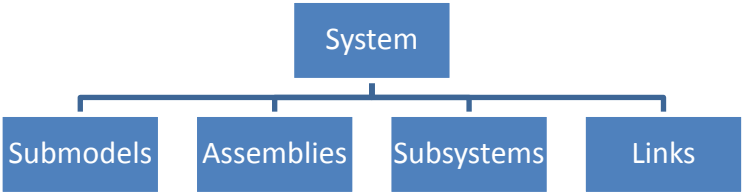


Рис. 7.2

В сборку могут входить субмодели **[Submodel]**, подсистемы **[Subsystem]**, другие сборки **[Assembly]** и связи **[Link]**между ними, **Рис. 7.3**.

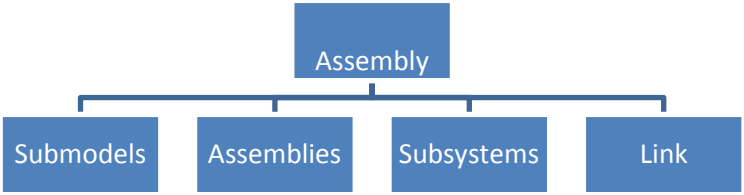


Рис. 7.3

Подсистема **[Subsystem]** строится из линейных элементов, нагрузки могут быть приложены только к подсистемам,
Рис. 7.4.

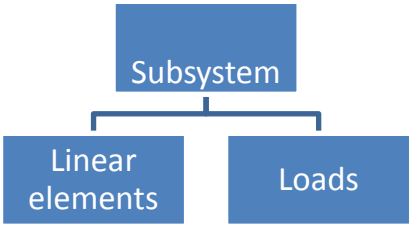


Рис. 7.4

Система с уникальным именем хранится в отдельном файле.

ЗАМЕЧАНИЕ: Любой структурный элемент может иметь уникальное имя, заданное пользователем

7.2 Элемент Сборка [Assembly]

Элемент предназначен для объединения нескольких субмоделей, подсистем и т.д. в сборку, которая затем входит в полную модель исследуемого объекта самостоятельной структурной единицей.
Сборка может редактироваться только в составе полной модели. Задается именем и положением ее локальной системы координат в глобальной, принадлежащей всей модели, **Рис. 7.5**.

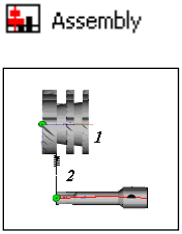
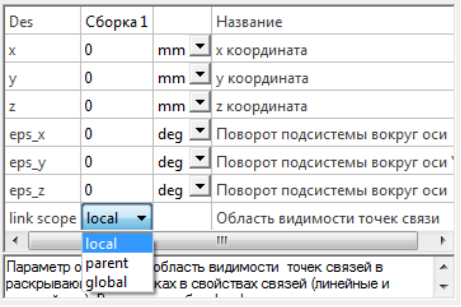
Символы меню	**Окно параметров**
	

Рис. 7.5

Параметр **[link scope]** определяет область видимости точек связей в раскрывающихся списках в свойствах связей (линейные и нелинейные). Возможен выбор: **local** - по умолчанию, стандартное поведение, как и в старых версиях программы. Выводятся только точки связи в текущей и вложенных сборках. **parent** - дополнительно видны точки связей из сборки на уровень выше, **global** - видны все точки связей в модели.

Порядок расположения элементов типа [Сборка] и [Субмодель] может быть изменен в дереве модели. Для этого могут быть использованы команды контекстного меню “Move Up”, “Move Down”, **Рис. 7.6**

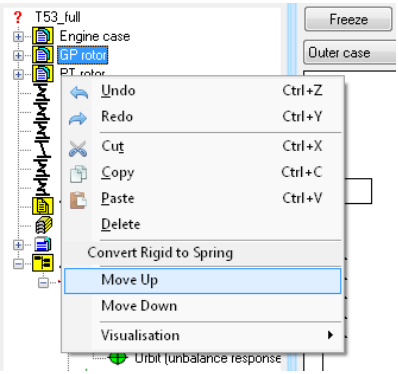
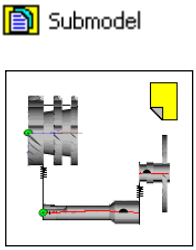
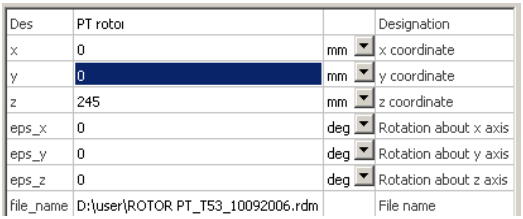


Рис. 7.6

Изменение порядка следования структурных элементов в дереве модели служит для изменения визуализации при разнесении по сборкам.

7.3 Элемент Субмодель [Submodel]

Элемент предназначен для объединения нескольких сборок и/или подсистем в модель, которая является частью более полной модели. Задается именем, локальной системой координат, определяющей ее положение в глобальной системе координат полной модели, **Рис. 7.7**.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	PT rotor		Designation
x	0	mm	x coordinate
y	0	mm	y coordinate
z	245	mm	z coordinate
eps_x	0	deg	Rotation about x axis
eps_y	0	deg	Rotation about y axis
eps_z	0	deg	Rotation about z axis
file_name	D:\user\ROTOR PT_T53_10092006.rdm		File name

Рис. 7.7

При добавлении субмодели в модель необходимо указать ее местоположение во внешней файловой структуре, **Рис. 7.8**.
Для этого необходимо:

- выделить субмодель в дереве основного проекта;
- указать в позиции **[file name]** путь к субмодели.

Диалог открытия файла вызывается в контекстном меню параметра командой **[Extended properties]**.Для этого необходимо **выделить** курсором поле ввода и нажать правую кнопку мыши. Далее пользователь стандартными действиями находит требуемый файл, **Рис. 7.9**.

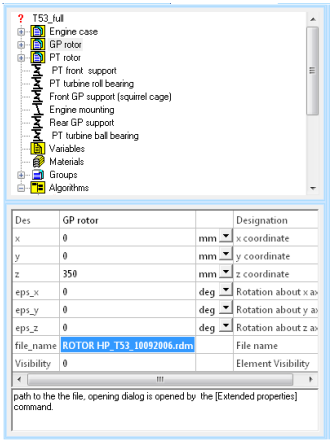


Рис. 7.8

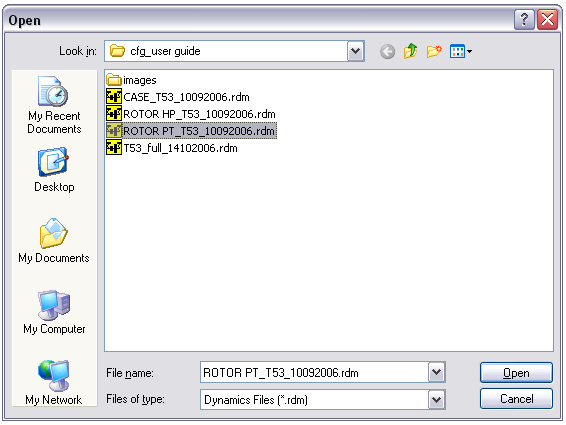


Рис. 7.9

Данную процедуру требуется повторить для всех субмоделей. В случае изменения пути к субмоделям или изменения соответствующих им конфигураций необходимо выполнить команду **[File]**, **[Reload submodels]**. Модель проекта будет обновлена отредактированными субмоделями. Также можно обновить текущую субмодель, выбрав в контекстном меню элемента команду "Перезагрузить субмодель"

ЗАМЕЧАНИЕ: Если путь к субмодели содержит только имя файла, то система будет пытаться открыть субмодель из каталога, в котором находится главная модель

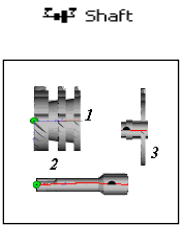
ЗАМЕЧАНИЕ: Редактирование содержимого субмоделей в сборочной конфигурации заблокировано

7.4 [Shaft] элемент

Подсистема является структурным элементом, построенным из элементарных элементов – балок, оболочек, дисков и т.д. Ее положение в пространстве задается набором линейных и угловых координат, **Рис. 7.10.**

Рис. 7.10

Символы меню | **Окно параметров**



Des	Подсистема 1		Designation
x	0	mm	x координата
y	0	mm	y координата
z	40.0844	mm	z координата
eps_x	0	deg	Поворот подсистемы вокруг оси X
eps_y	0	deg	Поворот подсистемы вокруг оси Y
eps_z	0	deg	Поворот подсистемы вокруг оси Z
material	задается пользователем		Выбор материала
E	2.1e+011	N/m2	Модуль упругости
Nue	0.3		Коэффициент Пуассона
rho	7850	kg/m3	Плотность материала
Ln_dec	0		Логарифмический декремент
cs	1e+007	mm	Шаг разбиения

Материал подсистемы может быть задан пользователем, либо выбран из базы данных. По умолчанию всем элементам, входящим в подсистему, присваивается материал подсистемы.

Параметр **[cs]** используется всеми алгоритмами программы. Его назначение – разбиение длинных балок и цилиндрических оболочек на короткие сегменты (балки/оболочки). Этот процесс улучшает моделирование реальных стержневых систем за счет более точного учета инерционных параметров при дискретном моделировании.

Разбиение балок на участки после задания параметра **[cs]** происходит автоматически. Его величина задается в миллиметрах и определяет длину участков, на которые разбиваются длинные балки.

ЗАМЕЧАНИЕ: Балочные элементы и цилиндрические оболочки автоматически разбиваются в местах присоединения связей и установки точечных элементов

Чтобы добавить подсистему, пользователь, применяя технологию **“drag and drop”**, переносит элемент из библиотеки элементов в центральное окно. Координатные оси и элемент **[Балка]** появляются в центральном окне.

8 ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

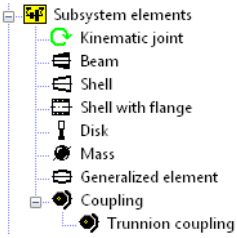


Рис. 8.1

Подсистема является частью полной динамической модели (системы). Например, для двухвального ГТД может быть выделено несколько подсистем – ротор низкого давления, ротор высокого давления, корпус внутренний, корпус наружный и т.д.

Все подсистемы соединяются между собой связями, которые описывают свойства опорных узлов, силовых элементов, подвески и т.д. В библиотеке программы моделирующие элементы представлены следующими позициями и обозначениями, **Рис. 8.1**

8.1 Общие свойства элементов и их параметры

Каждый типовой элемент определяется набором переменных параметров, которые задают его положение в подсистеме, геометрию, материал и т.д. Некоторые из этих параметров имеют одинаковое значение для всех элементов **Таблица 8.1**

Таблица 8.1

Параметр	Описание
Des	По умолчанию переменная имеет текстовое значение **[Название элемента_Номер].** Число указывает порядковый номер элемента в модели. Например, **[Балка 12]**. Пользователь может изменить текст на любой другой

Material	Переменная определяет способ задания материала элемента: Материал задается тремя путями: - выбирается пользователем из базы данных; - параметры материала редактируется пользователем; - если подсистема использует только один тип материала, то выбирается материал подсистемы
segRef	Переменная указывает способ позиционирования и задания геометрии элемента, обладающего длиной. В первом случае длина элемента определяется через координаты начала и конца элемента **[z1]** и **[z2]**. Эти два параметра могут редактироваться. Во втором случае пользователь задает непосредственно длину элемента через параметр **[ls].** В этом случае параметры **[z1]** и **[z2]** не редактируются
ls	Длина элемента. Величина **[ls]** может редактироваться, если параметр **[segRef]** задан как **[length]**
z1	Координата позиционирует начальное левое сечение элемента
z2	Координата позиционирует конечное правое сечение элемента
Type	Переменная назначает различные свойства типовым элементам, например: • для балок и оболочек – цилиндрическая или коническая • для абстрактного элемента - изотропный или ортотропный • для связи – изотропная или полная и т.д.
Conn_type	Переменная устанавливает, каким образом связь присоединяется к подсистеме. Возможно два варианта: **[via body]** – связь присоединяется к подсистеме без дополнительных условий. Точка связи определяется именем подсистемы и координатой **z;** **[via connection point]** – связь присоединяется к заранее установленной точке с заданным именем. Точка задается именем подсистемы, в которой она находится, и координатой **z** (в локальной для данной подсистемы системе координат). Этот тип присоединения связи более удобен для редактирования и является единственным вариантом при формировании многоуровневых несоосных пространственных систем
side1_subs	Переменная указывает подсистему, к которой подсоединяется граничное сечение **1** связи. По умолчанию выбранной подсистемой является нулевая подсистема (жесткое основание)
side2_subs	Переменная указывает подсистему, к которой подсоединяется граничное сечение **2** связи. По умолчанию выбранной подсистемой является нулевая подсистема (жесткое основание)
UT_x	Перемещение вдоль оси **X**
UT_y	Перемещение вдоль оси **Y**
UT_z	Перемещение вдоль оси **Z**
UR_x	Поворот вокруг оси **X**
UR_y	Поворот вокруг оси **Y**
UR_z	Поворот вокруг оси **Z**

d*	Связь при визуализации представляется пружиной с внутренним, наружным размерами и шириной. Данная переменная определяет внутренний размер элемента в модели
D*	Переменная определяет наружный размер элемента в модели
B*	Переменная определяет ширину связи в модели. Используется только для визуализации связи в модели
t_st_type	Переменная устанавливает способ задания момента возникновения нагрузки в задачах нестационарного анализа - в абсолютных значениях **[real]** или относительных **[relative]** : **[relative]** - использует **временной параметр** из элемента **[Kinematic joint]** **[real]** - использует время интегрирования исследуемого процесса, задаваемое в алгоритме **[Transient response]**
t_st_rel	Значение временного параметра (для **[realative]**)
t_st_real	Значение временного параметра для **[real]**
E	Модуль упругости 1-города
Nue	Коэффициент Пуассона
Rho	Плотность материала
Ln_dec	Логарифмический декремент

ЗАМЕЧАНИЕ: В случае несовпадения граничных сечений связи значения коэффициентов жесткости определяются при условии заделки второго граничного сечения **side2** связи и нагружения первого сечения **side1**

ЗАМЕЧАНИЕ: Матрица податливости в протяженных элементах определяется в условиях заделки левого граничного сечения 1 элемента и нагружения правого сечения 2

ЗАМЕЧАНИЕ: Все геометрические параметры элементов задаются в локальной системе координат конкретной подсистемы

Для элементов [Балка], [Оболочка], [Оболочка с фланцем] начиная с версии DYNAMICS R4.11 доступен вывод расчетных параметров элемента (массово-инерционных характеристик и матрицы податливости) в диалоге [El. Results]. Ранее эти параметры были доступны только в режиме вывода [Протокола].

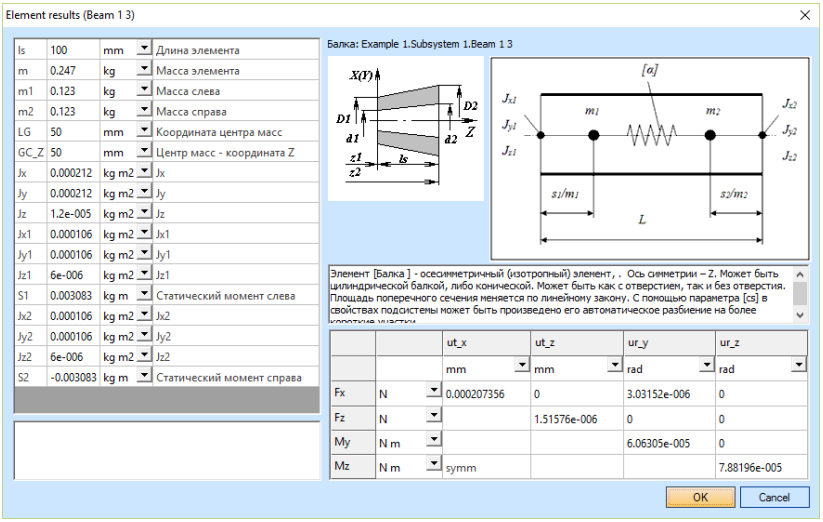


Рис. 8.2

При двойном клике левой кнопкой мыши на поле с названием параметра, к которому подключена переменная будет активировано окно свойств связанной переменной.

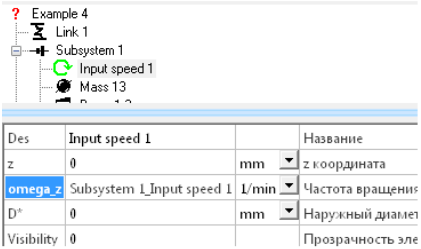


Рис. 8.3

При двойном клике на названии поля подключения связи происходит переход к точке связи или ближайшему элементу в подсистеме.

ЗАМЕЧАНИЕ: Переключиться на предыдущий активный элемент можно нажатием комбинации клавиш ctrl+shift+z. На следующий ctrl+shift+y.

Иногда в модель требуется добавить дополнительное сечение, не прибегая к функциональности авторазбиения балочных и оболочечных элементов. Либо требуется разбить элементы не поддающиеся авторазбиению. Для цилиндрических элементов это можно было сделать и ранее через функциональность копирования-вставки элементов.

Теперь же при двойном клике мышкой появляется диалоговое окно (Рис. 8.4), в котором можно отредактировать координату вставки элемента либо в локальной системе координат (СК), либо в глобальной. Вставка сечения в глобальной СК может пригодиться при установке сечения для подключения связи в режиме [via body], в котором координаты указываются в глобальной СК модели.

Также эту функциональность можно использовать для приблизительного определения координат в модели.

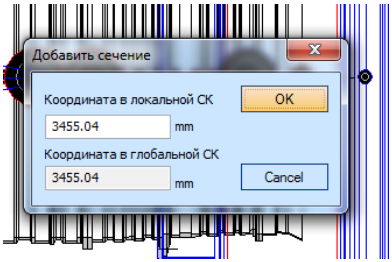


Рис. 8.4

ЗАМЕЧАНИЕ: Параметры не относящиеся к геометрии протяженного элемента будут продублированы.

ЗАМЕЧАНИЕ: При активной ячейке параметра в таблице свойств элемента нажатие ctrl+2 или ctrl+4 приводит к умножению параметра на 2 или 4 соответственно. Одновременное нажатие ctrl+shift+2 или ctrl+shift+4 приводит к делению на 2 или на 4 соответственно. Функциональность предназначена либо для ввода с чертежа радиуса, либо для учета масштаба на чертеже. Также это работает для нескольких одновременно выделенных ячеек. Ячейки также могут быть выделены по отдельности с зажатым Ctrl.

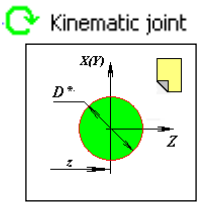
8.2 Типовой элемент [Kinematic joint]

Элемент определяет для подсистемы закон изменения частоты вращения в заданном временном диапазоне. Используется как в случае вращающихся подсистем, так и неподвижных, **Рис. 8.5**. Если для подсистемы данный элемент не задан, то по умолчанию считается, что частота вращения системы равна 0.

Закон изменения частоты вращения может быть различным:

- частота вращения является постоянной во всем временном диапазоне. В этом случае для динамической системы можно провести любые расчеты, за исключением расчета критических частот вращения;

- частота вращения меняется в некотором временном диапазоне - например, от 0 до максимального значения. В этом случае имеется возможность рассчитать критические частоты вращения в данном диапазоне.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Kinematic joint 2		Designation
z	0	mm	z coordinate
omega_z	0	1/min	Velocity about z direction
D*	0	mm	Outer diameter

Рис. 8.5

Ввод данных для элемента проводится через команду **[Variables]** в соответствии со следующими этапами.

1. Пользователь добавляет элемент **[Kinematic joint]** в соответствующую подсистему. Положение элемента не влияет на параметры подсистемы и ее элементов.

ЗАМЕЧАНИЕ: Для данного элемента не имеет значения место (координата z) установки внутри подсистемы

2. Пользователь создает новую переменную с помощью команд**[Variable], [Value variable]**. В левом нижнем окне появляется окно для ввода значений переменной **[Value variable]**, **Рис. 8.6**.

Рис. 8.6

3. Кликом правой кнопкой мыши в поле значения переменной **[value]** пользователь открывает список следующих команд, **Рис. 8.7**.

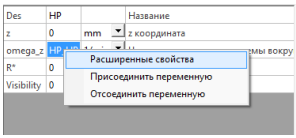


Рис. 8.7

4. Используя команду**[Расширенные свойства],** пользователь может открыть окно **[Value variable]** для ввода значений переменной, **Рис. 8.8**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Рекомендуется всем переменным **[Value variable]** назначать имена в соответствии с именем варьируемого параметра

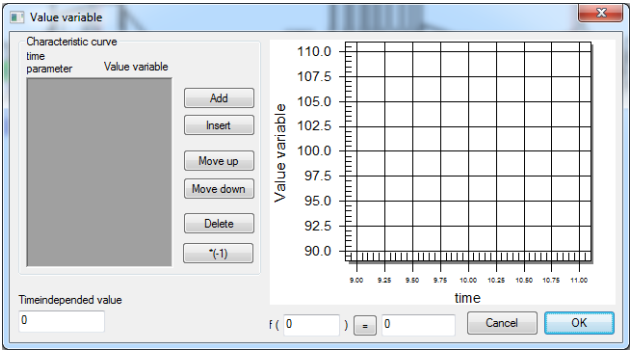


Рис. 8.8

5. Пользователь добавляет соответствующее количество временных параметров, для которых будет определяться значение переменной **[Value variable]**, **Рис. 8.9**.

ЗАМЕЧАНИЕ: [time parameter] (в настройках алгоритмов фигурирует как t_pr) является абстрактным параметром, позволяющим привести к единому знаменателю изменение разных по физике параметров.

В **таблице 8.2** приведены разные варианты задания закона изменения скорости вращения. Все они определяют разгон от 0 до 10000 об/мин. В (1) случае параметру t_pr задается смысл скорости вращения. Во (2) варианте придается смысл процентов по режиму. В (3) - приведенные обороты. Если при запуске разгон ротора до 10000 оборотов производится за 12 сек, то (4) вариант позволяет параметризовать параметры по времени эксперимента (может быть удобно в алгоритме [Нелинейный анализ]).

Таблица 8.2

1		2		3		4	
t_pr	Знач.	t_pr	Знач.	t_pr	Знач.	t_pr	Знач.
0	0	0	0	0	0	0	0
10000	10000	100	10000	1	10000	12	10000

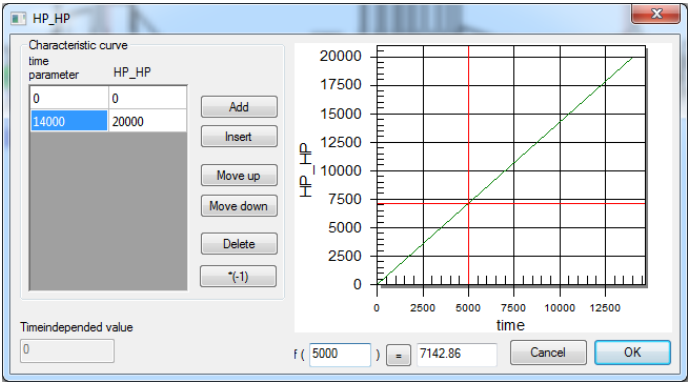


Рис. 8.9

Кнопки окна позволяют управлять процессом ввода и редактирования. Поля под графиком позволяют узнать интерполированное значение функции или аргумента.

6. Последний этап – присоединение определенной переменной **[Value variable]** к варьируемому параметру. Пользователь кликом правой кнопкой мыши в поле значения переменной **[omega_z]** открывает список команд и выполняет команду**[Присоединить переменную], Рис. 8.10**.

Значение переменной может быть использовано для определения других подсистем, имеющих тот же закон изменения частоты вращения

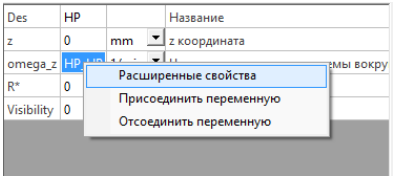


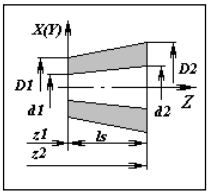
Рис. 8.10

ЗАМЕЧАНИЕ: Если для подсистемы не задан элемент **[Kinematic joint]**, скорость вращения вала принимается равной 0. При расчете выдается соответствующее предупреждение.

ЗАМЕЧАНИЕ: Если скорость вращения вала постоянна, то значение скорости может быть задано в поле параметра omega_z.

8.3 Типовой элемент [Beam]

Элемент **[Beam]** - осесимметричный (изотропный) элемент, **Рис. 8.11**. Ось симметрии – **Z**. Может быть цилиндрической балкой, либо конической. Может быть как с отверстием, так и без отверстия. Площадь поперечного сечения меняется по линейному закону. С помощью параметра **[cs]** команды **[Options]** может быть произведено его автоматическое разбиение на более короткие участки.

Символы меню	Окно параметров
Beam 	

Des	Beam 1		Designation
segRef	z1 and z2		Measurement
ls	100	mm	Length of element
z1	0	mm	Start coordinate
z2	100	mm	End coordinate
Type	cylinder		Type
d1	0	mm	Inner start diameter
D1	179.696	mm	Outer start diameter
material	Like subsystem		Material
E	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity
Nue	0.3		Poisson's ratio
rho	7850	kg/m3	Density
Ln_dec	0		Logarithmic decrement

Рис. 8.11

Для каждого балочного элемента его упругие и инерционные параметры могут быть рассчитаны и выведены в протоколе.

Правило знаков при определении перемещений и сил показано на **Рис. 8.12**. Положительные направления перемещений показаны стрелками. Положительные направления сил совпадают с направлением перемещений.

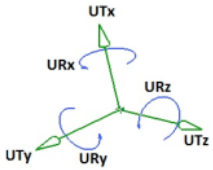


Рис. 8.12

ЗАМЕЧАНИЕ: Для моделирования тонкостенных конических элементов конструкций следует использовать элемент [Shell]

ЗАМЕЧАНИЕ: Все балочные элементы рассчитываются с учетом деформации сдвига

В контекстном меню балок и оболочек присутствуют команды конвертации элементов из одного типа в другой, **Рис. 8.13**. Тонкостенные элементы конструкций корпусов, цапф следует моделировать оболочечными элементами. Если же на этапе моделирования они были промоделированы балочными элементами, то с помощью команд в контекстном меню элемента можно произвести замену.

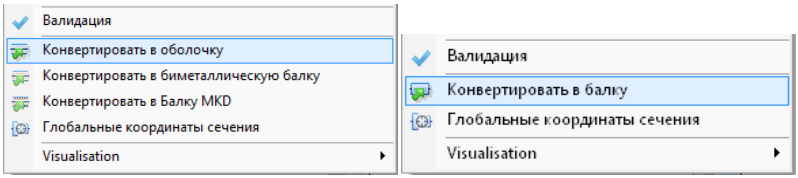
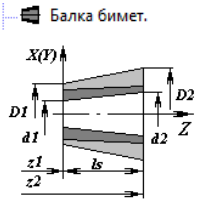


Рис. 8.13

8.4 Типовой элемент [Beam Bimetal]

Элемент **[Балка бимет.]** - осесимметричный (изотропный) элемент, **Рис. 8.14**. Ось симметрии – **Z**. Позволяет задавать различные свойства материалов в радиальном направлении.

Символы меню	Окно параметров



Des	Балка бимет. 1 4		Название
segRef	длина		Способ позиционирования элемента
ls	27	mm	Длина элемента
z1	141	mm	Координата слева
z2	168	mm	Координата справа
Type	Конус		Type
d1	0	mm	Внутренний диаметр слева
D1	27.94	mm	Наружный диаметр в левом сечении
d2	0	mm	Внутренний диаметр справа
D2	27.94	mm	Наружный диаметр в правом сечении
D1_in	13.97	mm	Наружный диаметр внутреннего слоя в левом сечении
D2_in	13.97	mm	Наружный диаметр внутреннего слоя в правом сечении
material	...		material
el. vis.	color...		el. vis.
Visibility	0		Прозрачность элемента
el. vis.	color...		el. vis.
Св-ва Эл.	...		Св-ва Эл.

Рис. 8.14

Может быть цилиндрической балкой, либо конической. Может быть как с отверстием, так и без отверстия. Площадь поперечного сечения меняется по линейному закону. С помощью параметра **[cs]** команды **[Options]** может быть произведено его автоматическое разбиение на более короткие участки.

Задание свойств материалов производится в диалоге (**Рис. 8.15**) вызываемом двойным кликом на параметре [material] или из контекстного меню параметра

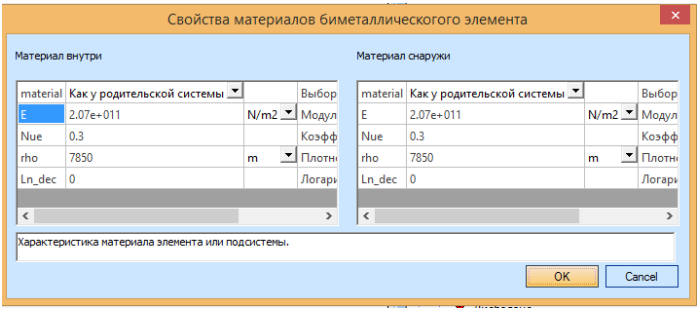


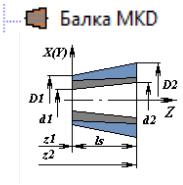
Рис. 8.15

Помимо биметаллических изделий (например, колеса зубчатых передач), элемент подходит для моделирования распределенной массы не участвующей в основной жесткости вала или корпуса. Например, в генераторах и электромоторах. Подходит для моделирования насадных деталей из разного материала сопрягаемых с натягом.

8.5 Типовой элемент [Beam MKD]

Элемент **[Балка MKD]** - осесимметричный (изотропный) элемент, Рис. 8.16. Ось симметрии – **Z**. Позволяет задавать различные диаметры для жесткостных и массовых характеристик.
Может быть цилиндрической балкой, либо конической. Может быть как с отверстием, так и без отверстия. Площадь поперечного сечения меняется по линейному закону. С помощью параметра **[cs]** команды **[Options]** может быть произведено его автоматическое разбиение на более короткие участки.
Массовые диаметры задаются большими или равными жесткостным. Но расчет будет проводится корректно и для произвольных соотношений диаметров.

Символы меню	Окно параметров



Des	Балка MKD 1 7		Название
segRef	длина		Способ позиционирования элемента
ls	13	mm	Длина элемента
z1	368	mm	Координата слева
z2	381	mm	Координата справа
Type	Конус		Type
d1_M	100	mm	Внутренний массовый диаметр слева
D1_M	200	mm	Наружный массовый диаметр в левом с
d1_S	120	mm	Внутренний жесткостной диаметр слева
D1_S	160	mm	Наружный жесткостной диаметр в левом
d2_M	100	mm	Внутренний массовый диаметр справа
D2_M	200	mm	Наружный массовый диаметр в правом
d2_S	120	mm	Внутренний жесткостной диаметр справа
D2_S	160	mm	Наружный жесткостной диаметр в право
material	Как у родительской системы		Выбор материала
el. vis.	color...		el. vis.
Visibility	0		Прозрачность элемента
el. vis.	color...		el. vis.
Св-ва Эл.	...		Св-ва Эл.

Рис. 8.16

Элемент подходит для реализации рекомендаций стандарта API (**Рис. 8.17**).

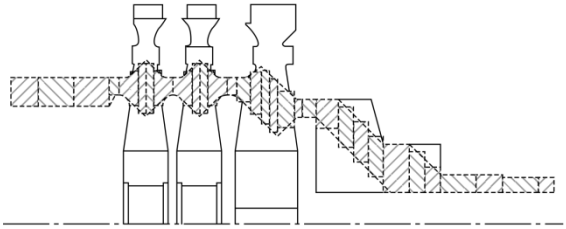


Рис. 8.17

Визуализация элемента может быть отдельно настроена для массово-инерционной и жесткостной частей (**Рис. 8.18**).

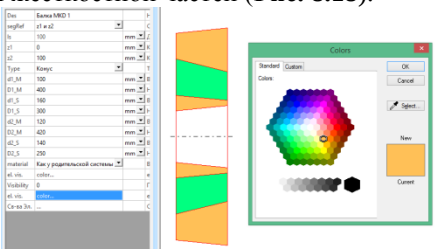
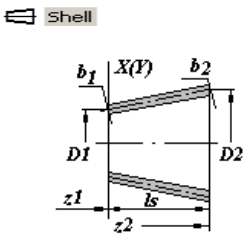
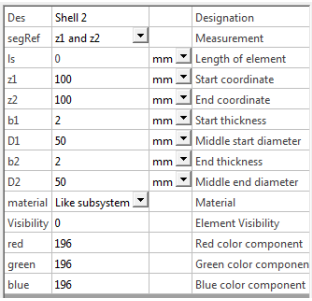


Рис. 8.18

8.6 Типовой элемент [Shell]

Осесимметричный (изотропный) элемент,**Рис. 8.19**. Ось симметрии – **Z**. Может быть цилиндрической либо конической. Площадь поперечного сечения меняется по линейному закону. Геометрия задается длиной, срединным диаметром и толщиной оболочки в начальном и конечном сечении.

Начиная с версии 4.8.8 цилиндрические оболочки могут автоматически разбиваться на подучастки в зависимости от настроек параметра [shell autosplit] в корневом элементе [Система] дерева модели (**Рис. 8.20)**. Параметр [без cs] - разбиение происходит только в местах установки связей и точечных элементов. При выборе [всегда] - будет дополнительно учитываться параметр [cs] авторазбиения элементов подсистемы.
Элемент оболочка корректно моделирует поведение конических оболочечных элементов конструкции от фланца до фланца (между жесткими сечениями). Не рекомендуется проводить разбиение конических участков между фланцами без проведения валидации в МКЭ.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Shell 2		Designation
segRef	z1 and z2		Measurement
ls	0	mm	Length of element
z1	100	mm	Start coordinate
z2	100	mm	End coordinate
b1	2	mm	Start thickness
D1	50	mm	Middle start diameter
b2	2	mm	End thickness
D2	50	mm	Middle end diameter
material	Like subsystem		Material
Visibility	0		Element Visibility
red	196		Red color component
green	196		Green color componen
blue	196		Blue color component

Рис. 8.19

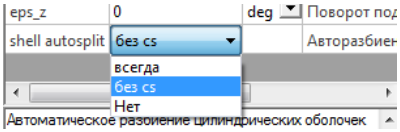


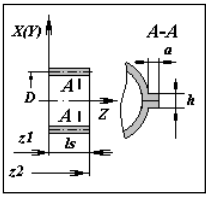
Рис. 8.20

ЗАМЕЧАНИЕ: Для моделирования тонкостенных конических элементов конструкций следует использовать элемент [Shell]

8.7 Типовой элемент [Shell with flange]

Элемент **[Shell with flange]**является ортотропным элементом, **Рис. 8.21**. Может быть только цилиндрическим. Используется для моделирования разъемных корпусов компрессоров и нагнетателей с продольными фланцами.

Символы меню



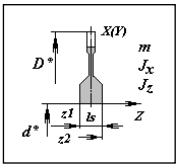
Окно параметров

Des	Shell with flange 1		Designation
segRef	z1 and z2		Measurement
ls	100	mm	Length of element
z1	0	mm	Start coordinate
z2	100	mm	End coordinate
b	2	mm	Thickness
D	50	mm	Middle diameter
a	5	mm	Width of flange
h	10	mm	Thickness of flange
material	Like subsystem		Material
Visibility	0		Element Visibility
red	196		Red color component
green	196		Green color componen
blue	196		Blue color component

Рис. 8.21

8.8 Типовой элемент [Disk]

Элемент (**Рис. 8.22**) предназначен для моделирования рабочих колес осевых компрессоров, турбин и т.д. Задается инерционными параметрами – массой, диаметральным и осевым моментами инерции, а также шириной между двумя боковыми торцами, к которым присоединяются другие элементы.
Пользователь может изменить форму диска (только для визуализации модели) посредством параметров **d*, D***.

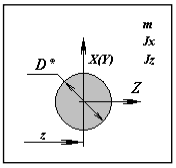
Символы меню	Окно параметров
Disk 	

Des	Disk 7		Designation
segRef	z1 and z2		Measurement
ls	100	mm	Length of element
z1	101	mm	Start coordinate
z2	201	mm	End coordinate
m	0	kg	Mass
type	Isotropic		Type
Jx	0	kg m2	Jx
Jz	0	kg m2	Jz
d*	0	mm	Inner diameter
D*	50	mm	Outer diameter

Рис. 8.22

8.9 Типовой элемент [Mass]

Элемент предназначен для моделирования массового элемента, сосредоточенного в точке, **Рис. 8.23.** Задается инерционными параметрами. Не имеет длины.

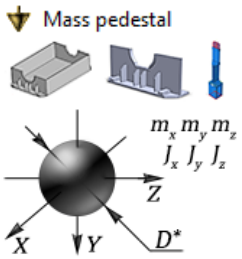
Символы меню	Окно параметров
Mass 	

Des	Mass 2		Designation
z1	950	mm	Start coordinate
m	10	kg	Mass
type	Isotropic		Type
Jx	0.001	kg m2	Jx
Jz	0.001	kg m2	Jz
D*	20	mm	Outer diameter
Vis as	default		Element Visualisation a
Visibility	0		Element Visibility

Рис. 8.23

8.10 Типовой элемент [Mass pedestal]

Элемент предназначен для моделирования массового элемента, сосредоточенного в точке, Рис. 8.24. Задается инерционными параметрами. Не имеет длины. Возможно задания различных значений массы по радиальным и осевому направлениям. Предназначен для моделирования собственных частот основания(подвески) в редуцированной модели.

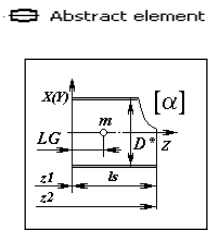
Символы меню	Окно параметров
	

Des	Mass pedestal 6		Designation
z1	0	mm	Start coordinate
mx	100	kg	Mass in X direction
my	110	kg	Mass in Y direction
mz	80	kg	Mass in Z direction
Jx	100	kg m2	Jx
Jy	100	kg m2	Jy
Jz	100	kg m2	Jz
R*	0	mm	Fictive radius
Vis as	default		Element Visualisation as...
Visibility	0		Element Visibility

Рис. 8.24

8.11 Типовой элемент [Generalized element]

Элемент (**Рис. 8.25**) может быть представлен как изотропный или ортотропный. Задаются длина элемента, его масса, главные моменты инерции, коэффициенты податливости. Центр массы определяется расстоянием от левого края элемента.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Generalized element 2		Designation
segRef	z1 and z2		Measurement
ls	100	mm	Length of element
z1	100	mm	Start coordinate
z2	200	mm	End coordinate
type	general		Type of element
type	Isotropic		Type
inertia_cos	boundary		Coordinate system for inertia properties
m1	0	kg	Mass1
Jx1	0	kg m2	Jx1
Jz1	0	kg m2	Jz1
S1	0	m	Static moment of inertia 1
m2	0	kg	Mass2
Jx2	0	kg m2	Jx2
Jz2	0	kg m2	Jz2
S2	0	m	Static moment of inertia 2
flex_matrix	...		Flexibility matrix
D*	50	mm	Outer diameter
Ln_dec	0		Logarithmic decrement

Рис. 8.25

Масса может быть задана в своем центре тяжести, либо разнесена по краям элемента. В последнем случае для левой и правой массы определяется также статический момент инерции. Для ортотропного

элемента задаются коэффициенты податливости в двух плоскостях. Имеется возможность редуцировать элемент до безынерционного или абсолютно жесткого. Описание значений для всех элементов представлено в **Таблице 8.3**.

Упругие свойства элемента определяются симметричной матрицей податливости (изотропной или ортотропной), **Рис. 8.26.** На рисунке выделены элементы учитываемые в расчете. Остальные элементы игнорируются.

Начиная с версии DYNAMICS R4.11 исправлено обозначение строк и столбцов в матрице податливости. Обозначения перемещений располагаются по строкам, нагрузок по столбцам. Порядок задания элементов в матрице податливости не изменился.

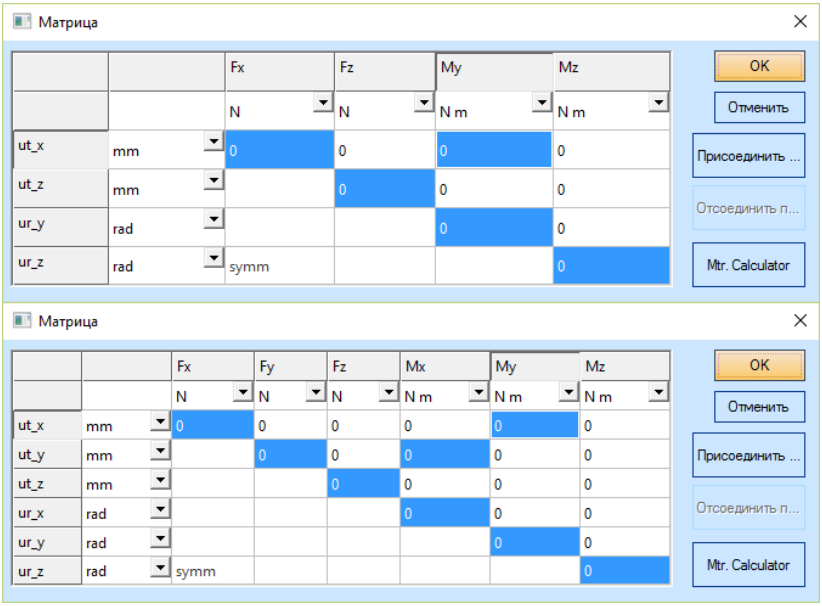


Рис. 8.26

Все коэффициенты податливости определяются в соответствии с правилом знаков, представленным на **Рис. 8.12**.

ЗАМЕЧАНИЕ: При задании полной матрицы коэффициентов податливости требуется согласование ее коэффициентов между собой (т.е. коэффициенты должны отражать реальные жесткостные свойства конструкции, описываемой этим элементом)

ЗАМЕЧАНИЕ: В случае задания массовых характеристик в центре массы обобщенного элемента используется схема, когда массовые характеристики приводятся к левому сечению обобщенного элемента. В случае если это сечение имеет жесткую заделку, массовые характеристики не будут учтены в расчете

Таблица 8.3Описание параметров элемента

Обозначение	**Описание параметра**
Type **General,** **Massless** **Rigid**	Переменная определяет тип элемента. Возможны три варианта: элемент общего вида; элемент безынерционный; элемент абсолютно жесткий. В зависимости от включенного типа, в таблице редактирования параметров доступны лишь те, которые относятся к нему
Type **Isotropic,** **Orthotropic**	Переменная определяет симметрию свойств элемента: -изотропный (обладающий круговой симметрией относительно оси **Z**; параметры с индексом “**y**” автоматически инициализируются значениями параметров с индексом “**x**” и для редактирования недоступны); -ортотропный (обладающий двумя ортогональными плоскостями симметрии; параметры элемента задаются отдельно в плоскостях **YOZ** и **XOZ** локальной системы координат элемента и могут различаться)
inertia_cos **Boundary,** **Center of mass**	Переменная определяет способ распределения инерционных параметров элемента в расчетной модели. Возможны варианты: все инерционные параметры сосредоточены в центре массы элемента; инерционные параметры распределяются по концам. Распределение задается пользователем
m	Масса элемента
LG	Координата по оси **Z**, определяющая положение центра массы элемента. Отсчитывается от левого конца (сечения) элемента
Jx	Массовый момент инерции элемента вокруг оси **X**

Jy	Массовый момент инерции элемента вокруг оси **Y**
Jz	Массовый момент инерции элемента вокруг оси **Z**
m1	Масса на левом конце элемента
Jx1	Инерционный момент левой части типового элемента вокруг оси **X** главной системы координат **X,Y,Z,** проходящей в левом сечении элемента
Jy1	Инерционный момент левой части типового элемента вокруг оси**Y** главной системы координат **X,Y,Z,** проходящей в левом сечении элемента
Jz1	Инерционный момент левой части типового элемента вокруг оси Z главной системы координатX,Y,Z, проходящей в левом сечении элемента
S1	Статический момент левой части элемента вокруг главных осей X, Y, Z , проходящих через левое сечение элемента
m2	Масса на правом конце элемента
Jx2	Инерционный момент правой части типового элемента вокруг оси X главной системы координат X,Y,Z, проходящей в правом сечении элемента
Jy2	Инерционный момент правой части типового элемента вокруг оси Y главной системы координат X,Y,Z, проходящей в правом сечении элемента
Jz2	Инерционный момент правой части типового элемента вокруг осиZ главной системы координат X,Y,Z, проходящей в правом сечении элемента
S2	Статический момент правой части типового элемента вокруг главных осей X,Y,Z, проведенных в правом сечении элемента
dUTx/dFx	Прямой коэффициент податливости. Связывает линейное перемещение по оси X правого сечения участка с приложенной к нему силой по оси X при условии заделки левого сечения
dUTx/dMx	Перекрестный коэффициент податливости. Связывает перемещение по оси X правого сечения участка с приложенным к нему моментом вокруг оси X при условии заделки левого сечения
dURx/dMx	Прямой коэффициент моментной податливости. Связывает угловое перемещение вокруг оси X правого сечения участка с приложенным к нему моментом вокруг оси X при условии заделки левого сечения
dUTy/dFy	Прямой коэффициент силовой податливости. Связывает линейное перемещение по оси Y правого сечения участка с приложенной к нему силой по оси Y при условии заделки левого сечения
dUTy/dMy	Перекрестный коэффициент податливости. Связывает линейное перемещение вокруг оси Y правого сечения участка с приложенным к нему моментом вокруг оси Y при условии заделки левого сечения
dURy/dMy	Коэффициент податливости. Связывает угловое перемещение вокруг оси Y правого сечения участка с приложенным к нему моментом вокруг оси Y при условии заделки левого сечения

dUTz/dFz	Коэффициент податливости. Связывает линейное перемещение по оси Z правого сечения участка с приложенной к нему силой по оси Z при условии заделки левого сечения
dURz/dMz	Коэффициент податливости. Связывает угловое перемещение вокруг оси Z правого сечения участка с приложенным к нему моментом вокруг оси Z при условии заделки левого сечения
D*	Переменная, устанавливающая размер абстрактного элемента (диаметр) при визуализации модели

8.12 Визуализация элементов [Disk], [Mass], [Generalized element]

Начиная с версии 4.6.5, появилась возможность расширенной настройки визуализации элементов **[Диск]**, **[Масса]**, **[Обобщенный элемент]**. Помимо отображения элементов в варианте "по умолчанию" - **[стандарт]**, есть возможность дополнительной настройки в режимах **[диск]** и **[файл]**.

Для элемента **[Диск]** чаще всего могут использоваться режимы **[стандарт]** и **[диск]**. Режим **[диск]** позволяет задать размеры диаметров ступицы, обода, высоту лопаток. Преобладающий вариант настроек для этого элемента - режим **[целиком]**. В этом режиме можно настроить и параметры 2D визуализации и отображение 3D модели из файла в формате VRML. Если путь пустой, то 3D визуализация строится автоматически на основе заданных размеров диска.

Для элементов **[Масса]** и **[Обобщенный элемент]** могут быть полезны режимы визуализации **[диск]** и **[файл]**. В режиме **[файл]** визуализация элемента в 3D режиме может быть произведена отображением трехмерной модели, загруженной из файла в формате VRML. 2D отображение представляется в этом случае прямоугольником заданных габаритов. При загрузке из файла может потребоваться установка коэффициента масштабирования 3D модели (**[to_m_factor]** - коэффициент перевода единиц модели в метры). Из файла могут визуализироваться сложные элементы конструкции, меняющие характерный облик изделия. Например, диск вентилятора, сложные элементы опор. В случае уточнения массово-инерционных и упругих характеристик конструкции с вводом полученных данных в **[Обобщенный элемент]** имеет смысл загружать визуализацию таких элементов из файла.

Элемент **[Масса]** может быть удачно использован для задания массово-инерционных характеристик дисков и их расширенной визуализации. Режимы **[без обода]**, **[без ступицы]**, **[лопатки]** могут быть использованы совместно с балочными элементами. Например, обод (если он входит в силовой контур) может быть промоделирован балочным элементом с нулевой плотностью и соответствующим модулем упругости. Режим **[лопатки]** используется в случае отсутствия полотна и ступицы диска (например, лопатки расположены на барабане компрессора).

На рисунке (**Рис. 8.27)** цифрами обозначены следующие варианты:

1. Визуализация массы как диска в режиме **[целиком]**
2. Визуализация массы как диска в режиме **[лопатки]**. Участок барабана компрессора промоделирован балочными элементами
3. Визуализация диска в режиме **[стандарт]**
4. Визуализация массы как диска в режиме **[без обода]**. Обод промоделирован балочным элементом
5. Визуализация массы как диска в режиме **[без ступицы]**. Ступица промоделирована балочными элементами
6. Визуализация диска в режиме **[файл]** с 3Д отображением модели вентилятора
7. Визуализация обобщенного элемента в режиме **[файл]** с отображением силовых элементов корпуса

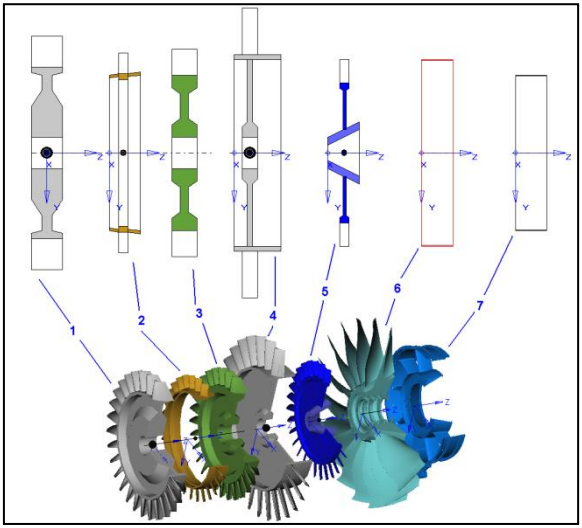
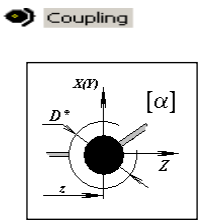
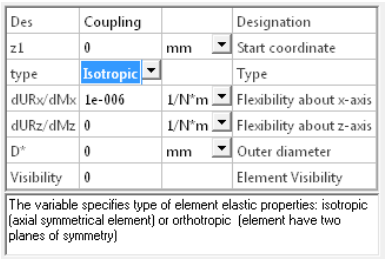


Рис. 8.27

8.13 Типовой элемент [Coupling]

Общий случай

Осесимметричный (изотропный) либо ортотропный элемент, позволяющий вводить угловые и крутильную податливости, сосредоточенные в точке **Рис. 8.28**. С его помощью можно моделировать локальные податливости, например, изгибную податливость фланцевого соединения.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Coupling		Designation
z1	0	mm	Start coordinate
type	Isotropic		Type
dURx/dMx	1e-006	1/N*m	Flexibility about x-axis
dURz/dMz	0	1/N*m	Flexibility about z-axis
D*	0	mm	Outer diameter
Visibility	0		Element Visibility

The variable specifies type of element elastic properties: isotropic (axial symmetrical element) or orthotropic (element have two planes of symmetry)

Рис. 8.28

ЗАМЕЧАНИЕ: Не следует использовать ортотропные моментные податливости на вращающемся роторе.

Рисунок дает представление о визуализации шарнира между двумя двухопорными роторами в 2D расчетной модели, **Рис. 8.29**.

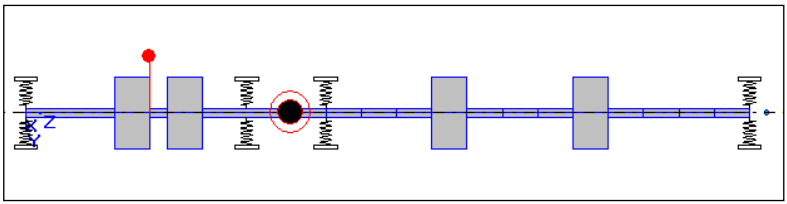


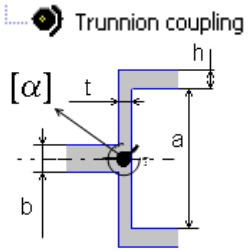
Рис. 8.29

Пластина

В случае, когда длина балки много меньше его диаметра, такой элемент является пластиной. Пластина обладает малой радиальной

податливостью, которой можно пренебречь, и высокой угловой податливостью.
Геометрия пластины описывается балочным элементом. Для моделирования моментной податливости пластины используется типовой элемент [**Trunnion coupling**], **Рис. 8.30.**

Символы меню	Окно параметров



Des	Trunnion coupling 1		Designation
z1	0	mm	Start coordinate
b	50	mm	Rod diameter
t	25	mm	Plate width
a	1080	mm	Inner cylinder diameter
h	25	mm	Cylinder thickness
material	Like subsystem		Material
D*	0	mm	Outer diameter
Visibility	0		Element Visibility

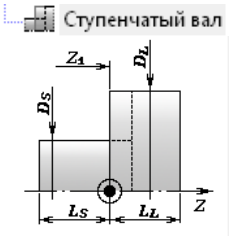
Рис. 8.30

Значение податливости пользователь может получить в [**Протоколе**].
При использовании элемента пользователь должен соблюдать условия ***a-b>>t и a>>b***.

Ступенчатый вал

Элемент представляет собой шарнир, моделирующий дополнительную крутильную податливость, которую необходимо учитывать при резком ступенчатом изменении диаметра вала. Данная необходимость возникает по причине эффекта проникновения (Shaft Stepping) при соотношении диаметров >1.5.,

Символы меню	Окно параметров



Des	Ступенчатый вал 1		Название
z1	0	mm	Координата слева
Ds	50	mm	Меньший диаметр участка вала
Ls	100	mm	Длина участка вала меньшего диаметра
DL	50	mm	Больший диаметр
LL	100	mm	Длина участка большего диаметра
material	Как у родительской системы		Выбор материала
D*	0	mm	Наружный диаметр
Visibility	0		Прозрачность элемента

Диаметр участка вала до резкого увеличения диаметра (ступеньки)

Рис. 8.31

9 ЛИНЕЙНЫЕСВЯЗИ МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ

К линейным связям между подсистемами относятся:

- Упруго-демпферная связь общего вида **[Link]**
- Абсолютно-жесткая связь общего вида **[Rigid link]**
- Упруго-демпферная связь, описываемая несимметричной матрицей жесткости и демпфирования **[Elastic nonsymmetric link]**
- Шестеренчатая связь общего вида **[Gear set]**
- Элемент **[Connection point]**

В библиотеке элементов эти элементы имеют вид, показанный на **Рис. 9.1.**

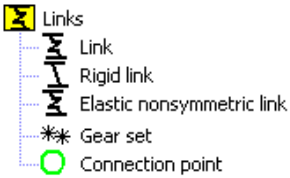


Рис. 9.1

В контекстном меню любой связи есть возможность копирования в буфер обмена свойств подключения и настроек визуализации активной связи**, Рис. 9.2**

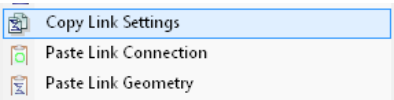


Рис. 9.2

После того как настройки скопированы командой [Копировать настройки связей] можно сделать активной другую связь (например, левой кнопкой мыши) и вставить из буфера обмена настройки подключения ([Вставить подключение связи]) или параметры визуализации связи [Вставить геометрию связи]. Данные команды

ускоряют работу пользователя со сложными моделями и позволяют значительно уменьшить риск появления ошибок типа «человеческий фактор» при замене связей одного типа на другой или установке параллельных связей.

Чтобы упростить и ускорить работу по подключению связей в сложных моделях следует пользоваться следующими командами контекстного меню. В меню точек связей команда [Использовать точку связи] позволяет скопировать в буфер обмена информацию об интересуемой точки для подключения. После чего в контекстном меню связей возможно подключение запомненной точки связи к первой (Side1) или второй (Side2) сторонам связи, Рис. 9.3.

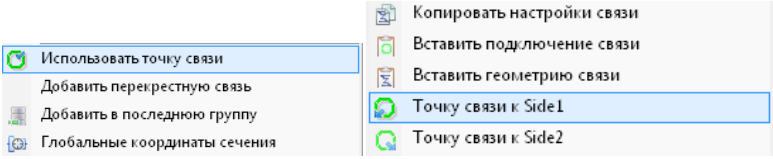
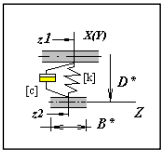
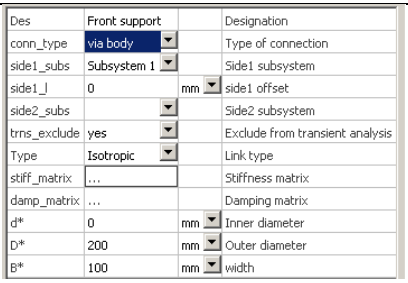


Рис. 9.3

9.1 Упруго-демпферная связь общего вида [Link]

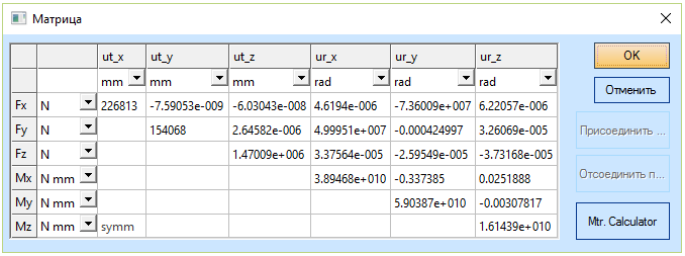
Элемент позволяет соединить две подсистемы линейной упруго-демпферной связью двух типов – изотропной или связью общего вида, задаваемой полной матрицей коэффициентов жесткости и демпфирования, **Рис. 9.4.**
Размерность матриц 6x6. Коэффициенты матрицы жесткости определяются при условии заделки сечения **side2** и нагружения **side1**.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Front support		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Side1 subsystem
side1_l	0	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
trns_exclude	yes		Exclude from transient analysis
Type	Isotropic		Link type
stiff_matrix	...		Stiffness matrix
damp_matrix	...		Damping matrix
d*	0	mm	Inner diameter
D*	200	mm	Outer diameter
B*	100	mm	width

Рис. 9.4

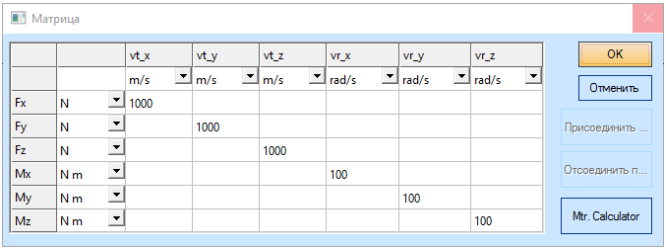
Упругие свойства определяются матрицей жесткости. Окно для ввода коэффициентов жесткости представлено на **Рис. 9.5.**
Начиная с версии DYNAMICS R4.11 исправлено обозначение строк и столбцов в матрице жесткости и демпфирования. Обозначения перемещений и скоростей располагаются по столбцам, нагрузок по строкам. Порядок задания элементов в матрице жесткости и демпфирования не изменился.
Порядок установки коэффициентов в матрице жесткости в соответствии с частным производными представлен в Таблице 9.1. Для матрицы демпфирования расстановка элементов аналогична.



		ut_x	ut_y	ut_z	ur_x	ur_y	ur_z
		mm	mm	mm	rad	rad	rad
Fx	N	226813	-7.59053e-009	-6.03043e-008	4.6194e-006	-7.36009e+007	6.22057e-006
Fy	N		154068	2.64582e-006	4.99951e+007	-0.000424997	3.26069e-005
Fz	N			1.47009e+006	3.37564e-005	-2.59549e-005	-3.73168e-005
Mx	N mm				3.89468e+010	-0.337385	0.0251888
My	N mm					5.90387e+010	-0.00307817
Mz	N mm	symm					1.61439e+010

Рис. 9.5

Окно для ввода коэффициентов демпфирования представлено на **Рис. 9.6.**



		vt_x	vt_y	vt_z	vr_x	vr_y	vr_z
		m/s	m/s	m/s	rad/s	rad/s	rad/s
Fx	N	1000					
Fy	N		1000				
Fz	N			1000			
Mx	N m				100		
My	N m					100	
Mz	N m						100

Рис. 9.6

Диалог с одновременным выводом матрицы жесткости и демпфирования доступен по двойному клику на название параметра (**[stiff_matrix]** или **[damp_matrix]**) или в контекстном меню элемента, **Рис. 9.7.**

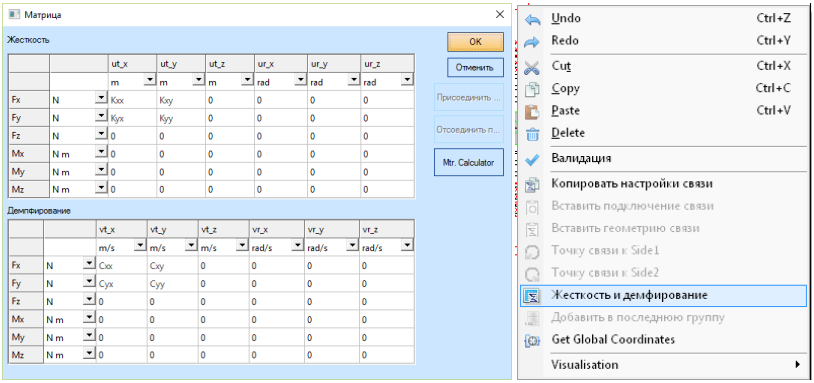


Рис. 9.7

Связь может быть выбрана изотропной или ортотропной. В первом случае коэффициенты жесткости и демпфирования по направлениям X и Y задаются одним коэффициентом. Во втором случае пользователю предлагается задать полный набор коэффициентов.

Таблица 9.1

	Ut_x[m]	Ut_y[m]	Ut_z[m]	Ur_x[rad]	Ur_y[rad]	Ur_z[rad]
Fx[N]	$K_{xx} = \frac{\partial F_x}{\partial x}$	$K_{xy} = \frac{\partial F_x}{\partial y}$	$\frac{\partial F_x}{\partial z}$	$\frac{\partial F_x}{\partial r_x}$	$\frac{\partial F_x}{\partial r_y}$	$\frac{\partial F_x}{\partial r_z}$
Fy[N]	$K_{yx} = \frac{\partial F_y}{\partial x}$	$K_{yy} = \frac{\partial F_y}{\partial y}$	$\frac{\partial F_y}{\partial z}$	$\frac{\partial F_y}{\partial r_x}$	$\frac{\partial F_y}{\partial r_y}$	$\frac{\partial F_y}{\partial r_z}$
Fz[N]	$\frac{\partial F_z}{\partial x}$	$\frac{\partial F_z}{\partial y}$	$\frac{\partial F_z}{\partial z}$	$\frac{\partial F_z}{\partial r_x}$	$\frac{\partial F_z}{\partial r_y}$	$\frac{\partial F_z}{\partial r_z}$
Mx [N-m]	$\frac{\partial M_x}{\partial x}$	$\frac{\partial M_x}{\partial y}$	$\frac{\partial M_x}{\partial z}$	$\frac{\partial M_x}{\partial r_x}$	$\frac{\partial M_x}{\partial r_y}$	$\frac{\partial M_x}{\partial r_z}$
My [N-m]	$\frac{\partial M_y}{\partial x}$	$\frac{\partial M_y}{\partial y}$	$\frac{\partial M_y}{\partial z}$	$\frac{\partial M_y}{\partial r_x}$	$\frac{\partial M_y}{\partial r_y}$	$\frac{\partial M_y}{\partial r_z}$
Mz [N-m]	$\frac{\partial M_z}{\partial x}$	$\frac{\partial M_z}{\partial y}$	$\frac{\partial M_z}{\partial z}$	$\frac{\partial M_z}{\partial r_x}$	$\frac{\partial M_z}{\partial r_y}$	$\frac{\partial M_z}{\partial r_z}$

Коэффициенты матриц жесткости и податливости могут быть заданы переменными значениями во всем временном диапазоне частот вращения. В этом случае используются алгоритмы **Собственные частоты** и **Карта собственных частот**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Подключенные переменные интерпретируются в единицах измерения Си. Независимо от выбора единиц измерения в диалоге.

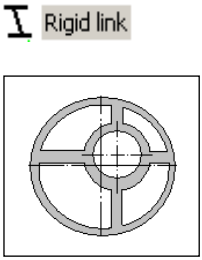
Для некоторых нестационарных задач (подсистемы связаны между собой только нелинейными связями) расчет базиса должен вестись с учетом связанности этих подсистем. В этом случае в точки присоединения нелинейных связей включается линейная связь. В процессе нестационарного анализа она удаляется. Удаление производится с помощью функции **[trns_exclude]** заданием значения **[yes]**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Следует помнить, что исключение связи приводит только к удалению в процессе нестационарного анализа жесткостной части связи. Демпфирование не исключается

9.2 Абсолютно-жесткая связь общего вида [Rigid link]

Связь позволяет соединить подсистемы между собой и установить свойства связи (граничные условия) по степеням свободы – либо абсолютно жесткая связь, либо свободна от закрепления, **Рис. 9.8.**

Символы меню	Окно параметров



Des	Rigid link 1		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Side1 subsystem
in_cos	global		Coordinate system for side1 section
side1_l	0	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
UTx	fixed		Translation in x-direction
UTy	fixed		Translation in y-direction
UTz	fixed		Translation in z-direction
URx	fixed		Rotation about x-axis
URy	fixed		Rotation about y-axis
URz	fixed		Rotation about z-axis
d*	0	mm	Inner diameter
D*	150	mm	Outer diameter
B*	20	mm	width

Рис. 9.8

Таблица 9.2 Параметры

UTx	Переменная определяет свойства связи в направлении X –перемещение полностью запрещено или не запрещено
URx	Переменная определяет свойства связи в направлении вращения вокруг оси X – перемещение полностью запрещено или не запрещено
UTy	Переменная определяет свойства связи в направлении X – перемещение полностью запрещено или не запрещено
URy	Переменная определяет свойства связи в направлении вращения вокруг оси Y – перемещение полностью запрещено или не запрещено
UTz	Переменная определяет свойства связи в направлении X – перемещение полностью запрещено или не запрещено
URz	Переменная определяет свойства связи в направлении вращения вокруг оси Z– перемещение полностью запрещено или не запрещено

9.3 Связь с несимметричной матрицей жесткости и демпфирования [Elastic nonsymmetric link]

Элемент позволяет соединить две подсистемы (включая нулевую) линейной упруго-демпферной связью, описываемой несимметричными матрицами жесткости и демпфирования, **Рис. 9.9**.

Элемент предназначен для использования в линейных расчетах систем с опорными узлами, коэффициенты жесткости которых меняются по некоторому закону по времени или по частоте вращения. Данная связь не учитывается при расчете базиса. Используется в сочетании с элементом, моделирующим основную упруго-демпферную связь общего вида **[Связь]**.

Этот тип связи может быть использован для различных типов нелинейных опорных узлов ротора, когда имеются данные по их жесткостным и демпфирующим коэффициентам в зависимости от частоты вращения, полученные либо от изготовителя опорных узлов, либо каким-то другим путем. В этом случае коэффициенты матриц жесткости и податливости задаются переменными значениями во всем временном диапазоне частот вращения.

Размерность матриц 6x6. Коэффициентами несимметричной матрицы жесткости являются добавки к коэффициентам жесткости основной связи, которая задается симметричной матрицей жесткости (в частном случае диагональной) и используется для расчета базиса системы.

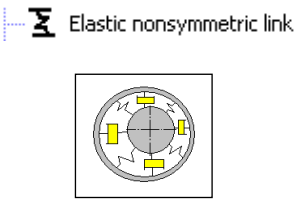
Символы меню	Окно параметров
	

Рис. 9.9

Окно ввода параметров связи аналогично окну ввода упруго-демпферной связи общего вида, **Рис. 9.10.** В отличие от упруго-демпферной связи общего вида, заполняются все строчки матрицы.

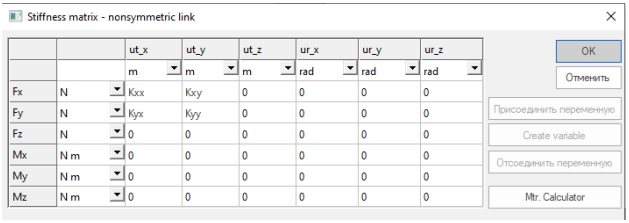


Рис. 9.10

Демпфирующие свойства связи определяются полной матрицей, **Рис. 9.11.**

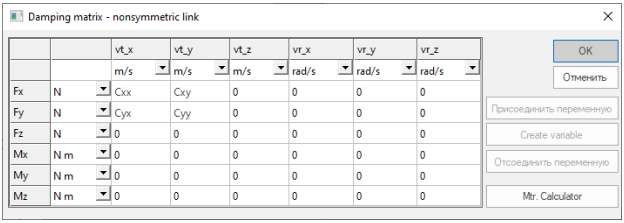


Рис. 9.11

Если к связи подключены переменные, то при двойном клике ЛКМ на связи или названии параметра stiff_matrix или damp_matrix показывается диалог Импорт табличных данных в опоры.

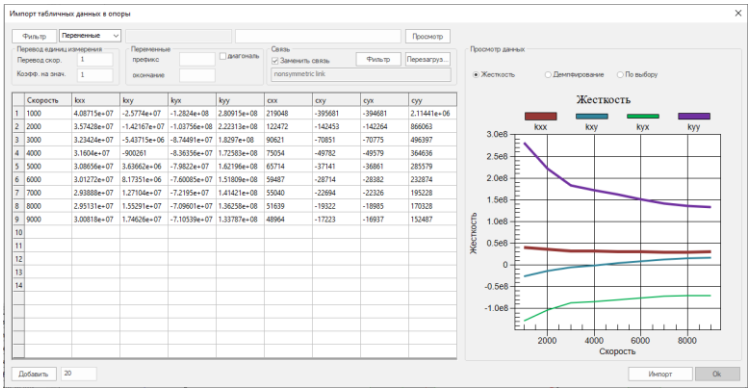


Рис. 9.12

ЗАМЕЧАНИЕ: Несимметричная матрица жесткости не участвует в расчете базиса. Для корректного учета такой связи в расчете, желательно наличие в спектре частот алгоритма «Базис» твердотельных форм колебаний. В случае двухопорного ротора в модель должны быть добавлены связи типа [Link] с несущественными коэффициентами жесткости (например, 1000 [Н/м]) в радиальном направлении.

Иногда возникает необходимость расчитать/проверить систему без модальной связи. Учесть жесткости опоры в базисе, в этом случае может использоваться команда контестного меню «Преобразовать в симметричную связь» с указанием режима, для которого будут взяты интерполированные значения коэффициентов жесткости и демпфирования. При этом старая связь будет удалена и заменена на элемент типа [Связь]. Если необходимо сохранить старую связь, то после конвертации следует скопировать новую связь в буфер обмена (Ctrl+C) и отменить конвертацию модальной связи (Ctrl+Z). Вставить связь из буфера обмена. (Ctrl+V).

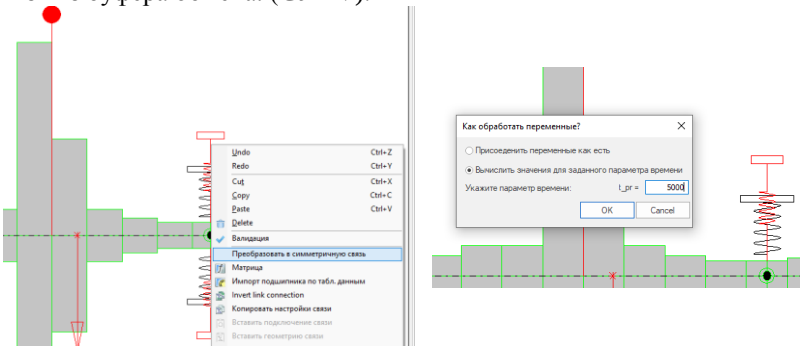


Рис. 9.13

Параметр [Type] определяет режим в котором работает связь – «модальная» или «нелинейная». Режим «модальная» соответствует привычному поведению элемента в системе. Связь в этом режиме учитывается как модальный добавок в системе модальных уравнений (в левой его части). В этом режиме в программе нет функциональности для определения реакции в системе для такой опоры. Для определения реакции необходимо перемножение матрицы жесткости и

демпфирования на столбцы перемещений и скоростей для соответствующей точки расчета. В этом режиме связь учитывается во всех алгоритмах кроме [Базиса].

$$[K]*\{u\}+[C]*\{v\}=\{R\}$$

В режиме «нелинейная» связь учитывается в правой части уравнения как реакции в системе. При этом она может работать только в алгоритме [Нелинейный анализ]. В этом режиме в реакции в связи могут быть получены аналогично всем остальным нелинейным связям.
На Рис. 9.14 показаны опции позволяющие оптимизировать расчет в «нелинейном» режиме. Опция «6x6» включает в расчет полную матрицу жесткости и демпфирования 6x6. Опция «2x2» включает расчет только 2x2 кусок матрицы жесткости и демпфирования. Предназначен для моделирования опор с двумя степенями свободы, например подшипники скольжения. В этом режиме учитываются только коэффициенты Kxx, Kxy, Kyx, Kyy, Cxx, Cxy, Cyx, Cyy. Опция «UtxUtyUtz» включает в расчет только три диагональных коэффициента каждой матрицы (Kxx, Kyy, Kzz, Cxx, Cyy, Czz).

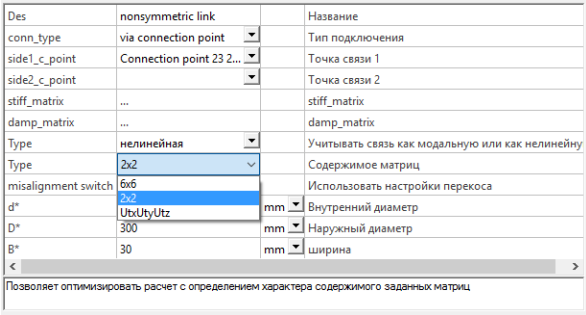


Рис. 9.14

Опция [misalignment switch] (Рис. 9.15) позволяет задать статическое преднагружение опоры за счет постоянного статического смещения корпуса подшипника относительно линии центров опор.
Функциональность может быть использована для подбора оптимального смещения корпусов опор в тяжелых роторах в соответствии с линией статического прогиба. Предназначено для использования в роторах с количеством опор больше двух.
Либо для использования моделирования пружинного преднагружения.

Des	nonsymmetric link		Название
conn_type	via connection point		Тип подключения
side1_c_point	Connection point 23 2...		Точка связи 1
side2_c_point			Точка связи 2
stiff_matrix	...		stiff_matrix
damp_matrix	...		damp_matrix
Type	нелинейная		Учитывать связь как модальную или как нелинейну
Type	2x2		Содержимое матриц
misalignment switch	да		Использовать настройки перекоса
ut_x	0	mm	Displacement in x direction
ut_y	0	mm	Displacement in y direction
ut_z	0	mm	Displacement in z direction
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	300	mm	Наружный диаметр
B*	30	mm	ширина

Использовать настройки задания перекоса в связи. Например, статическое смещение кольца подшипника на валу по отношению к корпусу.

Рис. 9.15

9.4 Шестеренчатая связь общего вида [Gear set]

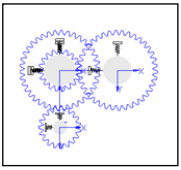
Связь двух подсистем, предназначенная для моделирования различных типов шестеренчатых передач. Жесткость связи определяется контактной жесткостью в зубчатом зацеплении (не учитывается локальная податливость зубьев, находящихся в зацеплении, и зубчатого венца).

Вид передачи – цилиндрическая, коническая или гипоидная - определяется положением подсистем в пространстве. Требуется согласование положения подсистем с общей точкой на делительных окружностях зубчатых колес.

Для того чтобы описать местоположение и геометрические параметры зубчатой передачи пользователь должен первоначально выбрать тип зацепления.

Тип зубчатой передачи определяется параметрами **[helical]** или **[bevel]**.

Для прямозубой или косозубой цилиндрической пары выбирается параметр **[helical]** со следующими данными, **Рис. 9.16:**

Символы меню	Окно параметров
Gear set 	

Des	Gear set		Designation
side1_c_point	Connection point 1		Side1 connection point
side2_c_point	Connection point 2		Side2 connection point
type_gearset	helical		Gearset type
gearing	outer		Gearing type
z1	38		Number of teeth
z2	19		Number of teeth
module	14	mm	Module
alpha_wn	20	deg	Operating pressure angle
beta_w1	0	deg	Working helix angle
Kc	1e+010	N/m^2	Контактная жесткость
b	100	mm	Контактная длина
C	0	s/m	Contact damping

Рис. 9.16

- точки присоединения зубчатых колес к валам. Соединение валов осуществляется через узловые точки **[Side1 c_point]** и **[Side2 c_point].**Пользователь заранее формирует эти точки с помощью элемента **[Connection point]** и затем выбирает эти точки из общего списка
- тип зацепления – наружное или внутреннее (только в случае **[helical]**)
- количество зубьев на ведущем **[z1]** и ведомом **[z2]** колесах
- модуль зубчатого зацепления**[module]**
- угол контакта**[alpha_wn]**
- угол наклона зубьев **[beta_w1]**
- контактная жесткость **[Kc]**. Обычно значение контактной жесткости находится в диапазоне**1…2e10** N/m^2
- длина контакта **[b]**

Для конической пары выбирается параметр **[bevel]** со следующими дополнительными данными,**Рис. 9.17**

Des	Gear set 5		Designation
side1_c_point	Connection point 1		Side1 connection point
side2_c_point	Connection point 1		Side2 connection point
type_gearset	bevel		Gearset type
z1	50		Number of teeth
z2	50		Number of teeth
module	5	mm	Module
alpha_wn	20	deg	Operating pressure angle
beta_w1	0	deg	Working helix angle
beta_w2	0	deg	Working helix angle
delta1	45	deg	Pitch angle
delta2	45	deg	Pitch angle
Kc	1e+010	N/m^2	Контактная жесткость
b	60	mm	Контактная длина
C	0	s/m	Contact damping

Рис. 9.17

- угол наклона зубьев первого колеса **[beta_w1]**
- угол наклона зубьев второго колеса **[beta_w1]**
- угол начального конуса первого колеса **[delta1]**
- угол начального конуса второго колеса **[delta2]**

ЗАМЕЧАНИЕ: Геометрические и инерционные параметры шестеренчатого соединения моделируются с помощью стержневых элементов – **[Beam]** или **[Generalized element]**

ЗАМЕЧАНИЕ: При неправильном задании геометрических данных шестеренчатой пары возможно нарушение правильности отображения зацепления. Это изображение может быть использовано пользователем для проверки введенных данных

ЗАМЕЧАНИЕ: Передаточное отношение не используется для определения частоты вращения ведомого вала или ведущего. Пользователь должен предварительно задать частоты вращения с учетом передаточного отношения, используя элемент **[Kinematic joint]**

Пример модели динамической системы с двумя ступенями шестеренчатой передачи показан на **Рис. 9.18.**

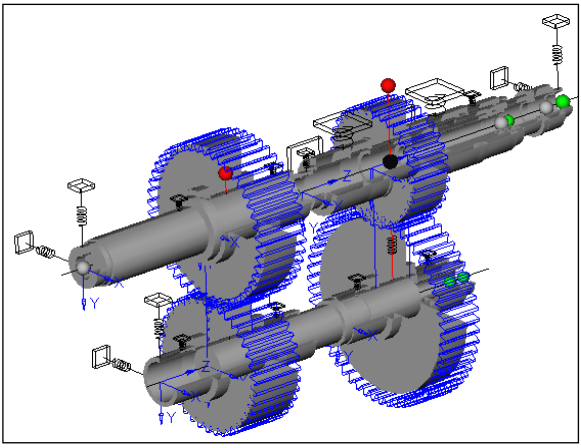
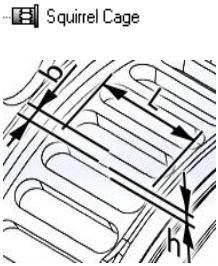


Рис. 9.18

9.5 Упругодемпферная связь [Беличье колесо]

Символы меню	Окно параметров



Des	Squirrel Cage 1		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Shaft 1.Squirrel cage example		Side1 subsystem
side1_l	0	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
trns_exclude	No		Exclude from transient analysis
type	single		Squirrel cage type
Lb	75	mm	Squirrel cage bar length
b	4.01	mm	Squirrel cage bar width
h	4.5	mm	Squirrel cage bar height
n	96		Number of bars
E	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity
Cs	0	N*s/m	Damping coefficient
	...		Squirrel Cage extended
add output	No		show additional output
Kr	1.72894e+008	N/m	Stiffness coefficient
d*	0	mm	Inner diameter
D*	100	mm	Outer diameter
B*	0	mm	width

Рис. 9.19

[Беличье колесо] – специальный элемент в DYNAMICS R4 для моделирования радиальной жесткости упругой опоры типа «Беличье колесо». Этот элемент позволят параметризовать его параметры в

задачах построения Карты критических частот и карты собственных частот, **Рис. 9.19** . Так же могут быть получены дополнительные параметры для проектирования.

Связь модет быть двух типов – [одинарная] связь и связь общего вида [двойная]. Упругие свойства связи задаются через коэффициенты жесткости и демпфирования в направлении X и Y.

Для расчетов коэффициентов жесткости используется аналитическая формула, которая используется в программе DamperR3.1. На **Рис. 9.20** приведена часть «3.3.2 Анализ упругих элементов» из документа «Демпферные опоры» с описанием формулы.

An FE stiffness can be calculated by

$$K = \frac{nEbh(b^2 + kh^2)}{2l^3},$$

where

n - number of bars;

b, h, l - width, thickness and length of a bar accordingly;

E - Young module of the bar material at operating temperature.

$k = \frac{1}{\left(1 + \frac{2\sqrt{bh}}{l}\right)^3}$ - correction coefficient, depending on the flexible web dimensions

Maximal stress in the bar

$$\sigma_d = \frac{3E\delta}{l^2}\left(k^{\frac{2}{3}} h\cos\varphi + b\sin\varphi\right),$$

where

$$\varphi = \arctan\frac{b}{hk^{\frac{2}{3}}} + n\pi;\ n = 0 \text{ or } 1$$

δ - radial clearance

Static displacement under the support weight G loading

$$\delta_0 = G/K \quad .$$

Static stress in a bar under the weight loading

$$\sigma_{\delta_0} = \sigma_d \frac{\delta_0}{\delta} \quad .$$

Рис. 9.20

В случае использования типа [двойная] в связи [Беличье колесо] полная жесткость рассчитывается следующим образом Kr=Ksc1*Ksc2/(Ksc1+Ksc2), где Ksc1 и Ksc2 жесткости рассчитанные для каждой из двух частей «беличьего колеса».

Для того чтобы изменить параметры каждой части двойного беличьего колеса необходимо воспользоваться переключателем [part#], **Рис. 9.21**.

type	double		Squirrel cage type
part #	first		Squirrel cage part properties
Lb	75	mm	Squirrel cage bar length
b	4.01	mm	Squirrel cage bar width
h	4.5	mm	Squirrel cage bar height
n	96		Number of bars
E	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity

type	double		Squirrel cage type
part #	second		Squirrel cage part properties
Lb2	75	mm	Squirrel cage bar length
b2	4.2	mm	Squirrel cage bar width
h2	4.5	mm	Squirrel cage bar height
n2	96		Number of bars
E2	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity

Рис. 9.21

Переключатель Да/Нет параметра [add output] позволяет показать дополнительно рассчитанные параметры для «беличего колеса», **Рис. 9.22**.

type	single		Squirrel cage type
Lb	75	mm	Squirrel cage bar length
b	4.01	mm	Squirrel cage bar width
h	4.5	mm	Squirrel cage bar height
n	96		Number of bars
E	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity
Cs	0	N*s/m	Damping coefficient
	...		Squirrel Cage extended
add output	yes		show additional output
delta	0.1	mm	Radial clearance. For statical stress calculation
F	100	N	load in radial direction
ut	0.0144156	mm	Deflection in radial direction under load
max stress	62.0544	MPa	Maximal alterating stress. e=1
stress	4.56888	MPa	Stress due to load.
Fmax	693.691	N	Max load in radial direction. delta=ut
Kr	6.93691e+006	N/m	Stiffness coefficient

Рис. 9.22

Дополнительные функции для проектирования «беличьего колеса» доступны через расширенный диалог [Squirrel cage extended]. Этот диалог может быть запущен двойным кликом на соответствующем свойстве (см. **Рис. 9.23**) или через команду [Extended properties] в контекстном меню.

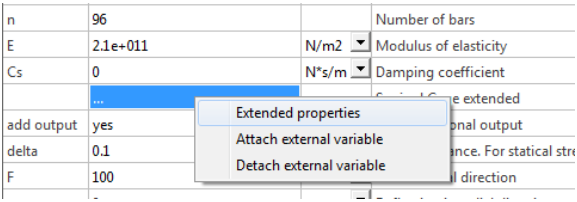


Рис. 9.23

Диалог представленный на **Рис. 9.24** позволяет проверить влияние входных параметров на выходные характеристики такие как: жесткость, напряжения, максимальные нагрузки, деформации. Изменение одного входного параметра определяется процентным соотношением взятым от начального значения. Вертикальные и горизонтальные красные линии показывают положение начального значения и соответствующего ему выходного параметра.

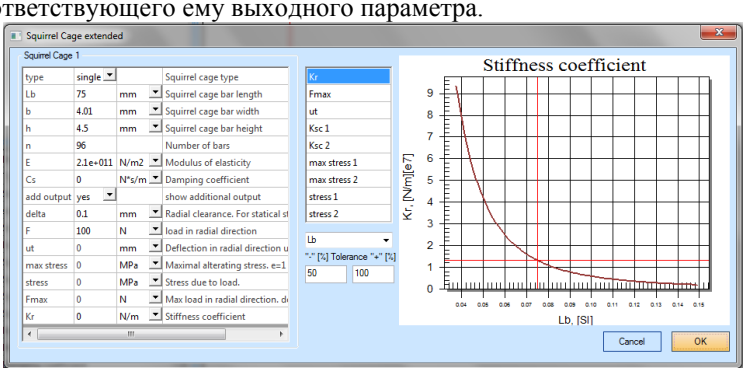


Рис. 9.24

ЗАМЕЧАНИЕ: Параметр **[trns_exclude]** исключает только жесткость из нелинейного анализа, демпфирование не исключается

9.6 Элемент [Connection point]

Элемент устанавливает для подсистемы точку, к которой будет присоединяться граничное сечение любой связи из меню программы, **Рис. 9.25.**

.

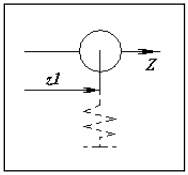
Символы меню	Окно параметров
Connection point 	Des | Connection point 3 | | Designation z | 400 | mm | z coordinate D* | 0 | mm | Outer diameter

Рис. 9.25

Ее положение определяется координатой **Z** в локальной системе координат конкретной подсистемы.

10 СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Для анализа поведения динамической системы под действием различных видов нагружения имеются следующие элементы:

- Дисбалансная нагрузка **[Unbalance load]**
- Осевая статическая сила **[Axial force]**
- Внезапное изменение дисбаланса **[Blade loss]**
- Динамическая нагрузка общего вида **[Dynamic load]**

В библиотеке элементов эти элементы имеют вид, **Рис. 10.1**

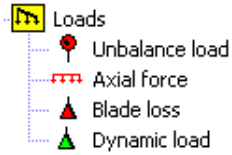
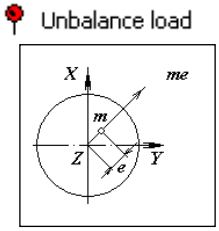
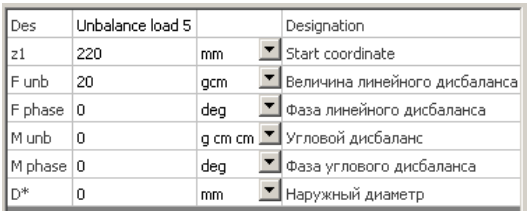


Рис. 10.1

ЗАМЕЧАНИЕ: Все нагрузки могут быть приложены в любой точке модели, за исключением точек внутри твердых тел – дисков, абстрактных элементов. Они могут быть размещены только на границах этих элементов

10.1 Дисбалансная нагрузка[Unbalance load]

Элемент предназначен для задания дисбалансов во вращающихся частях роторов, **Рис. 10.2**

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Unbalance load 5		Designation
z1	220	mm	Start coordinate
F unb	20	gcm	Величина линейного дисбаланса
F phase	0	deg	Фаза линейного дисбаланса
M unb	0	g cm cm	Угловой дисбаланс
M phase	0	deg	Фаза углового дисбаланса
D*	0	mm	Наружный диаметр

Рис. 10.2

Таблица 10.1 Описание параметров

Параметры	**Обозначение**	***Описание параметра***
Start coordinate	**z1**	Координата [z1] в направлении оси Z, определяющая положение дисбаланса в локальной системе координат XYZ
Linear unbalance	**unb F**	Величина линейного дисбаланса (масса* эксцентриситет)
Unbalance phase	**phase F**	Фаза линейного дисбаланса, задает угловое смещение дисбалансов между собой
Angle unbalance	**unb M**	Угловой дисбаланс (массовый момент инерции*угол перекоса)
Angle unbalance phase	**phase M**	Фаза углового дисбаланса, задает смещение угловых дисбалансов между собой.

На **Рис. 10.3** показаны направления отсчета фазовых углов.

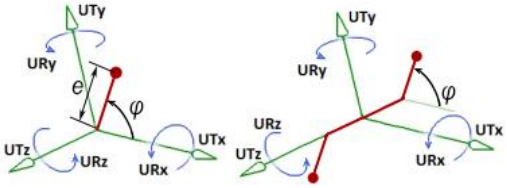


Рис. 10.3

10.2 Осевая статическая сила [Axial force]

Элемент предназначен для формирования на участке ротора или корпуса осевой статической нагрузки, (**Рис. 10.4**
), действующей по оси Z. Такая нагрузка приводит к изменению изгибной жесткости балочных и оболочечных элементов подсистемы, а также отдельных элементов, жесткость которых зависит от осевых усилий (например, жесткость фланцевых соединений)**.**

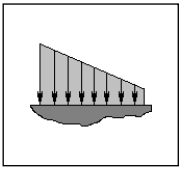
Символы меню	Окно параметров
Load 	Точечная нагрузка Des | Axial force 26 | | Designation type | point | | Load type z1 | 802.05 | mm | Start coordinate Fz1 | 1800 | N | force in Z direction at start coordinate Постоянная нагрузка, действующая вдоль оси Z Des | Axial force 26 | | Designation type | line(const) | | Load type z1 | 802.05 | mm | Start coordinate z2 | 1000 | mm | End coordinate Fz1 | 1800 | N | force in Z direction at start coordinate Переменная нагрузка, действующая вдоль оси Z Des | Axial force 26 | | Designation type | line(line) | | Load type z1 | 500 | mm | Start coordinate z2 | 800 | mm | End coordinate Fz1 | 2000 | N | force in Z direction at start coordinate Fz2 | 2000 | N | force in Z direction at end coordinate

Рис. 10.4

Таблица 10.2 Описание параметров

Обозначение	Описание параметра
z1	Координата, устанавливающая начало действия осевой силы
z2	Координата, устанавливающая конец действия осевой силы
type: **point** **line (const)** **line (line)**	Параметр определяет варианты осевой нагрузки: - сила в точке (действует только в данной точке) - сила, действующая на участке (эпюра силы на участке действия силы постоянна). Режим соответствует действию осевой силы , например, при наличии стяжного болта. - сила, действующая на участке (линейный закон изменения эпюры силы на участке)
Fz	Осевая сила в направлении оси Z. Растяжение или сжатие определяется знаком. «+» - растяжение.

Существенное изменение собственных частот достигается в случае если сила соизмерима с силой Эйлера для данного стержня.
При выводе расширенных свойств параметра [Fcr (Euler)], показывается диалог расчета критической силы Эйлер потери устойчивости стержня при сжатии.

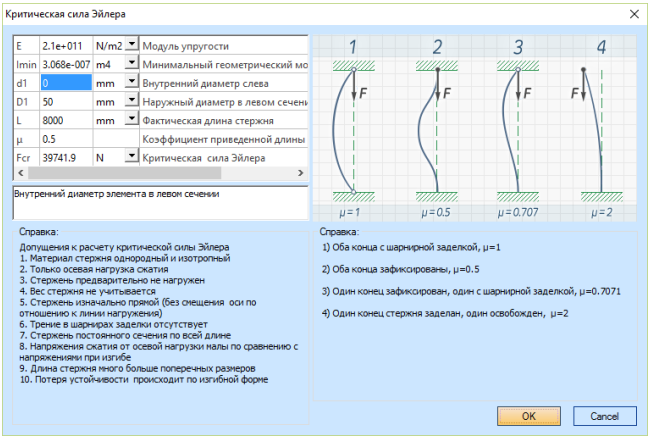
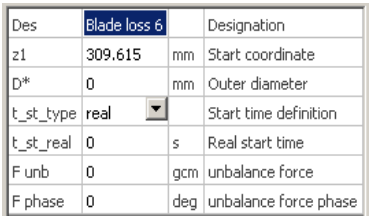


Рис. 10.5

10.3 Внезапное изменение дисбаланса [Blade loss]

Элемент предназначен для моделирования внезапного изменения дисбаланса (например, вследствие обрыва лопатки на рабочем колесе компрессора или турбины), **Рис. 10.6.**

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Blade loss 6		Designation
z1	309.615	mm	Start coordinate
D*	0	mm	Outer diameter
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	0	s	Real start time
F unb	0	gcm	unbalance force
F phase	0	deg	unbalance force phase

Рис. 10.6

Таблица 10.3

Обозначение	*Описание параметра*
z1	Координата, определяющая место внезапного изменения дисбаланса (например, обрыва лопатки)
F unb	Линейный дисбаланс, появляющийся после обрыва лопатки
F phase	Фаза линейного дисбаланса

Прочие параметры элемента приведены в их общем описании.

10.4 Динамическая нагрузка общего вида [Dynamic Load]

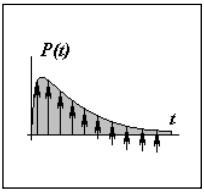
Типовой элемент предназначен для моделирования различных типов внешних динамических нагрузок на роторную систему, **Рис. 10.7**. Возможны следующие виды нагрузок:

- нагрузка произвольного вида **[general]**
- ступенчатая нагрузка**[step]**
- импульсная нагрузка**[impulse]**
- гармоническая нагрузка**[harmonic]**

Нагрузки могут быть заданы по любой степени свободы. Моделирование полигармонического нагружения проводится несколькими типовыми элементами.

Символы меню	Окно параметров

Dynamic load



- general

Des	External load 6		Designation
l1	0	mm	Start coordinate
D*	5	mm	diameter
Type	general		External load type
Fx	10	N	force in X direction
Fy	0	N	force in Y direction
Fz	0	N	force in Z direction
Mx	0	N m	moment in X direction
My	0	N m	moment in Y direction
Mz	0	N m	moment in Z direction

- step

Des	External load 6		Designation
l1	0	mm	Start coordinate
D*	5	mm	diameter
Type	step		External load type
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	3	s	Real start time
Fx	10	N	force in X direction
Fy	0	N	force in Y direction
Fz	0	N	force in Z direction
Mx	0	N m	moment in X direction
My	0	N m	moment in Y direction
Mz	0	N m	moment in Z direction

- impulse

Des	External load 6		Designation
l1	0	mm	Start coordinate
D*	5	mm	diameter
Type	impulse		External load type
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	3	s	Real start time
t_imp	0		impulse duration
Fx	10	N	force in X direction
Fy	0	N	force in Y direction
Fz	0	N	force in Z direction
Mx	0	N m	moment in X direction
My	0	N m	moment in Y direction
Mz	0	N m	moment in Z direction

- harmonic

Des	External load 6		Designation
l1	0	mm	Start coordinate
D*	5	mm	diameter
Type	harmonic		External load type
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	3	s	Real start time
Freq	3000	1/min	Frequency
init_phase	0	grad	initial phase
Fx	10	N	force in X direction
Fy	0	N	force in Y direction
Fz	0	N	force in Z direction
Mx	0	N m	moment in X direction
My	0	N m	moment in Y direction
Mz	0	N m	moment in Z direction

- unbalance

Des	Dynamic load 1		Designation
z1	0	mm	Start coordinate
D°	0	mm	Outer diameter
Type	unbalance		External load type
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	0	s	Real start time
rot_fctr	0.9		Rotation factor
F unb	100	gcm	unbalance force
F phase	0	deg	unbalance force phase
M unb	0	g cm cm	unbalance moment
M phase	0	deg	unbalance moment phas
Visibility	0		Element Visibility

Рис. 10.7

Среди прочих параметров задаются:
t_imp - продолжительность действия импульса
Freq - частота гармонической силы
Initialphase- начальная фаза гармонической составляющей

Для вариантов нагрузки General, Impulse, Step нагрузка выводится в окне 2D графика в виде стрелки с направлением соответствующим составляющим силы и подписью со значением.

Этот элемент учитывается только в алгоритме [Нелинейный анализ].

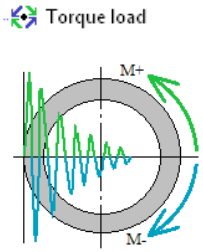
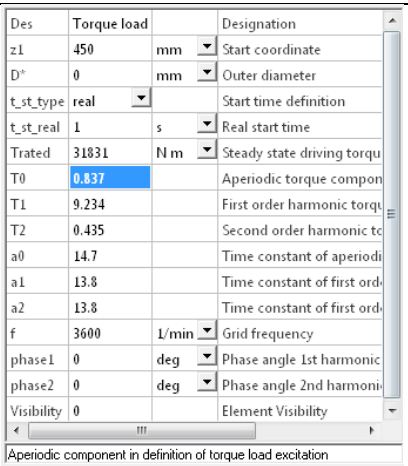
10.5 Динамический крутящий момент [Torque Load]

Элемент [Крутящий момент] представляет собой внешнюю динамическую нагрузку, прикладываемую к сечению подсистемы. Предназначен для моделирования динамических изменений крутящего момента. Гармонические возмущения могут возникать, например, в электрических машинах при 2-х и 3-х фазном коротком замыкании. Крутящий момент задан в виде гармонического ряда. Соответственно, подставляя значения амплитуд, постоянных времени и фаз, можно моделировать различное поведение крутящего момента.
Для математического описания крутящего момента используется гармонический ряд

$$T = \begin{cases} T_{rated}[T_o e^{-a_0 t} + T_1 e^{-a_1 t}\sin(\omega t + \varphi_1) + T_2 e^{-a_2 t}\sin(2\omega t + \varphi_2)], & t > t1 \\ T_{rated}, & t \le t1 \end{cases}.$$

где T_{rated}, T_o, T_1, T_2, - крутящий момент двигателя и амплитудные значения компонентов вариации крутящего момента, a_0, a_1, a_2 –

временные коэффициенты характеризующие процесс затухания, φ_1, φ_2 - фазовые углы, ω - частота сети.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Torque load		Designation
z1	450	mm	Start coordinate
D*	0	mm	Outer diameter
t_st_type	real		Start time definition
t_st_real	1	s	Real start time
Trated	31831	N m	Steady state driving torqu
T0	0.837		Aperiodic torque compon
T1	9.234		First order harmonic torqu
T2	0.435		Second order harmonic tc
a0	14.7		Time constant of aperiodi
a1	13.8		Time constant of first ord
a2	13.8		Time constant of first ord
f	3600	1/min	Grid frequency
phase1	0	deg	Phase angle 1st harmonic
phase2	0	deg	Phase angle 2nd harmoni
Visibility	0		Element Visibility

Aperiodic component in definition of torque load excitation

Крутящий момент Trated действует в пределах всего времени интегрирования.
Этот элемент учитывается только в алгоритме [Нелинейный анализ].

11 НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЯЗИ

К элементам, с помощью которых можно вести моделирование нелинейных роторных систем, относятся следующие:

- Программируемая пользовательская связь **[User link]**;
- Шаблон программируемого пользовательского элемента **[User link],** заданный именем **[Template Script]**;
- Нелинейная опора**[Non-linear support]** ;
- Цилиндрический подшипник скольжения**[Plain Journal Bearing support]**;
- Радиально-упорный подшипник **[Ball Bearing support]**;
- Роликовый подшипник **[Roll Bearing support]**;
- Гидравлический демпфер **[Damper support]**;
- Зазор **[Clearance]**.

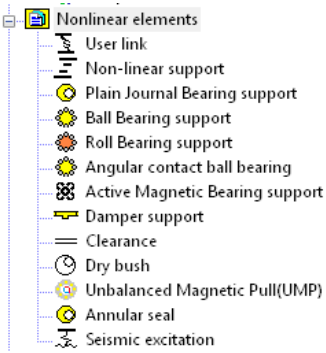


Рис. 11.1

В базе данных эти элементы имеют вид, **Рис. 11.1**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Нелинейные связи могут быть использованы только в нестационарном анализе

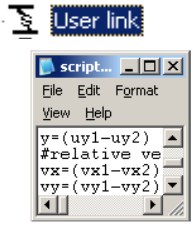
ЗАМЕЧАНИЕ: Расстояние и взаимные повороты между сечениями, к которым подключена связь, должны быть нулевыми. Т.е. оба сечения связи должны быть в одинаковых системах координат

11.1 Программируемая пользовательская связь (User link)

Позволяет пользователю на базе имеющейся у него математической модели или алгоритма разработать собственный нелинейный элемент связи между подсистемами. Его можно включить в общую схему расчетов роторной системы любой сложности с уже имеющимися наборами нелинейных элементов, **Рис. 11.2**.

Например, таким элементом могут быть подшипник скольжения другого типа, магнитная опора, газодинамический подшипник и т.д.

Сложность модели нелинейного элемента практически не ограничена. Создание элемента для использования в программной системе ведется при помощи встроенного скриптового языка **Python (версии 3.x)** (www.python.org), который достаточно быстро может быть освоен пользователем.

Символы меню	**Окно параметров**
	

Des	Скрипт-связь 3		Designation
скрипт	...		Скрипт, описывающий математическую модель элемента
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	GP rotor		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	0	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	0	mm	ширина

Рис. 11.2

Пример окна с записью программы на языке показан на **Рис. 11.3.**

Скрипт, описывающий математическую модель элемента

```
1  from dynlib import *
2  from math   import *
3  from dynlib import trace
4  #-----------------------------------------------------
5  # input settings for plain journal bearing are the same as for tutorial exa
6  # ex12 Rotor with journal bearings.rdm
7  # replace Plain journal bearings in this example by this script for functic
8  #-----------------------------------------------------#
9  #L-bearing length
10 #R-bearing radius
11 #delta-radial clearance
12 #mu-Lubricant absolute viscosity
13 #p0-input pressure
14 L=10e-3          #bearing length
15 R=25e-3         #bearing radius
16 delta=0.1e-3  #radial clearance
17 mu=0.0172     #Lubricant absolute viscosity
18 p0=0             #input pressure
19 #-----------------------------------------------------#
20 #
21 #L-bearing length
22 #R-bearing radius
23 #delta-radial clearance
24 #mu-Lubricant absolute viscosity
25 #p0-input pressure
26
27 def calcJB(exchangeContainer,L,R,delta,mu,p0):
28         omega1=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_speed1')
29         omega2=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_speed2')
30         # sections linear offset
31         #-----------------------------------------------------#
32         t=exchangeContainer.getDoubleValue('integration_time')
33         #-----------------------------------------------------#
34         ux1=exchangeContainer.getDoubleValue('ux1')
35         uy1=exchangeContainer.getDoubleValue('uy1')
36
37         ux2=exchangeContainer.getDoubleValue('ux2')
38         uy2=exchangeContainer.getDoubleValue('uy2')
39         #-----------------------------------------------------#
40         vx1=exchangeContainer.getDoubleValue('vx1')
41         vy1=exchangeContainer.getDoubleValue('vy1')
```

Ln 98/ 98 Col 1 Cancel OK

Рис. 11.3

ЗАМЕЧАНИЕ: Новый алгоритм, записанный на языке и отлаженный пользователем, может быть запрограммирован разработчиками программы для включения его в основную библиотеку элементов. Это позволит увеличить его быстродействие по сравнению со скриптовым элементом на несколько порядков

ЗАМЕЧАНИЕ: Алгоритмы, реализованные на языках **FORTRAN, Visual C++** и т.д., также могут быть адаптированы в программную систему. В этом случае контактируйте с разработчиком программной системы **DYNAMICS R4**

Таблица 11.1 Входные данные элемента

Граничное сечение связи 1	Граничное сечение связи 2
Линейные перемещения ux1;uy1; uz1 **Линейные скорости** vx1; vy1; vz1 **Угловые перемещения** tx1; ty1; tz1 **Угловые скорости** vtx1, vty1, vtz1	**Линейные перемещения** ux2; uy2; uz2 **Линейные скорости** vx2; vy2; vz2 **Угловые перемещения** tx2; ty2; tz2 **Угловые скорости** vtx2, vty2, vtz2

На входе также присутствуют частоты вращения соединяемых связью подсистем **omega1** и **omega2.**

Таблица 11.2 Выходные данные элемента

Граничное сечение связи 1	Граничное сечение связи 2
Линейные силы fx1; fy1; fz1 **Моменты вокруг осей** mx1; my1; mz1	**Линейные силы** fx2; fy2; fz2 **Моменты вокруг осей** mx1; my1; mz1

11.2 Шаблоны программируемого пользовательского элемента [User link]

Пользователь может использовать готовый шаблон для написания скриптового элемента. Для этого двойным кликом на строчке библиотеки элементов **[Template script]** он вставляет шаблон в соответствующее место создаваемой модели. Текст шаблона**[Template script]**показан ниже, **Таблица11.3.**

Таблица11.3

```
From dynlib import *
from math   import *
from dynlib import trace

#getting current rotating speed of  a side 1 subsystem
omega1=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_speed1')
#getting current rotating speed of  a side 2 subsystem
omega2=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_speed2')

#---------------------------------------------
#getting current integration time of transient analysis
t=exchangeContainer.getDoubleValue('integration_time')

ux1=exchangeContainer.getDoubleValue('ux1')
uy1=exchangeContainer.getDoubleValue('uy1')
uz1=exchangeContainer.getDoubleValue('uz1')

ux2=exchangeContainer.getDoubleValue('ux2')
uy2=exchangeContainer.getDoubleValue('uy2')
uz2=exchangeContainer.getDoubleValue('uz2')

vx1=exchangeContainer.getDoubleValue('vx1')
vy1=exchangeContainer.getDoubleValue('vy1')
vz1=exchangeContainer.getDoubleValue('vz1')
vx2=exchangeContainer.getDoubleValue('vx2')
vy2=exchangeContainer.getDoubleValue('vy2')
vz2=exchangeContainer.getDoubleValue('vz2')

Tx1=exchangeContainer.getDoubleValue('tx1')
Ty1=exchangeContainer.getDoubleValue('ty1')
Tz1=exchangeContainer.getDoubleValue('tz1')
Tx2=exchangeContainer.getDoubleValue('tx2')
Ty2=exchangeContainer.getDoubleValue('ty2')
Tz2=exchangeContainer.getDoubleValue('tz2')

Tx_dot1=exchangeContainer.getDoubleValue('vtx1')
Ty_dot1=exchangeContainer.getDoubleValue('vty1')
Tz_dot1=exchangeContainer.getDoubleValue('vtz1')
Tx_dot2=exchangeContainer.getDoubleValue('vtx2')
Ty_dot2=exchangeContainer.getDoubleValue('vty2')
Tz_dot2=exchangeContainer.getDoubleValue('vtz2')

fx1=fx2=fy1=fy2=fz1=fz2=mx1=mx2=my1=my2=mz1=mz2=0
#-----------------------------------------------
#----------Place  your code here-----
```

```
#-----------------------------------------------------

#-------------------------------------------------------#
exchangeContainer.setDoubleValue('fx1',fx1)
exchangeContainer.setDoubleValue('fy1',fy1)
exchangeContainer.setDoubleValue('fz1',fz1)
exchangeContainer.setDoubleValue('fx2',fx2)
exchangeContainer.setDoubleValue('fy2',fy2)
exchangeContainer.setDoubleValue('fz2',fz2)
exchangeContainer.setDoubleValue('mx1',mx1)
exchangeContainer.setDoubleValue('my1',my1)
exchangeContainer.setDoubleValue('mz1',mz1)
exchangeContainer.setDoubleValue('mx2',mx2)
exchangeContainer.setDoubleValue('my2',my2)
exchangeContainer.setDoubleValue('mz2',mz2)
```

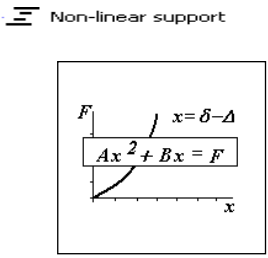
В ряде случаев пользователю могут понадобиться дополнительные библиотеки, которые не входят в комплект поставки программной системы, например, **NumPy** или **LinearAlgebra.** Эти библиотеки разрабатываются сторонними организациями для использования в программировании на языке Python (версии 3.x). Пользователь загружает необходимые ему библиотеки и устанавливает их согласно инструкциям разработчиков.

ЗАМЕЧАНИЕ: Пользователь может перевести скриптовый элемент в библиотеку типовых элементов и алгоритмов программной системы. Для этого в папке программы **\DynamicsR4\Script\Python\ UserElement** необходимо создать новую директорию, в которую требуется скопировать файлы из соседних папок, отвечающих за скриптовые элементы, с целью их последующего изменения.
Редактирование можно вести текстовым редактором, например, **Notepad или Notepad ++**

11.3 Нелинейная опора (Non-linear support)

Элемент предназначен для моделирования связи между подсистемами с нелинейной радиальной жесткостью и демпфирования, **Рис. 11.4**.

Символы меню	Окно параметров



Des	Non-linear support 5		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Side1 subsystem
side1_l	30	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
A	2.33e+012		Polynomial coefficient A
B	6.09e+007		Polynomial coefficient B
delta	0	mm	Radial clearance
Cb	1800	N*s*m	Damping coefficient
d*	0	mm	Inner diameter
D*	100	mm	Outer diameter
B*	50	mm	width

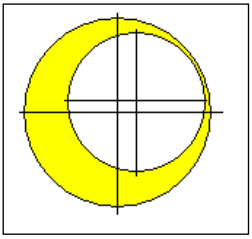
Рис. 11.4

Связь может иметь зазор. Нелинейная жесткость опоры, после того как выбран зазор, задается зависимостью между деформацией и силой, которая описывается полиномом второй степени ***Ax2+Bx=F(x).*** Такая связь может моделировать, например, подшипниковую опору, для которой получена такая зависимость. Этот же элемент может использоваться и для моделирования других типов опорных узлов или связей между ротором и корпусом, ротором и ротором, для которых имеются данные по радиальной жесткости.

11.4 Цилиндрический подшипник скольжения [Plain journal bearing]

Моделируются два основных типа цилиндрического подшипника, **Рис. 11.5.** Первый тип – короткий (без уплотнительных колец). Второй тип - длинный (с уплотнительными кольцами). Граничные условия для жидкостной пленки – **[π-пленка]** (половинный охват) и **[2π-пленка]** (полный охват).

Элемент может быть использован только в нестационарном анализе для любых режимов работы роторной системы, как стационарных, так и нестационарных. Учитывается давление подачи масла.

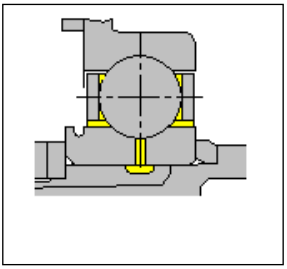
Символы меню	Окно параметров
Plain Journal Bearing support 	

Des	Plain Journal Bearing support 1		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	output shaft z33		Side1 subsystem
side1_l	87.7	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
Type	short		Design type
R	50	mm	Bearing radius
film	2pi-film		Cavitation film model
Lr	109.5	mm	Bearing length
delta	0.12	mm	Radial clearance
mue	0.0072	Ns/m2	Lubricant absolute viscosity
P0	0	N/m2	Supply pressure to the bearing
d*	0	mm	Inner diameter
D*	0	mm	Outer diameter
B*	50	mm	width

Рис. 11.5

11.5 Шарикоподшипник [Ball bearing support]

Элемент представляется связью между двумя стержневыми подсистемами и моделирует радиально-упорный подшипник качения, устанавливаемый между ротором и статором/ротором, **Рис. 11.6**.

Символы меню	Окно параметров
Ball bearing 	

Des	Ball Bearing support 3		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	1	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs	Subsystem 2		Подсистема для сечения 2 связи
side2_l	1	mm	положение граничного сечения 2 связи
Dr	11.9062	mm	Rolling elements diameter
z	11		Число тел качения
Di	40	mm	Inner race diameter
deltai	0	mm	Радиальный зазор по внутреннему кольцу
deltao	0	mm	Радиальный зазор по внешнему кольцу
Kp_input	ввод		Тип ввода контактной жесткости
KH	1.334e+010	N/m	Контактная жесткость
Cb	2940	N*s/m	Коэффициент демпфирования
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	0	mm	ширина

Рис. 11.6

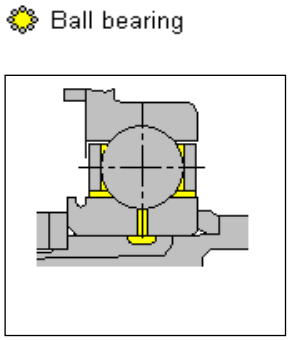
Учитывается зазор подшипника, количество тел качения, находящихся в зоне нагружения и передающих радиальную нагрузку, контактная жесткость тел качения и поверхностей качения в зоне нагружения. В расчете можно задать также демпфирование в подшипнике.

Контактная жесткость в зависимости от параметра **Kp_input** может быть задана, либо рассчитана автоматически.

11.6 Радиально-упорный шарикоподшипник [Angular contact ball bearing]

Элемент представляется связью между двумя стержневыми подсистемами и моделирует шариковый подшипник.

Символы меню



Окно параметров

Des	Ball Bearing SDOF support		Название
conn_type	via body		Тип подключения
side1_subs	Вал		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	0	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs	Корпус		Подсистема для сечения 2 связи
side2_l	0	mm	положение граничного сечения 2 связи
Dr	22.225	mm	Диаметр тел качения
z	18		Число тел качения
Dm	165	mm	Диаметр центров тел качения подшипника
Kp_input	ввод		Тип ввода контактной жесткости
Kpi	0	N/m	Контактная жесткость по внутренней дорожке
Kpe	0	N/m	Контактная жесткость по внешней дорожке
zp	-0.14	mm	Осевое расстояние от центра тела качения подшипника
zq	0	mm	Осевое расстояние от центра тела качения подшипника
Rp	82.803	mm	Радиальное расстояние от осевой линии подшипника д
Rq	82.195	mm	Радиальное расстояние от осевой линии подшипника д
Ri	11.45	mm	Радиус кривизны внутренней дорожки
Ro	11.45	mm	Радиус кривизны внешней дорожки
oi	26	deg	Номинальный угол контакта в шарикоподшипнике по е
φ0	90	deg	Угловое положение 1-го тела качения
input_type	coordinates		Варианты задания исходных данных
inertia	да		Расчет с инерцией
Mr	47.69	g	Масса шарика
conditions	both		Учет температурного состояния подшипника, монтажн
	...		Учет температурного состояния подшипника, монтажн
расш. вывод	эксперт		Расчет и вывод промежуточных параметров
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	15	mm	ширина

Рис. 11.7

Учитывается угол контакта, зазор по внутренней и наружной обоймам, радиусы кривизны наружной и внутренней обойм, количество тел качения, их инерция и контактная жесткость в зоне нагружения.

Контактная жесткость в зависимости от параметра **Kp_input** может быть задана, либо рассчитана автоматически.

Возможно рассмотреть систему без учета инерции шариков и с ее учетом. В расчете можно также задать демпфирование в подшипнике. Элемент учитывает пять степеней свободы внутренней обоймы: три поступательных и две вращательных.

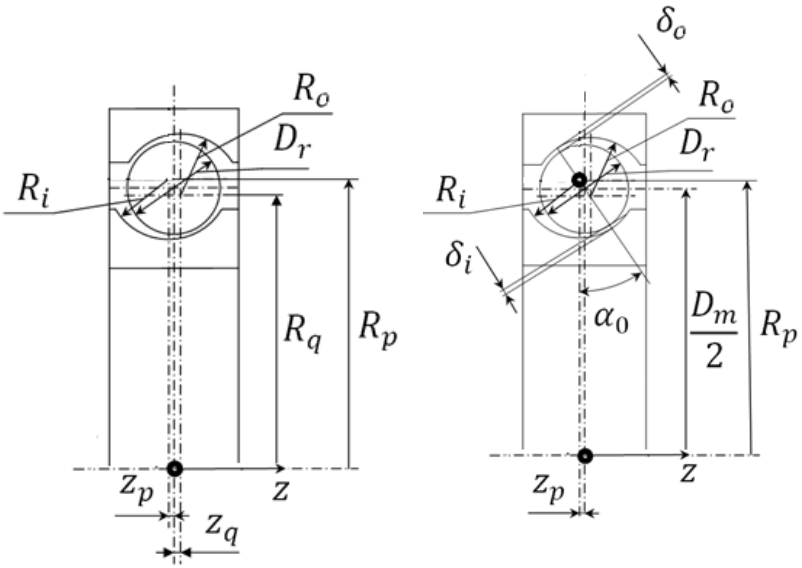


Рис. 11.8

Таблица 11.4 Описание параметров элемента

Параметр	**Описание**
Des	По умолчанию переменная имеет текстовое значение **[Название элемента_Номер].** Число указывает порядковый номер элемента в модели. Пользователь может изменить текст на любой другой (например, на имя подсистемы)
conn_type	Переменная устанавливает, каким образом связь присоединяется к подсистеме. Возможно два варианта: [via body] – связь присоединяется к подсистеме без дополнительных условий. Точка связи определяется именем подсистемы и координатой z; [via connection point] – связь присоединяется к заранее установленной точке, с заданным именем. Точка задается именем подсистемы, в которой она находится и координатой z (в локальной для данной подсистемы системе координат). Этот тип присоединения связи более удобен для редактирования и является единственным вариантом при формировании многоуровневых несоосных пространственных систем
side1_subs	Переменная указывает подсистему, к которой подсоединяется граничное сечение 1 связи. По умолчанию выбранной подсистемой является нулевая подсистема (жесткое основание)
side1_I	Координата определяет положение граничного сечения 1 связи в подсистеме

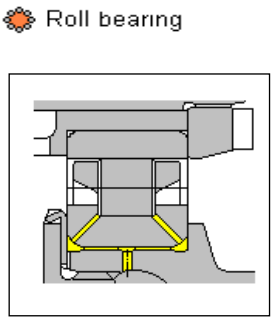
side2_subs	Переменная указывает подсистему, к которой подсоединяется граничное сечение 2 связи. По умолчанию выбранной подсистемой является нулевая подсистема (жесткое основание)
side2_I	Координата определяет положение граничного сечения 2 связи в подсистеме
Dr	Диаметр тел качения. Используется при расчете контактной жесткости
z	Число тел качения
Dm	Диаметр центров тел качения подшипника по чертежу
deltai	Зазор по внутренней дорожке качения по углу контакта. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=clearance
delta0	Зазор по внешней дорожке качения по углу контакта. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=clearance
Kp_input	Тип ввода контактной жесткости. В элементе может быть рассчитана по параметрам подшипника.
Kpi	Контактная жесткость по внутренней дорожке. Этот параметр доступен в режиме редактирования [Kp_input]=ввод
Kpe	Контактная жесткость по внешней дорожке. Этот параметр доступен в режиме редактирования [Kp_input]=ввод
zp	Осевое расстояние от центра тел качения до центра кривизны внутренней дорожки качения. Знак «-» означает положение точки контакта на левой части внутреннего кольца. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=coordinates
zq	Осевое расстояние от центра тел качения до центра кривизны внешней дорожки качения. Знак «-» означает положение точки контакта на левой части внешнего кольца. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=coordinates
Rp	Радиальное расстояние от осевой линии подшипника до центра кривизны внутренней дорожки качения. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=coordinates
Rq	Радиальное расстояние от осевой линии подшипника до центра кривизны внутренней дорожки качения. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=coordinates
Ri	Радиус кривизны внутренней дорожки. Используется при расчете контактной жесткости
Ro	Радиус кривизны внешней дорожки. Используется при расчете контактной жесткости
alfa_i	Номинальный угол контакта в шарикоподшипнике по внутреннему кольцу. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=clearance
alfa_o	Номинальный угол контакта в шарикоподшипнике по внешнему кольцу. Этот параметр доступен в режиме редактирования [input]=clearance
Phi0	Угловое положение 1-го тела качения. Этот параметр практически не влияет на результаты с вращением. Может иметь влияние на анализ состояния подшипника при расчете со статическим радиальным нагружением

input_type	Позволяет выбрать различные варианты задания геометрии подшипника (Рис. 11.8). В режиме [coordinates] задаются координаты центров кривизн дорожек качения. Является режимом по умолчанию и предпочтительным с точки зрения сходимости расчетов режимом. В режиме [clearance] задаются зазоры по углу контакта, углы контакта, диаметр центров тел качения.
inertia	Позволяет выбрать расчет с учетом или без учета инерционных сил в телах качения
Mr	Масса шарика. Этот параметр доступен в режиме редактирования [inertia]=да
conditions	Позволяет выбрать варианты учета рабочих условий подшипника. [none] - без учета температур и монтажных натягов и зазоров; [temperature] - учет только температурного состояния; [mounting_fits] - учет только монтажных натягов и зазоров; [both] - учет одновременно и температур и монтажных натягов и зазоров
расш.вывод	Если выбрано "Стандарт", то во время расчета будут выводиться промежуточные параметры. Если выбрано «Эксперт», то будут вычисляться дополнительные параметры и выводиться в результатах расчета по текущему нелинейному элементу. Некоторые параметры требуют проведения дополнительных вычислений, что может привести к замедлению расчета. По умолчанию значение "Нет"
d*	Переменная устанавливает размер элемента (внутренний диаметр) при визуализации модели
D*	Переменная устанавливает размер элемента (наружный диаметр) при визуализации модели
B*	Ширина связи при визуализации. Не используется в расчетах

11.7 Роликовый подшипник [Roll bearing support]

Элемент представляется связью между двумя стержневыми подсистемами и моделирует роликовый подшипник качения, устанавливаемый между ротором и статором (ротором и ротором), **Рис. 11.9**. Учитывается зазор подшипника, количество тел качения, передающих радиальную нагрузку, контактная жесткость тел качения и поверхностей качения в зоне нагружения. В расчете можно задать также демпфирование в подшипнике.

Символы меню	Окно параметров



Des	Роликовый подшипник 4		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	1	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
Dr	0	mm	Rolling elements diameter
z	0		Число тел качения
Di	0	mm	Inner race diameter
deltai	0	mm	Радиальный зазор по внутреннему кольцу
deltao	0	mm	Радиальный зазор по внешнему кольцу
Kp_input	расчет		Тип ввода контактной жесткости
L	0	mm	Длина роликов
Cb	0	N*s/m	Коэффициент демпфирования
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	0	mm	ширина

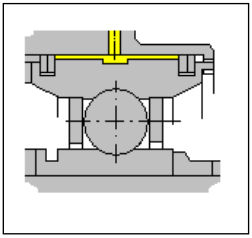
Рис. 11.9

11.8 Гидродинамический демпфер [Damper support]

Моделируются два основных типа демпферов – короткий (без уплотнительных колец) и длинный (с уплотнительными кольцами по краям), а также их комбинации, **Рис. 11.10**.

Граничные условия для жидкостной пленки – **[π-пленка]** (половинный охват) и **[2 π-пленка]** (полный охват). Ламинарное течение. Возможность расчета динамических систем, как на стационарных, так и на нестационарных режимах.

Символы меню	Окно параметров

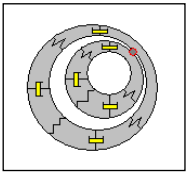


Des	Damper support 2		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Subsystem 1		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	0	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
Type	short		Тип демпфера
R	75	mm	Радиус демпфера
film	pi-пленка		Кавитационная модель пленки
Lr	37.5	mm	Длина демпфера
delta	0.225	mm	Радиальный зазор
mue	0.0172	Ns/m2	Динамическая вязкость
P0	0	N/m2	Давление подачи масла в демпфер
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	30	mm	Наружный диаметр
B*	10	mm	ширина

Рис. 11.10

11.9 Зазор [Clearance]

Элемент представляет собой упруго-демпферный ограничитель прогиба. Позволяет моделировать системы с зазорами, различными видами контактов, а также динамические свойства сложных конструкций опорных узлов различных типов, **Рис. 11.11**. В модели представляется связью между подсистемами общего вида.

Символы меню	Окно параметров
Clearance 	

Des	Зазор 3		Название
conn_type	via body		Тип подключения
side1_subs	Вентилятор		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	0	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
L1	0	mm	Смещение точки крепления наружного пакета 1
L2	0	mm	Смещение точки крепления наружного пакета 2
L3	0	mm	Смещение точки контакта
k1	1600	N/m	Коэффициент жесткости наружного пакета
c1	0	N*s/m	демпфирование пакета 1
k2	1e+010	N/m	Коэффициент жесткости внутреннего пакета
c2	0	N*s/m	демпфирование пакета 2
R	50	mm	Радиус пакета
delta	1	mm	Радиальный зазор
e1	0	mm	Начальный эксцентриситет 1
e2	0	mm	Начальный эксцентриситет 2
Teta1	0	deg	Начальное угловое положение e1
Teta2	0	deg	Начальное угловое положение e2
mue	0	Ns/m2	Коэффициент трения
Vsmin	0.001		Минимальная скорость проскальзывания
расш. вывод	стандарт		Расчет и вывод промежуточных параметров
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	0	mm	ширина

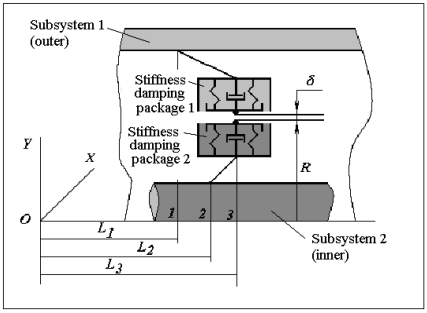


Рис. 11.11

ЗАМЕЧАНИЕ: Параметр элемента **side_1** всегда должен соответствовать внешней подсистеме, а параметр **side_2** – внутренней.

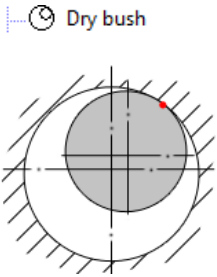
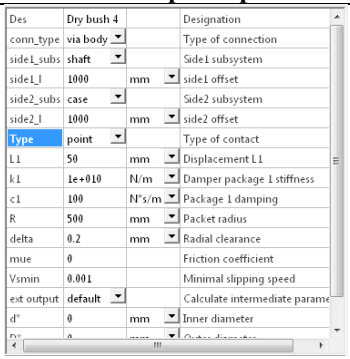
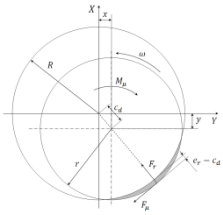
ЗАМЕЧАНИЕ: Элемент всегда должен быть прикреплен к двум подсистемам. Отсутствие закрепления по одной из сторон (**side_1** или **side_2**) не допускается.

Таблица 11.5

Обозначение	Описание
L1	Смещение точки крепления наружного упруго-демпферного пакета 1 к подсистеме
L2	Смещение точки крепления наружного упруго-демпферного пакета 2 к подсистеме
L3	Смещение точки контакта. По умолчанию L1=L2=L3=0
k1	Коэффициент жесткости наружного упруго-демпферного пакета 1
c1	Коэффициент демпфирования наружного упруго-демпферного пакета 1
k2	Коэффициент жесткости внутреннего упруго-демпферного пакета 2
c2	Коэффициент демпфирования наружного упруго-демпферного пакета 2
R	Наружный радиус внутреннего упруго-демпферного пакета 2
delta	Радиальный зазор
e1	Начальный эксцентриситет (смещение подсистемы от общей оси вращения) подсистемы 1
e2	Начальный эксцентриситет (смещение подсистемы от общей оси вращения) подсистемы 2
Teta1	Начальное угловое положение упруго-демпферного пакета 1
Teta2	Начальное угловое положение упруго-демпферного пакета 2
mue	Коэффициент трения в точке контакта
Vsmin	Минимальная скорость проскальзывания. Vsmin=0.001 м/сек

11.10 Подшипник сухого трения [Dry bush]

Элемент моделирует подшипник сухого трения. Может быть задан контакт в точке или по линии. В случае точечного контакта может быть использован в качестве замены элемента Зазор (выше скорость расчета). Рис. 11.12.

Символы меню	Окно параметров
	 

Des	Dry bush 4		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	shaft		Side1 subsystem
side1_l	1000	mm	side1 offset
side2_subs	case		Side2 subsystem
side2_l	1000	mm	side2 offset
Type	point		Type of contact
L1	50	mm	Displacement L1
k1	1e+010	N/m	Damper package 1 stiffness
c1	100	N*s/m	Package 1 damping
R	500	mm	Packet radius
delta	0.2	mm	Radial clearance
mue	0		Friction coefficient
Vsmin	0.001		Minimal slipping speed
ext output	default		Calculate intermediate parame
d°	0	mm	Inner diameter

Рис. 11.12

Таблица 11.6

Обозначение	Описание
Type	Тип контакта в опоре. Может быть точечным или линейным. В случае линейного контакта будут рассчитаны моментные реакции.
L1	Смещение точки крепления наружного упруго-демпферного пакета 1 к подсистеме

k1	Коэффициент жесткости наружного упруго-демпферного пакета 1
c1	Коэффициент демпфирования наружного упруго-демпферного пакета 1
R	Наружный радиус внутреннего упруго-демпферного пакета 2
delta	Радиальный зазор
mue	Коэффициент трения в точке контакта
Vsmin	Минимальная скорость проскальзывания. Vsmin=0.001 м/сек

11.11 Активный магнитный подшипник [Active magnetic bearing support]

Элемент является связью между двумя стержневыми подсистемами и моделирует активный магнитный подшипник (АМП), **Рис. 11.15**. Моделируются три основных типа АМП: цилиндрический, конический и осевой. Возможно два типа ввода параметров подшипника–[**standard]** (обычный набор параметров) и [**expert]**. Экспертный ввод параметров предназначен для моделирования специальных случаев и предполагает знание пользователем алгоритма магнитной опоры. В модели учитывается: зазор между ротором и статором, максимальные ток и плотность тока в обмотке, кол-во электромагнитных полюсов, число полюсов управления, возможность замены обмотки. Полюс управления - это ось, совпадающая с направлением действия результирующей силы от ближайших к ней электромагнитов, ток для этих электромагнитов рассчитывается из перемещения вдоль оси полюса управления. Электромагниты равномерно распределены по полюсам управления, поэтому кол-во полюсов электромагнитов в опоре должно быть кратно числу полюсов управления, **Рис. 11.13**. Возможны два варианта системы управления – с **[PD – регулятором]** и **[PID – регулятором]**.

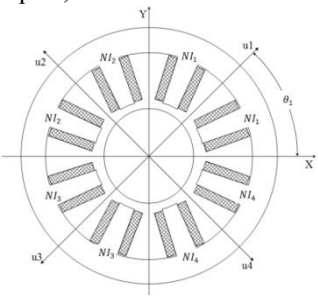
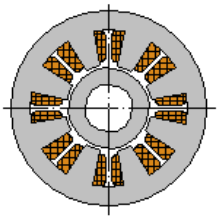


Рис. 11.13

Элемент может быть использован только в нестационарном анализе для любых режимов работы роторной системы, как стационарных, так и нестационарных.

Символы меню	Окно параметров

Active Magnetic Bearing support



Des	Active Magnetic Bearing support 2 3 2		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	Shaft 1		Side1 subsystem
side1_l	1000	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
Type	Isotropic		Link type
Opt.Type	standard		Options level type
Geometry Type	Cone		Geometry bearing configuration type
d1	260	mm	Inner start diameter
d2	188	mm	Inner end diameter
D	280	mm	Outer diameter
b	55	mm	magnetically active part width
Imax	5	A	Saturation current
Np	16		Number of poles
Phi_P1	0	deg	Angle position of the pole N1
Ncp	4		Number of control poles
Teta_CP1	0	deg	Angle position of the control pole N1
Flux direction	removable_coils		magnetic flux direction
Flux direction	heteropolar		magnetic flux direction
Jmax	6	A/mm2	Maximum Current Density
Controller	PID controller		Controller type
Kp	100000		Proportional part of the PID-controller
Ki	1.7e+007		Integral part of the PID-controller
Kd	1000		Differential part of the PID-controller

Рис. 11.15

На **Рис. 11.14** представлена модель элемента с ее основными геометрическими параметрами.

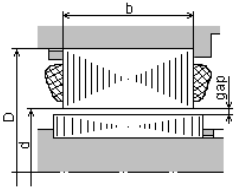


Рис. 11.14

Максимально допустимый ток в обмотке является током насыщения. Минимальное кол-во электромагнитных полюсов и полюсов управления равно 3.

Параметры регулятора K_p, K_i, K_dсоответствуют следующему выражению:

$$I = K_p u(t) + K_i \int_0^t u(t)dt + K_d \frac{du(t)}{dt}$$

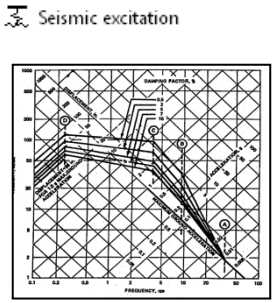
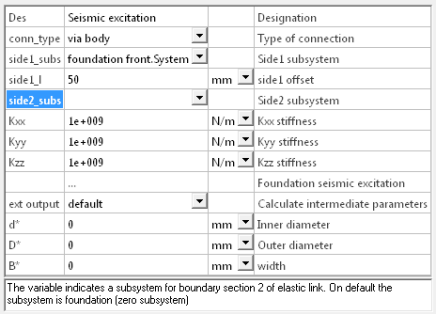
где: I – ток, подающийся на полюс управления,
u(t) - перемещения в плоскости полюса управления,
t–текущий момент времени, K_p, K_i, K_d- пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно.
ПД – регулятор реализует пропорционально – дифференциальный закон управления.

ПИД – регулятор реализует пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления.

ЗАМЕЧАНИЕ: Опция задания параметров (изотропный или полный) и направление магнитного потока не реализованы в DYNAMICS R4.8.

11.12 Сейсмическое воздействие [Seismic Excitation]

Связь позволяет при расчете алгоритма [Нелинейный анализ] моделировать кинематическое возбуждение основания установки и возникающие при этом переходные процессы. Одним из частных случаев является работа установки в условиях землетрясения. Элемент позволяет настроить жесткость связи основания с установкой в трех направлениях и задать спектр отклика сейсмического воздействия со стороны основания.

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Seismic excitation		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs	foundation front.System		Side1 subsystem
side1_l	50	mm	side1 offset
side2_subs			Side2 subsystem
Kxx	1e+009	N/m	Kxx stiffness
Kyy	1e+009	N/m	Kyy stiffness
Kzz	1e+009	N/m	Kzz stiffness
	...		Foundation seismic excitation
ext output	default		Calculate intermediate parameters
d*	0	mm	Inner diameter
D*	0	mm	Outer diameter
B*	0	mm	width

The variable indicates a subsystem for boundary section 2 of elastic link. On default the subsystem is foundation (zero subsystem)

Рис. 11.16

Воздействие задается как полигармонический сигнал, действующий одновременно в трех направлениях. Временной интервал воздействия поделен на несколько диапазонов. Диапазон нарастающих, постоянных и затухающих амплитуд.

Жесткость связи модели с основанием задается коэффициентами жесткости Kxx, Kyy, Kzz.

ЗАМЕЧАНИЕ: Для расчета алгоритма [Базис] необходимо наличие линейных связей установки с основанием. Жесткости на перемещение в такой связи задаются относительно мягкими (по сравнению с жесткостью в нелинейном элементе). Степени свободы на углы поворота могут быть зафиксированы большими моментными жесткостями (1e10-1e11 Н/м)

Для настройки параметров сейсмического воздействия необходимо вызвать диалог расширенной настройки двойным кликом на «…» () или командой “Extended Properties” в контекстном меню.

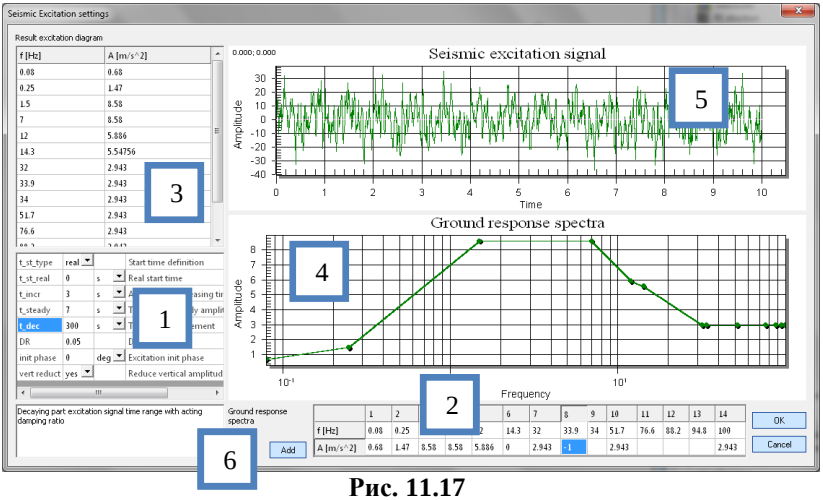


Рис. 11.17

На **Рис. 11.17** показан диалог настройки сейсмического воздействия на основание. Цифрами отмечены следующие элементы управления:

1. Таблица с характеристиками временных интервалов сейсмического воздействия. На **Рис. 11.18** показаны различные стадии сейсмического воздействия – зоны роста амплитуд, постоянных амплитуд и затухающих амплитуд входного воздействия. По окончании промежутка времени t_dec производится отключение сейсмического воздействия. Рекомендуется устанавливать это значение за пределами времени интегрирования.

2. Таблица частот и амплитуд гармонических составляющих, определяющих спектр ответа при сейсмическом воздействии. Следует задавать значащие точки диаграммы спектра ответа. Если требуется задать дополнительные гармоники (например, соответствующие собственным частотам конструкции), то в поле для амплитуды можно поставить отрицательное число, либо оставить ячейку пустой . Тогда значения амплитуд для этих частот будут интерполированы по заданным ключевым точкам. Если требуется временно отключить какую-либо гармоническую составляющую, то в ячейке для амплитуды можно поставить 0.
3. Результирующая таблица спектра ответа с интерполированными значениями амплитуд.
4. Заданный спектр ответа в виде амплитудно-частотной характеристики.
5. Амплитудно-временная характеристика полигармонического сигнала для зоны постоянных амплитуд.
6. Кнопка «Добавить» служит для добавления дополнительных гармонических составляющих в спектр ответа от сейсмического воздействия.

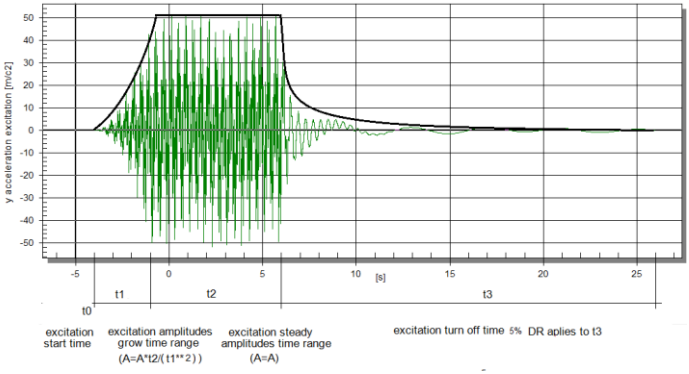
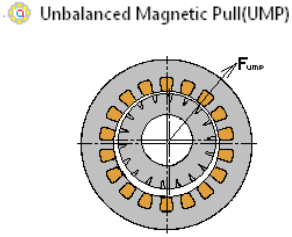
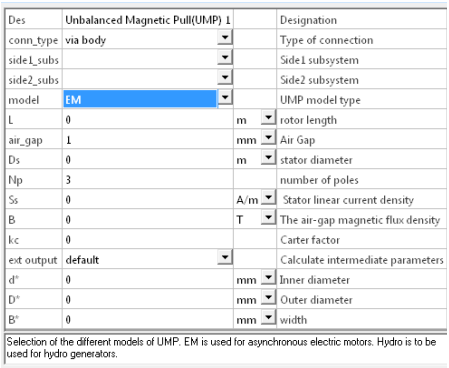


Рис. 11.18

11.13 Одностороннее магнитное притяжение [Unbalanced Magnetic Pull]

Связь, моделирующая эффект одностороннего магнитного притяжения/тяжения (Unbalanced Magnetic Pull -UMP) в электрических машинах. В случае возникновения неравномерности воздушного зазора между ротором и статором, вследствие статического или динамического эксцентриситета ротора, электромагнитное поле вызывает одностороннюю радиальную силу, приложенную к центру ротора и направленную в сторону наименьшего воздушного зазора. UMP работает на уменьшение жесткости ротора. Одностороннее магнитное притяжение присуще гидрогенераторам и асинхронным электродвигателям

Символы меню	Окно параметров
	

Des	Unbalanced Magnetic Pull(UMP) 1		Designation
conn_type	via body		Type of connection
side1_subs			Side1 subsystem
side2_subs			Side2 subsystem
model	EM		UMP model type
L	0	m	rotor length
air_gap	1	mm	Air Gap
Ds	0	m	stator diameter
Np	3		number of poles
Ss	0	A/m	Stator linear current density
B	0	T	The air-gap magnetic flux density
kc	0		Carter factor
ext output	default		Calculate intermediate parameters
d°	0	mm	Inner diameter
D°	0	mm	Outer diameter
B°	0	mm	width

Selection of the different models of UMP. EM is used for asynchronous electric motors. Hydro is to be used for hydro generators.

Рис. 11.19

Таблица 11.7

model	Выбор типа модели для расчета UMP. EM используется для асинхронных электрических машин. Hydro используется для многополюсных машин, таких как генераторы для гидротурбин.
L	Длина части ротора с обмоткой
air_gap	Номинальный воздушный зазор между ротором и статотром

Ds	Внутренний диаметр статора
Np	число полюсов
Ss	Линейная плотность тока в обмотке
B	Номинальное значение индукции магнитного поля в воздушном зазоре
kc	Коэффициент Картера (Коэффициент воздушного зазора) может быть определен как отношение максимальной магнитной индукции в зазоре к средней.

На **Рис. 11.20** показано взаимодействие моделей роторной системы и модели UMP в процессе интегрирования

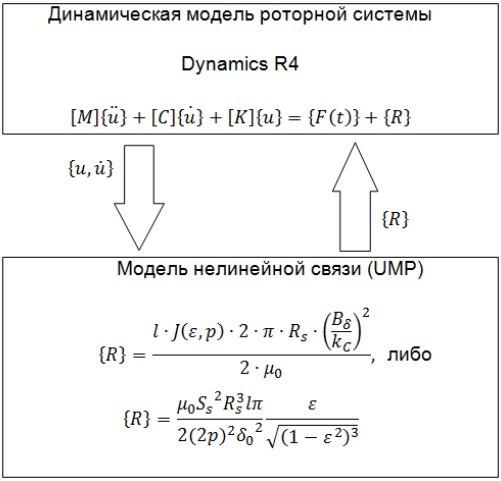


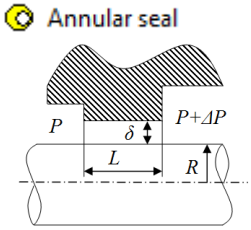
Рис. 11.20

В случае моделирования UMP для асинхронной машины используется первое уравнение. В случае гидрогенератора второе уравнение. Это связано с некоторыми особенностями каждого из типов машин.

11.14 Щелевое уплотнение [Annular seal]]

Связь моделирует взаимодействие ротора и корпуса в условии протекания несжимаемой жидкости с постоянной вязкостью под давлением через небольшой радиальный зазор – щелевое уплотнение (**Рис. 11.21**). В модели используется алгоритм, описывающий объемное течение жидкости с учетом центрирующей силы (эффекта Ломакина), закрутки потока и потерь на трение в жидкости. Для определения средней осевой скорости используется итеративный процесс. Ротординамические коэффициенты определяются для центрального положения ротора.

Символы меню



Окно параметров

Des	Annular seal 1		Название
conn_type	via body		Тип подключения
side1_subs			Подсистема для сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
R	120	mm	Радиус щелевого уплотнения
L	8	mm	Длина щелевого уплотнения
delta	0.25	mm	Радиальный зазор
dP	5e+006	N/m2	Pressure drop
mue	0.000183	Ns/m2	Динамическая вязкость
rho	1000	kg/m3	Fluid density
alpha	0		Коэффициент закрутки на входе
zeta	0.1		Entrance loss factor
расш. вывод	эксперт		Расчет и вывод промежуточных параметров
d*	0	mm	Внутренний диаметр
D*	0	mm	Наружный диаметр
B*	0	mm	ширина

Рис. 11.21

11.15 Расчет жесткости и демпфирования в нелинейных элементах

Установив расширенный выбор **[эксперт]** в параметрах нелинейного элемента дополнительно будут рассчитаны коэффициенты матриц жесткости и демпфирования в соответствии со степенями свобод этого элемента. Расчет этих коэффициентов производится путем численного дифференцирования, что приводит к замедлению общего времени расчета модели.

ЗАМЕЧАНИЕ: Для элементов **[Dry bush]**, **[Clearance]** расчет жесткостей и демпфирования не предусмотрен.

Пример вывода жесткостных и демпфирующих коэффициентов для подшипника скольжения представлен на **Рис. 11.22**.

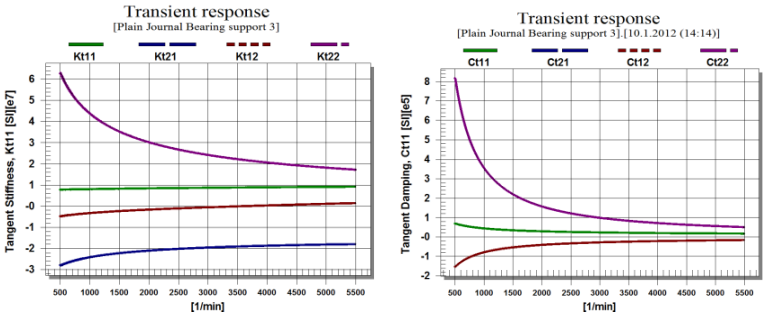


Рис. 11.22

Нумерация коэффициентов соответствует нумерации ячеек в матрице 6x6, где первое значение соответствует строке, а второе столбцу, начиная с 1. Таким образом, перекрестный коэффициент Kyx будет иметь обозначение Kt21, а моментная жесткость по оси y при нагружении по оси x Kt15.

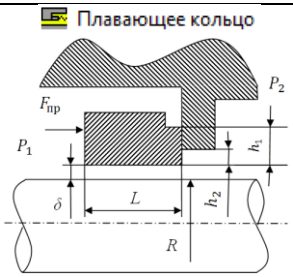
11.16 Плавающие кольцо [Floating ring]

Элемент является связью между двумя подсистемами и моделирует щелевое уплотнение с плавающим кольцом, Рис. 11.23. В модели учитывается: объемное течение жидкости с учетом центрирующей силы (эффекта Ломакина), закрутки потока и потерь на трение, инерция кольца (возможно ее отключение), велинина поджатия пружины и сила от изменения перепада давлений на кольцо. Для определения средней осевой скорости используется итеративный процесс. При выводе результатов следует учесть: $K_{xx}=K_{yy}$, $K_{yx}=-K_{xy}$, $C_{xx}=C_{yy}$, $C_{yx}=-C_{xy}$.

ЗАМЕЧАНИЕ: Кольцо рассматривается идеальным без какой либо диффузорности или конфузорности его геометрии. Не учитывается неравномерность зазора между кольцом и валом, отклонения формы уплотнительных поверхностей в продольном и поперечном направлении. Не учитывается изменение силы трения при изменении площади контакта кольца с корпусом в случае перемещения кольца. Ротординамические коэффициенты для центрального положения ротора, жидкость несжимаемая и однородно вязкая.

ЗАМЕЧАНИЕ: Сечение 1 - ротор, сечение 2 - корпус

Символы меню	**Окно параметров**



Des	Плавающее кольцо		Название
conn_type	via body		Тип подключения
side1_subs	Generator.Assembly.Система		Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	9616	mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs			Подсистема для сечения 2 связи
R	20	mm	Радиус вала в уплотнении
L	7.5	mm	Длина плавающего кольца
delta	0.027	mm	Радиальный зазор
P_1	7.013e+006	N/m2	Давление на входе
P_2	755000	N/m2	Давление на выходе
mue	1.38e-005	Pa-s	Динамическая вязкость жидкости
rho	70.8	kg/m3	Плотность жидкости
alpha	0.5		Коэффициент закрутки на входе
zeta	0.1		Коэффициент потерь на входе
r_r	0		Среднеквадратичная грубость поверхности ротора
r_s	0		Среднеквадратичная грубость поверхности статора
inertia	да		Расчет с инерцией
Mr	0.1	g	Масса кольца
h	1.7	mm	Толщина плавающего кольца (h1)
h2	0.5	mm	Толщина плавающего кольца (h2)
mue_fr	0.1		Коэффициент трения скольжения
mue_fr static	0.1		Коэффициент трения покоя
Fpr	10	N	Сила поджатия кольца пружиной в осевом направлении
Vsmin	0.001		Минимальная скорость проскальзывания
расш. вывод	стандарт		Расчет и вывод промежуточных параметров

Рис. 11.23

Список экспертных параметров представлен в таблице **11.8**.

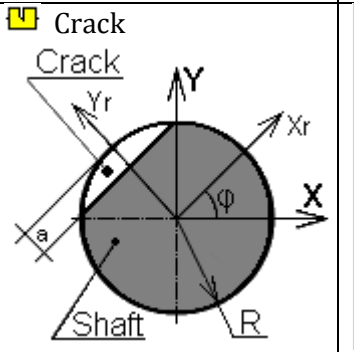
Таблица 11.8

Параметр	**Описание**
Delta_Pressure	перепад давления по режимам работы уплотнения, размерность Па
Delta_ux, Delta_uy	изменение зазора между кольцом и ротором, размерность мм
Ring_u_x, Ring_u_y, Rotor_u_x, Rotor_u_y	перемещения кольца и ротора относительно корпуса, используются для построения орбит движения, размерность мм.
e_ring	модуль вектора перемещения(эксцентриситет) кольца, размерность мм
vec_FFriction Rest, vec_FFriction Slip	модуль вектора силы трения покоя и скольжения, размерность Н
vec_FHudrody n	модуль вектора гидродинамической силы, размерность Н
vec_FInertia	дуль силы приводящей кольцо в движение, размерность Н
vec_vel_ring	модуль вектора скорости кольца, размерность мм/с

11.17 Трещина [Crack]

Элемент представляет собой связь между двумя стержневыми подсистемами, частями вала, разделенными трещиной (**Рис. 11.24**). Элемент моделирует изменение локальной моментной жесткости в сечении трещины по мере вращения вала.

Символы меню	Окно параметров



Des	Nonlinear Crack		Designation
conn_type	via connection point		Type of connection
side1_c_point	Connection point 1.Shaft 1.System		Side1 connection point
side2_c_point	Connection point 2.Shaft 2.System		Side2 connection point
model	breathing		Crack model
Kr_input	calculate		Calculate or input of init sti
a	3	mm	Crack depth
D	10	mm	Diameter of shaft section w
teta	0	deg	Crack position spin angle
Nue	0.3		Poisson's ratio
E	2.1e+011	N/m2	Modulus of elasticity
Kr basis	15244.3	N*m	From basis Link: rotational
Kr calc	15244.3	N*m	For Basis:Place this rotation
ext output	expert		Calculate intermediate para
d*	0	mm	Inner diameter
D*	0	mm	Outer diameter
B*	0	mm	width

Рис. 11.24

Элемент «Трещина» используется совместно с базисной линейной связью, моментная жесткость которой по осям X и Y равна минимальной моментной жесткости открытой трещины $k^{\text{исх}}min = k_{rx}^{\text{исх}}$. Элемент «Трещина», воспроизводит циклическое увеличение и уменьшение жесткости по мере вращения ротора, относительно $k_{rx}^{\text{исх}}$, при этом реакции элемента вычисляются:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{rx}(\theta){C_1}^2 + k_{ry}(\theta){S_1}^2 - k_{rx}^{\text{исх}} & k_{rx}(\theta)C_1S_1 - k_{ry}(\theta)C_1S_1 \\ k_{rx}(\theta)C_1S_1 - k_{rx}(\theta)C_1S_1 & k_{rx}(\theta){C_1}^2 + k_{rx}(\theta){S_1}^2 - k_{rx}^{\text{исх}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{rx} \\ u_{ry} \end{Bmatrix},$$

$$k_{rx}(\theta) = \frac{2 \cdot k_{rx}^{\text{исх}}}{(1 - \cos(\theta))},$$

$$k_{ry}(\theta) = \frac{2 \cdot k_{ry}^{\text{исх}}}{(1 - \cos(\theta))},$$

где

$k_r(\theta)$ – коэффициент моментной жесткости во вращающейся СК,

θ - угол между фазой поворота вала и фазой прецессии,

$k_r^{\text{исх}}$ – начальное значение коэффициента моментной жесткости, соответствует открытой трещине,

u_r – поворот сечения,
M – изгибающий момент.

Элемент позволяет моделировать постоянно открытую трещину, в этом случае жесткость во вращающейся системе координат остается постоянной. Исходные значения жесткостей рассчитываются автоматически для набора заданных параметров. Исходные коэффициенты моментной жесткости могут быть заданны пользователем вручную.

При выводе в режиме «эксперт» происходит вывод дополнительных параметров:

- Krx [N*m/rad] – локальная мометная жесткость в сечении трещины вокруг оси Xr во вращающейся вместе с валом системе координат.
- Kry [N*m/rad] – локальная мометная жесткость в сечении трещины вокруг оси Yr во вращающейся вместе с валом системе координат.
- Kfx [N*m/rad] – локальная мометная жесткость в сечении трещины по оси X в глобальной системе координат.
- Kfy [N*m/rad] – локальная мометная жесткость в сечении трещины по оси Y в глобальной системе координат.
- Kfxy, Kfyx [N*m/rad] – локальная перекрестная мометная жесткость в сечении трещины в глобальной системе координат.

ЗАМЕЧАНИЯ

1 Если значение жесткости базисной связи заранее неизвестно, известны только геометрические параметры трещины, то необходимо просчитать одну точку в нелинейном анализе системы, при этом базисная связь имеет нулевую матрицу жесткости. В окне вывода временного сигнала, необходимо выбрать вывод внутренних параметров элемента «Трещина». Затем нужно скопировать значение коэффициента жесткости _Krx из сигнала и вставить это значение в качестве коэффициентов моментной жесткости по осям X и Y в матрицу жесткости базисной связи. Если моментная жесткость базисной связи заранее определена, то необходимо ввести это значении в соответствующее поле интерфейса элемента «Трещина»

2 Элемент всегда должен быть прикреплен к двум подсистемам. Отсутствие закрепления по одной из сторон (**side_1** или **side_2**) не допускается.

3 В случае ручного задания начальных значений коэффициентов моментной жесткости трещины, необходимо задавать коэффициенты в соответствии с изображенной на рисунке системой координат.

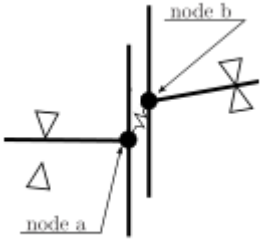
4 С уменьшением размера трещины, увеличивается погрешность автоматического вычисления начальных значений жесткости.

11.18 Несоосность валов [Shaft misalignment]

Элемент представляет собой связь между двумя стержневыми подсистемами, частями вала, соединенными с перекосом (несоосно) (**Рис. 11.25**). Элемент «Несоосность валов» воспроизводит циклическое изменение матрицы жесткости соединения валов по мере вращения роторной системы с учетом взаимных параллельной и угловой несоосности.

Таблица 11.9 Описание параметров элемента

Параметр	Описание
stiff_matrix	Матрица жесткости 6x6 соединения, без учета перекоса.
ut_x, ut_y	Радиальное смещение узла “b” относительно узла ”a”.
ur_x, ur_y	Поворот сечения ”b” относительно сечения ”a”.

Символы меню	Окно параметров
Misalignment (Shaft) 	

Des	Misalignment 7		Designation
conn_type	via connection point		Type of connection
side1_c_point	cp 1 misalignment poi...		Side1 connection point
side2_c_point	cp 2 misalignment poi...		Side2 connection point
stiff_matrix	...		stiff_matrix
Type	nonlinear		Modal or nonlinear link type
misalignment switch	yes		Use misalignment settings
ut_x	0.0005842	m	Displacement in x direction
ut_y	-0.0007874	m	Displacement in y direction
ur_x	-0.00349	rad	Rotation about x direction
ur_y	0	rad	Rotation about y direction
d*	0	mm	Inner diameter
D*	0	mm	Outer diameter
B*	0	mm	width

Рис. 11.25

ЗАМЕЧАНИЕ: В основе алгоритмов DYNAMICS R4 лежит допущение о том, что узлы модели не выходят из плоскости сечений (гипотеза малых колебаний). В результате элемент «Несоосность валов» способен воспроизводить малую несоосность и не предназначен для моделирования вращающихся пространственных конструкций.

ЗАМЕЧАНИЕ: Узел “a” элемента «Несоосность валов» всегда должен быть подключен только к левой подсистеме, узел “b” всегда только к правой. Узлы “a” и ”b” обязаны находиться в одном сечении, то есть осевое расстояние между ними должно быть равно 0.

ЗАМЕЧАНИЕ: В каждой подсистеме, которые соединяет элемент «Несоосность валов» должна быть задана одинаковая скорость вращения.

12 ГРУППЫ

12.1 Группа элементов [Group]

Элемент **[Group]** используется для проведения вариантных расчетов без значительного редактирования модели динамической системы, **Рис. 12.1.**

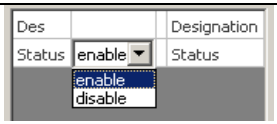
Символы меню	Окно параметров
	

Рис. 12.1

Группы позволяют исключить из расчётов отдельные элементы модели по желанию пользователя. Также одна группа элементов может быть заменена другой группой элементов (например, две упругие опоры постоянной жесткости заменены двумя нелинейными опорами). В этом случае пользователь избавляется от необходимости иметь несколько моделей (файлов) проекта или проводить редактирование базового варианта.

ЗАМЕЧАНИЕ: В группы могут быть добавлены все точечные элементы и связи.

Последовательность действий для создания элемента группы **[Group]**:

- открыть проект;
- добавить в проект новые элементы, которые будут включены в группу
- двойным кликом на элемент **[Group]** в дереве элементов создать в проекте элемент **[Group].** При этом элемент будет иметь имя[**Group1].** Вторая группа получит имя **[Group 2]**и т.д.;
- с помощью курсора в проекте выделить необходимый элемент группы и перетащить его в поле элемента **[Group 1]**или в другую группу (см. технологию работы с экранными объектами в **Windows** с помощью мыши "drag & drop");
- установить статус для элемента **[Group …] –[Enable]** или **[Disable]**.

ЗАМЕЧАНИЕ: При визуализации модели выводятся только включенные в расчет элементы.

В названии группы автоматически добавляется [+] или [-] в зависимости от ее статуса.

При перетаскивании точеного элемента или связи в группу происходит обновление дерева модели, при котором оно сворачивается. Это может быть неудобно в случае добавления нескольких точечных элементов или связей в одну и ту же группу во вложенных сборках. Команда **[Добавить в последнюю группу]** может быть использована после того как будет добавлен в какую-либо группу элемент с помощью перетаскивания, **Рис. 12.2.**

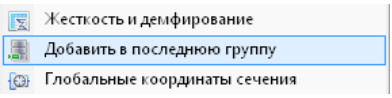


Рис. 12.2

12.2 Группа переменных[Variables]

В программе есть два типа переменных: **[Value variable]**, **[String variable]**, **Рис. 12.3.**

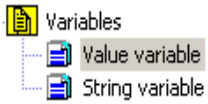
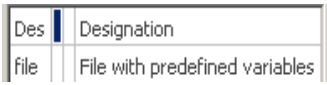
Символы меню	Окно параметров
	

Рис. 12.3

Переменные [**Value variable**], **[String variable]**добавляются в модель двойным кликом левой клавиши мыши.

При двойном клике левой кнопкой мыши на поле с названием параметра, к которому подключена переменная будет активировано окно свойств связанной переменной, **Рис. 12.4**. При двойном клике на названии поля подключения связи происходит переход к точке связи или ближайшему элементу в подсистеме.

Переключиться на предыдущий активный элемент после этого можно нажатием комбинации клавиш **[ctrl+shift+z]**.

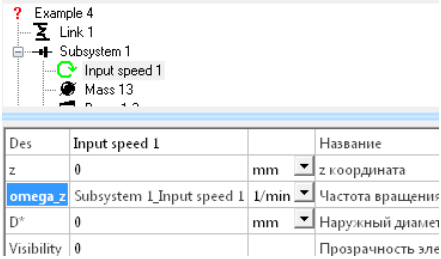


Рис. 12.4

12.2.1 Численная переменная [Value variable]

Переменная используется для следующих целей:

- задать значение переменной, не меняющейся во времени, которое может быть назначено одному или нескольким параметрам динамической системы

Такими параметрами могут быть частота вращения вала, коэффициенты жесткости опорных узлов, их местоположение, геометрические и массовые характеристики.

Ввод **[Численная переменная]** проводится в следующей последовательности:

1. Используя курсор, выделите**[Численная переменная]** элемент в меню проекта. Назначьте имя текстовой переменной (например, **[Скорость НД]**),**Рис. 12.5**.

2. Используя курсор и правую кнопку мыши, откройте список следующих команд, **Рис. 12.6**.

3. Используйте команду **[Расширенные свойства]** для ввода значений параметра. Для этого для каждого выбранного значения временной шкалы (значения временного параметра) задайте его значение, **Рис. 12.7.** Так же доступно определение интерполированных значений функции и аргумента.

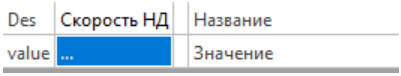


Рис. 12.5

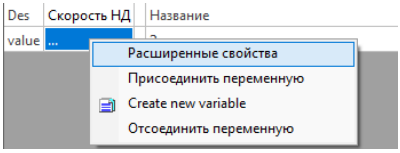


Рис. 12.6

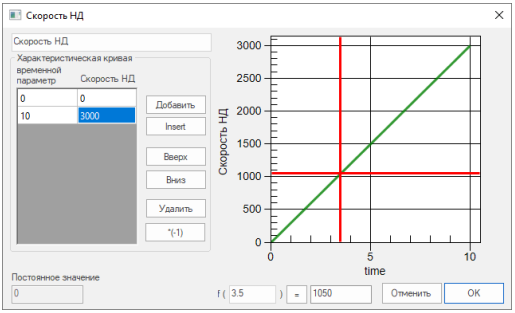


Рис. 12.7

ЗАМЕЧАНИЕ: В окне **[Time independed value]** вводится значение данного параметра, которое будет использоваться в модели для расчета базиса. По умолчанию этот параметр для частоты вращения равен 0. Все другие параметры имеют значение, назначенное пользователем при начальном формировании модели. Пользователь может изменить его значение на любое другое

ЗАМЕЧАНИЕ: В любом алгоритме переменные экстраполируются за пределы установленных/ крайних значений. Только в линейных алгоритмах частота вращения не экстраполируется, и расчет ведется до t_pr, соответствующего максимальному значению в переменной скорости (проверить с 2мя роторами)

4. Пользователь закрывает окно командой **[OK]**, и переменная автоматически становится внешней переменной с именем **[Скорость НД]**.

5. Пользователь выделяет переменный параметр (например,**omega_z**) **Рис. 12.8** и назначает ему внешнюю переменную командой **[Присоединить переменную], Рис. 12.9.**

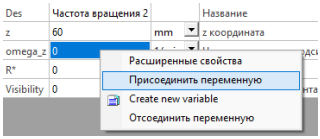


Рис. 12.8

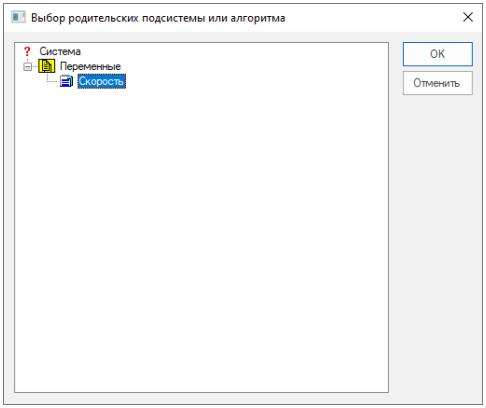


Рис. 12.9

12.2.2 Текстовая переменная [String variable]

[Текстовая переменная] используется для формирования текстовых переменных. Его удобно использовать при использовании user-programmable элементов. Например, один скриптовый алгоритм можно присоединить к нескольким одинаковым нелинейным связям. Это позволяет вести редактирование скриптового алгоритма только в одном месте и один раз.

Создание элемента**[Текстовая переменная]** проводится следующим образом:

1. Используя курсор, выделите **[Текстовая переменная]** элемент в меню проекта и назначьте имя текстовой переменной (например, **[Rolling bearing script]**), **Рис. 12.10.**

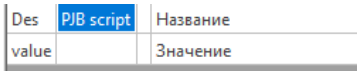


Рис. 12.10

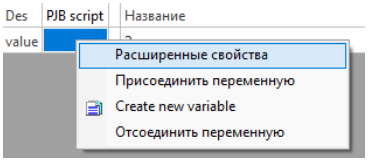


Рис. 12.11

2. Используйте команду **[Расширенные свойства]** для ввода текстовой переменной, **Рис. 12.11.**

3. После выполнения команды появляется окно для ввода текстовой переменной, **Рис. 12.12.**

Рис. 12.12

4. Далее вводится текст алгоритма на языке Python, **Рис. 12.13.** Подсветка синтаксиса работает только при редактировании параметра скрипт элемента [Скрипт- связь]

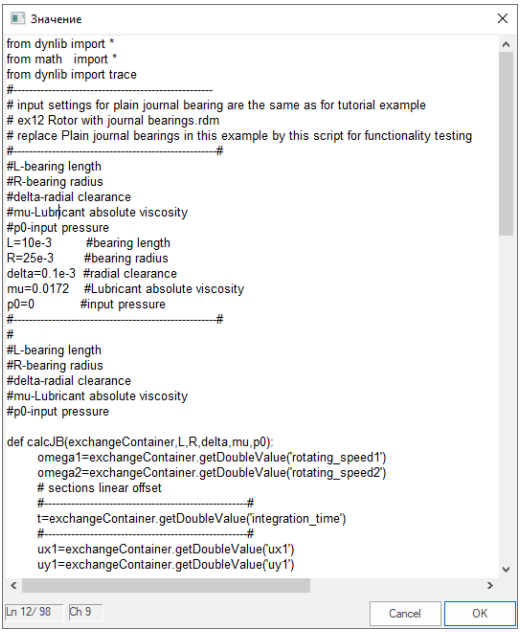


Рис. 12.13

5. После ввода текста клавишей **[OK]** в строчке value появляются три точки, говорящие о том, что переменная **[PJB script]** приобрела значение, **Рис. 12.14.**

6. Пользователь выделяет в дереве модели параметр, например,**[Ball bearing],** для которого подготовлена внешняя переменная. В нижней части экрана появляется окно элемента модели для ввода его параметров, **Рис. 12.15**.

7. Правой клавишей мыши пользователь открывает список команд для работы с внешними переменными, **Рис. 12.16.**

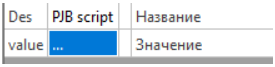


Рис. 12.14

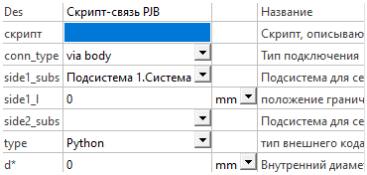


Рис. 12.15

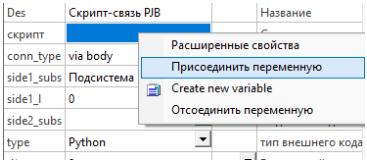


Рис. 12.16

8. Далее пользователь выделяет переменную и выполняет команду **[Attach external variable].** Открывается список внешних переменных, в которых одновременно находятся все виды переменных, в том числе текстовые, **Рис. 12.17.**

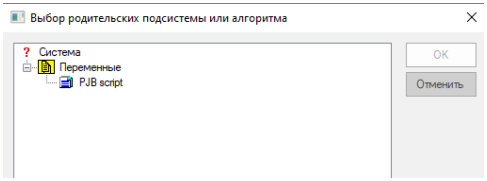


Рис. 12.17

9. Выделив переменную с помощью клавиши **[OK]**, пользователь назначает переменной ее значение, **Рис. 12.18**

Des	Скрипт-связь PJB		Название
скрипт	PJB script		Скрипт, описывак
conn_type	via body		Тип подключения
side1_subs	Подсистема 1.Система		Подсистема для с
side1_l	0	mm	положение грани
side2_subs			Подсистема для с
type	Python		тип внешнего код
d*	0	mm	Внутренний диаме
D*	0	mm	Наружный диамет
B*	0	mm	ширина

Рис. 12.18

13 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

13.1 Управление изображением

Экран со всеми окнами, с помощью которого проводится моделирование новой динамической системы, показан на **Рис. 13.1**

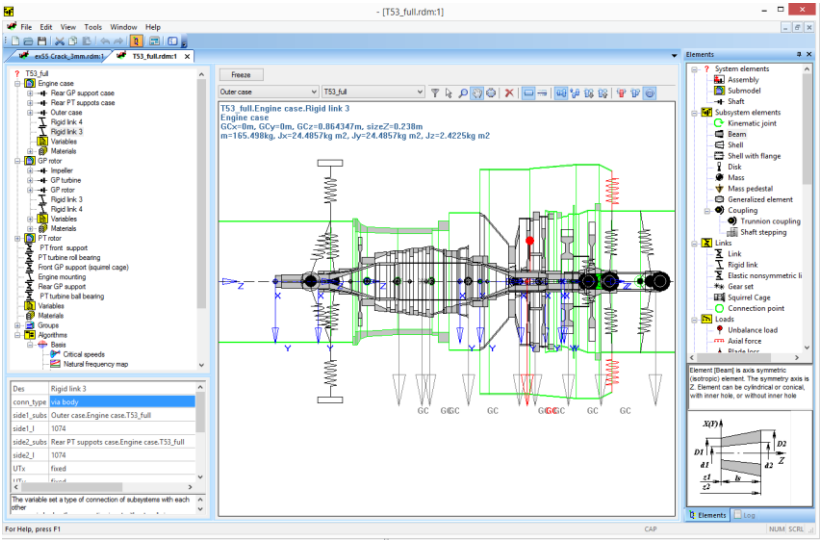


Рис. 13.1

В верхней части окна для ввода-вывода результатов моделирования находятся кнопки для управления изображением модели, **Рис. 13.2:**

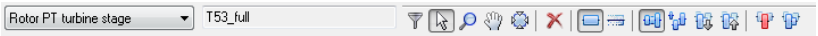
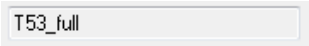


Рис. 13.2

Среди них:

- список выбора текущей подсистемы; активен в режиме отображения только одной подсистемы.



- показывает название сборки или субмодели, выбранной в диалоге фильтра вывода.

- кнопка вызова диалога фильтра вывода модели. После нажатия будет показан диалог с деревом структуры модели. При выборе сборки или субмодели, соответствующей всем роторам, на экране будут отображены подсистемы и связи, входящие только в выбранную сборку

- включает режим курсора, в котором пользователь может выделить элементы в модели (клавиша 'A'/'Ф');

- кнопка масштабирования изображения модели. Курсор меняет свой вид на изображение лупы. Увеличение – левая кнопка мыши, уменьшение – правая (клавиша 'Z'/'Я'). Зуммирование работает также вращением колеса мышки;

- кнопка сдвига перемещения изображения в окне (клавиша 'H'/'P');

- кнопка приведения изображения в размер окна;

- кнопка удаления элемента модели. Элемент можно указать либо непосредственно на модели, либо выделив курсором в меню проекта;

- кнопка для вывода объемной модели проекта;

- кнопка вывода скелета модели;

- возврат к исходному изображению модели;

- кнопка разнесения подсистем;

- кнопка разнесения сборок модели на один уровень;

- кнопка сворачивания разнесенной по сборкам модели на один уровень;

- кнопка выделения и визуализации только одной подсистемы на экране.

- кнопка выделения и визуализации только текущей сборки;

- кнопка вывода в окно 2D массово-инерционных характеристик текущего структурного элемента

13.2 Создание модели из одной подсистемы

Создание модели начинается с определения субмоделей, сборок внутри каждой субмодели, подсистем внутри сборок и т.д. В результате создается иерархия основных структурных единиц. Пример такой иерархии показан на **Рис. 13.4.**

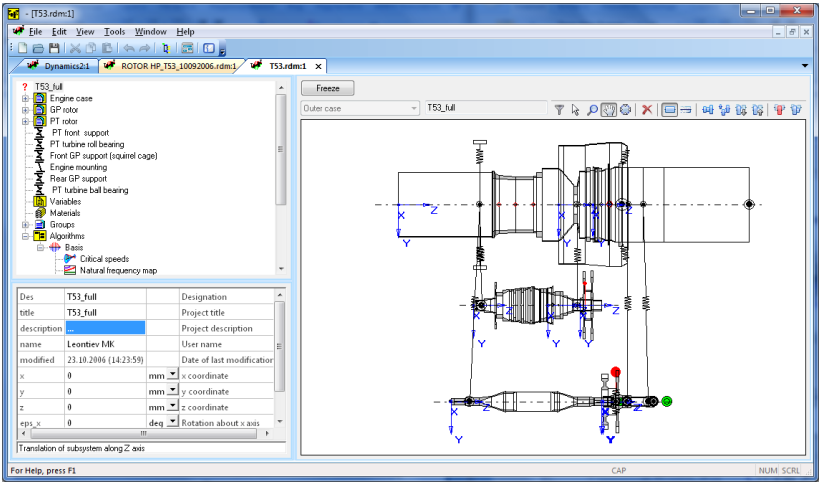


Рис. 13.4

Каждой структурной единице может соответствовать одна или несколько подсистем. Создание подсистем ведется последовательно.

1. На первом шаге пользователь, используя технологию **“Drag and Drop”**, передвигает **[Subsystem]** элемент из библиотеки элементов на поле главного окна. В поле (**Рис. 13.5**) появляется первый балочный элемент подсистемы с параметрами **“по умолчанию”.** Эти параметры можно впоследствии отредактировать, либо полностью удалить этот элемент.

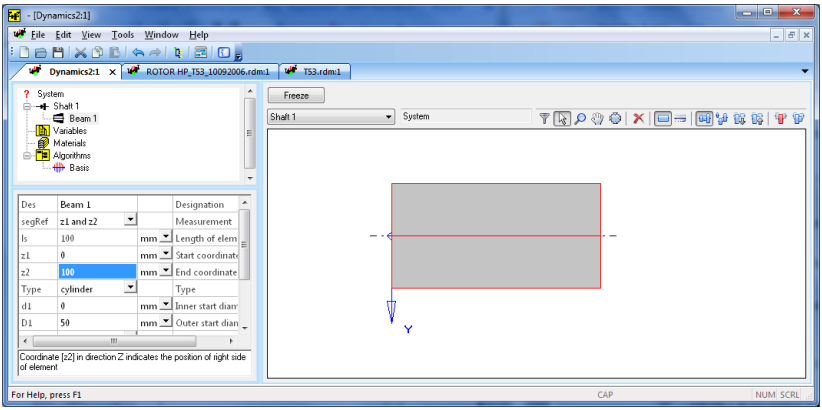


Рис. 13.5

ЗАМЕЧАНИЕ: Следует иметь в виду, что любая подсистема должна обладать длиной. Поэтому нежелательно проводить удаление балочного элемента, не задав новых элементов, обладающих длиной.

2. Пользователь определяет общие свойства подсистемы. Задаются:

- уникальное имя

ЗАМЕЧАНИЕ: Следует иметь в виду, что любая подсистема должна обладать уникальным именем, ассоциативно связанным с реальной конструкцией. Это поможет пользователю свободно ориентироваться в сложных динамических системах, составленных из нескольких подсистем

- положение в пространстве (задается координатами левого конца подсистемы). По умолчанию предполагается, что все системы являются соосными
- материал подсистемы (в случае необходимости для отдельных элементов подсистемы может быть переопределен)

3. Далее, перетаскивая мышью элементы из дерева элементов, пользователь набирает требуемую модель.

Одновременно с вводом элемента или в процессе редактирования модели можно вести ввод и редактирование его параметров. Для этого в модели с помощью курсора или в меню проекта выделяется соответствующий элемент, **Рис. 13.6.**

После выделения элемента в нижнем правом окне **[Element data window]** появляются параметры этого элемента, которые можно отредактировать. Ввод данных происходит кликом курсора в любой точке экрана.

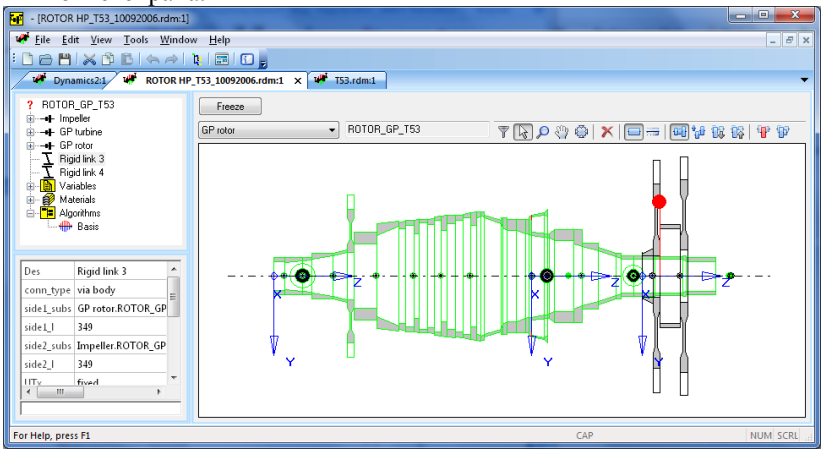


Рис. 13.6

ЗАМЕЧАНИЕ: Чтобы выделить элемент, необходимо указать его курсором и нажать левую клавишу мыши (выделяемый элемент становится активным, а его контуры подсвечиваются красным цветом)

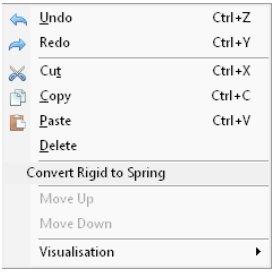


Рис. 13.7

Выделив элемент, пользователь может его вырезать, скопировать, вставить его в любую подсистему. Для этого нажатием правой кнопки мыши пользователь открывает соответствующий набор команд, **Рис. 13.7**.

Пользователь может вставить любой элемент из библиотеки элементов в модель в любом месте.

ЗАМЕЧАНИЕ: Большое число элементов в подсистеме или их небольшой линейный размер могут трансформировать их представление в графической модели в линию. Это приводит к трудностям в выделении соответствующего элемента с помощью курсора. Для увеличения изображения можно использовать функцию выделения одной подсистемы и дискретной лупы

При создании подсистемы имеется возможность ряд элементов поместить на уже имеющиеся в подсистеме балки и оболочки. Среди этих элементов связь, шарнир, масса, все виды нагрузок. В этом случае балка разбивается на части сечением, в котором находятся указанные элементы.

Иногда в модель требуется добавить дополнительное сечение, не прибегая к функциональности авторазбиения балочных и оболочечных элементов. Либо требуется разбить элементы не поддающиеся авторазбиению. Для цилиндрических элементов это можно было сделать и ранее через функциональность копирования-вставки элементов.

Теперь же при двойном клике мышкой появляется диалоговое окно (**Рис. 13.8**), в котором можно отредактировать координату вставки элемента либо в локальной системе координат (СК), либо в глобальной.

Вставка сечения в глобальной СК может пригодиться при установке сечения для подключения связи в режиме **[via body]**, в котором координаты указываются в глобальной СК модели.

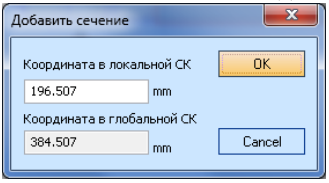


Рис. 13.8

Также эту функциональность можно использовать для приблизительного определения координат в модели.

> **ЗАМЕЧАНИЕ:** Параметры не относящиеся к геометрии протяженного элемента будут продублированы.

При проверке модели иногда требуется определять расстояния между разными узлами модели (например, расстояние между опорами). Поскольку координаты элементов в подсистемах задаются в локальной СК, это может вызывать сложности.

Команда контекстного меню **[Глобальные координаты сечения]** доступна для элементов, связей, подсистем, сборок, **Рис. 13.9**
С помощью контекстного меню можно изменить цвета и прозрачность как отдельных элементов, так и всех элементов входящих в подсистему или сборку.
Для изменения цвета необходимо вызвать контестное меню, например, элемента типа [Сборка] (Рис. 13.10).

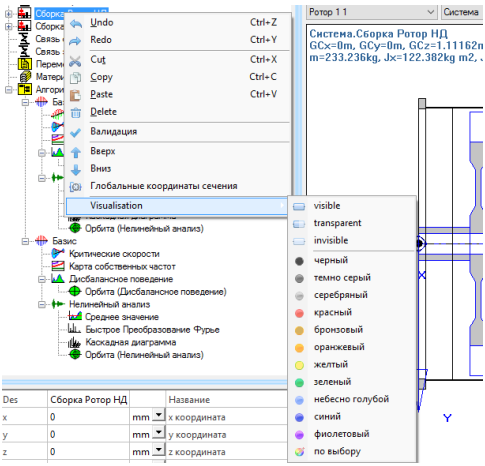


Рис. 13.10

. Вывод производится в окно **[Log]** в формате «**[название элемента]** x1 y1 z1 x2 y2 z2». Для протяженных элементов, подсистем, связей выводятся координаты начала и конца. Для точечных элементов координаты 1 и 2 дублируются. Для сборок выводятся координаты точки отсчета СК сборки.

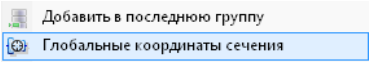


Рис. 13.9

С помощью контекстного меню можно изменить цвета и прозрачность как отдельных элементов, так и всех элементов входящих в подсистему или сборку.

Для изменения цвета необходимо вызвать контестное меню, например, элемента типа [Сборка] (Рис. 13.10).

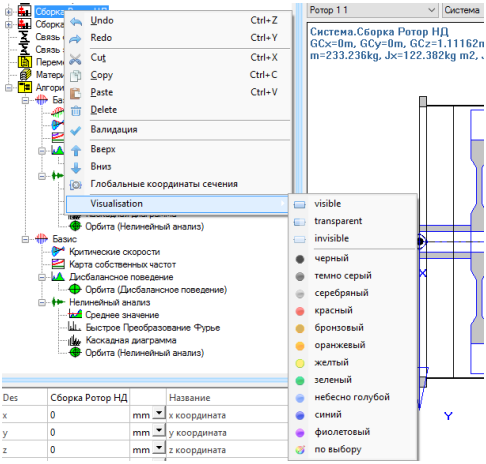


Рис. 13.10

13.3 Создание модели, состоящей из нескольких подсистем

Создание модели из нескольких подсистем ведется поэтапно, **Рис. 13.11**

Создаются отдельные подсистемы. Количество подсистем не ограничено.

1. Между подсистемами устанавливаются связи, каждая из которых моделирует линейный или нелинейный элемент реальной конструкции динамической системы. Количество связей не ограничено.

ЗАМЕЧАНИЕ: Связь может быть непосредственно присоединена к подсистеме. В этом случае положение ее граничной точки определяется координатой Z. Связь может быть также присоединена к предварительно заданной точке связи. Для пространственных систем вариант присоединения связи является предпочтительным

2. Устанавливаются параметры связей.

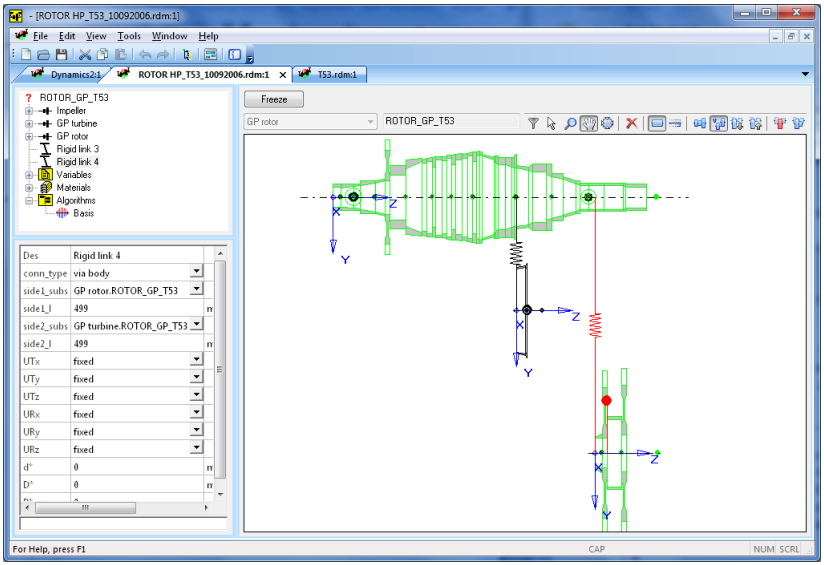


Рис. 13.11

ЗАМЕЧАНИЕ: Следует иметь в виду, что для непосредственного выделения элементов модели с помощью курсора на графическом изображении модели требуется предварительно выделить соответствующую подсистему в меню проекта

ЗАМЕЧАНИЕ: Желательно, чтобы все связи между подсистемами, в том числе с нулевой подсистемой, имели уникальные имена. В противном случае у пользователя могут возникнуть трудности в выводе результатов расчетов в сложной роторной (динамической) системе

На **Рис. 13.12** показана динамическая система, составленная из девяти подсистем, разнесенных между собой. Все подсистемы соединены между собой упругими или абсолютно жесткими связями.

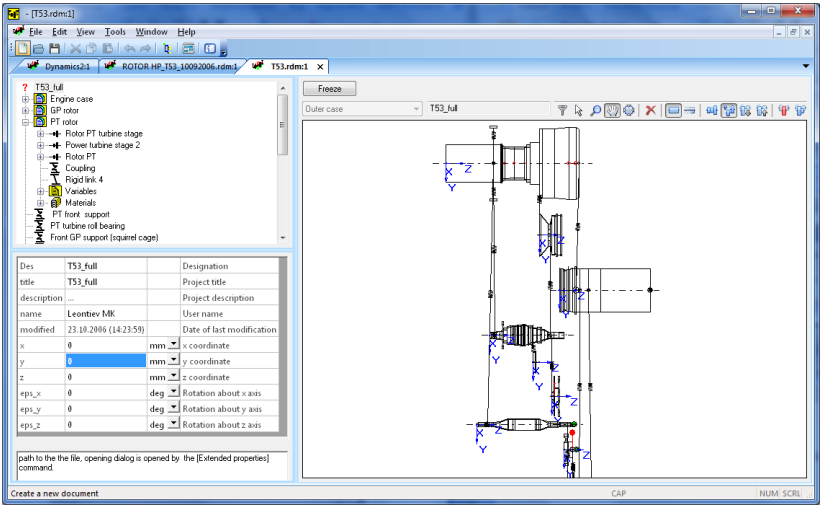


Рис. 13.12

На **Рис. 13.13** показано исходное состояние модели.

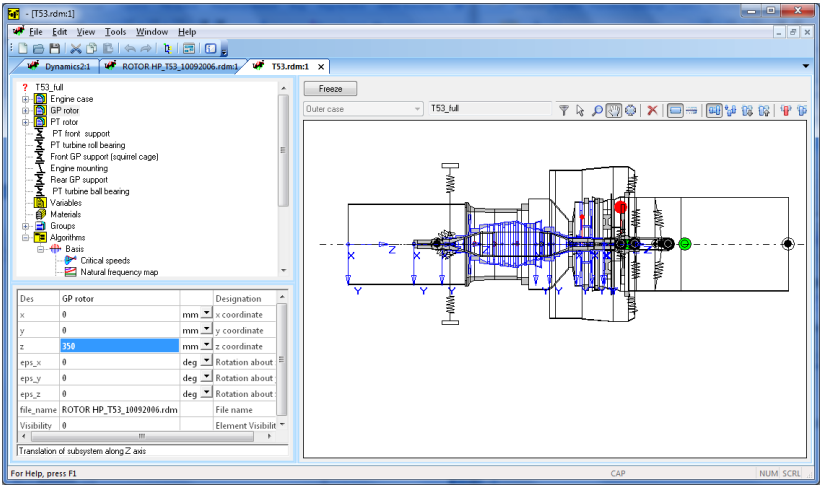


Рис. 13.13

13.4 Разнесение по сборкам и субмоделям

При создании сложной модели желательно грамотно ее структурировать. Разнесение по сборкам и субмоделям может сильно помочь в дальнейшей работе над моделью. Помимо удобства работы в панели дерева модели, улучшается визуализация объекта исследования при разнесении компонентов модели.

На **Рис. 13.14** приведен пример последовательного разнесения модели по сборкам и субмоделям.

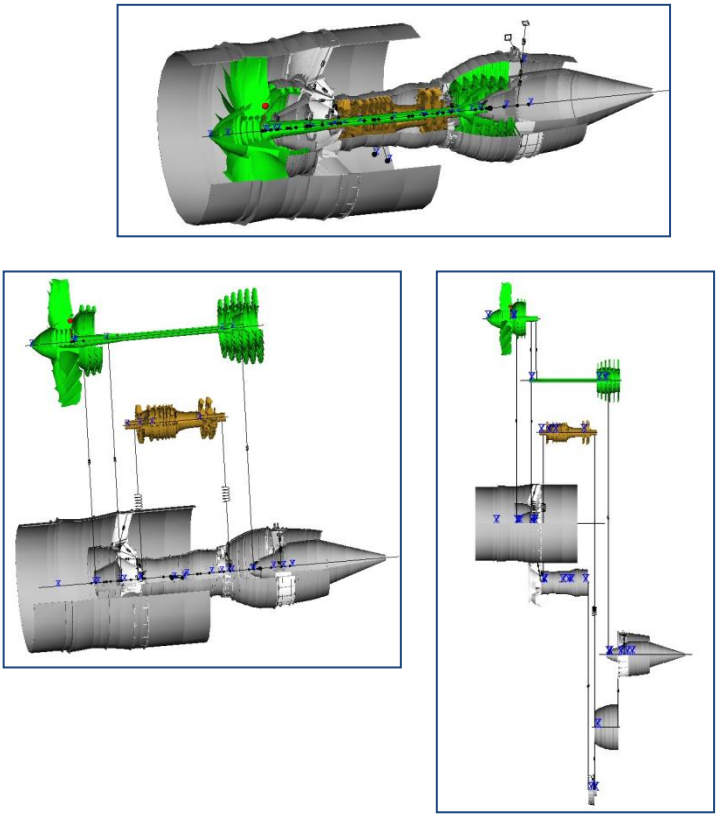


Рис. 13.14

Для визуализации форм колебаний предпочтительно выделять в отдельные структурные элементы не согласно модульной конструкции двигателя, а по принадлежности к корпусам и роторам.

ЗАМЕЧАНИЕ: Каждое нажатие на кнопку "Разнести Сборки" разносит модель на один уровень вложенности.

Порядок расположения элементов типа [Сборка] и [Субмодель] может быть изменен в дереве модели. Для этого могут быть использованы команды контекстного меню “Move Up”, “Move Down”, Рис. 7.6. Изменение порядка следования структурных элементов в дереве модели служит для изменения визуализации при разнесении по сборкам.

13.5 Диалог импорта параметризованных данных по жесткости и демпфированию в подшипниках скольжения

Параметры жесткости и демпфирования в подшипниках скольжения существенно зависят от скорости вращения ротора. На **Рис. 13.15** приведена таблица с рассчитанными коэффициентами в программе XLPocket (www.rmt-inc.com)).

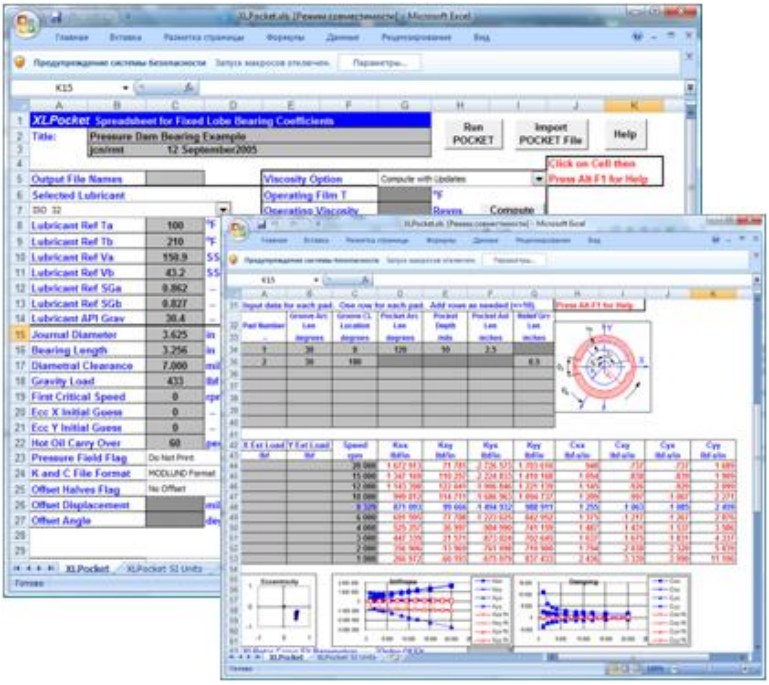


Рис. 13.15

Моделирование таких подшипников проводится с применением параметризации соответствующих ячеек в матрице жесткости и демпфирования Квазилинейной связи.

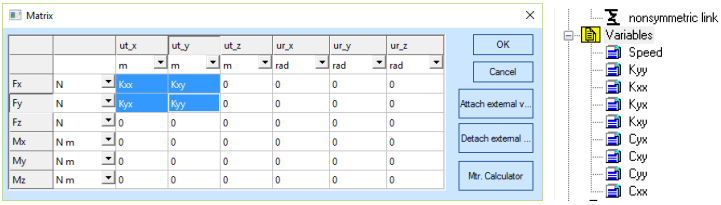


Рис. 13.16

Этот тип связи учитывается только в алгоритмах модального анализа (во всех кроме алгоритма Базис). Также для этого типа связи возможно задание несимметричных матриц жесткости и демпфирования, характерных для подшипников скольжения, **Рис. 13.16**.

Для корректного расчета с Квазилинейной связью в модели должна присутствовать фиктивная связь для расчета базиса и получения полного набора форм.

Для автоматизации ввода исходных данных в программе присутствует специальный диалог импорта данных подшипника в табличной форме. Диалог может быть вызван из меню «Сервис\Ипорт подшипника из таблицы», **Рис. 13.17**.

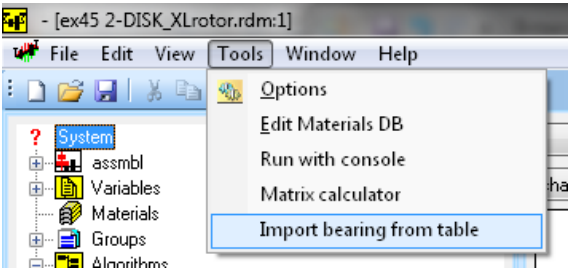


Рис. 13.17

Диалог обработки табличных данных представлен на **Рис. 13.18** ниже. Диалог позволяет генерировать в модели новые связи с автоматическим подключением переменных, а также редактировать данные в уже существующих в модели связях.

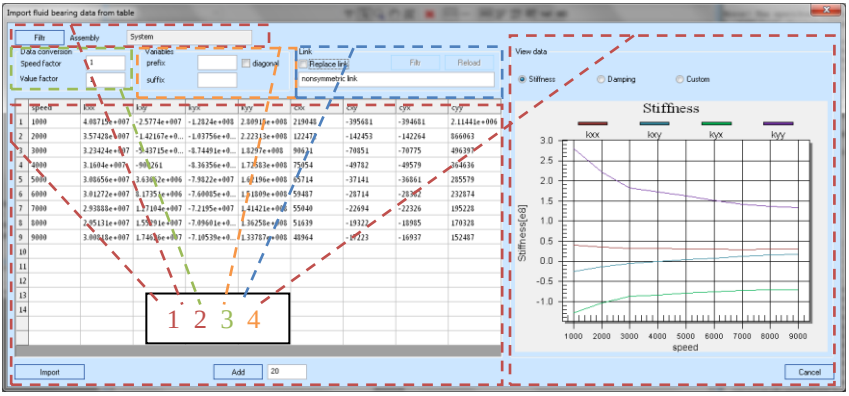


Рис. 13.18

Цифрами на рисунке обозначены следующие группы элементов:

1. Таблица с данными по скоростям вращения, жесткости и демпфированию. Скорости вращения при вставке в программу интерпретируются как time_proportion (первый столбец в переменных), жесткости и демпфирования в единицах Си (N/m, N*sec/m).
2. Определяет сборку в модели для вставки новой квазилинейной связи и набора переменных
3. Определяют коэффициенты для конвертации табличных данных. Предназначены для коррекции скорости в time_proportion, и перевода значений жесткости и демпфирования из вставленных данных в Си
4. Элементы управления для задания префикса и суффикса к названию переменной. Необходимо при наличии в модели нескольких подшипников для разделения названий переменных подключенных к разным связям. В случае если помечен элемент «diagonal» обрабатываться будут только диагональные элементы.
5. Группа элементов для задания свойств связи. Определение названия вновь создаваемой связи, либо загрузка данных из существующих в модели связей. Для активации элементов управления загрузкой необходимо пометить пункт “Replace Link”
6. Визуализация введенных в таблице жесткостей и демпфирования. Например, при пометке «Stiffness» выводятся только столбцы, соответствующие жесткости. При выборе «Custom» выводятся столбцы, для которых выделены первые ячейки.

Также поддерживается импорт данных по жесткости и демпфированию из текстового файла. Файл должен содержать 9 столбцов с данными разделенными пробелами. Первый столбец - скорости вращения, остальные 8 столбцов - жесткости (kxx, kxy,kyx,kyy) и демпфирование (cxx, cxy, cyx, cyy). Первая строка игнорируется.

14 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

14.1 Введение

DynFB – компьютерная программа разработанная для расчета статических и динамических характеристик подшипников скольжения различных типов на стационарных режимах работы.

14.2 Математическая модель гидродинамического подшипника

Математическая модель гидродинамической пленки подшипника скольжения основана на уравнении Рейнольдса, модифицированном в соответствие с моделью турбулентности Константинеску, и уравнении сохранения энергии для течения жидкости в тонких пленках. Уравнение Рейнольдса основано на ряде допущений:

- Жидкость несжимаема
- Течение происходит в тонкой пленке $\frac{c}{R} = \boldsymbol{O}(10^{-3})$
- Инерция жидкости не учитывается

Уравнение Рейнольдса позволяет производить расчет статического давления в масляной пленке имеет вид:

$$\frac{\partial}{R^2\partial\varphi}\left(\frac{h^3}{12k_x\mu}\frac{\partial p}{\partial\varphi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{12k_z\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right)=\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{1}{2}\omega\frac{\partial h}{\partial\varphi},$$

где R – радиус цапфы вала, μ – динамическая вязкость жидкости, h – радиальный зазор между цапфой вала и корпусом, ω – угловая скорость вращения цапфы вала, φ, z – угловая и осевая координата, t – время, k_x, k_z – коэффициенты турбулентности, расчитываются по формулам:

$$k_x = 1 + 0.04417 \cdot (k^2 Re)^{0.725},$$
$$k_z = 1 + 0.0247 \cdot (k^2 Re)^{0.65},$$
$$k = 0.125 \cdot Re^{0.07},$$

где Re – локальное число Рейнольдса в потоке $Re = \frac{\rho R \omega h}{\mu}$.

Уравнение энергии для подшипника скольжения получено также основываясь на допущениях свойственных течению в тонкой пленке:

- конвекция в направлениях φ и z значительно преобладает над диффузией
- теплоемкость и теплопроводность в масляном слое принимаются постоянными во всех точках
- рассматривается стационарный процесс, поэтому производные по времени равны нулю
- В турбулентном потоке, эффект турбулентного перемешивания значительно преобладает над эффектом молекулярной диффузии. Вследствие этого, повышение температуры за счет вязкой диссипации имеет тенденцию равномерно распределяться по толщине пленки.

Таким образом уравнение энергии имеет вид:

$$\rho c h \left(U \frac{\partial T}{R \partial \varphi} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{12\mu}{h} \left(k_z W^2 + k_x \frac{R^2 \omega^2}{12} + k_x \left(U - \frac{\omega R}{2} \right)^2 \right) + Q_s,$$
$$U = -\frac{h^2}{12 \mu k_x} \frac{\partial p}{R \partial \varphi} + \frac{R\omega}{2},$$
$$W = -\frac{h^2}{12 \mu k_z} \frac{\partial p}{\partial z},$$
$$Q_s = h_j (T - T_j) + h_b (T - T_b),$$

где ρ – плотность жидкости, c – теплоемкость жидкости, T – температура, U, W – скорости потока в окружном и осевом направлении соответственно, Q_s – тепловой поток в стенки вала и корпуса, h_j, h_b – коэффициенты теплопередачи от жидкости к валу и корпусу соответственно, T_j, T_b – температура вала и корпуса соответственно. Связь уравнения Рейнольдса и уравнения энергии обеспечивается через динамическую вязкость жидкости (является функцией температуры) и скоростью потока жидкости (является функцией давления).

Зона кавитации описывается граничными условиями Свифта – Штибера:

$$p = 0,$$
$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0.$$

Действующая на цапфу ротора сила определяется как интеграл поля статического давления, полученного из решения уравнение Рейнольдса. Статическое положение ротора определяется равенством заданной внешней нагрузки и опорной реакции гидродинамической пленки. Для полученного стационарного равновесного положения ротора определяются статические и динамические характеристики подшипника.

14.3 Основные допущения математической модели гидродинамического подшипника

- Жидкость не сжимаема;
- Жидкость является Ньютоновской;
- Течение происходит в тонкой пленке $\frac{c}{R} = \boldsymbol{O}(10^{-3})$;
- Инерция жидкости не учитывается;
- Поверхности вала и корпуса абсолютно жесткие и изотермические;
- Перенос тепла жидкостью от одного сегмента к другому учитывается через заданный коэффициент переноса;
- Перекосы ротора не учитываются;

14.4 Математическая модель газодинамического подшипника

Для расчета давления газа на стенки вала и корпуса подшипника используется уравнение Рейнольдса для сжимаемой жидкости, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{R^2 \partial \varphi}\left(p\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(p\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{1}{2}\omega\frac{\partial}{\partial \varphi}(ph) + \frac{\partial}{\partial t}(ph),$$

где R – радиус вала, h - функция распределения зазора, μ – динамическая вязкость газа, p – функция давления, ω – угловая скорость вращения вала, φ, z – пространственные координаты, t – время.

Давление на торцах подшипника равно давлению окружающей среды.

$$p(\varphi, 0) = p(\varphi, L) = p_a,$$

где p_a – давление окружающей среды.

Если подшипник имеет отдельные сегменты или лепести, то граничным условием на их входных и выходных кромках является давление окружающей среды.

$$p(\varphi_1, z) = p(\varphi_2, z) = p_a.$$

Рабочий зозор в лепестковом подшинике, в отличие от подшипника с жесткими стенками, является не только функцией пространственных координат, но и давления. Это обусловлено тем, что лепесток является податливым и деформируется под действием давления газа $h = f(\varphi, z, p)$. Значение рабочего зазора в подшипники будет определятся двумя слагаемыми. В первую очередь зазор будет определяться смещением вала относительно корпуса $h_0(X, Y)$, но кроме смещения вала зазор будет определять деформация лепестка $\delta(p)$. В DynFB для учета деформации лепестка, опирающегося на гофрированную подложку используется модель Хешмата (Heshmat)

$$h(\varphi, z) = h_0 + \delta = c + X\cos(\varphi) + Y\sin(\varphi) + K_1(p - p_a),$$

где c – начальный сборочный зазор, K_1 – коэффициент податливости сегмента. Коэффициент K_1 определяется свойствами материала лепестка и гофрированной подложки, а так же ее геометрическими параметрами (см. рис. 14.1):

$$K_1 = \left(\frac{\alpha c}{p_a}\right),$$

$$\alpha = \frac{2 s_0 p_a l_0^3}{E t_0^3 c}(1 - \nu^2),$$

где s_0 – шаг гофры, l_0 – половинная длина выступа гофры, t_0 – толщина листа гофры, h_0 – высота выступов гофры, E – модуль упругости первого рода материала гофры, ν – коэффициент Пуассона материала гофры. Здесь α – безразмерный коэффициент податливости.

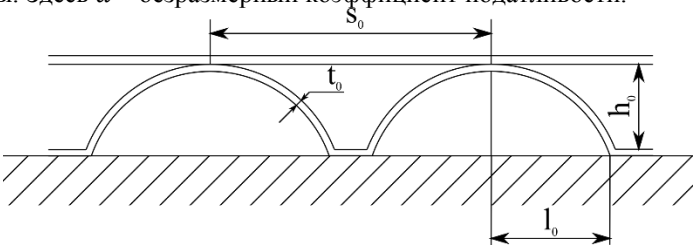


Рис. 14.1 – Пояснение геометрических параметров гофры.

Модель Хешмата основана на ряде допущений:

- Жесткость гофрированной подложки принимается постоянной и равномерно распределенной по всей площади сегмента.

- Коэффициент α является константой и не зависит от величины деформации гофры.
- Лепесток не деформируется сам по себе, не провисает между выступами гофры, а полностью повторяет деформацию гофрированного слоя.
- Деформация гофрированного слоя под действием внешних сил зависит только от локальных эффектов, то есть только от силы, действующей на конкретную точку.
- Трение между лепестком, гофрой и корпусом не учитывается.

Конструкция лепесткового подшипника сама по себе не допускает появления зоны разряжения. Так как при достижении условия $p < p_a$ лепесток будет отрываться от гофры под действием давления окружающей среды и прогибаться в сторону уменьшения зазора пока давление не выровняется (см. **Рис. 14.2**). Эта зона не будет привносить никакого вклада в изменение величины опорной реакции. Однако, данный эффект будет оказывать воздействие на профиль давления в клине. Согласно работе Хешмата вышеописанное явление по сути похоже на возникновение зоны кавитации в обычных гидродинамических подшипниках скольжения. Для учета данной особенности в DynFB применяется дополнительное условие накладываемое на профиль давление:

$$P = (p/p_a) = 1, \text{где } p < p_a,$$

что похоже на граничное условие Гюмбеля в гидродинамических подшипниках.

В газодинамических подшипниках с жесткими стенками зона разряжения присуствует, и её учет не требует ни каких дополнительных условий.

14.5 Основные допущения математической модели газодинамического подшипника

- Слой жидкости тонкий, поэтому можно пренебречь силами инерции жидкости и градиентом давления в по толщине слоя
- Поток ламинарный
- Поток изотермический
- Жидкость в зазоре – «идеальный газ», т.е. для адиабатного изотермического процесса плотность пропорциональна давлению $p/\rho = Const$.

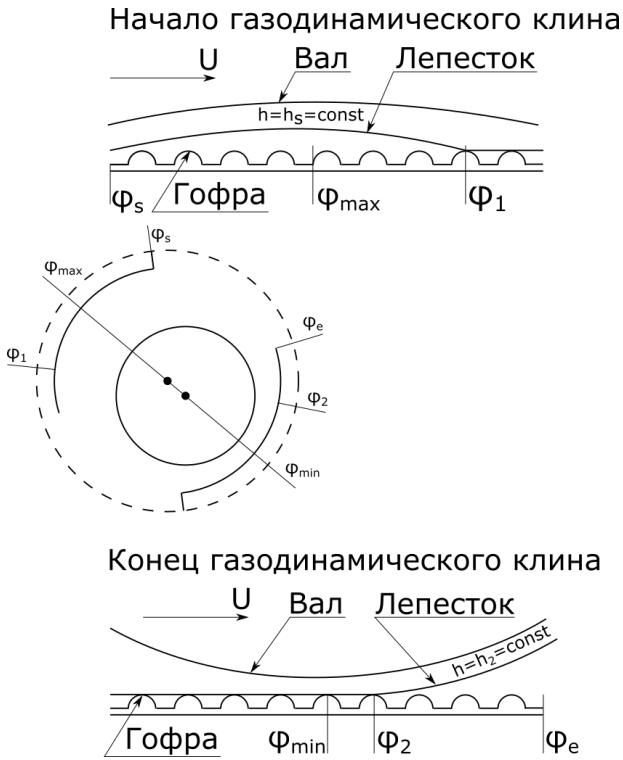


Рис. 14.2 – Пояснение к постановке граничных условий для зоны разряжения

14.6 Результаты расчета

Для каждого стационарного состояния подшипника скольжения, которое определяется частотой вращения ротора и внешней нагрузкой, рассчитывается следующий набор параметров:

Таблица 14.1

Название	Размерность	Комментарий
Коэффициент жесткости [K]	Н/м	Коэффициенты жесткости по двум степеням свободы ротора в направлениях X и Y
Коэффициент демпфирования [C]	Н*м/с	Коэффициенты демпфирования по двум степеням свободы ротора в направлениях X и Y

Координаты равновесного положения ротора [X/c, Y/c]	-	Координаты равновесного положения ротора X, Y отнесенные к величине заданного зазора
Эксцентриситет ротора [Epp]	-	Эксцентриситет ротора отнесенный к величине заданного зазора
Угол отклонения ротора [Psi]	°	Угол отклонения ротора от вертикальной оси, отсчитывается от оси –Y (минус Y).
Максимальное давление [Pmax]	Па	Значение максимального давления в пленке
Угол максимального давления [Pmax_angl]	°	Угловая координата точки максимального давления в пленке
Минимальны зазор [Hmin]	-	Величина минимального зазора в пленке, отнесенные к величине заданного зазора
Угол минимального зазора [Hmin_angl]	°	Угловая координата точки с минимальным зазором в пленке
Предельная скорость вращения [ThresSpeed]	об/мин	Предельная скорость в ращения при которой жесткий ротор будет сохранять стабильность на подшипнике скольжения при заданной силе веса
Стабилен ли подшипник [IsStable]	ДА / НЕТ	Стабилен ли жесткий ротор на подшипнике скольжения при заданной силе веса и скорости вращения
Потери мощности на трение [PwrLoss]	Вт	Потери мощности на трение в подшипнике скольжения
Торцевые утечки [SideFlow]	л/мин	Утечки масла из подшипника через торцы. (Только для гидродинамических подшипников)

Максимальная температура [Tmax]	°C	Максимальная температура в гидродинамической пленке
Критическая масса [CritMass]	кг	Предельная масса жесткого ротора, больше которой ротор будет сохранять стабильность на подшипнике скольжения при данной скорости вращения
Перемещения сегментов	[рад, м, м]	Перемещения сегментов в локальной системе координат каждого сегмента: один поворот и два смещения. Данный параметр вычисляется только для подшипников скольжения с самоустанавливающимися сегментами.

14.7 Общие исходные данные

Скорость вращения ротора ω [об/мин], список скоростей вращения для которых будет производиться расчет параметров подшипника скольжения.

Внешняя нагрузка Fx, Fy [Н], компоненты внешней нагрузки. Могут быть постоянными или переменными, функцией частоты вращения:

$$F = F_0 + F_1 \cdot \omega + F_2 \cdot \omega^2.$$

Свойства смазывающей жидкости:

- Название в базе данных (только для жидкостей). Если название отсутствует в базе данных, пользователь должен добавить новую позицию в базу данных свойств смазывающих жидкостей и занести свойства жидкости в базу
- Плотность жидкости/газа при рабочей температуре [кг/м^3]. Учитывается в расчете если включен режим прямого задания свойств жидкости. В таком случае уравнение энергии исключается из расчета, а плотности принимается равной заданной и постоянной по всему масляному слою.
- Динамическая вязкость жидкости [Па*сек]. Аналогично предыдущему пункту применяется только в режиме прямого задания свойств жидкости.

Свойства подачи масла в подшипник (только для гидродинамических подшипников):

- Коэффициент переноса тепла. Определяет какая часть тепла, сгенерированного в предыдущем сегменте, будет перенесена маслом в следующий сегмент. Пределы изменения коэффициента [0; 1].
- Температура масла на входе в подшипник [град. С].

Дополнительные настройки подшипник (только для гидродинамических подшипников):

- Граничные условия на границе зоны кавитации. Условия Гюмбеля:

$$\text{Если } P < 0, \text{то } P = 0$$

  Рейнольдса (Свифта – Штибера):

$$p = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0.$$

- Режим теплового расчета: изотермический – температура в масляном слое считается постоянной во всех точках и равной заданной, не изотермический – температура в масляном слое неравномерная и определяется из совместного решения уравнения Рейнольдса и уравнения энергии.
- Граничные условия теплового расчета: адиабатный расчет – отсутствие теплообмена между масляным слоем и стенками вала и корпуса подшипника, заданная температура поверхности вала и корпуса – поверхности вала и корпуса считаются изотермическими и имеют постоянную температуру равную заданной.

Количество узлов расчетной сетки m, n в окружном и осевом направлении соответственно.

14.8 Plain journal bearing. Цилиндрический подшипник скольжения

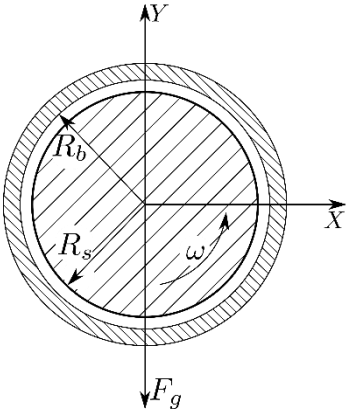


Рис. 14.3

Таблица 14.2

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c

14.9 Axial groove journal bearing. Цилиндрический подшипник с осевыми проточками

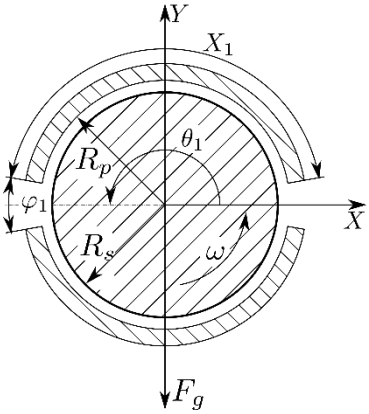


Рис. 14.4

Таблица 14.3

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение средней линии проточки	°	θ_i	groove_Arc_pos[]
6	Угол сектора проточки	°	φ_i	Grv_Arc_Ln[]

14.10 Offset half journal bearing. Подшипник со смещенными сегментами

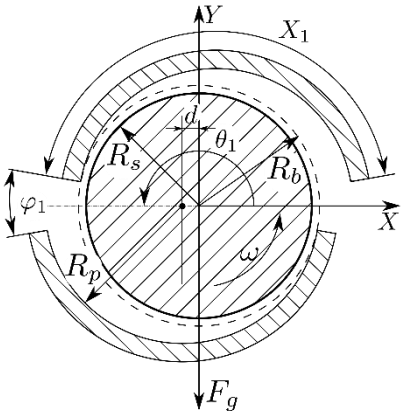


Рис. 14.5

Таблица 14.4

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Технологический Радиальный зазор (не сборочный)	м	Cp=Rp-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение средней линии проточки	°	θ_i	groove_Arc_pos[]
6	Угол сектора проточки	°	φ_i	Grv_Arc_Ln[]
7	Смещение сегментов	м	d	Lin_offset

14.11 Elliptical and multylobe journal bearing. Эллиптический и многоклиновый подшипник скольжения

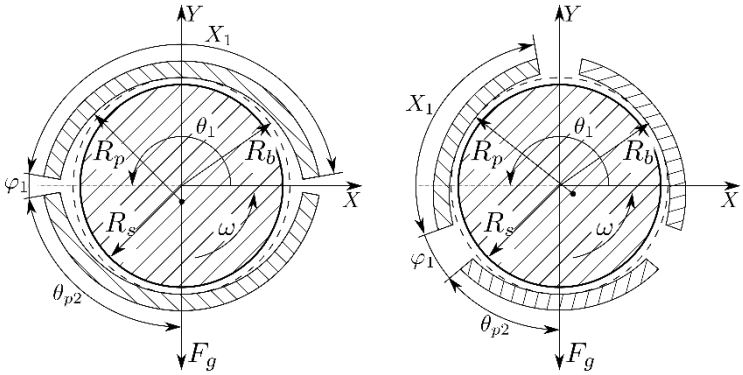


Рис. 14.6

Таблица 14.5

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Сборочный радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение средней линии проточки	°	θ_i	groove_Arc_Pos[]
6	Угол сектора проточки	°	φ_i	Relief_Grv_Len[]
7	Коэффициент формы	--	mf	preload[]
8	Относительное смещение сегмента	--	af	offset[]

Коэффициент формы – отношение дистанции между центром кривизны сегмента и геометрическим центром подшипника к радиальному зазору:

$$mf = 1 - \frac{c_b}{c_p}.$$

Относительное смещение сегмента – отношение сектора сходящейся части сегмента к полному сектору сегмента:

$$af = \frac{\theta_{pi}}{X_i}.$$

14.12 Tapered land journal bearing. Подшипник скольжения с клиновидной выборкой в сегментах

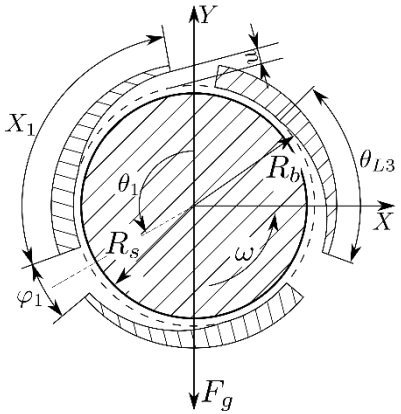


Рис. 14.7

Таблица 14.6

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение средней линии проточки	°	θ_i	groove_Arc_pos[]
6	Угол сектора проточки	°	φ_i	Grv_Arc_Ln[]

7	Угол сегмента клиновой выборки	°	θ_{Li}	Taper_Arc_Len[]
8	Глубина выборки на передней кромке сегмента	м	u	lob_undercut[]
9	Осевая длина выборки	м	L_l	Taper_Ax_Len[]

14.13 Pressure dam journal bearing. Подшипник скольжения с порогом

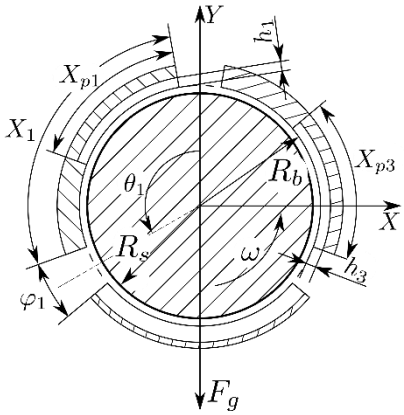


Рис. 14.8

Таблица 14.7

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение средней линии проточки	°	θ_i	groove_Arc_pos[]

6	Угол сектора проточки	°	φ_i	Grv_Arc_Ln[]
7	Угол сектора выборки материала	°	X_{pi}	Pocket_Arc_Len[]
8	Глубина выборки материала	м	h_i	Pocket_Depth[]
9	Осевая длина выборки	м	h_{gi}	Pocket_Axl_Len[]
10	Ширина круговой маслораспределительной канавки	м	L_{gp}	Relief_Grv_Len[]

14.14 Tilting pad journal bearing. Подшипник с самоустанавливающимися сегментами

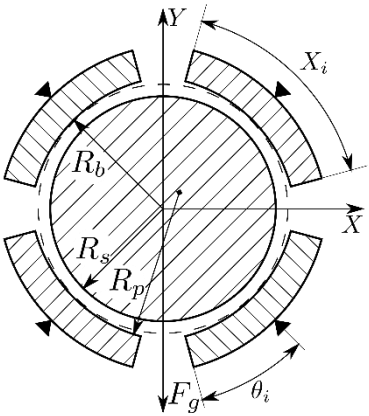


Рис. 14.9

Таблица 14.8

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	PadArcLen

5	Коэффициент формы	--	mf	PadPreload
6	Относительное смещение подвеса	--	af	PadPivotOffset
7	Направление силы тяжести	--	df	GravityForceDirection
8	Учет инерции сегментов	--	pi	PadInertiaInclude
9	Учет жесткостных свойств подвеса	--	pstfi	PivotStiffInclude

Коэффициент формы – отношение дистанции между центром кривизны сегмента и геометрическим центром подшипника к радиальному зазору:

$$mf = 1 - \frac{c_b}{c_p}.$$

Относительное смещение подвеса – отношение углового смещения подвеса от передней кромки сегмента к углу сектора сегмента:

$$af = \frac{\theta_i}{X_i}.$$

Направление силы тяжести возможно строго между сегментами либо по центру сегмента. По сути этот параметр определяет ориентацию сегментов относительно системы координат, вместе с тем на практике сегменты ориентируют обычно в одном из двух выше озвученных положений относительно силы тяжести.

В расчете возможен учет инерционных свойств сегментов. Он осуществляется в предположении, что сегменты совершают колебания с частотой прямой синхронной прецессии ротора. При включённом учете инерции сегментов пользователь должен ввести ряд дополнительных исходных данных (см. **Рис. 14.10**) :

Таблица 14.9

#	Название	Размерность	Обозначение
1	Масса сегмента	кг	mp
2	Момент инерции сегмента относительно центра тяжести	кг*м^2	Ip
3	Горизонтальное расстояние от точки подвеса до центра тяжести сегмента	м	B
4	Вертикальное расстояние от точки подвеса до центра тяжести сегмента	м	C

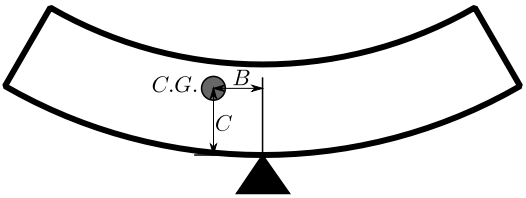
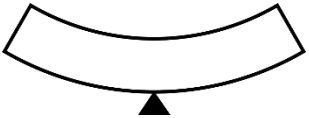
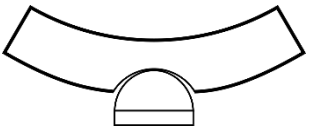
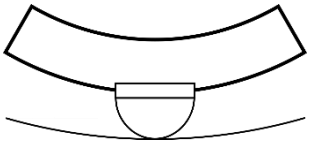
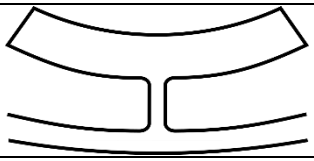


Рис. 14.10

В случае, когда конструкция подвеса сегмента не позволяет представить его в виде идеального шарнира, необходим учет его жесткостных свойств в расчете динамических характеристик подшипника. На данный момент в DynFB реализованы следующие типы подвеса сегментов:

Таблица 14.10

Идеальный шарнир	
Сферический подвес – шар внутри сферы	

Цилиндрический подвес – контакт по линии	
Сферический подвес – шар внутри цилиндра	
Упругий подвес	

Исходные данные для учета сферического и цилиндрического подвесов одни и те же, но имеют различный смысл в зависимости от выбранного типа (см. **Рис. 14.11, Рис. 14.12**):

Таблица 14.11

#	Название	Размерность	Обозначение
1	Модуль упругости материала подвеса	Па	Ep
2	Модуль упругости материала корпуса	Па	Eh
3	Коэффициент Пуассона материала подвеса	--	vp
4	Коэффициент Пуассона материала корпуса	--	vh
5	Диаметр подвеса	м	Dp
6	Диаметр корпуса	м	Dh
7	Эффективная ширина сегмента	м	Leff

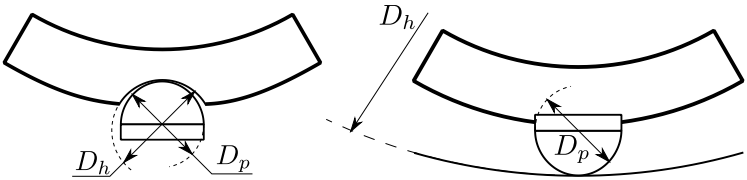


Рис. 14.11

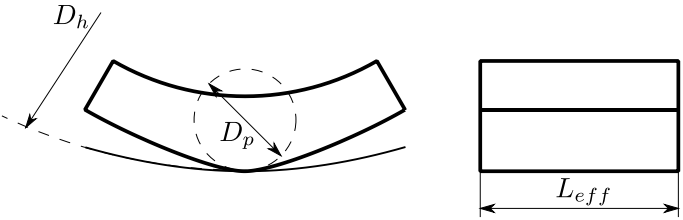


Рис. 14.12

Упругий подвес моделируется консольно закрепленной балкой прямоугольного сечения (см. **Рис. 14.13**).

Таблица 14.12

#	Название	Размерность	Обозначение
1	Модуль упругости материала подвеса	Па	Ep
2	Эффективная длина упругой части	м	Leff
3	Площадь поперечного сечения упругого элемента	м^2	A
4	Момент инерции сечения упругого элемента в направлении изгиба	м^4	I

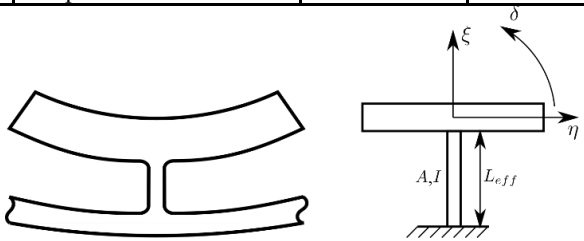


Рис. 14.13

14.15 Gas bearing. Цилиндрический газодинамический подшипник

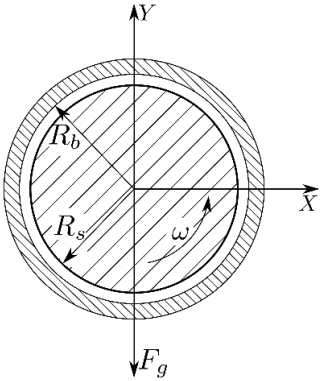


Рис. 14.14

Таблица 14.13

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	C
4	Ориентационный угол	°	α	OrientationAngle

14.16 Multilobe gas bearing. Многоклиновый газодинамический подшипник

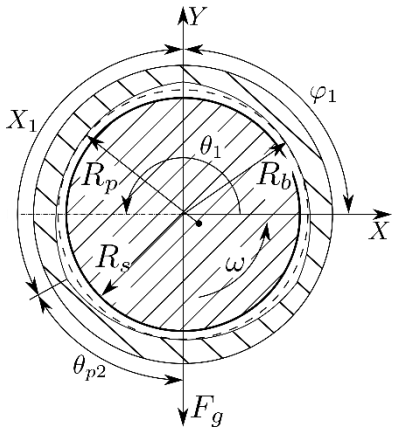


Рис. 14.15

Таблица 14.14

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Сборочный радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Угол сектора сегмента	°	X_i	Pd_Arc_Ln[]
5	Угловое положение входной кромки первого сегмента	°	φ_1	firstEdgeLocatior
6	Коэффициент формы	--	mf	preload[]
7	Относительное смещение сегмента	--	af	offset[]

14.17 Air foil bearing. Лепестковый газодинамический подшипник

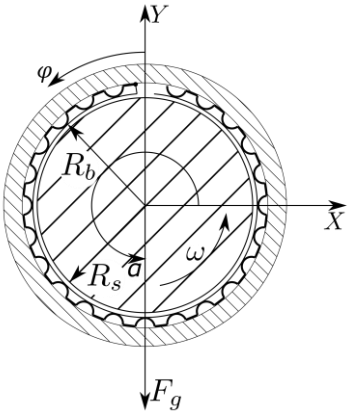


Рис. 14.16

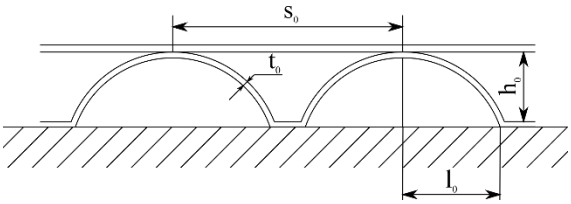


Рис. 14.17

Таблица 14.15

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Радиус вала	м	Rs	R
2	Длина подшипника	м	L	L
3	Сборочный радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Высота выступа гофры	м	h_0	BMh
5	Половина длины выступа гофры	м	l_0	BMl

6	Ширина гофры	м	w	BMw
7	Толщина листа гофры	м	t_0	BMt
8	Шаг выступов гофры	м	s_0	BMs
9	Коэффициент Пуассона материала гофры	--	ν	BMnu
10	Модуль упругости материала гофры	Па	E	BME
11	Коэффициент трения	--	Fmu	Fmu
12	коэффициент поглощения энергии	--	η	eta
13	Ориентационный угол	°	α	OrientationAngle

При моделировании таких подшипников применяется по сути две основные модели трения: модель вязкого трения и модель гистерезисного трения.

$$P = K_b(1 + i\eta)U,$$

Где P – безразмерное давление, K_b – безразмерный коэффициент жесткости упругого слоя, i – мнимая единица, η – коэффициент поглощения энергии. Как легко заметить, при использовании модели гистерезисного трения, давление является комплексным числом, а значит комплексными будут и силы в подшипнике. В этом случае, уравнение Рейнольдса для производных давления по перемещению (метод бесконечно малых отклонений) решается в комплексном виде, что позволяет получить матрицу механического импеданса. А из неё матрицы жесткости и демпфирования подшипника.

Все основные уравнения DynFB, в части газодинамических подшипников, построены на модели вязкого трения. Однако, при условии, что ротор совершает круговую прецессию, можно без труда осуществить переход от модели гистерезисного трения к модели вязкого трения и получить эквивалентные коэффициент вязкого демпфирования.

$$C_{eq} = \frac{\eta K_b}{\gamma},$$

Таким образом можно учесть коэффициент поглощения η в уже реализованной математической модели.

14.1 Annular seal. Щелевое уплотнение (жидкость)

Для расчета щелевого уплотнения можно выбрать шаблон «t31 AnnularSealBlack 1200» (с использованием модели Black & Jenssen [42]) или «t32 AnnularSealChilds05 37360» (с использованием модели Childs [43]). Шаблоны предназначены для расчета уплотнения на 1200 и 37360 об / мин соответственно.

Допущения:
1) анализ короткого уплотнения
2) Вибрации небольшие по сравнению с центральным положением.

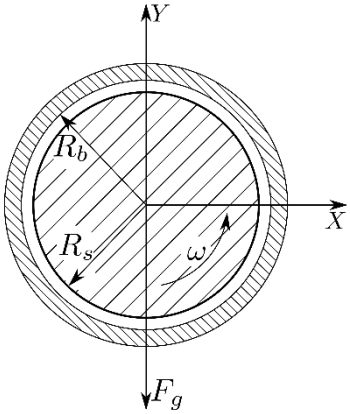


Рис. 14.18

Таблица 14.16

#	Название	Размерность	Обозначение	Обозначение в интерфейсе
1	Диаметр вала	м		D
2	Длина уплотнения	м	L	L
3	радиальный зазор	м	Cb=Rb-Rs	c
4	Перепад давления постоянная часть	Pa		deltaP0

5	Перепад давления линейная часть P=deltaP1*rpm	Pa*rpm		deltaP1
6	Перепад давления нелинейная часть P=deltaP2*rpm^2	Pa*rpm^2		deltaP2
7	Коэффициент потерь на входе	-		inlet_loss
8	Коэффициент завихрения на входе	-		Inlet_Swirl_Ratio

Перепад давления расчитывается как:

$$deltaP = deltaP0 + deltaP1 * \omega + deltaP2 * \omega^2$$

14.2 Графический интерфейс пользователя

В DYNAMICS R4 встроен графический интерфейс пользователя для работы с программой DynFB. Диалог может быть вызван из меню «Сервис\Подшипники скольжения», **Рис. 14.19**.

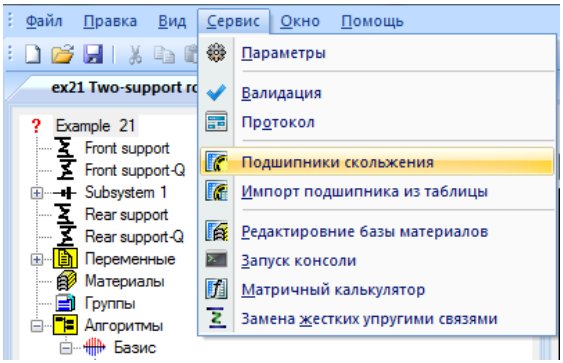


Рис. 14.19

Диалог работы с DynFB представлен на **Рис. 14.20** ниже. Диалог позволяет подготавливать расчетную конфигурацию подшипника, запускать расчет, просматривать результаты расчета, генерировать в модели новые связи моделирующие параметризованный по частоте вращения подшипник скольжения.

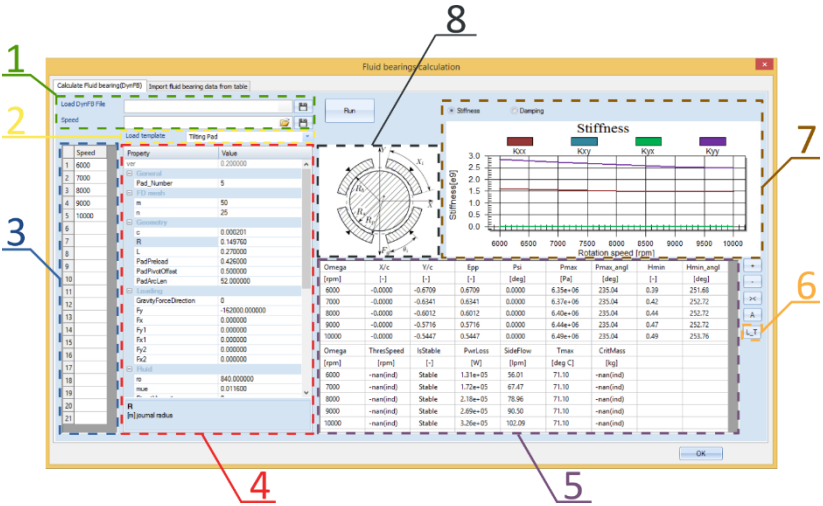


Рис. 14.20

Цифрами на рисунке обозначены следующие группы элементов:

1. Пути к файлам конфигурации расчетной модели и списка скоростей. Вызов диалога сохранения текущей конфигурации и списка скоростей.
2. Выбор шаблона подшипника скольжения, доступны следующие шаблоны:
    - Цилиндрический подшипник с двумя осевыми проточками “ t0 Two Axial Groove ”
    - Подшипник со смещенными сегментами “ t1 OffsetHalf Bearing ”
    - Подшипник с эллиптической расточкой “ t2 Elliptical ”
    - Многоклиновый подшипник “ t2 Multi-Lobe ”
    - Подшипник с клиновидной выборкой “ t3 Taper Land ”
    - Подшипник с порогом “ t4 Pressure Dam ”
    - Цилиндрический подшипник “ t5 Plain Journal ”
    - Подшипник с самоустанавливающимися сегментами, подвес сегментов – идеальный шарнир “ Tilting Pad ”
    - Подшипник с самоустанавливающимися сегментами, подвес сегментов – сфера внутри сферы “ Tilting Pad Ball Contact ”
    - Подшипник с самоустанавливающимися сегментами, подвес сегментов – цилиндрический “ Tilting Pad Line Contact ”

- Подшипник с самоустанавливающимися сегментами, упругий подвес сегментов “ Tilting Pad Web Pivot ”
- Цилиндрический газодинамический подшипник
- Многоклиновый газодинамический подшипник
- Лепестковый газодинамический подшипник

3. Список скоростей вращения, для которых будет производиться расчет параметров
4. Основное поле ввода исходных данных
5. Поле вывода результатов расчета (см. **Таблица 14.1**). Результаты представлены в удобной табличной форме. Во время расчета в данное поле происходит вывод промежуточной информации непосредственно из программы DynFB. Эти данные можно использовать для контроля сходимости расчета по значениям вычисленных опорных реакций (Fx, Fy), они должны быть равны заданным нагрузкам с противоположным знаком. Также контроль можно осуществлять по вычисленным значениям приведенных (к зазору) перемещений ротора. Ели значения приведенных перемещений значительно больше 1, то скорее всего расчет завершился не корректно и требуется проверить исходные данные.
6. Пользователь может просмотреть вывод программы DynFB и по завершении расчета, нажав кнопку L_T (см. **Рис. 14.21**).
7. График изменения жесткости или демпфирования по частоте вращения.
8. Схема выбранного типа подшипника.

По завершении расчета выбранной конфигурации, рассчитанные коэффициенты жесткости и демпфирования автоматически передаются на вкладку “Import fluid bearing from table” **Рис. 14.22**, которая является диалогом “Import bearing from table” (см. **п.п. 13.5**). С помощью данного диалога пользователь может легко импортировать параметризованную связь, моделирующую подшипник скольжения, в состав роторной системы.

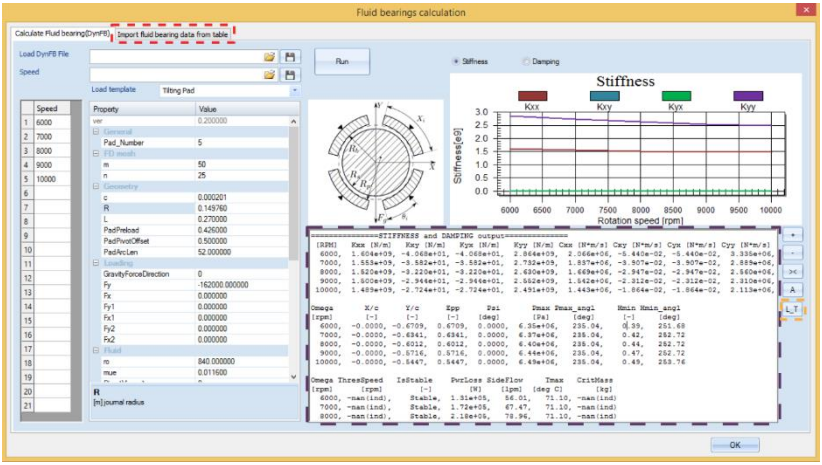


Рис. 14.21

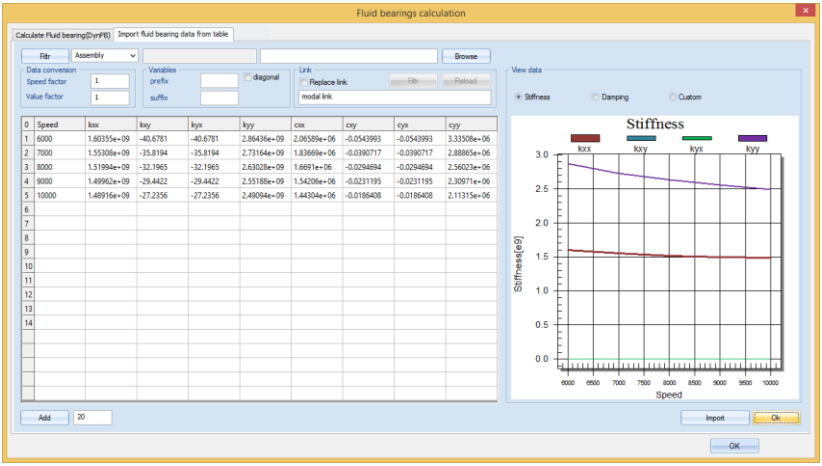


Рис. 14.22

15 АЛГОРИТМЫ СТАЦИОНАРНОГО АНАЛИЗА

К алгоритмам стационарного анализа относятся:

- Базис**[Basis]**
- Частоты собственных колебаний **[Natural frequencies]**
- Карта собственных частот **[Natural frequency map]**
- Критические частоты вращения **[Critical speeds]**
- Дисбалансное поведение**[Unbalance response]**
- Параметрический анализ**[Parameter analysis]**

Следует отметить, что данные алгоритмы предназначены для расчета линейных систем. Анализ нелинейных систем ведется в блоке нестационарного анализа.

В случае если в созданной модели находятся нелинейные элементы, то алгоритмы при расчете игнорируют их. Это следует иметь в виду, так как в некоторых случаях полученный базис не будет достаточен для последующего анализа. Также может быть нарушена точность последующих расчетов, а прочие результаты не будут соответствовать представлениям пользователя. Например, если ротор опирается только на подшипники скольжения, то базис и все последующие результаты будут получены для свободного ротора.

Набор алгоритмов для рабочего проекта формируется из БД алгоритмов. Для переноса алгоритма в проект пользователю достаточно выделить в меню БД соответствующий алгоритм и сделать двойной клик левой клавишей мыши. Алгоритм автоматически будет перенесен в БД алгоритмов проекта, **Рис. 15.1**.

Любой алгоритм сопровождается функциональным окном для его настройки и ввода параметров. Для открытия окна требуется просто выделить алгоритм в меню проекта. Запуск алгоритма в работу осуществляется кнопкой **[Start]**.

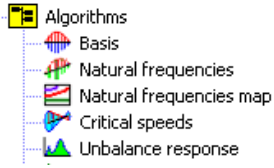


Рис. 15.1

ЗАМЕЧАНИЕ: При работе одного алгоритма желательно не запускать другие алгоритмы программной системы. Тем не менее параллельная работа алгоритмов допускается

15.1 Базис[Basis]

Расчет собственных частот и динамического поведения роторной системы использует методы модального синтеза и анализа, в основе которых лежит предварительное определение базового набора частот и форм собственных колебаний (базиса) в некотором частотном диапазоне. Этот набор рассчитывается в предположении отсутствия вращения роторов и какого-либо демпфирования.

Базис включает частоты и формы для всех типов вибраций – поперечных колебаний (в вертикальной и горизонтальной плоскости), осевых и крутильных.

Расчет базиса проводится после того, как создана динамическая модель роторной системы путем нажатия кнопки **[Start]**. После расчета все собственные частоты и формы сортируются и показываются в списке попарно. Для каждой частоты после ее выделения выводится соответствующая форма колебаний.

Рис. 15.2 показывает окно, где представлены частоты базиса. Выделение собственной частоты приводит к появлению в основном окне соответствующей этой частоте формы колебаний.

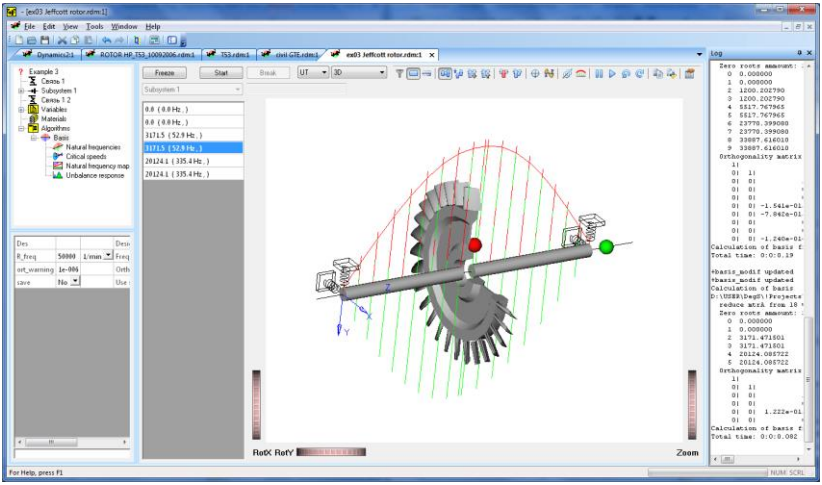


Рис. 15.2

Функциональные кнопки различных типов позволяют вывести результаты в различной форме их представления.

При расчете базиса рассчитывается матрица ортогональности форм колебаний, которая позволяет контролировать созданную модель и правильность расчета. Открыв закладку **[Log],** пользователь может увидеть столбец рассчитанных частот базиса и матрицу ортогональности, **Рис. 15.3.**

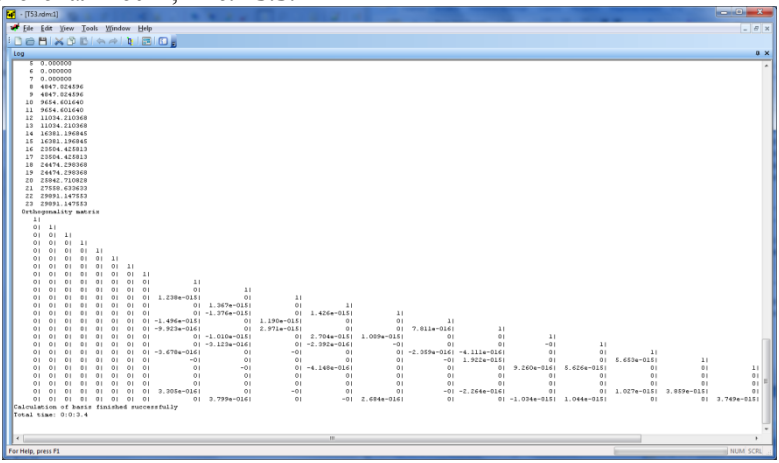


Рис. 15.3

Одновременно с графическим выводом пользователь может получить, как и в случае базиса, форму колебаний в виде таблицы, а также получить распределение потенциальной и кинетической энергии по подсистемам, связям и элементам подсистем.

Вывод может быть произведен двумя путями:

- через функцию **[Protocol]**
- непосредственно в главном окне вывода, путем выбора команды **[Table]**, **Рис. 15.4**

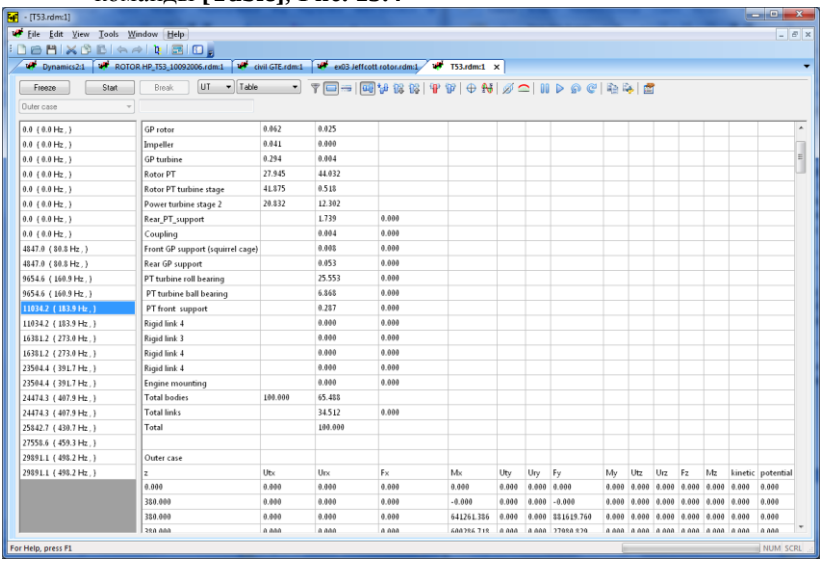


Рис. 15.4

Данные выводятся для каждой формы колебаний в отдельности.

ЗАМЕЧАНИЕ: Следует иметь в виду, что перед выполнением всех алгоритмов при необходимости предварительно проводится автоматический пересчет базиса. Это позволяет пользователю избежать ошибок при выполнении вариантных расчетов. Программа в ходе работы пользователя отслеживает изменения параметров модели, которые требуют пересчета алгоритма Базис.

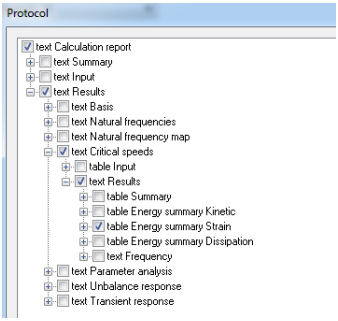
Для ускорения расчетов рекомендуется посчитать Базис вручную. Тогда при запуске каждого другого алгоритма не будет проводиться

пересчет базисных форм колебаний, который может занимать значительное время на сложных системах

ЗАМЕЧАНИЕ: Все рассчитанные формы колебаний выводятся в нормированном виде. У пользователя есть возможность нормирования форм через соответствующий диалог (см. далее)

Табличные данные могут быть скопированы для использования в стандартных графических программах, например, для **Microsoft Excel®.**

В режиме протокола имеется возможность вывода информации по энергиям в одной таблице для всех частот, подсистем и связей (**Рис. 15.5**). Таблицы выводятся отдельно для кинетической, потенциальной энергий.



Energy summary Strain

Designation	0	0	2308.77	2476.77	3107.9	5041.67	6339.81
	0	0	0.0229	0.0224	0	0.0025	0
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
HP	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.26	2.98
LP	0.0	0.0	5.63	7.1	100.0	85.22	0.0
L2_2	0.0	0.0	0.05	0.26	0.0	0.0	97.02
L1_2	0.0	0.0	0.16	0.19	0.0	2.03	0.0
L1_19	0.0	0.0	0.17	0.2	0.0	0.39	0.0
L1_30	0.0	0.0	0.91	1.33	0.0	8.49	0.0
L1_52	0.0	0.0	1.18	0.99	0.0	0.78	0.0
L1_58	0.0	0.0	91.38	89.34	0.0	2.82	0.0

Рис. 15.5

Точность результатов расчета всех алгоритмов в программе зависит от полноты расчета базиса. Чем больше форм насчитано в базисе, тем точнее результаты модальных алгоритмов. Но чем более полно рассчитан базис, тем больше времени будет уходить на расчет остальных алгоритмов. Алгоритмы редуцирования систем уравнений на основе методов Модального синтеза позволяют добиться высокой скорости расчетов при приемлемой точности результатов. В большинстве случаев для Нестационарных расчетов (только линейные элементы, «небольшие» гироскопы) достаточно удвоенного по отношению к рабочим оборотам диапазона расчета базиса. В случае присутствия в модели нелинейных элементов, элементов с большими

гироскопическими моментами (зависят от величины диаметральных моментов инерции и скорости вращения ротора), квазилинейных связей с сильно меняющимися коэффициентами жесткости и демпфирования по режимам (особенно характерно для подшипников скольжения) необходима настройка системы на оптимальное соотношение производительности и точности расчета. Для этого проводится несколько расчетов для разных диапазонов базиса и определяется тот диапазон, при котором изменение результатов становится незначительным. В линейных алгоритмах это могут быть частоты в алгоритме **[Карта собственных частот]**, положение резонансных пиков на АЧХ алгоритма **[Дисбалансное поведение]**. Например, пользователю может быть достаточно 1 - 5% точности определения частоты колебаний или положения резонансного пика.

Проверить корректность реакций в Нелинейном анализе можно, просуммировав реакции по всем связям и сравнив с приложенной нагрузкой (суммой нагрузок). Это самый точный метод, но в сложных моделях он может быть трудноосуществим. Можно также провести несколько расчетов с разным диапазоном базиса. Контролируется изменение величины реакции.

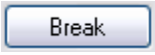
15.2 Управление выводом и отображением форм колебаний

На **Рис. 15.6** представлена часть поля с находящимися на нем кнопками, с помощью которых пользователь может вывести ту или иную информацию по частотам и формам колебаний.

Рис. 15.6

- кнопка режима постоянного сохранения полученного изображения (это может быть модель динамической системы либо результаты анализа) в центральном окне программы. Например, пользователь может зафиксировать окно для вывода результатов нестационарного анализа и работать с моделью.

- кнопка запуска расчетов динамической модели по предварительно выбранному в окне проекта алгоритму.



- кнопка прерывания расчетов.

- кнопка выбора параметра, по которому будет отображаться форма колебаний. Возможен вывод форм колебаний по перемещению, углу поворота, силе и моменту.

- кнопка выбора способа вывода формы колебаний – в виде графического отображения 3D либо в форме таблицы.

- кнопка перехода к выводу одной подсистемы.

- список для выбора подсистемы (работает только после нажатия кнопки).

- кнопка отображает орбиты прецессионного движения в плоскости экрана (для отображения форм критических частот вращения). Нажатие на кнопку несколько раз меняет вид модели. Вид слева, вид справа

- отображает форму колебаний в плоскости экрана. Последовательное нажатие меняет вид в плоскости XZ, YZ

- высвечивает или удаляет орбиты прецессионного движения точек роторной системы (для отображения форм критических частот вращения).

- включение отображения линии формы.

- кнопки управления анимацией изображения форм колебаний.

- пауза.

- начать анимацию.

- дискретная анимация в направлении против часовой стрелки.

- дискретная анимация в направлении по часовой стрелке.

- кнопка копирования формы колебаний в буфер обмена.

- кнопка копирования формы колебаний в буфер обмена с автоматизацией вставки в последний активный документ Word, используются шаблоны на Python (C:\Program Files\Alfatran\DynamicsR4\Script\Python\helper\automate_word.py и модуль win32com)

- кнопка вывода окна для настройки опций отображения 3D вида текущей модели, **Рис. 15.7**. Опции включают в себя:

- Установка цвета фона окна
- Управление видимости форм колебаний сквозь модель
- Коэффициент масштаба координатной системы подсистем, сборок 0 - отображение отсутствует
- Коэффициент масштаба изгибных форм колебаний
- Коэффициент масштаба крутильных форм колебаний
- Масштаб отображения формы в режиме 3Д анимации в дисбалансном поведении
- Масштаб орбит в 3Д окне постобработчика орбиты

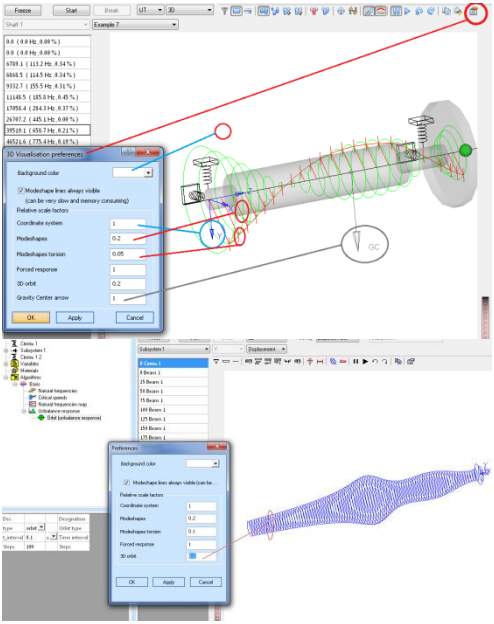


Рис. 15.7

В нижней части экрана находятся “колеса”, с помощью которых можно вращать изображение вокруг оси X или Y, а также масштабировать изображение.

Небольшим движением курсора, зафиксированного левой клавишей мыши на форме, можно заставить изображение модели и формы двигаться в указанном направлении. Последующим нажатием левой клавиши мыши движение можно остановить.

15.3 Частоты собственных колебаний [Natural frequencies]

Этот алгоритм рассчитывает демпфированные (при наличии демпфирования в роторной системе) или недемпфированные частоты и формы колебаний динамической системы.

Частоты в окне **[Журнал]** выводятся в комплексной форме с действительной и мнимой частью.

В отличие от базиса, частоты и формы собственных колебаний могут рассчитываться с учетом частоты вращения роторов. В этом случае ротор совершает пространственное движение, **Рис. 15.8.**

В случае одного направления движения роторов, орбиты прямого прецессионного движения высвечиваются зеленым цветом, обратного прецессионного движения – синим цветом.

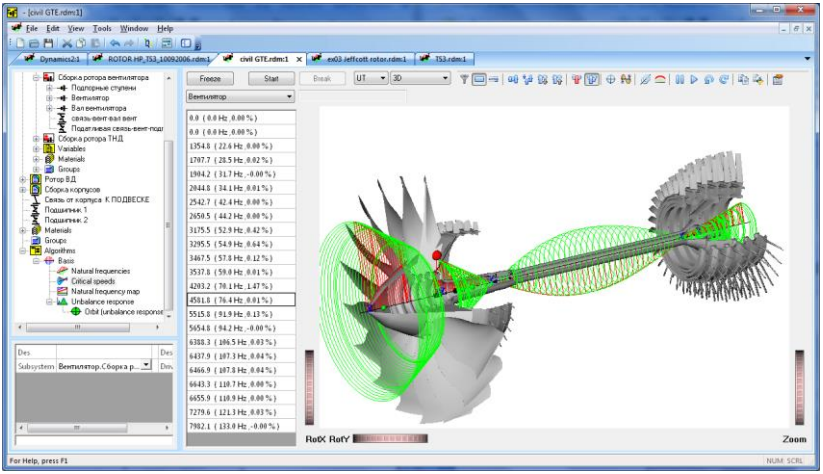


Рис. 15.8

Окно настройки алгоритма показано на **Рис. 15.9.**

Рис. 15.9

Параметр **t_pr** определяет режим динамической системы, для которого рассчитываются собственные частоты.

Одновременно с графическим выводом пользователь может получить, как и в случае базиса, форму колебаний в виде таблицы, а также получить распределение потенциальной и кинетической энергии по подсистемам, связям и элементам подсистем.

15.4 Карта собственных частот[Natural frequency map]

Карта частот собственных колебаний показывает влияние частоты вращения ротора на частоты прямых и обратных прецессий роторной системы, **Рис. 15.10.**

На карте выводятся линии собственных частот, а также линии частот вращении роторов. Нисходящие линии собственных частот соответствуют частотам обратных прецессий роторной системы. Восходящие линии соответствуют частотам прямых прецессий ротора. Точки пересечения линий частот вращения роторов с линиями частот собственных колебаний определяют критические частоты вращения роторов динамической системы. Пользователь может воспользоваться функцией ZOOM (выделить мышкой область графика), чтобы вывести любую часть частотной карты.

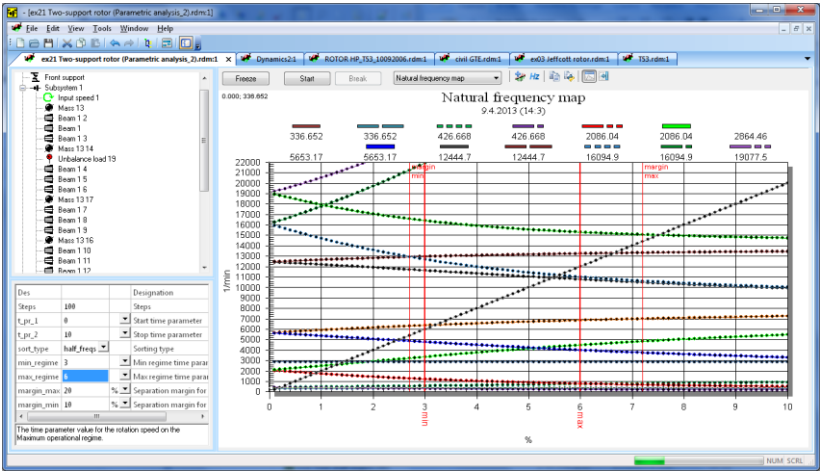


Рис. 15.10

Карта собственных частот строится в частотном диапазоне от **[t_pr_1]** до **[t_pr_2],** устанавливаемом пользователем. Количество шагов расчета в выбранном частотном диапазоне устанавливается параметром **[Steps]**.

Для упорядочивания вывода линий частотной карты и карт устойчивости используются алгоритмы сортировки. По умолчанию установлен алгоритм [**half freqs**]. Алгоритм [**half freqs**].упорядочивает полученные собственные частоты по признаку подобия форм колебаний на соседних режимах. Параметры**[max_regime]**

и**[min_regime]** определяют значения временного параметра, соответствующего скорости вращения для максимального и минимального режима работы. **[margin_max]**, **[margin_min]**– дополнительные границы, устанавливаемые пользователем.

Расчет проводится после нажатия кнопки **[Start]**. Окно параметров показано на **Рис. 15.11**

Des			Название
Steps	100		Количество шагов
t_pr_1	0		Начальное значение временного параметра
t_pr_2	1e+006		Конечное значение временного параметра
sort_type	no_sorting		Sorting type
min_regime	2		Временной параметр для минимального режима
max_regime	5		Временной параметр для максимального режима
margin_max	20	%	Запас по диапазону на критические скорости на ма
margin_min	15	%	Запас по диапазону на критические скорости по отн

Рис. 15.11

- Кнопка позволяет добавить в модель алгоритм **[Собственные частоты]** с настройками, соответствующими текущей точке на графике частот. Таким образом, если пользователь хочет посмотреть форму колебаний для конкретной частоты на определенном режиме, он может щелкнуть мышью на точке линии на графике Карты собственных частот, курсор установится на точку на графике. После этого можно нажать на кнопку и перейти во вновь созданный алгоритм **[Собственные частоты]**. При этом параметр **[t_pr]** будет соответствовать текущей точке, а после расчета в списке частот будет выделена нужная частота.

- Кнопка для моделей с противоположным вращением роторов для построения Карты собственных частот имеет смысл вывод скоростей роторов по модулю. Зажатая кнопка (по умолчанию) служит для принудительного отображения в положительной области частот вращения роторов в отрицательном направлении.

Одновременно с картой собственных частот пользователь может получить карту устойчивости, **Рис. 15.12.** Для каждой формы колебаний выводится либо логарифмический декремент**[Logarithmic Decrement],**

либо коэффициент относительного демпфирования**[Damping Ratio]** в зависимости от временного параметра**.**

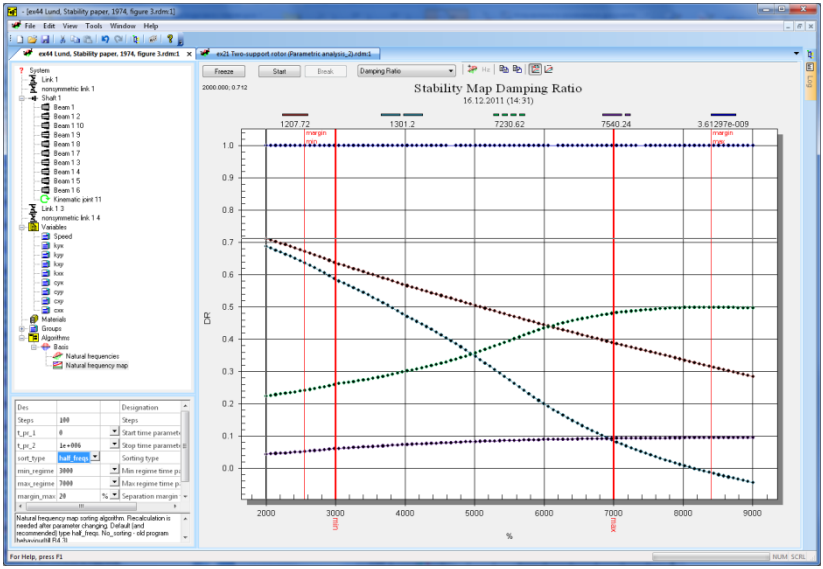


Рис. 15.12

Также может быть получена зависимость коэффициента относительного демпфирования от частоты собственных колебаний **Locus chart Logarithmic Decrement (Locus Lndec) и Locus chart Damping Ratio (Locus DR)**, **Рис. 15.13**

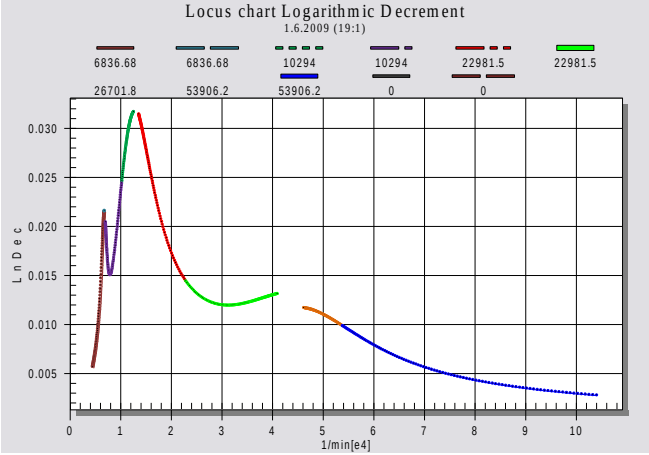


Рис. 15.13

Для карты Locus DR может быть дополнительно получен вывод результатов в соответствии с требованиями стандарта API 610 - Центробежные насосы (**Рис. 15.14**).

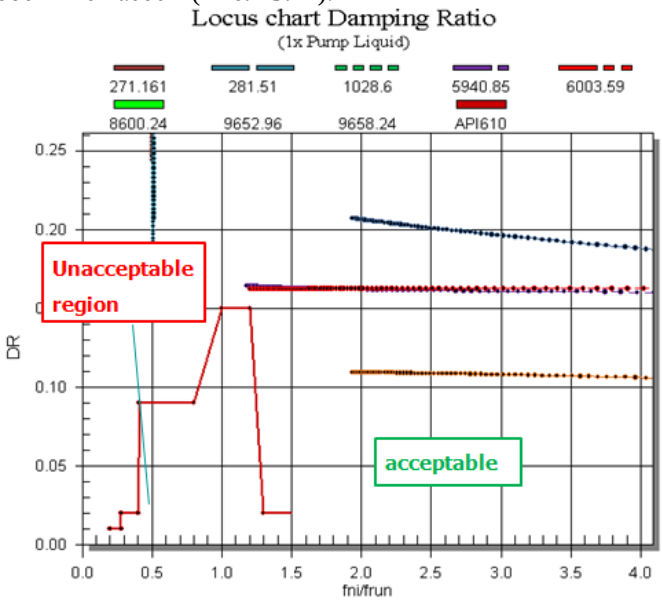


Рис. 15.14

По оси абсцисс откладывается отношение значений собственных частот к значению скорости вращения на режиме(fri/frun). Дополнительно

выводится граница области при попадании в которую необходимо проведение дополнительных расчетов системы.

15.5 Критические частоты вращения[Critical speeds]

Данный алгоритм рассчитывает критические демпфированные формы колебаний роторной системы. При этом в случае многороторной системы пользователь может рассчитать критические частоты каждого ротора отдельно, **Рис. 15.15**.

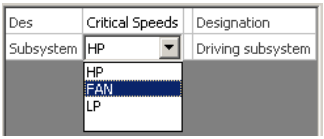


Рис. 15.15

Частоты и формы колебаний системы, соответствующие критической частоте вращения, выводятся аналогично частотам собственных колебаний в окне вывода, **Рис. 15.16**, **Рис. 15.17**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Расчет критических частот вращения может быть проведен только при задании частотного диапазона с помощью элемента**[Kinematic joint]**

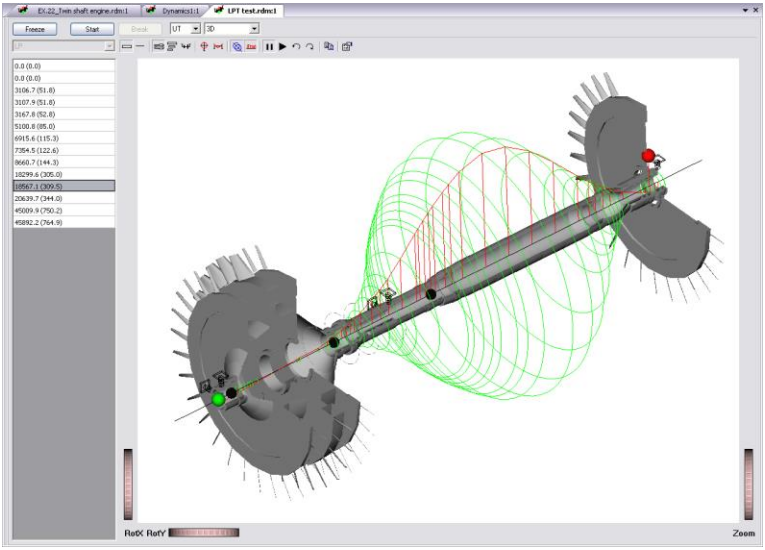


Рис. 15.16

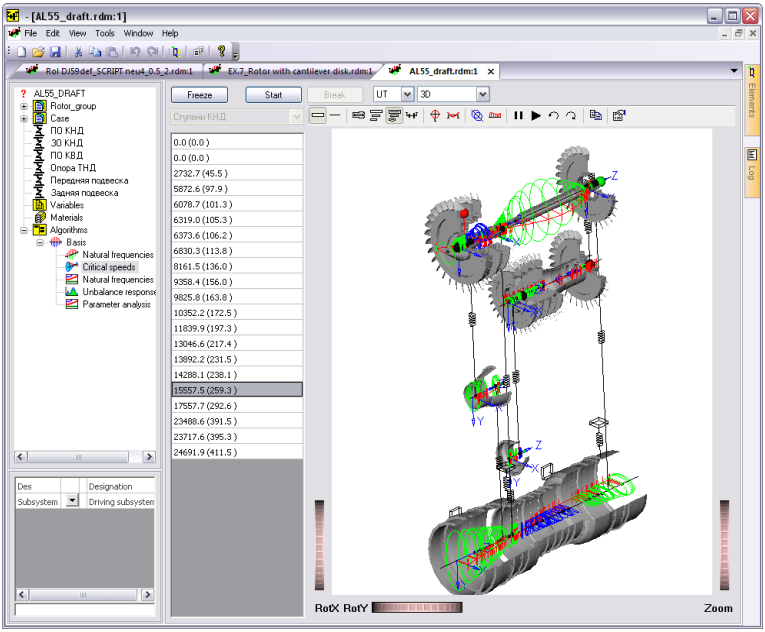


Рис. 15.17

Как и в случае частот собственных колебаний, пользователь может получить распределение потенциальной и кинетической энергий по подсистемам, связям и элементам подсистем динамической системы.

15.6 Дисбалансное поведение [Unbalance response]

Алгоритм **[Unbalance response]** предназначен для расчета поведения роторной системы от действия дисбалансов.

Пользователь может рассчитать дисбалансное поведение системы от единичного дисбаланса либо от системы дисбалансов только одного ротора.

В стационарной постановке он получает дисбалансное поведение в любой точке модели с частотой соответствующего ротора.

Для того чтобы получить динамическое поведение от системы роторов, пользователь должен перейти к нестационарным расчетам.

ЗАМЕЧАНИЕ: Задание дисбалансов ведется в процессе создания модели. Пользователь может, используя элемент **[Group],** создавать группы дисбалансов. Последовательно подключая эти группы дисбалансов, пользователь получает возможность анализировать различные резонансные состояния от различных систем дисбалансов.

Выбор алгоритма **[Unbalance response]** сопровождается появлением соответствующих полей ввода параметров и вывода результатов.

Des	Unbalance response		Designation
Steps	500		Steps
t_pr_1	0		Start time parameter
t_pr_2	10		Stop time parameter
show AF and SM	yes		Show AF and SM labels
show AF lines	No		Show AF auxiliary lines
show operating speeds	yes		Show operating regimes lines
min_regime	3		Min operating regime
max_regime	5		Max operating regime

Рис. 15.18

На Рис. 15.18 показано окно для ввода шага, с которым будет проводиться расчет амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик, а также ввода диапазона вывода АЧХ и ФЧХ.

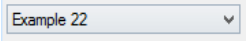
Таблица 15.1 Описание параметров элемента

Обозначение	Описание параметра
Steps	Количество точек АЧХ во всем расчетном диапазоне. На графике точки соединяются линейными отрезками.
t-pr_1	Параметр определяет левую границу диапазона вывода АЧХ
t_pr_2	Параметр определяет правую границу диапазона вывода АЧХ
show AF and SM	Yes или No. Управление выводом на график значений AF SM (см. ниже)
show AF lines	Yes или No. Вывод на график дополнительных линий для расчета AF
show operating speeds	Yes или No. Вывод на график дополнительных линий обозначающих границы рабочих режимов
min_regime	t_pr соответствующий минималльному режиму
max_regime	t_pr соответствующий максимальному режиму

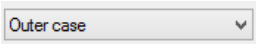
Окно вывода результатов включает поля управления выводом, **Рис. 15.19**.

Рис. 15.19

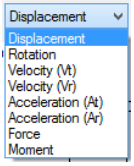
Для вывода результатов расчета пользователь пользуется следующими окнами настроек:



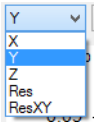
- фильтр по сборкам для списка подсистем и связей



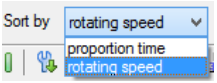
- выбор подсистемы для вывода данных;



- выбор параметра, по которому будет проводиться вывод;

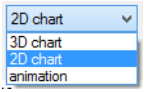


- выбор проекции вектора параметра на ось. Res – вывод результирующих значений ($\sqrt{x^2+y^2+z^2}$); ResXY – вывод результирующих значений ($\sqrt{x^2+y^2}$);



- выбор параметра оси X;

- выбор подсистемы, по скорости которой будет проводиться вывод данных;



- выбор способа вывода графика;

- приостановка расчета;

- сохранить настройки графика (программа запоминает настройки графика между запусками);

- применить к графику ранее сохраненные настройки ;

- скопировать график в буфер обмена. Копируется изображение с графиками со сторонами 1500* 750;

- копируется график в буфер обмена и вставляется в последний открытый документ Word (используются Python шаблоны (DynamicsR4\Script\Python\helper\automate_word.py, модуль win32com);

- для одного или нескольких графиков копируются в буфер обмена и выводятся в панель журнала значения для выделенной на графике точки;

- запускает диалог экспорта графика;

- вывод подписей для экстремумов на графике. При зажатой клавише Ctrl выводится только подпись самого большого по модулю значения. При зажатой клавише Shift выводится подпись для текущей точки на графике;

- кнопки управления выводом легенды к графикам;

- перевод оси из rpm в Гц при сортировке по оборотам в результатах алгоритмов [Дисбалансное поведение] и [Нелинейный анализ]

- кнопка добавления к графику АЧХ фазо-частотной характеристики (ФЧХ);

- используется для расчета и вывода деформаций и реакций;
- Вывод одновременно нескольких графиков с независимыми осями ординат. Например, наложение графика скорости вращения на график виброперемещения

- вывод значений коэффициентов усиления и запасов по отстройке от рабочих режимов в соответствии с API RP684

В случае вывода 2D-графика пользователь должен определить подсистему и ее сечение для вывода**, Рис. 15.20**.

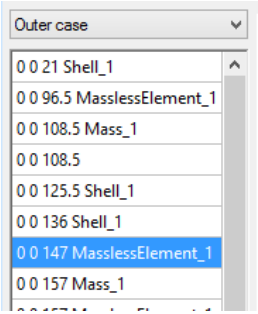


Рис. 15.20

На **Рис. 15.21** показано окно полученной АЧХ.

ЗАМЕЧАНИЕ: Вывод АЧХ соответствует половине Peak-to-Peak.

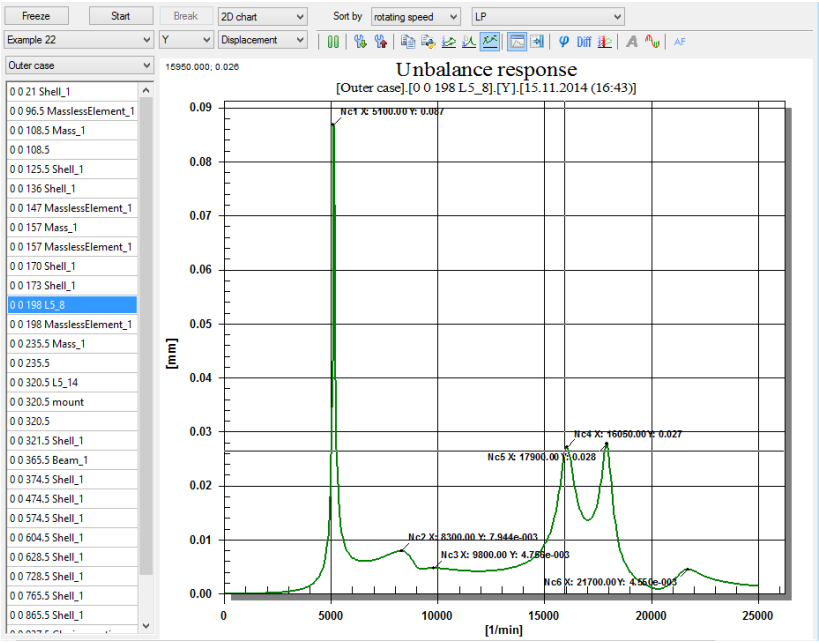


Рис. 15.21

Одновременно пользователь может вывести АЧХ по всем или нескольким сечениям подсистемы, **Рис. 15.22.**

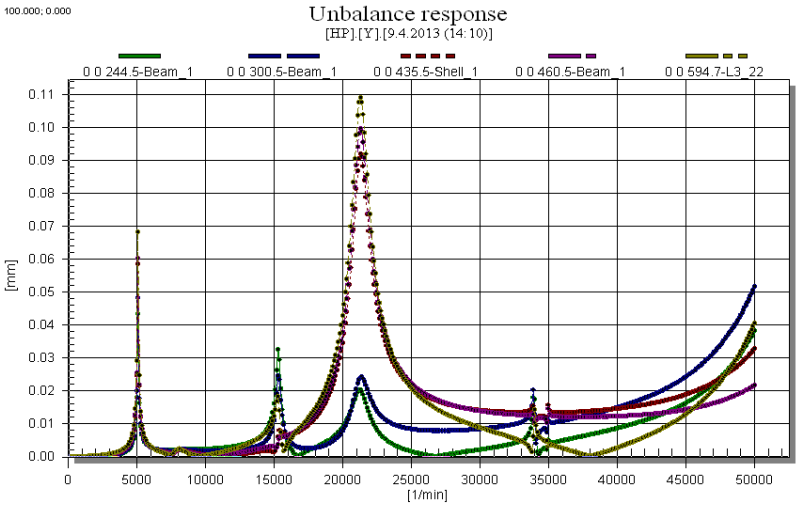


Рис. 15.22

Также пользователь может сформировать список сечений из разных подсистем и связей. Для этого через контекстное меню сечения надо добавить его в новый список. После чего добавить в этот список другие сечения модели. В списке подсистем над сечениями появится позиция с созданным списком.

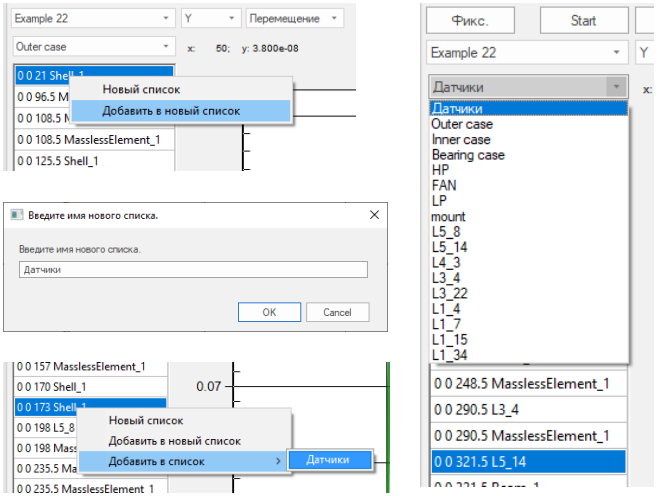


Рис. 15.23

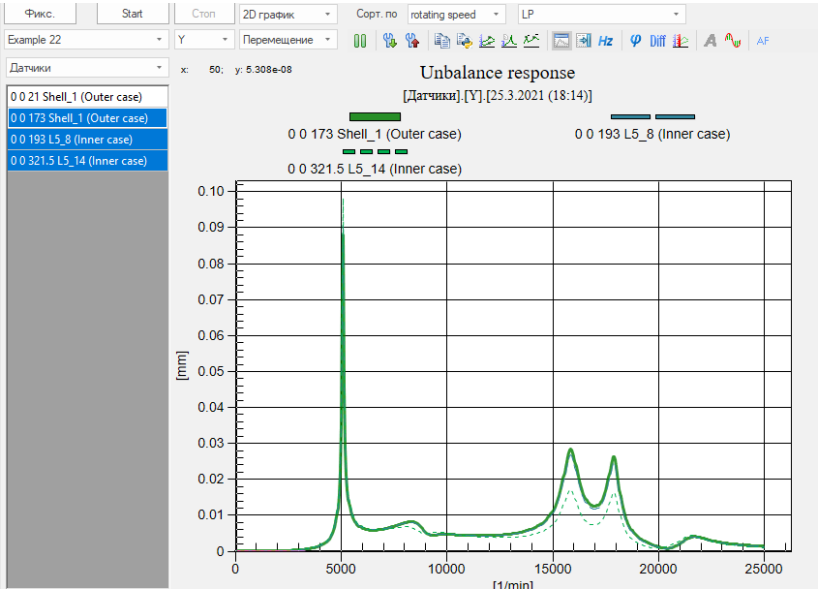


Рис. 15.24

В контекстном меню позиций из созданного списка есть команды удаления сечений и удаления списка.

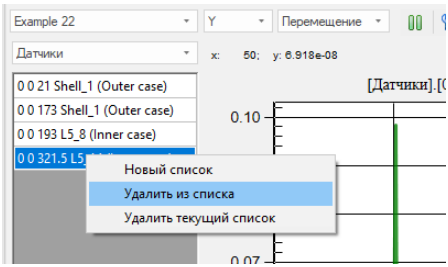


Рис. 15.25

Кнопка [AF] (AF) - Amplification Factors - позволяет вывести графики амплитудно-частотныхxарактеристик в соответствии с рекомендациями стандарта API RP684

API Standard Paragraphs Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train torsionals, and Rotor Balancing (API RP 684), Second Edition, august 2005.

На **Рис. 15.26** представлены параметры контролируемые в соответствии с API.
Nc1 - первая критическая скорость ротора;
Ac1 - амплитуда колебаний по первой критической скорости;
Ncn - критическая скорость с номером n;
Nmc - максимальная скорость вращения;
N1 - меньшая скорость соответствующая амплитуде 0.707 Ac1;
N2 - большая скорость соответствующая амплитуде 0.707 Ac1;
N2-N1 - ширина пика с половиной энергии колебаний;
AF=Nc1/(N2-N1) - коэффициент усиления (Amplification Factor);
SM - запас отстройки резонанса (Separation Margin);
SMr - необходимый запас;
SMa - актуальный запас

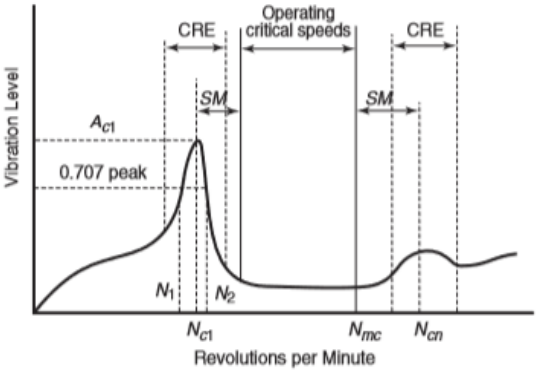


Рис. 15.26

Если вследствие большого демпфирования по критической скорости не могут быть определены N1 или N2, то в подписи к пику устанавливается "AF=?".
В соответствии с API критические скорости с AF<2.5 считаются критически задемпфированными и определение SM не требуется.
Если AF>= 2.5 и критическая скорость ниже диапазона рабочих режимов, то SM (в процентах) должно быть не менее рассчитанного по формуле значения или 16% (берется наименьшее).

$$SM = 17 * \left(1 - \frac{1}{AF - 1.5}\right)$$

Если AF>= 2.5 и критическая скорость выше диапазона рабочих режимов, то SM (в процентах) должно быть не менее рассчитанного по формуле значения или 26% (берется наименьшее).

$$SM = 10 + 17 * \left(1 - \frac{1}{AF - 1.5}\right)$$

Помимо вывода информации на графике (Рис. 15.27) данные выводятся также в журнале.

Если требуемый SMr больше действительного SMa, то подпись к данному пику обозначается красным. SM для пиков находящихся внутри зоны рабочих режимов не рассчитывается.

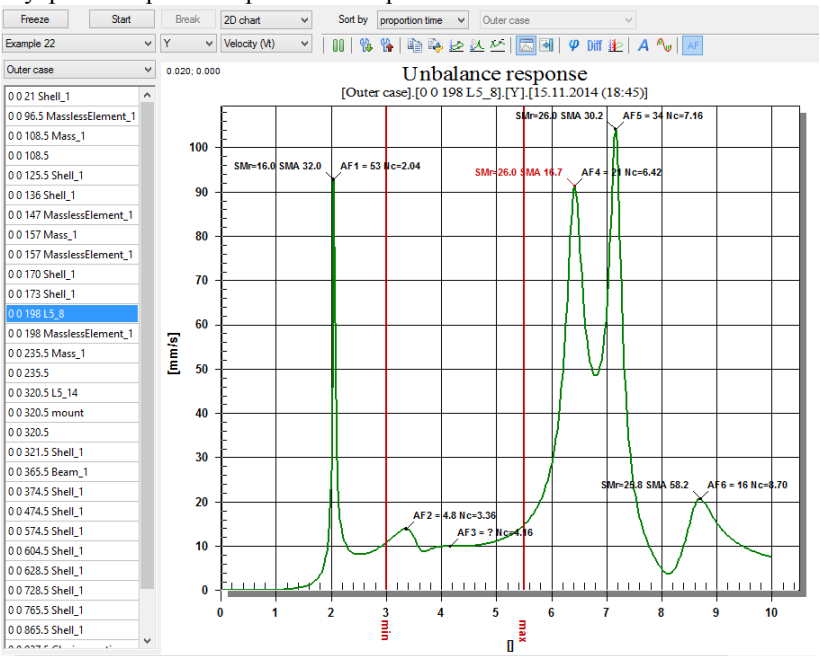


Рис. 15.27

Кнопка “ Diff ” используется для расчета и вывода деформаций и реакций. Для этого, удерживая клавишу **[Ctrl],** пользователь указывает пару кривых, разность которых он хочет получить. Например, можно рассчитать деформацию середины вала относительно его опоры.

Реакцию опоры можно также рассчитать, используя эту функцию (выделив кривую силы до связи и после связи).

Аналогично можно вывести и 3D – график дисбалансного поведения. На **Рис. 15.28** и **Рис. 15.29** показаны соответственно графики для перемещения и силы.

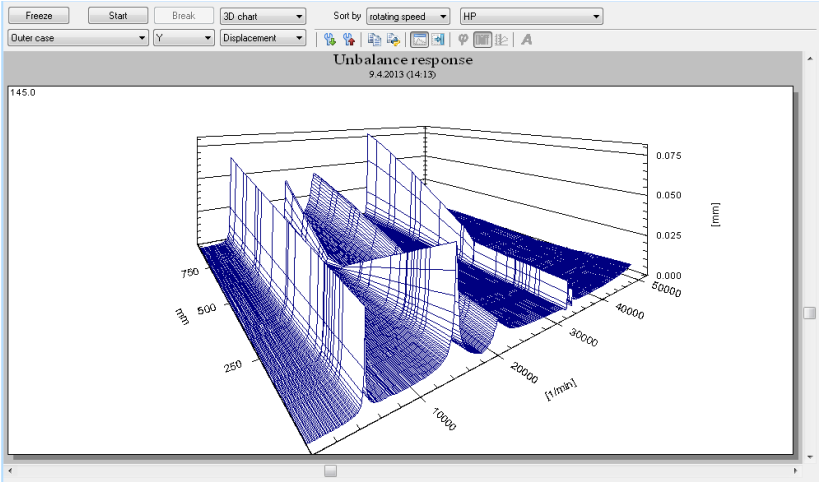


Рис. 15.28

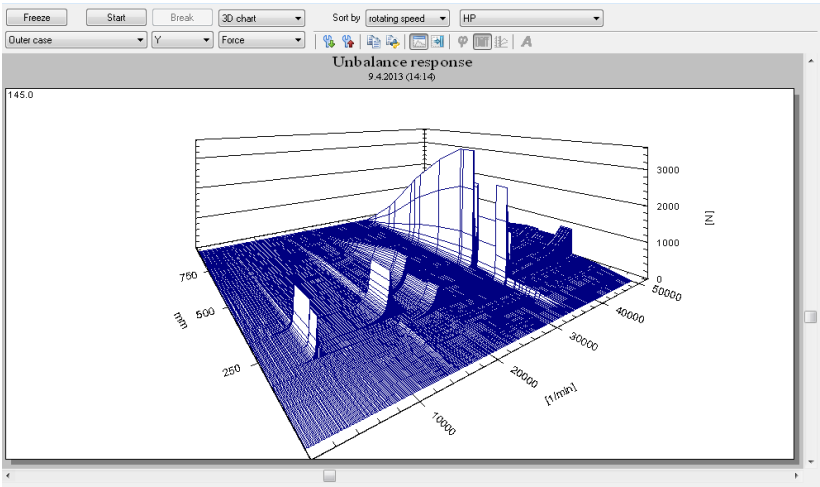


Рис. 15.29

Дополнительным алгоритмом для вывода результатов дисбалансного поведения является алгоритм вывода орбит движения **[Orbit (Unbalance response)].** Также как и любой другой его можно перенести из библиотеки алгоритмов в БД проекта.

Выбор алгоритма **[Orbit (Unbalance response)]** сопровождается появлением окна для вывода орбит движения **Рис. 15.30**,

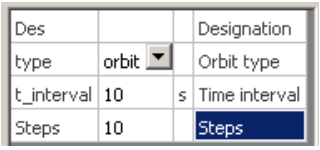


Рис. 15.30

либо фазовой траектории, **Рис. 15.31**.

Рис. 15.31

Графики могут быть представлены в различной форме с помощью меню графического пакета, вызываемого правой кнопкой мыши при курсоре, установленном в поле графика**, Рис. 15.32.**

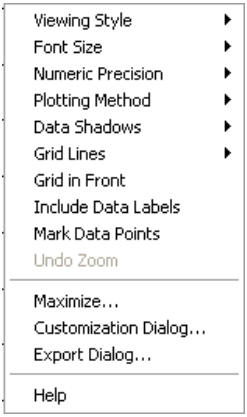


Рис. 15.32

Графики могут быть отредактированы (**Рис. 15.33**), скопированы в различном виде (формате) и переданы в буфер обмена, файл или на принтер (**Рис. 15.34**).

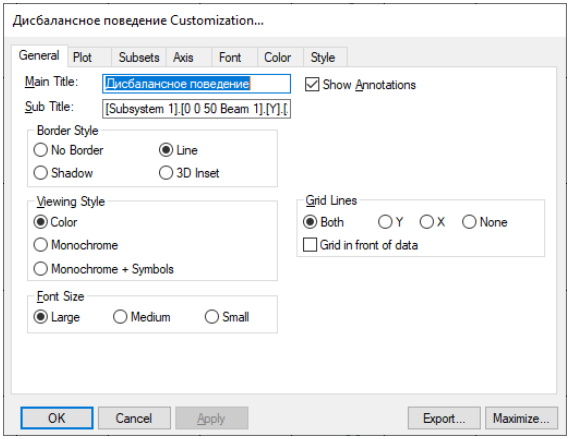


Рис. 15.33

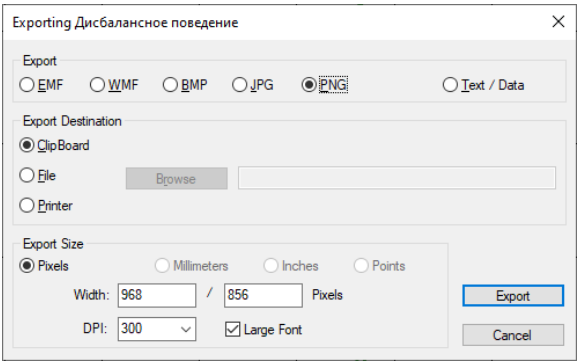


Рис. 15.34

Возможность представления графиков в текстовом формате (только данные) позволяет использовать эти данные в других графических пакетах, например, в программе **Microsoft Excel**. Окно настройки текстового формата показано на **Рис. 15.35**.

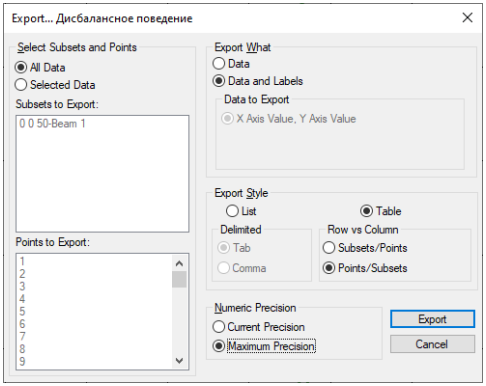


Рис. 15.35

15.7 Параметрический анализ [Parameter analysis]

15.7.1 Одномерный параметрический анализ

Параметрический анализ дает возможность провести анализ влияния различных параметров модели на ее динамические свойства.

Результатом параметрического анализа являются карты, в которых отображается зависимость собственных частот колебаний, критических частот вращения или логарифмического декремента для соответствующих форм колебаний от варьируемого параметра.

> **ЗАМЕЧАНИЕ:** Пользователь может получить карту параметрического анализа по любому параметру упруго-инерционной системы, описывающему: связи, участки, шарниры, массы, диски. Возможно варьирование координат положения элементов, не имеющих длины – шарниров, связей, масс

Алгоритм получения карт параметрического анализа следующий:

1. Определить параметр, влияние которого на частоты или декременты требуется исследовать, например, коэффициент жесткости **kyy = [ut_x/Fx]** матрицы жесткости **[k]**, описывающей свойства опоры ротора

2. Создать переменную, например, **[Front kyy, N/m]**

3. Присвоить переменной **[Front kyy, N/m]** постоянное значение, которое будет использоваться для расчета базиса, **Рис. 15.36**.

Des	Front Kyy, N/m	Designation
value	10000	Value

Рис. 15.36

Прикрепить переменную к коэффициенту матрицы жесткости **[ut_x/Fx],Рис. 15.37**.

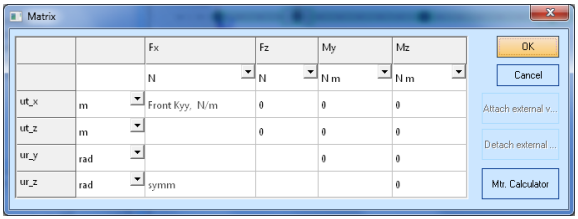


Рис. 15.37

4. Добавить в список алгоритмов проекта алгоритм **[Parameter analysis]**.

5. После выделения курсором строчки алгоритма **[Parameter analysis]** в списке алгоритмов в нижней левой части экрана появляется окно настройки общих параметров алгоритма, **Рис. 15.38**.

6. Пользователь может:
   - установить тип алгоритма – критические частоты вращения либо частоты собственных колебаний
   - установить ротор (подсистему), для которой будут рассчитываться частоты
   - установить тип вывода – пользователь может вывести либо частоты форм колебаний, либо декременты колебаний

- установить значение функции **[Recalculate Basis].** Значение **YES**- базис будет пересчитываться перед каждым шагом. Значение **NO** - базис не пересчитывается. Используется, если в модели роторной системы варьируемый параметр не влияет на базис.

В случае если выбран алгоритм **[Natural frequencies**], пользователь должен, используя временной параметр **[t_pr]**, установить режим, для которого будут исследоваться влияние параметра динамической системы на частоты собственных колебаний, **Рис. 15.39**.

Des	Parametric maps	Designation
inp_parameters	...	Input parameters
algorithm	Critical speeds	Type of processing algorithm
Subsystem	Subsystem 1	Driving subsystem
output_type	frequencies	Type of results
recalculate_basis	yes	Is Basis has to be recalculated

Рис. 15.38

Des	Parametric maps	Designation
inp_parameters	...	Input parameters
algorithm	Natural frequencies	Type of processing algorithm
t_pr	8	Time parameter
output_type	frequencies	Type of results
recalculate_basis	yes	Is Basis has to be recalculated

Рис. 15.39

7. Далее пользователь с помощью курсора переходит к строчке **[inp_parameters]** и командой **[Extended properties]** в контекстном меню открывает окно для настройки внутренних параметров алгоритма, **Рис. 15.40**.

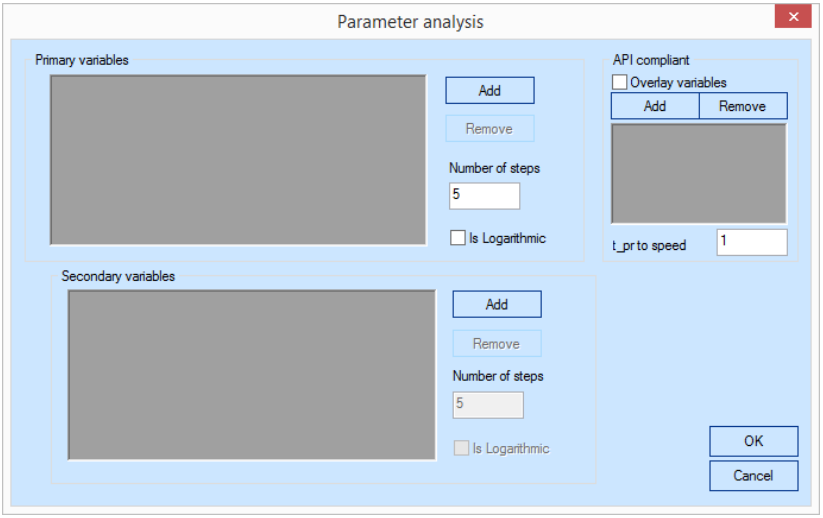


Рис. 15.40

8. С помощью кнопки **[Add]** пользователь добавляет начальную переменную **[Primary values]**, **Рис. 15.41**.

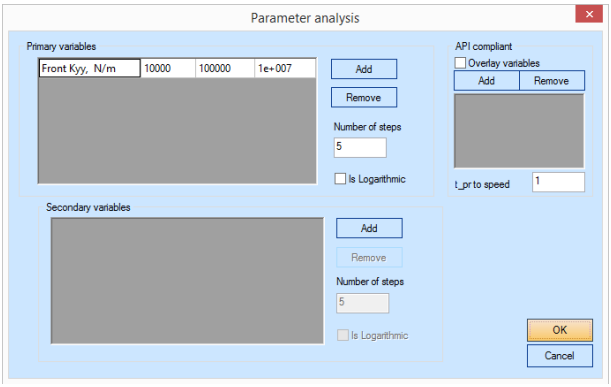


Рис. 15.41

9. Вводятся значения границ переменной, **Рис. 15.42**.
В части "API compliant" пользователь может задать вывод дополнительных переменных на графике. Например, это могут быть значения жесткости подшипников скольжения по режимам при построении карты критических скоростей.

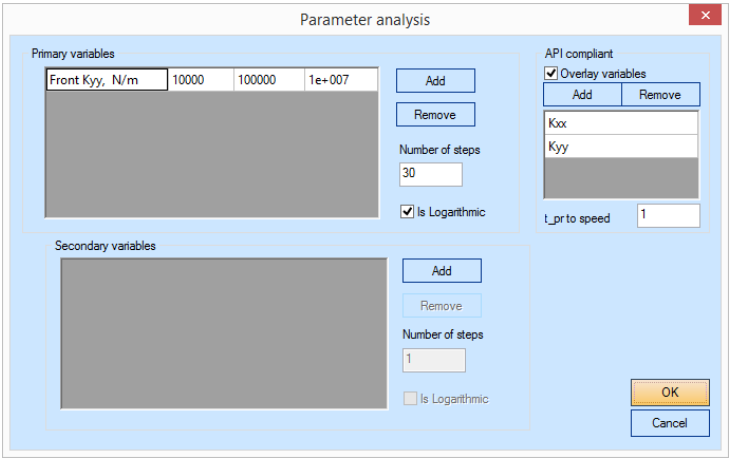


Рис. 15.42

10. Устанавливается число расчетных точек **[Number of steps]** для карты параметрического анализа.

ЗАМЕЧАНИЕ: Шаг в параметрическом анализе может изменяться по логарифмическому закону. Для этого пользователь должен установить флаг в окне **[Is Logarithmic].** Данный флаг следует устанавливать в случае, когда диапазон изменения переменной составляет несколько порядков.

11. Запускается алгоритм расчета кнопкой **[Start].** Результатом является, например, спектр критических частот вращения, рассчитанный для нижнего значения варьируемого параметра, **Рис. 15.43**.

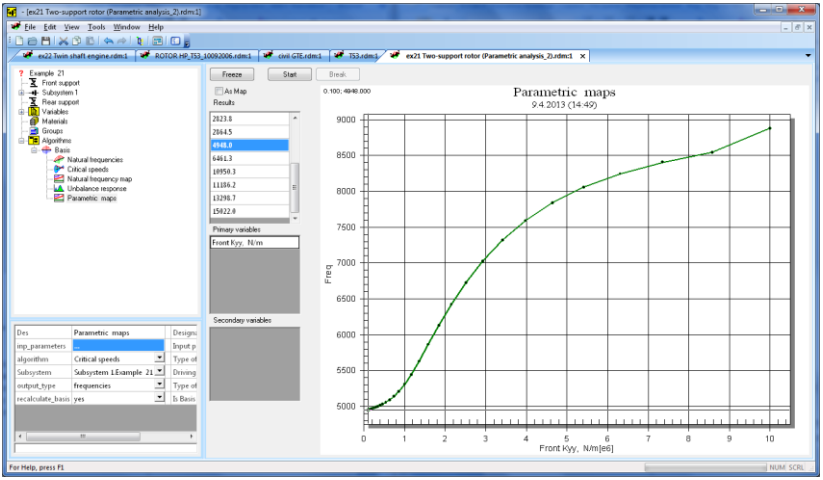


Рис. 15.43

12. При установленном флаге "As Map" пользователь может получить карту параметрического анализа, например, карту критических частот вращения, **Рис. 15.44**.

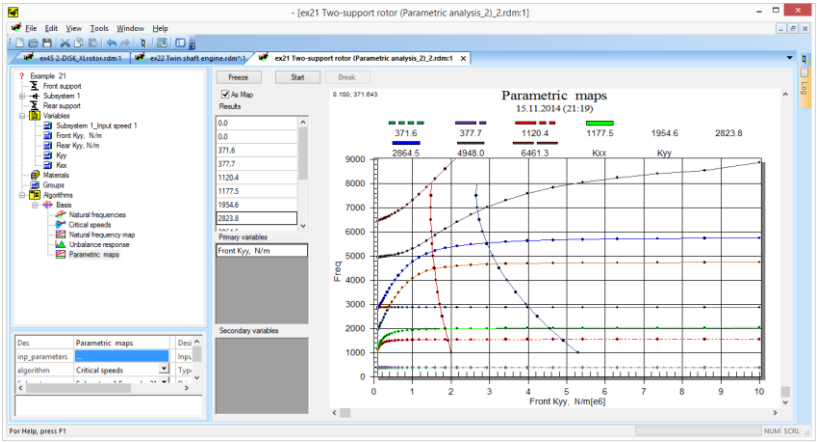


Рис. 15.44

ЗАМЕЧАНИЕ: Количество первичных переменных **[Primary values]** может быть неограниченным

Значения полученных частот или декрементов можно получить, используя команду **[Export dialog]** из меню для работы с графическими изображениями. С помощью последовательных команд **[Export dialog] – [Text/data only] – [Export…] – [Export]**, может быть сформирован текстовый файл значений частот или декрементов в зависимости от варьируемого параметра.

15.7.2 Двухмерный параметрический анализ

Пользователь может провести двухмерный параметрический анализ. В этом случае он должен добавить вторичную переменную **[Secondary variables]**. Параметры этой переменной задаются так же, как и в случае одной переменной, **Рис. 15.45**.

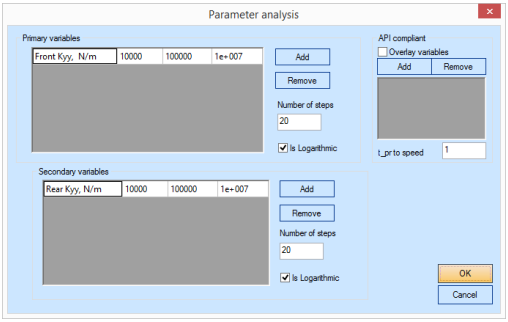


Рис. 15.45

После проведения расчета появляется спектр частот, рассчитанный для нижних значений варьируемых переменных. Для каждой частоты можно выделить поверхность, каждая точка которой соответствует критической частоте с тем же порядковым номером, что и в начальном спектре, **Рис. 15.46**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Количество вторичных переменных **[Secondary values]** может быть неограниченным

ЗАМЕЧАНИЕ: В случае подключения переменных к связям типа [Связь], участвующим в расчете алгоритма [Базиз], при расчете каждой комбинации параметров будет пересчитываться базис. Для сложных моделей это может занимать значительное время. В таких случаях рекомендуется использовать связь типа [Квазилинейная связь], которая не участвует в расчете [Базиса].

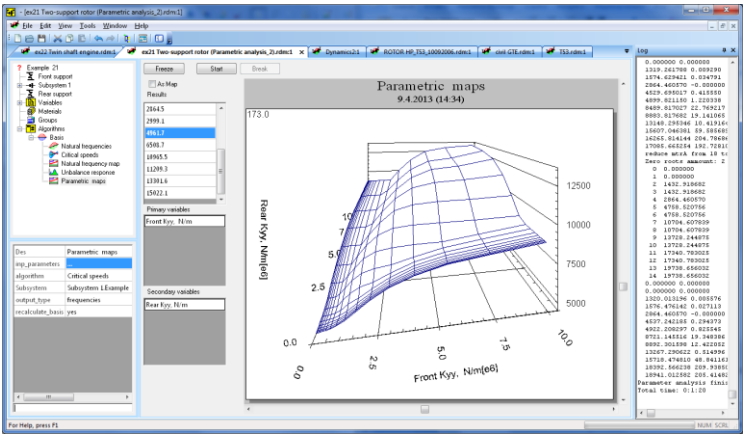


Рис. 15.46

Значения частот или декрементов можно получить как и в предыдущем случае, т.е. использовать команду **[Export dialog]** из меню для работы с графическими изображениями, с помощью которой может быть сформирован текстовый файл с данными графика.

15.8 Моделирование аэродинамических сил

В процессе работы турбомашины в ее проточной части и лабиринтных уплотнениях возникают аэродинамические силы, которые могут привести к потере устойчивости ротора. Среди этих сил венцовые, бандажные, лабиринтные. Природа возникновения этих сил одинакова и связана с нарушением осесимметричности течения газа через лопатки или уплотнения.

В настоящем разделе рассматриваются обобщенные критерии аэродинамического возбуждения в роторной системе, позволяющие оценить дестабилизирующие эффекты, и алгоритм их использования в программной системе DYNAMICS R4.
Результатом работы этого алгоритма является матрица жесткости, моделирующая аэродинамическую связь между ротором и статором, включающая два перекрестных коэффициента жесткости, рассчитанные для осевых или центробежных колес ступеней компрессоров и турбин:

$$\begin{bmatrix} 0 & K_{xy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{yx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

15.8.1 Уравнение Алфорда

Аэродинамические силы, вызывающие дестабилизирующие эффекты, зависят от режимов работы турбомашины, меняются по времени и делают роторную систему нестационарной. Для их определения можно воспользоваться формулой Алфорда (Alford’s formula), позволяющей определить перекрестные жесткости аэродинамической связи между ротором и статором как для осевых, так и для центробежных компрессоров или их ступеней.

Общее уравнение Алфорда имеет вид:

$$K_{xy} = -K_{yx} = \frac{\beta \cdot P}{\omega \cdot D \cdot H},$$

где

K_{xy} , K_{yx}	Н/м	перекрестные коэффициенты жесткости
P	Н·м /s	мощность ступени
ω	rad/s	частота вращения ротора
D	м	средний диаметр лопаток
H	м	длина лопатки
β		коэффициент эффективности ступени

$\beta=0.5$	Для осевых ступеней с бандажированными лопатками
$\beta=1.5$	Для осевых ступеней с небандажированными лопатками
$\beta=2 \ldots 3$	Для радиальных небандажированных центробежных ступеней
$\beta=5 \ldots 10$	Для перегруженных центробежных ступеней

15.8.2 Модифицированное уравнение Алфорда

Стандарт API 617 устанавливает два уровня анализа динамической устойчивости роторных систем, и, в частности, центробежных компрессоров. Первый уровень основывается на уравнении Алфорда, позволяющем рассчитывать приближенные аэродинамические силы для ступеней центробежных компрессоров. Если компрессор не удовлетворяет условиям первого уровня, то переходят на второй уровень анализа. Он предполагает более детальный анализ дестабилизирующих эффектов от лабиринтных уплотнений.
Аэродинамическое возбуждение в центробежном компрессоре в соответствии со стандартом API 617 (1 уровень) определяется по модифицированной формуле Алфорда (Modified Alford's formula) .

$$K_{xy} = -K_{yx} = \frac{\beta \cdot 9554 \cdot P}{N \cdot Dc \cdot Hc} \cdot \rho_{ratio}$$

Kxy , Kyx	Н/м	перекрестные коэффициенты жесткости
9554	m·N·rpm/kW	эмпирическая размерная константа
P	kW	мощность ступени
N	rpm	частота вращения
Dc	м	диаметр импеллера
Hc	м	минимальная ширина импеллера или выходной улитки
ρ_{ratio}		$\rho_{ratio} = \rho_{out} / \rho_{in}$
ρ_{in}	kg/m3	плотность газа на входе в ступень
ρ_{out}	kg/m3	плотность газа на выходе из ступени
β		коэффициент эффективности ступени

15.8.3 Уравнение Уочела

Другой формулой, используемой для оценки аэродинамической устойчивости, является формула Уочела (Wachel's formula).

$$K_{xy} = -K_{yx} = \frac{955 \cdot P \cdot M}{N \cdot D \cdot H} \cdot \rho_{ratio},$$

K_{xy} , K_{yx}	Н/м	перекрестные коэффициенты жесткости
955	N·m·rpm/kW	эмпирическая размерная константа
P	kW	мощность ступени
N	rpm	частота вращения
M	а.е.м	молекулярный вес газа
D	м	диаметр импеллера
H	м	минимальная ширина импеллера или выходной улитки
ρ_{ratio}		$\rho_{ratio} = \rho_{discharge} / \rho_{suction}$
$\rho_{suction}$	kg/m3	плотность газа на входе в ступень
$\rho_{discharge}$	kg/m3	плотность газа на выходе из ступени

15.8.4 Скрипты для расчета перекрестных коэффициентов и подготовки связи

Исполняемый скриптовый файл **run_af_.py**, запущенный из программы DYNAMICS R4 командой **Runscript** позволяет рассчитать перекрестные коэффициенты жесткости и создать в модели роторной системы связь, описываемую матрицей жесткости с переменными коэффициентами. Первоначальный ввод данных производится в этом же файле**,** который готовится пользователем заранее. Файл **af_code.py** должен лежать в той же самой папке, он содержит функции расчета.

Работа с файлом исходных данных (run_af_.py)

Данные вводятся либо в единицах Английской системы (при этом устанавливается флаг **(is_English_units=True),** либо в СИ **(is_English_units=False)**).

	Speed	StagePower	Discharge Diameter	GasPassage Width	Density Ratio	Gas Molecular Weight	Beta	Kxy
English based	rpm	hp	in	in	-	a.e.m.	-	lbf/in
SI based	rpm	kW	m	m	0	a.e.m.	+	N/m

Выбирается тип расчета для каждой ступени рабочего колеса **calcType =[1,2,2,...].**
1 - Расчет по формуле Уочела
2 - Расчет по формуле Алфорда
3 - Расчет по модифицированной формуле Алфорда

Разные ступени могут быть рассчитаны по разным формулам.
Вводятся параметры для каждой ступени компрессора в одномерном массиве, порядок параметров в котором соответствует приведенной таблице.

Speed	StagePower	Discharge Diameter	GasPassage Width	Density Ratio	Gas Molecular Weight	Beta
1000	10	24	3	0	0	2
2000	50	24	3	0	0	2
3000	250	24	3	0	0	2

Отсутствующие в формулах параметры обозначаются нулями.

	Speed	StagePower	Discharge Diameter	GasPassage Width	Density Ratio	Gas MolecularWe	Beta
Формула Уочела	+	+	+	+	+	+	**0**
Формула Алфорда	+	+	+	+	**0**	**0**	+
Модифицированная формула Алфорда	+	+	+	+	+	**0**	+

Например, в скриптовом файле ввод параметров в английской системе единиц для двух ступеней и трех режимов для расчета по формуле Алфорда записывается как одномерный массив:

```
Stage1=[
1000,10,  24,3, 0,0,2,
2000,50,  24,3,0 ,0,2,
3000,250,24,3,0,0, 2
]
Stage2=[
1000,10, 24,3,0, 0,3,
2000,50, 24,3,0, 0,3,
3000,250,24,3,0, 0,3
]
```

Ступени для расчета перечисляются в списке, например, **stage_list= [Stage1, Stage2]**

Существует несколько вариантов расчета.
Вариант 1. Расчет для всего компрессора и получение суммарного K_{xy}.. В скрипте устанавливаются следующие значения переменных:

isVariant1=True
isVariant2=False

Вариант 2. Расчет только одной ступени и получение ее K_{xy}.

isVariant1=False
isVariant2=True
stage_number=0

Устанавливается значение переменной **stage_number=k (**где **k**-порядковый номер ступени в списке **stage_list [0…n]**).

В результате работы скрипта в открытой модели создаются связь общего вида [**Aerodynamic_Force_genLink]** и переменные **Kxy_N/mKyx_N/m**, подключенные к соответствующим коэффициентам матрицы жесткости связи. Пользователю остается подключить связь в месте приложения аэродинамической силы.

16 НЕСТАЦИОНАРНЫЙ АНАЛИЗ

16.1 Общие положения

Алгоритмы нестационарного анализа предназначены для расчета линейных и нелинейных роторных систем в стационарной и нестационарной постановке.

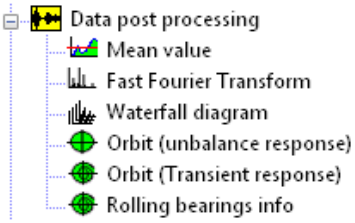


Рис. 16.1

Используется прямое интегрирование полученных уравнений движения с применением адаптивного алгоритма интегрирования. Шаг интегрирования автоматически варьируется в процессе расчёта в соответствии заданной точностью и текущих градиентов моделируемого процесса.

Полный набор алгоритмов для нестационарного анализа формируется из БД алгоритмов двойным кликом левой клавиши мыши строчки меню **[Transient analysis]**. Одновременно с основным алгоритмом в проект будут перенесены алгоритмы

Des			Название
эксперт	да		Экспертный режим
start_action	нет		Настройка действий при вычислениях
process_action	рассчитать		Вид действия
process_file_save	нет		Настройка сохранения результатов
step method	bdf		Выбор метода выбора шага
iter method	newton		Итерационный метод
rel tolerance	1e-06		Относительная погрешность
displ_abs_tolerance	1e-06	mm	Абсолютный допуск на перемещения
speed_abs_tolerance	1e-06	mm/s	Абсолютный допуск на скорости
t_pr_1	0		Начальное значение временного параметра
t_pr_2	0.1		Конечное значение временного параметра
intgr_time	0.1	s	Время интегрирования
init_time	1.5	s	Начальное время интегрирования
init_toler	одинаково		Допуски для начального интегрирования
init_output_step	0.0001	s	Шаг вывода во время начального интегрирования
init_damping	1000	N*s/m	Начальное демпфирование
output_step	0.0001	s	Шаг вывода
modal_det	500		Детализация переменных модальных параметров (жестк
With own weigth	да		Учет веса в системе
g_x	0	mm/s^2	Ускорение в направлении оси X
g_y	-9810	mm/s^2	Ускорение в направлении оси Y
g_z	0	mm/s^2	Ускорение в направлении оси Z
Эволюции ЛА	да		Учет гироскопических моментов при эволюции самолет
v_x	-0.105	rad/s	Угловая скорость вокруг оси X
v_y	0	rad/s	Угловая скорость вокруг оси Y

Угловая скорость вокруг оси Y. Используется для моделирования при эволюциях самолета.

Рис. 16.2

постобработки полученных временных графиков, **Рис. 16.2**.

Среди алгоритмов обработки:

- алгоритмы расчета средних значений **[Mean value]**
- алгоритмы БПФ**[Fast Fourier Transform]**
- алгоритм получения каскадных диаграмм вибрационных спектров **[Waterfall diagram]**
- алгоритм получения орбит движения **[Orbit (Transient response)]**

ЗАМЕЧАНИЕ: Любой алгоритм может быть удален из меню алгоритмов проекта командой **[Delete]**

Для настройки алгоритма нестационарного анализа используется соответствующее окно с полями выбора и ввода параметров настройки. Это окно одинаково как для линейных, так и для нелинейных динамических систем,**Рис. 16.2**.

Таблица 16.1Описание параметров элемента

Параметры	Обозначение Значение	Описание
expert	Да Нет	Дает возможность задания дополнительных опций элемента.
Start_action	None Load Save	Переменная, определяющая способ работы с данными: **[none]** – данные не сохраняются и не загружаются **[load]** – загрузить файл **[save]**– сохранить полученные результаты
process_action	calculate	Переменная, определяющая действие программы – расчет или другое
process_file_save	none	Переменная, определяющая способ настройки сохранения результатов в процессе интегрирования
step_method	bdf	Переменная для выбора метода определения шага в процессе интегрирования
iter method	newton	Переменная для выбора итерационного метода, используемого при интегрировании

real_tolerance	1e-006	Значение относительной погрешности параметра при интегрировании (**1e-3… 1e-15)**
Display abs tolerance	1e-006	Значение абсолютной погрешности параметра при интегрировании (**1e-3… 1e-15)**
Speed abs tolerance	1e-006	Значение абсолютной погрешности параметра при интегрировании (**1e-3… 1e-15)**
t_pr_1	0	Начальное значение временного параметра диапазона, в котором проводится исследование
t_pr_2	10	Конечное значение временного параметра
intgr_time	10	Время интегрирования, назначенное для временного диапазона, в котором исследуется система
init_time	1	Начальное время интегрирования. Вводится в случае необходимости для устранения начальных возмущений от скорости вращения, веса и т.д. Способ устранения – демпфирование начальных возмущений.
Init_damping	200	Значение демпфирования – вводится только для диапазона, определяемого начальным временем интегрирования. Меняется по линейному закону от некоторого заданного значения до **0**
output_step	0.001	Шаг, с которым выводятся данные интегрирования. Пропускаются все промежуточные данные. По умолчанию **0.001**. Уменьшение шага может привести к замедлению работы программы
modal_det	100	Детализация модальной жесткости и демпфирования
With own weight	Yes/No	Переменная, определяет, как проводится расчет – с учетом веса динамической системы или без него
a_x	0	Ускорение системы в направлении X.
a_y	-9.81	Ускорение системы в направлении Y
a_z	0	Ускорение системы в направлении Z
With evolution	Yes/No	Переменная, определяет наличие учета гироскопических эффектов, возникающих вследствие эволюции летательного аппарата
v_x	-0.105	Угловая скорость эволюции ЛА вокруг оси X
v_y	0	Угловая скорость эволюции ЛА вокруг оси Y

Расчет временного сигнала в **[Нелинейном анализе]** для сложных моделей может занимать довольно значительное время. Результаты расчета настроенной модели можно сохранить в файл на диске, чтобы впоследствии можно было проводить анализ полученных данных без их пересчета, **Рис. 16.3.**

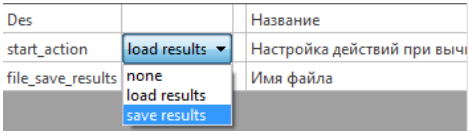


Рис. 16.3

Сохранение. Для сохранения результатов выберите в свойствах алгоритма в списке **[start_action]** пункт **[save results]**. Выделите любое другое поле. В свойствах останется параметр для задания пути к файлу для сохранения результатов. Диалог сохранения вызывается через контекстное меню на поле **[file_save_results]**. Сохранение происходит при нажатии на кнопку **[Start]** или сразу после закрытия диалога выбора пути сохранения.

Загрузка данных. В списке **[start_action]** выбирается пункт **[load results]**. Аналогично сохранению, настраивается путь к файлу с результатами. Загрузка результатов происходит после нажатия кнопки **[Start]**. Также данные можно загрузить и в пустую модель. В меню Файл/Открыть вызывается диалог открытия файлов. Фильтр расширений устанавливается на 'Все файлы'. Открывается файл результатов с расширением trs. Файл trs также может быть открыт двойным кликом. При такой загрузке создается пустая модель с настроенным на загрузку файла алгоритмом **[Нелинейный анализ]**.

ЗАМЕЧАНИЕ: Для закрытия окна во время расчета **[Нелинейного анализа]** необходима остановка расчета

На **Рис. 16.4** показан пример экрана вывода результатов нестационарного анализа роторной системы.

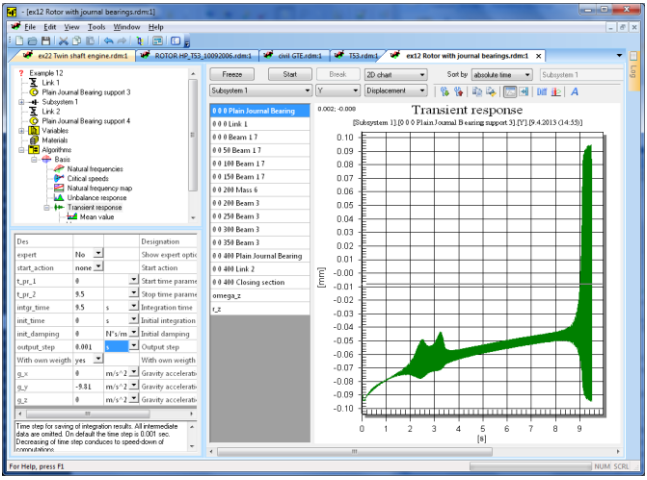


Рис. 16.4

После получения временного сигнала может быть получена дополнительная информация через алгоритмы постобработки.

Пользователь может наблюдать результаты нестационарного расчета в процессе самого расчета. Для этого он должен начать расчет, остановить его и запустить вновь. Выбирая нужное сечение для вывода, он видит результат, полученный к моменту выделения этого сечения. Помимо сортировки результатов в текущем сечении по времени и оборотам, пользователь может вывести зависимость изменения параметра в одном сечении относительно другого, **Рис. 16.5**.

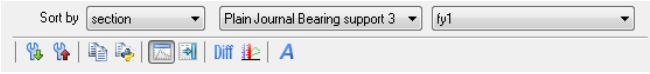


Рис. 16.5

Функция наложения используется для одновременного вывода данных по нескольким сечениям в собственных осях ординат. Например, наложение графика перемещения и скорости вращения.

A - кнопка выводит в журнал все перемещения и повороты для текущего положения курсора на графике. Формат вывода: u_x u_yu_zur_xur_yur_z.

16.2 Определение реакций

Реакции в линейных связях могут быть определены в алгоритмах **[Дисбалансное поведение]** и **[Нелинейный анализ]**, используя следующий алгоритм, **Рис. 16.6**:

1. В раскрывающемся списке выбрать подсистему, к которой подключена интересуемая связь
2. В раскрывающемся списке проекций на оси выбрать ось, по которой будет определяться реакция, например, Y
3. Выбрать в раскрывающемся списке тип выводимых данных – **[Сила]**
4. Выбрать в списке сечений подсистемы два сечения (с зажатой клавишей **[Ctrl]**), соответствующих точке подключения связи, и сечение, следующее за ним с такой же координатой. Это может быть первое сечение балочного элемента, точечная масса или другая связь
5. Пометить галочкой пункт «Вычислить разницу»

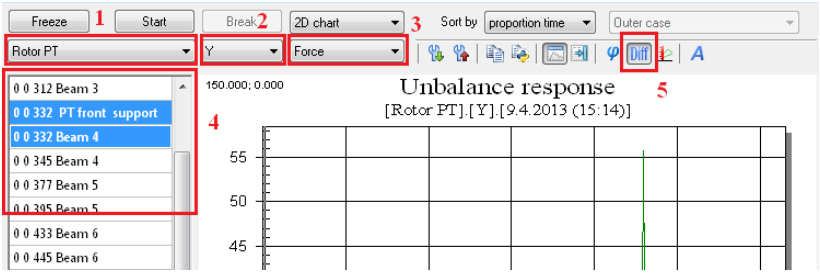


Рис. 16.6

ЗАМЕЧАНИЕ: Данная методика неприменима для определения реакций в нелинейных связях

ЗАМЕЧАНИЕ: Данная методика применима только для связей, подключенных к сечениям, расстояние и взаимные повороты между которыми нулевые. В противном случае результаты могут быть некорректными

Дополнительно для элементов типа [Связь] реакцию можно получить при выводе сил в сечении связи Internal.

Все связи из группы **[Нелинейные элементы]** учитываются только при расчете алгоритма **[Нелинейный анализ]**. Реакция в нелинейной связи может быть получена из дополнительных параметров вывода в списке по интересуемой нелинейной связи. Для этого надо, **Рис. 16.7**:

1. В раскрывающемся списке выбрать интересуемую нелинейную связь
2. Выбрать реакцию в точке закрепления по интересующей оси. Например, нелинейная связь присоединена первой точкой к валу и второй к корпусу. Для определения реакции в направлении Y на корпусе необходимо выбрать в списке параметр «fy2»

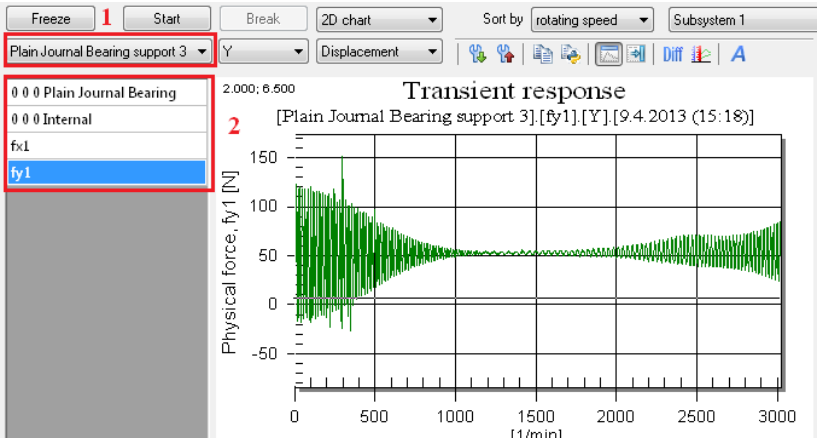


Рис. 16.7

ЗАМЕЧАНИЕ: При определении реакций следует помнить о влиянии полноты расчета базиса на величины, получаемые в остальных алгоритмах

16.3 Сообщения в процессе интегрирования

В процессе расчета в информационном окне сообщений и предупреждений выводится информация о том, как проходит интегрирование, время, затраченное на интегрирование, рис 15.8.

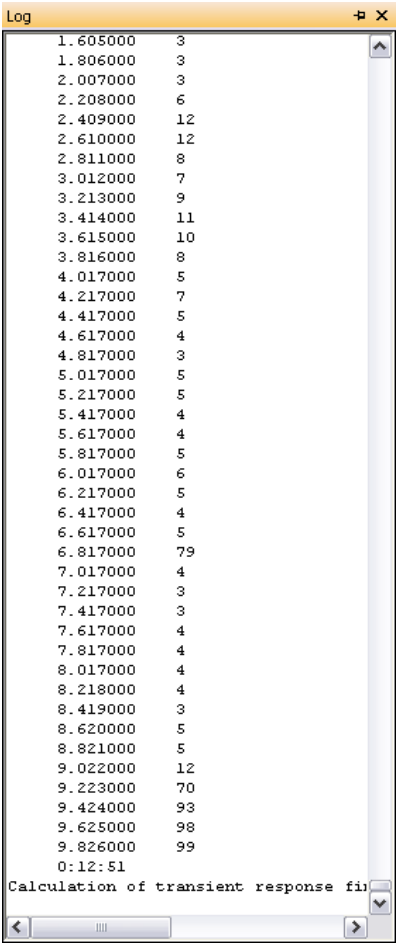


Рис. 16.8

Первый столбец – время, для которого выводится результат, второй столбец – время, затраченное на расчет шага вывода данных **[output_step]**.

После окончания расчета (или в процессе) пользователь может получить данные о том, как шло интегрирование. Для этого в раскрывающемся списке настройки параметров вывода **(Рис. 16.9)** пользователь выбирает параметр **[Transient response]**. В открывшемся окне пользователь выбирает необходимую команду, **Рис. 16.10**.

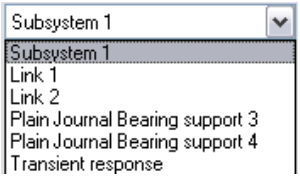


Рис. 16.9

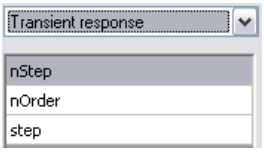


Рис. 16.10

Пользователь может наблюдать следующие характеристики:

- параметр**[nStep]** - количество внутренних шагов интегрирования, **Рис. 16.11**.

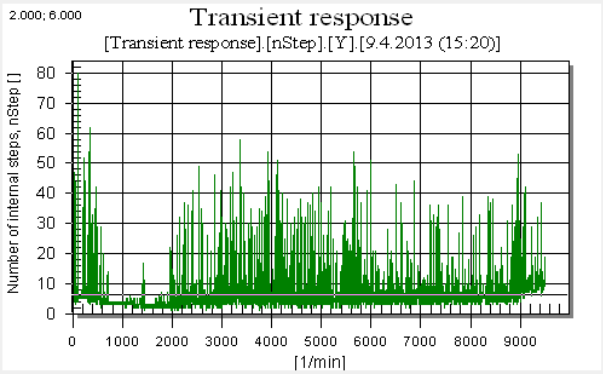


Рис. 16.11

- параметр**[nOrder]** - порядок полинома, используемого для аппроксимации пакетом CVODE, **Рис. 16.12**.

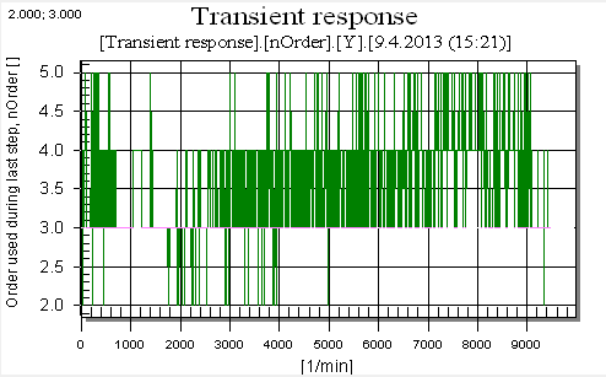


Рис. 16.12

- параметр**[step]** - размер шага, используемый на последнем шаге временного интервала, **Рис. 16.13**.

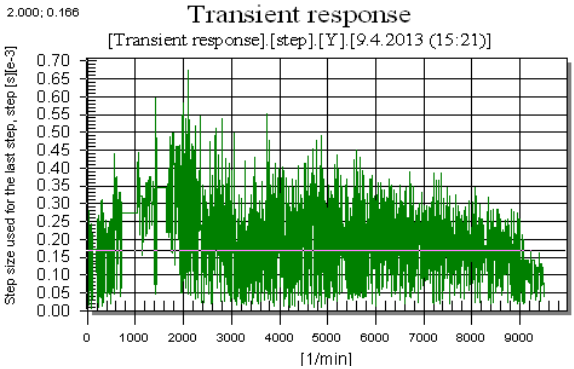


Рис. 16.13

16.4 Рекомендации по определению допусков при интегрировании

Пользователь может управлять процессом интегрирования, назначая не только временные параметры интегрирования (время и шаг интегрирования), но и назначая допуска на параметры, которые ответственны за процесс сходимости к решению. Правильно выбрав значения этих параметров, пользователь может значительно увеличить скорость интегрирования, повысить точность получаемых результатов, сократить последующие затраты времени на анализ результатов.

Управление процессом интегрирования ведется через следующие параметры:**[rel_tolerance], [displ_abs_tolerance]** и **[speed_abs_tolerance]** , **Рис. 16.14**.

rel tolerance	1e-006		Относительная погрешность
displ_abs_tolerance	1e-006	mm	Displacements absolute tolerance (noise level)
speed_abs_tolerance	1e-006	mm/s	Speeds absolute tolerance (noise level)

Рис. 16.14

[rel_tolerance] – параметр оценивает относительную погрешность результатов, получаемых в процессе интегрирования. Значение этого параметра может находиться в пределах от **1.0e-3 до 1.0e-15.** Например, **rel_tolerance=1.0e-4** означает, что относительная погрешность составляет **0.01%.** Не рекомендуется использовать значение этого параметра больше чем **1.0e-3**. Однако также нельзя делать этот

параметр слишком малым, чтобы не попасть в зону ошибок округления машинной арифметики.

[displ_abs_tolerance]/[speed_abs_tolerance] – параметры оценивают абсолютную погрешность параметров (перемещений/скоростей), получаемых в процессе интегрирования, которые могут быть настолько малы, что пользоваться относительной погрешностью бесполезно. Например, если параметр **y(i)** начинается не с нулевого значения, но с течением времени стремится к нулю, то контроль относительной ошибки перестает быть действенным, так как значение параметра **y(i)** находится в шумовой зоне. Значение этих параметров также находится в пределах от **1.0e-3 до 1.0e-15**.

Контроль погрешностей ведется на каждом временном шаге, поэтому конечные (глобальные) ошибки являются следствием ошибок на каждом временном шаге.
Можно взять за правило устанавливать значение погрешностей, уменьшая их значения от действительно желаемого диапазона ошибки конечного результата коэффициентом **0.01.** Например, если Вы желаете, точность параметров интегрирования **0.01%,** то следует выбрать значение параметра **[rel_tolerance]** равным **1.0e-6.**

В любом случае желательно, чтобы пользователь провел серию расчетных экспериментов для конкретной модели, чтобы найти наилучшие значения допусков на параметры, получаемые в процессе интегрирования, чтобы увидеть отличия в результатах при их варьировании.

16.5 Формы вынужденных колебаний

Для алгоритма [Нелинейный анализ] возможен вывод значений виброперемещений, виброскоростей, виброускорений и нагрузок по всем направлениям по длине компонентов роторной системы.

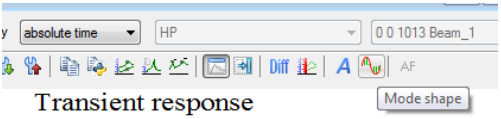


Рис. 16.15

Вывод формы колебаний от действия текущих сил производится для текущего момента времени. Пользователь выбирает диапазон данных

(зуммирует интересуемую область графика) и интересуемый момент времени(кликает на точке графика) на амплитудно-временной характеристике (АВХ). После нажатия на кнопкувывода формы колебаний (**Рис. 16.15**) строится графики форм колебаний для всех подсистем в выбранной сборке (**Рис. 16.16**). При смене направления (X, Y, Z), типа выводимого параметра или текущей сборки формы колебаний будут перестроены

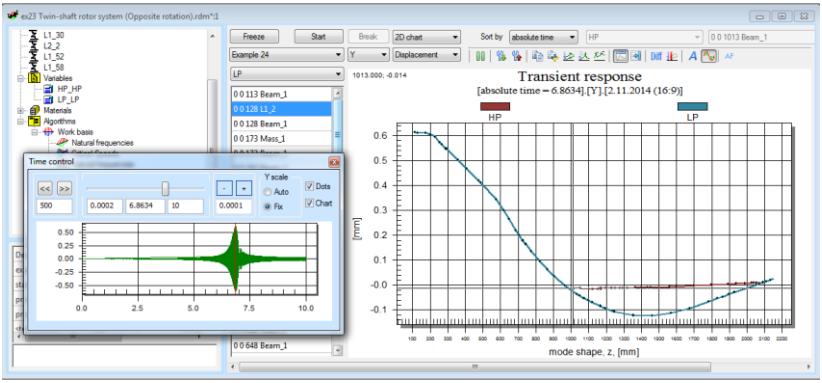


Рис. 16.16

Диалог управления отображением форм колебаний позволяет управлять изменением текущей позиции вывода форм колебаний.

На рисунке **16.7** показаны элементы управления.

1. Кнопками со стрелками запускается автоматическое изменение момента времени . Поле ниже позволяет редактировать частоту обновления в миллисекундах. Временной шаг редактируется в поле (3).
2. Ручное редактирование границ временного сигнала и текущей временной отметки.
3. Изменение временной отметки на величину указанную в поле в секундах.
4. Управление масштабом оси ординат. В режиме Auto, масштаб оси меняется автоматически под минимальные-максимальные значения формы колебаний. В режиме Fix масштаб фиксируется под текущие значения.
5. Область отображения АВХ сигнала для выделенного сечения перед переходом в режим отображения форм колебаний.

Вертикальной красной линией показывается текущий момент времени вывода форм колебаний.

6. Управление выводом точек сечений на графиках.

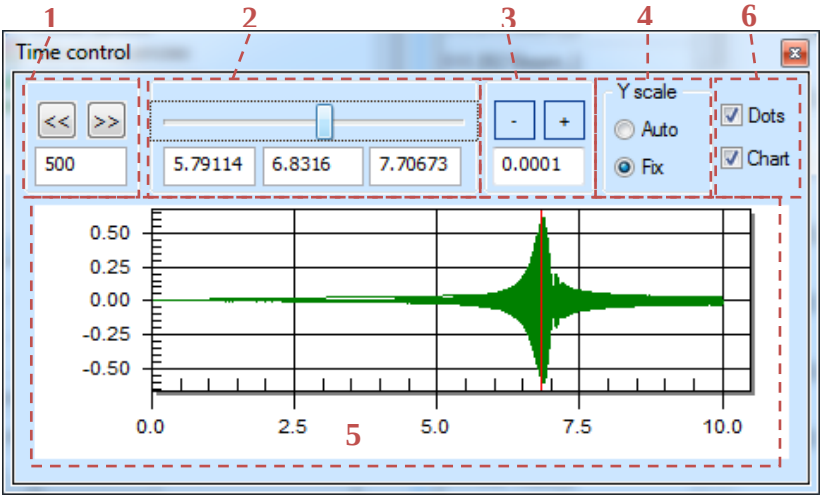


Рис. 16.17

16.6 Учет гироскопических моментов при эволюциях летательных аппаратов

Рассматриваются такие эволюции Летательных Аппаратов (ЛА) при которых вектор угловой скорости от эволюции не совпадает по направлению с вектором угловой скорости вращающихся роторов. При совершении ЛА эволюций во вращающихся роторах двигателя возникают гироскопические моменты в плоскости перпендикулярной траектории движения, а также на всех элементах ГТД инерционные перегрузки в плоскости траектории движения ЛА. Гироскопические моменты можно вычислить по формуле:

$$\overline{M_g} = \bar{L} \times \bar{\Omega},$$

где $\bar{\Omega}$ - вектор угловой скорости ЛА, $\bar{L}$ – момент импульса ротора двигателя: $\bar{L} = J_p\bar{\omega}$, так как ротор вращается вокруг своей оси симметрии, где J_p – момент инерции ротора вокруг оси вращения , $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения ротора. Таким образом величину гироскопического момента можно вычислить по формуле:

$$|\overline{M_g}| = J_p|\bar{\Omega}||\bar{\omega}|\sin(\theta),$$

Очевидно, что в случае однонаправленного вращения роторов гироскопические моменты будут направлены в одну сторону, а в биротативном двигателе – в разные. Этот факт необходимо учитывать при оценке нагрузок на опоры роторов во время эволюций самолета.

ЗАМЕЧАНИЕ: Расчет гироскопических моментов производится для постоянной скорости соответствующей режиму t_pr1. Если настройки алгоритма [Нелинейный анализ] задают режимы t_pr1 и t_pr2 с разными скоростями вращения роторов, то изменение скорости по режимам не будет учитываться при расчете гироскопических моментов. DYNAMICS R4 выдаст сообщение с предупреждением по окончании расчета.

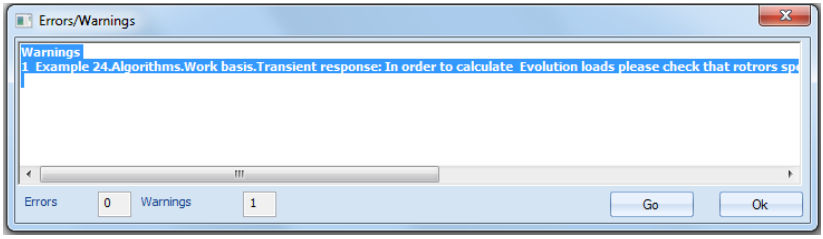


Рис. 16.18

17 ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Алгоритмы постобработки автоматически запускаются после их выбора с параметрами, рассчитанными в соответствии с настройками нестационарного анализа и параметрами “по умолчанию”. Пользователь может изменить настройки каждого из алгоритмов. Повторный запуск алгоритма обработки с новыми настройками происходит после повторного выбора сечения для вывода.

17.1 Алгоритмы расчета средних значений [Mean value]

Возможны два алгоритма:

- Размах **[Peak-to-Peak];**

Des			Designation
type	Peak-to-peak		Value type
t_interval	0.1	s	Time interval
t_overlapping	50	%	Interval overlapp
factor	1		Scaling factor
centering	No		Remove Static di

Рис. 17.1

- Среднеквадратическое значение **[Root mean square].**

Выбор алгоритма **[Peak-to-Peak]**или**[Root mean square]**проводится с помощью падающего меню, **Рис. 17.1**

Таблица 17.1Описание параметров элемента

Designation	**Des**	**Описание**
Value type	**type**	Выбор алгоритма • Размах **[Peak-to-Peak]** • Среднеквадратическое значение **[Root mean square]**
Time interval	**t_interval**	Временной интервал, по которому проводится осреднение временного сигнала
Interval overlapping	**t_overlapping**	Интервал перекрытия с соседними временными участками временного сигнала
Data output scaling factor	**factor**	Коэффициент скалирования данных расчета
For RMS algorithm static displacement will be neglected.	**centering**	Для алгоритма СКЗ производится исключение статической составляющей сигнала. Может возникнуть в результате действия статической силы (например, силы веса). Для корректного исключения временной интервал должен быть достаточно длинным, включать несколько периодов несущей частоты. В случае переменной статической составляющей (например, эффект всплытия ротора на подшипниках скольжения) достаточно коротким. Вариант по умолчанию - "Нет".

Для обоих алгоритмов устанавливается временной интервал **[t_interval]**, по которому проводится осреднение временного сигнала, и интервал перекрытия **[t_overlapping]** с соседними временными участками временного сигнала.

Кривые могут быть выведены как по временному параметру, так и по оборотам ротора. Пример вывода осредненных кривых временного сигнала **[Peak-to-Peak]** показан на **Рис. 17.2**

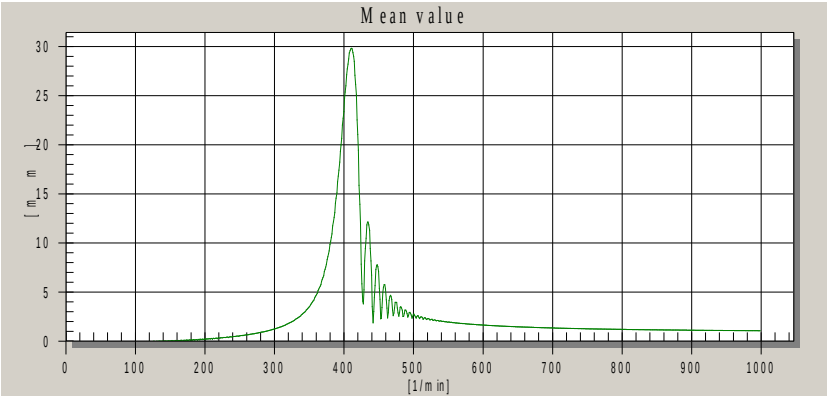


Рис. 17.2

17.2 Алгоритм быстрого преобразования Фурье

Окно настройки параметров быстрого преобразования Фурье (БПФ) показано на **Рис. 17.3**.

Des	FFT		Designation
window	Hanning		Window function
resampling step	1		Resampling load step
t_st_real	7	s	Real start time
t_fft_interval	0.33	s	Time interval for FFT
f1	0	Hz	Start frequency
f2	700	Hz	Stop frequency

Рис. 17.3

Таблица 17.2 Описание параметров элемента

Параметр	Обозначение	Описание параметра
Real start time	**t_st_real**	Время начала реализации, для которой будет проводиться БПФ
Window function	**window**	Тип накладываемой на выбранный диапазон временного сигнала оконной функции.
Resampling load step	**resampling step**	Шаг загрузки временного сигнала для уменьшения частоты дискретизации
Time interval	**t_interval**	Длина временной реализации
Start frequency	**f1**	Левая граница частотного диапазона

Stop frequency	**f2**	Правая граница частотного диапазона

Пользователь может самостоятельно установить время начала реализации **[t_st_real],** для которой будет проводиться БПФ и длину временной реализации **[t_interval].** Длина реализации не должна превысить длину оставшейся части временного сигнала.

Может быть также задан частотный диапазон от **[f1]** до **[f2]**для вывода спектра. Пример вывода вибрационного спектра представлен на **Рис. 17.4**.
Пользователь может отметить подписями пики на графике. Установить вериткальные линни кратных гармоник по отношению к текущей позиции курсора на графике (кликнуть по точке на графике и нажать соответствующую функцию)

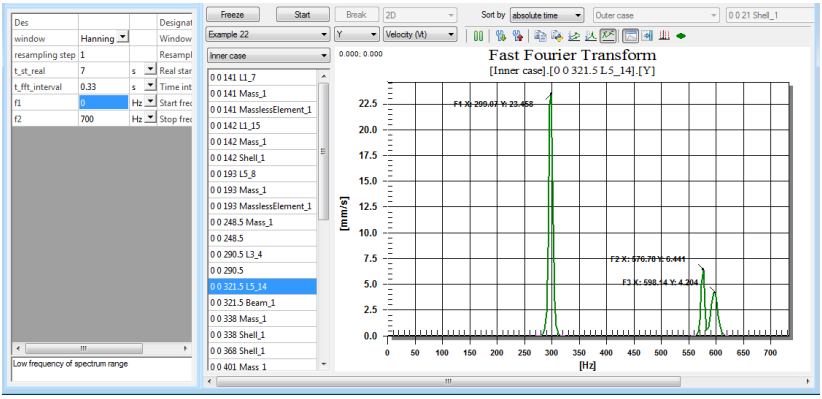


Рис. 17.4

Перед БПФ сигнал может дополнительно обработан наложением оконной функции.
Необходимо помнить, что БПФ производится для дискретных сигналов с количеством точек кратных степени 2 (например, ..., 4096, 8192, ...). Максимальное значение по частоте пиков в спектре Фурье равно половине частоты дискретизации.
В панели журнала печатается информация о количестве точек в запрошенной длине буфера, частоте дискретизации исходного сигнала. А также данные по количеству точек и длине АВХ использовавшейся в расчете БПФ.
Эту информацию полезно использовать для оптимизации параметров алгоритма [Каскадная диаграмма].

```
Requested t_fft_interval= 0.50[sec]; Number of points =
50001 Initial Sample rate=1.00000e+005 [Hz]
Actual t_fft_interval = 0.328[sec]; Number of points=
32768; Sample rate=1.00000e+005 [Hz]
```

При увеличении частоты дискретизации повышается точность определения высоких частот в спектре, точность определения низких частот при этом снижается. Если пользователя интересуют низкие частоты, то с помощью параметра [resampling step] можно понизить частоту дискретизации. Для resampling step=2 частота дискретизации уменьшается в два раза.

17.3 Каскадная диаграмма

Окно настройки параметров для вывода каскадной диаграммы вибрационных спектров показано на **Рис. 17.5.**

Des	Waterfall diagram		Designation
window	Hanning		Window function
resampling step	1		Resampling load step
t_st_real	0	s	Real start time
t_interval	10	s	Time interval
t_fft_interval	0.2	s	Time interval for FFT
t_overlapping	50	%	Interval overlapping
f1	0	Hz	Start frequency
f2	1000	Hz	Stop frequency

Рис. 17.5

Таблица 17.3 Описание параметров элемента

Параметры	Значение	Описание
Window function	**window**	Тип накладываемой на выбранный диапазон временного сигнала оконной функции.
Resampling load step	**resampling step**	Шаг загрузки временного сигнала для уменьшения частоты дискретизации
Real start time	**t_st_real**	Время начала интервала АВХ для построения каскадной диаграммы
Time interval	**t_interval**	Переменная, определяющая длину реализации, по которой рассчитывается набор спектров для диаграммы
Time interval for FFT	**t_fft_interval**	Переменная, определяющая длину реализации, по которой рассчитывается спектр
Interval overlapping	**t_overlapping**	Переменная, определяющая величину перекрытия реализаций для расчета осредненного спектра
Start frequency	**f1**	Начальная частота диапазона для вывода спектров
Stop frequency	**f2**	Конечная частота диапазона для вывода спектров

Пример каскадной диаграммы представлен на **Рис. 17.6**.
Описание оконных функций и рекомендаций настроек временного интервала для спектров см. в разделе Алгоритм Быстрого Преобразования Фурье.
Управление отображением:
Колесо мыши – увеличение/уменьшение
Зажать + двигать мышью - тере крутить график
Зажать + левый shift + двигать мышью - перемещать график
Подсветка спектра и значений режима при одинарном клике левой кнопкой мыши (ЛКМ).
Стрелками с клавиатуры можно менять выделенный спектр
При даблклике ЛКМ добавляются флаги к пикам.

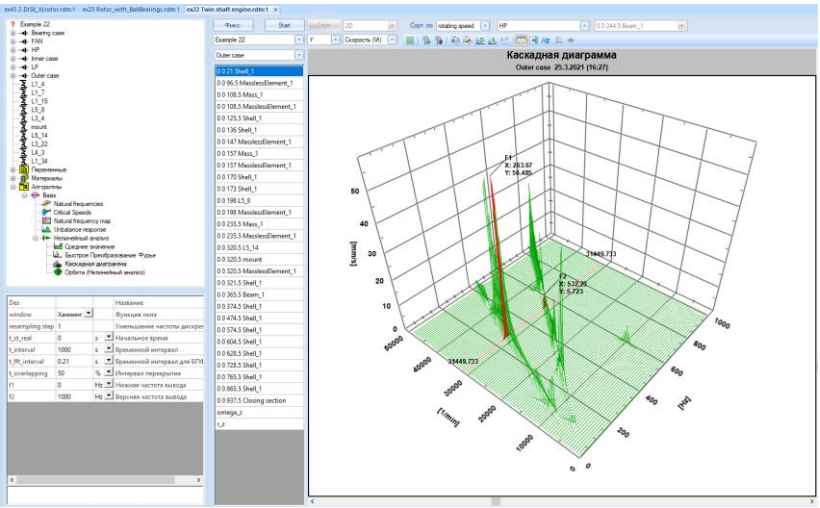


Рис. 17.6

С помощью бегунков горизонтальной и вертикальной управляющих линеек пользователь может поворачивать трехмерное изображение для получения наилучшего вида.

17.4 Орбиты движения

Окно настройки для вывода орбит движения показано на **Рис. 17.7**.

Des			Designation
t_st_real	0	s	Real start time
t_interval	10	s	Time interval

Рис. 17.7

Пользователь может вывести орбиты в любом сечении модели и любом интервале временного сигнала. Настройка интервала проводится параметрами начала вывода **[t_st_real]** и длины временного интервала **[t_interval]**.

Таблица 17.4Описание параметров элемента

Параметры	**Значение**	**Описание**
Real start time	**t_st_real**	Переменная устанавливает начальное время для вывода орбиты движения
Time interval	**t_interval**	Интервал времени, в котором будут выводиться орбиты

Орбиты могут быть выведены в двухмерном или трехмерном виде. Примеры двухмерного и трехмерного представления приведены на **Рис. 17.8**,**Рис. 17.9** соответственно.

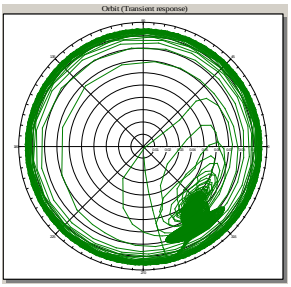


Рис. 17.8

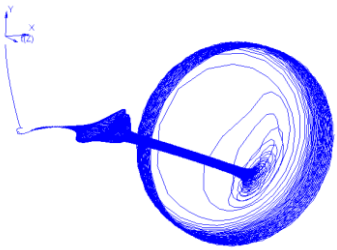


Рис. 17.9

17.5 Подшипники качения

Для проведения анализа состояния подшипника может быть использовано два варианта работы с интерфейсом DYNAMICS R4. Данные могут быть получены в рамках анализа временных сигналов в результатах алгоритма [**Нелинейный анализ**] и использования алгоритмов постобработки сигналов, либо с помощью алгоритма постобработки сигналов [**Подшипники качения**], **Рис. 17.10.**

Рис. 17.10

Если требуется проанализировать более подробно состояние подшипника для конкретного режима, то следует воспользоваться алгоритмом [**Подшипники качения**].

Для работы алгоритма требуется наличие рассчитанных результатов алгоритма [**Нелинейный анализ**]. Данные для алгоритма [**Подшипники качения**] могут быть загружены из ранее сохраненного расчета для текущей модели установки. Окно вывода информации представлено на **Рис. 17.11**.

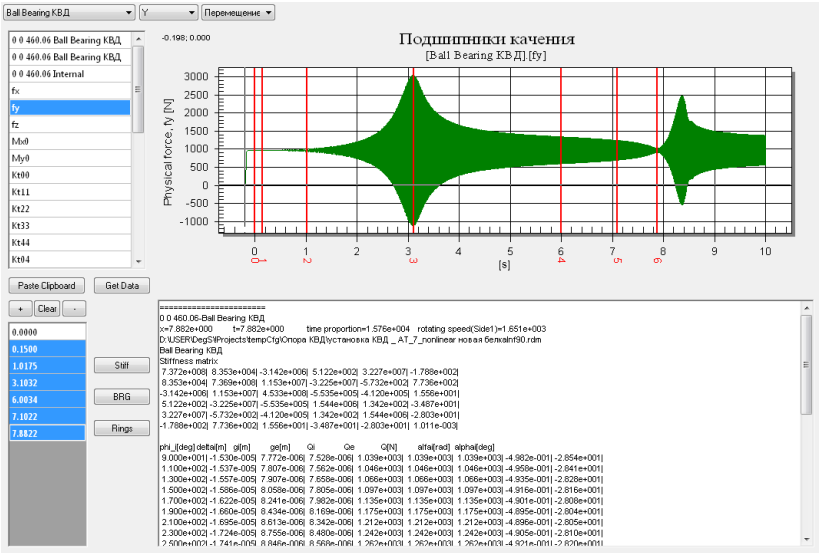


Рис. 17.11

Интерфейс алгоритма представлен несколькими основными блоками. В верхней части окна расположены список параметров/сечений исследуемого подшипника качения и график АВХ выбранного параметра. Эта часть окна используется для управления выбором режимов работы установки.

В нижней половине окна расположены элементы управления результатами по текущему подшипнику качения. Среди них список режимов для анализа состояния подшипника с элементами управления списком; окно вывода текстового протокола по текущему режиму и кнопки управления экспортом информации в буфер обмена.

Красными вертикальными линиями и цифрами на графике временного сигнала отмечены выбранные пользователем режимы, для которых проводится анализ состояния подшипника.

Рассмотрим последовательность действий пользователя при работе с данным алгоритмом. Сначала на АВХ отображаемого параметра с помощью курсора выбирается точка по интересуемому режиму. Для немедленного вывода данных по подшипнику нажимается кнопка [Get Data] Get Data. В окне протокола выводятся данные по параметрам состояния подшипника для выбранного режима. Среди них полная матрица жесткости, таблица параметров по телам качения, таблица линейных и угловых перемещений колец, реакций в подшипнике. Для составления списка режимов вместо кнопки [Get Data] может нажиматься кнопка +. В списке режимов появится временное значение выбранной точки. В дальнейшем достаточно выделить интересуемый режим в списке для вывода данных по подшипнику.
Кнопки [Stiffness], [BRG], [Rings] управляют экспортом данных.
Stiff - копирование в буфер обмена матрицы жесткости;
BRG - копирование в буфер обмена таблицы параметров по телам качения;
Rings - копирование в буфер обмена таблицы перемещений и реакций в кольцах подшипников.

Данные копируются в буфер обмена в формате, готовом для вставки в MS Excel.

В случае если в списке режимов выделено несколько сечений, в протокол выводится информация по последнему режиму, а по кнопкам копирования в буфер обмена записываются сводные таблицы по всем выделенным режимам.

Таблица 17.5

	Fx[N]	Fy[N]	Fz[N]	Mx[N/m]	My[N/m]	Mz[N/m]
ux[m]	7.36E+08	-6.94E+02	2.58E+04	1.53E+01	3.22E+07	-3.74E+02
uy[m]	-6.94E+02	7.35E+08	1.14E+07	-3.22E+07	-1.50E+01	-2.00E+00
uz[m]	2.58E+04	1.14E+07	4.52E+08	-4.82E+05	2.33E+03	0.00E+00
urx[rad]	1.53E+01	-3.22E+07	-4.82E+05	1.54E+06	0.00E+00	0.00E+00
ury[rad]	3.22E+07	-1.50E+01	2.33E+03	0.00E+00	1.54E+06	-3.78E+01
urz[rad]	-3.74E+02	-2.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.78E+01	0.00E+00

18 ПРОТОКОЛ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЕЕ АНАЛИЗА

Пользователь может вывести результаты создания модели динамической системы и результаты ее исследования. Для этого в панели инструментов программы существует функция **[Протокол]** с кнопкой . После нажатия кнопки открывается окно подготовки протокола, **Рис. 18.1**.

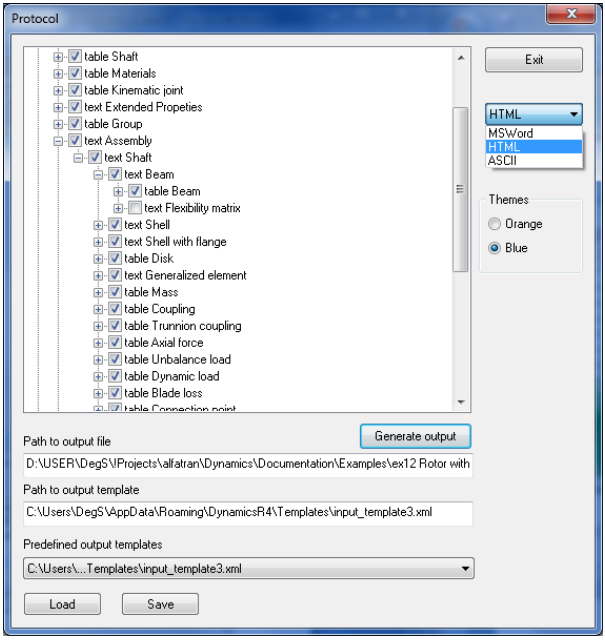


Рис. 18.1

Пользователь выбирает формат вывода протокола (**HTML, MS Word или ASCII)**. Формат вывода HTML является рекомендуемым и активен по умолчанию. Далее, проставляя галочки, указывает, какие данные из всего дерева протокола необходимо вывести, указывает, где сохранить протокол, формирует имя протокола и вводит эти данные с помощью кнопки **[Создать протокол]**. Настройка вывода протокола реализована в виде дерева.

Установка или снятие галочки в узловом элементе приводит к соответствующим изменениям во всех подуровнях. Например, установив галочку напротив **[Исходные данные],** будут выведены настройки всех элементов в модели. В дереве протокола присутствуют все типы элементов; если в модели не используются какие-либо из них, то они в протоколе показаны не будут, несмотря на установленные напротив них галочки.

ЗАМЕЧАНИЕ: Можно значительно сократить объем выводимых данных, исключив из вывода расчетные характеристики балочных элементов и оболочек, такие как матрицы податливости и массово инерционные характеристики

ЗАМЕЧАНИЕ: Настройки исходных данных по элементам, входящим в состав подсистемы, находятся в дереве: **[text Исходные данные]->[text Сборка]->[text Подсистема]**

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Желательно в протоколе результатов выводить только те данные, которые действительно необходимы. Установка галочек для всех элементов приведет к увеличенному времени генерации протокола и большому количеству текстовой информации на несколько сотен страниц

Пользователь может настроить вывод протокола один раз, после чего сохранить шаблон протокола, указав путь сохранения в нижнем поле диалога.

Пользователь может скопировать сохраненный шаблон протокола в папку “[User Application Folder]\DynamicsR4\Templates”, тогда появится возможность выбирать его из списка предопределенных шаблонов протоколов.

По умолчанию, файл с протоколом создается в одной папке с файлом модели и имеет такое же название. Расширение устанавливается в соответствии с форматом вывода.

Результаты вывода протоколов в разных форматах представлены на **Рис. 18.2**, **Рис. 18.3**, **Рис. 18.4**.

Calculation report on 16.7.2007 (13:58)

Input

System description: The model of twin-shaft gas turbine engine is represented. User can examine the dynamic structure properties computing the critical speeds, unbalance response, transient response.

System

Des	title	name	modified	x	y	z	m
				[mm]	[mm]	[mm]	[kg]
Example 22	Twin-Shaft Engine	Leontiev Mikhail	16.7.2007 (10:43)	0	0	0	0.000

Materials

Des	E	Nue	rho
	[N/m2]		[kg/m3]
titan	1e+011	0.3	4540
steel200	1.84e+011	0.3	7830
steel250	1.79e+011	0.3	7830
IN718	1.9e+011	0.3	8220
titan820	9.4e+010	0.3	4540
Al	7.2e+010	0.3	2.8
steel	1.5e+011	0.3	7830

Kinematic joint

Path	Des	z1	D*	omega_z
		[mm]	[mm]	[1/min]
Outer case.	Outer case	0	0	Outer case_Outer case
Inner case.	Inner case	0	0	Inner case_Inner case
Bearing case.	Bearing case	0	0	Bearing case_Bearing case
HP.	HP	0	0	HP_HP
FAN.	FAN	0	0	FAN_FAN
LP.	LP	0	0	LP_LP

Extended Propeties

Value variable

Des	value	argument	function
Variables.Outer case_Outer case	0	0	0
		10	0
Variables.Inner case_Inner case	0	0	0
		10	0
Variables.Bearing case_Bearing case	0	0	0
		10	0
Variables.HP_HP	0	0	0
		10	50000
Variables.FAN_FAN	0	0	0

Рис. 18.2

EX.22_Twin shaft engine.txt - Notepad

File Edit Format View Help

```
Calculation report on 16.7.2007 (14:0)
Input
System  description: The model of twin-shaft gas turbine engine is represented.
 User can examine the dynamic structure properties computing the critical speeds,
 unbalance response, transient response.
System
|          Des |                 title |                 name |             modified |     x |     y |     z |     m |
|              |                       |                      |                      |  [mm] |  [mm] |  [mm] |  [kg] |
|   Example 22 |   Twin-Shaft Engine   |  Leontiev Mikhail    |  16.7.2007 (10:43)   |     0 |     0 |     0 |  0.000 |

Materials
|          Des |           E |  Nue |       rho |
|              |       [N/m2] |      |   [kg/m3] |
|        titan |       1e+011 |  0.3 |      4540 |
|   steel200   |    1.84e+011 |  0.3 |      7830 |
|   steel250   |    1.79e+011 |  0.3 |      7830 |
|       IN718  |     1.9e+011 |  0.3 |      8220 |
|   titan320   |     9.4e+010 |  0.3 |      4540 |
|           Al |     7.2e+010 |  0.3 |       2.8 |
|        steel |     1.5e+011 |  0.3 |      7830 |

Kinematic joint
|             Path |              Des |    z1 |    D* |                    omega_z |
|                  |                  |  [mm] |  [mm] |                   [1/min] |
|     Outer case.  |     Outer case   |     0 |     0 |     Outer case_Outer case |
|     Inner case.  |     Inner case   |     0 |     0 |     Inner case_Inner case |
|   Bearing case.  |   Bearing case   |     0 |     0 |  Bearing case_Bearing case |
|             HP.  |               HP |     0 |     0 |                       HP_HP |
|            FAN.  |              FAN |     0 |     0 |                     FAN_FAN |
|             LP.  |               LP |     0 |     0 |                       LP_LP |

Extended Propeties
Value variable
|                                   Des |  value |  argument |  function |
|                                       |        |           |           |
|      Variables.outer case_Outer case  |      0 |         0 |         0 |
|                                       |        |        10 |         0 |
|                                       |        |           |           |
|      Variables.Inner case_Inner case  |      0 |         0 |         0 |
|                                       |        |        10 |         0 |
|                                       |        |           |           |
|  Variables.Bearing case_Bearing case  |      0 |         0 |         0 |
|                                       |        |        10 |         0 |
|                                       |        |           |           |
|                        Variables.HP_HP |      0 |         0 |         0 |
```

Рис. 18.3

Calculation report on 16.7.2007 (14:1)

Input

System_description: The model of twin-shaft gas turbine engine is represented. User can examine the dynamic structure properties computing the critical speeds, unbalance response, transient response.

System

Des	title	name	modified	x	y	z	m
				[mm]	[mm]	[mm]	[kg]
Example 22	Twin-Shaft Engine	Leontiev Mikhail	16.7.2007 (10:43)	0	0	0	0.000

Materials

Des	E	Nue	rho
	[N/m2]		[kg/m3]
titan	1e+011	0.3	4540
steel200	1.84e+011	0.3	7830
steel250	1.79e+011	0.3	7830
IN718	1.9e+011	0.3	8220
titan320	9.4e+010	0.3	4540
Al	7.2e+010	0.3	2.8
steel	1.5e+011	0.3	7830

Kinematic joint

Path	Des	z1	D*	omega_z
		[mm]	[mm]	[1/min]
Outer case.	Outer case	0	0	Outer case_Outer case
Inner case.	Inner case	0	0	Inner case_Inner case
Bearing case.	Bearing case	0	0	Bearing case_Bearing case
HP.	HP	0	0	HP_HP
FAN.	FAN	0	0	FAN_FAN
LP.	LP	0	0	LP_LP

Extended Propeties

Value variable

Des	value	argument	function
Variables.Outer case_Outer case	0	0	0
		10	0
Variables.Inner case_Inner case	0	0	0

Рис. 18.4

19 БАЗА ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

База данных программы формируется пользователем и постоянно отображается в основной библиотеке элементов программы, **Рис. 19.1**.

Ввод данных о материале ведется командами **[Tools]**, **[Edit Materials DB]**.

Задаются следующие данные, **Рис. 19.2:**

- Имя материала **[Designation]**
- Модуль упругости материала**[E**]
- Коэффициент Пуассона**[rho]**
- Плотность материала**[Nue]**

Логарифмический декремент **[Ln_dec]**

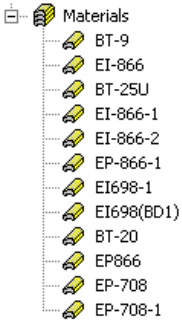


Рис. 19.1

Замечание: база материалов может быть перенесена на другой компьютер, если скопировать файл **[Директория установки программмы]\Data\materials.xml**

База данных материалов необходима в тех случаях, когда от проекта к проекту используются одни и те же материалы в моделях. Изменение свойств материалов в диалоге редактирования, добавление или удаление материалов не оказывает никакого влияния на материалы, уже добавленные в модели. Изменения, сделанные в базе данных материалов, будут действительны после перезапуска программы.

Замечание: Если требуется учесть различие характеристик материалов в зависимости от температуры, то пользователю необходимо добавить несколько материалов с одним и тем же названием и с пометкой, для какой температуры указаны свойства.

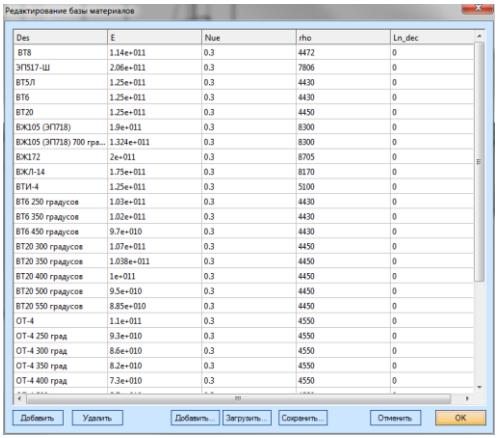


Рис. 19.2

Элементы управления:

- [Добавить] - Добавляет в БД шаблон позиции материала с характеристиками по умолчанию
- [Удалить] - Удаляет либо текущую, либо выделенные строки в таблице материалов
- [Добавить...] - Позволяет выбрать файл с сохраненной базой материалов и добавить ее к таблице материалов
- [Загрузить...] - Позволяет выбрать файл с сохраненной базой материалов и заместить содержимое таблицы данными из файла
- [Сохранить...] - Позволяет выбрать файл для сохранения копии Базы материалов в файле на диске.

Замечание: Файл базы материалов хранится в папке с настройками пользователя. Например, в Windows XP «C:\Documents and Settings\[User Name]\Application Data\DynamicsR4\materials.xml». Кнопка **[Сохранить...]** не влияет на расположение файла

20 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА “PYTHON” ПРИ СОЗДАНИИ СКРИПТА ЭЛЕМЕНТА “USER LINK”

“**User link”** элемент позволяет пользователю на базе имеющейся у него математической модели или алгоритма разработать собственный нелинейный элемент связи между подсистемами в виде скрипта (текста программы на языке PYTHON (версии 3.x)) .
Его можно включить в общую схему расчетов роторной системы любой сложности с уже имеющимися наборами нелинейных элементов.
В настоящем разделе даются некоторые рекомендации по использованию языка программирования PYTHON (версии 3.x) при создании нового нелинейного элемента.

20.1 Связь скрипта с программой DYNAMICS R4

Основным элементом, ответственным за связь с программой в скрипте, является объект **exchangeContainer**.
Через этот объект происходит обмен данными между интегратором в программе и алгоритмов в скрипте. Входными данными для скрипта, реализующего нелинейный алгоритм, являются данные по перемещениям, скоростям, ускорениям, углам поворота в сечениях, к которым подключена связь **UserScriptLink, Таблица 11.1.**

При обращении к переменной внутри контейнера используется ее имя.

Пример:

```
ux1=exchangeContainer.getDoubleValue('ux1')
Tx1=exchangeContainer.getDoubleValue('tx1')
```

Параметрами на выходе скрипта являются силовые и моментные реакции, **Таблица 11.2**.

Пример:

```
exchangeContainer.setDoubleValue('fx1',fx1)
```

20.2 Дополнительные параметры

Для работы алгоритма нелинейного элемента зачастую необходима дополнительная информация о скоростях вращения подсистем, текущем времени интегрирования, фазе и т.п. Дополнительные параметры представлены в **Таблица 20.1**.

Таблица 20.1

Параметр	тип	Описание
time_proportion	double	Текущее относительное время (ось абсцисс на законе изменения скорости)
integration_time	double	Текущее абсолютное время, время интегрирования
rotating_phase1, rotating_phase2	double	Текущая фаза вращения соответствующих подсистем
rotating_speed1, rotating_speed2	double	Текущие скорости вращения подсистем
call_status	int	Возвращает информационный флаг интегрирования по текущему шагу. -1 –первый вызов алгоритма (firstCall) 0- штатный шаг(processCall) 1- последняя итерация (lastCall)

		2-шаг, который будет сохранен (processCallSave)

Пример:

```
omega1=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_speed1')
phase1=exchangeContainer.getDoubleValue('rotating_phase1')
flag= exchangeContainer.getIntValue(‘call_status’)
```

20.3 Функции объекта exchangeContainer

getDoubleValue('Var_name'), getIntValue('Var_name')

Данные функции позволяют получать из контейнера значения переменных, соответствующих отправленным именам параметров (имена отправляются в кавычках)
Примеры приведены в разделе описания параметров.

setDoubleValue('Var_name', var), setIntValue('Var_name', var)

Данная функция устанавливает значение параметра 'Var_name' из переменной скрипта var, либо создает новый параметр в exchangeContainer.

Пример:

```
force_x1=100.5
exchangeContainer .setDoubleValue (‘fx1’, force_x1)
```

ЗАМЕЧАНИЕ: Будьте внимательны: если в кавычках отправлено имя параметра, отсутствующего в объекте exchangeContainer, то эта функция добавит в контейнер новый параметр. Данная возможность может быть использована для обмена данными, общими для всех итераций. Пример см в разделе функции IsExist.

IsExist ('Var_name','Type')

Функция служит для проверки наличия в контейнере переменной. В качестве параметров в функцию отправляются две строки. Первый параметр – имя переменной. Второй параметр - тип переменной. Возвращаемое значение - булево (True или False)

Пример:

```
test_var=0
if False==exchangeContainer.IsExist(' test_var ','double'):
      #will execute only at first iteration
      #calculation of some data
test_var=CalcSomething(…)
       trace(' test_var ='+str(test_var))
exchangeContainer.setDoubleValue(' test_var ', test_var)
   else:
test_var =exchangeContainer.getDoubleValue(' test_var ')
```

20.4 Печать отладочной информации в “логе” программы

trace(‘сообщение’)

Позволяет распечатать нужную информацию в окне Log программы.

Пример:

```
trace(' test_var ='+str(test_var))
```

Здесь функция str(test_var) преобразует число в строку (функция Python)

20.5 Ускорение работы скриптового элемента

Вы можете ускорить работу нелинейного алгоритма запрограммированного в **User Script Link**. Для этого скрипт условно делится на две логические части: первая – инициализация, вторая – основной алгоритм, который должен вызываться на каждом шаге нестационарного расчета. Эта вторая часть алгоритма выносится в специальную функцию, которая будет вызываться многократно,

остальная часть скрипта будет запущенна однажды в самом начале расчета. С этой целью нужно определитьт функцию со специальным служебным именем “dyn_loop()”, при отсуствии ее определения для расчета каждой временной отметки весь скрипт будет запускаться целиком.

```
#код вызываемый в начале расчета (инициализация)

def dyn_loop():
        #  основной алгоритм здесь
```

В окне редактирования скрипта это может выглядить следующим образом.

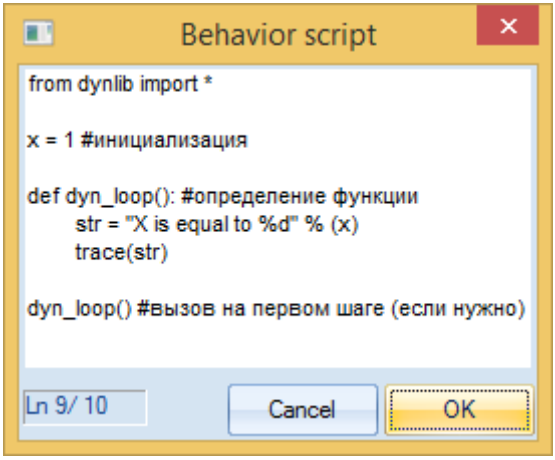


Рис. 20.1

21 КОМАНДНЫЙ ИНТЕРФЕЙС МОДЕЛИРОВАНИЯ

Командный интерфейс расширяет возможности пользователя по созданию моделей, а также проведению вариантных расчетов. Он дает возможность написания конвертеров из форматов моделирования или протоколов сторонних программ в формат DYNAMICS R4. Позволяет организовать автоматический ввод данных|, представленных в табличном виде. Позволяет создавать так называемые "калькуляторы" - небольшие программы, рассчитывающие характеристики элементов.

Конвертеры. Иногда при построении модели пользователь сталкивается с тем, что исходные данные представлены в виде таблиц. Это могут быть данные моделирования из сторонних программ, либо они были оформлены в таком виде после снятия с чертежей, либо это результаты расчетов матриц жесткостей подшипников в зависимости от режима. Занесение больших объемов табличных данных занимает много времени и чревато ошибками пользователя при вводе. Для автоматизации таких операций удобно использовать командный интерфейс моделирования.

Калькуляторы. Иногда, чтобы ввести данные в какой либо элемент, необходимо провести предварительные расчеты некоторых параметров (например, жесткостей опор, податливостей во фланцах) в зависимости от характеристик узла. Такой расчет может быть организован в скрипте, а полученные значения могут быть использованы при вставке элемента (для дополнительной информации см. Справочную систему DYNAMICS R4).

Параметризация. Пользователь может написать генерирование точек сложной функции и создать переменную, описывающую изменение какого-либо параметра по сложному закону

На **Рис. 21.1** приведен пример скрипта, создающего жестко закрепленную с одного края балку, состоящую из 10 участков.

ex01_Canteliver_bar.py - D:\For Learn\LearningCourse\ex01_Canteliver_bar.py

File Edit Format Run Options Windows Help

```
from dynlib import *

#/////////////////////////////////////////////////////////
document=exchangeContainer.getObject("document")
root=document.getRootObject()
bldr=ModelBuilderRDM(root)
#/////////////////////////////////////////////////////////

bldr.setCurrentMaterial(7850,2.1e+011,0.3,0)
obj_Subsystem_1=bldr.shaft("Subsystem 1",0,0,0,0,0,0,0.01)
bldr.clearCurrentMaterial()

for i in range(10):
        bldr.beam("Beam "+str(i+1),0.1,0,0.02)

obj_Rigid_link_1=bldr.rigidLink("Rigid link 1",None,None,1,1,1,1,1,1)
bldr.connectLink2(obj_Rigid_link_1,obj_Subsystem_1,0,None,0)

trace("Script finished")
```

Ln: 19 Col: 24

Рис. 21.1

Модель, сделанную в скрипте, можно загрузить в программу выбрав команду меню **[Файл/Запуск скрипта].**
Сделанную стандартными средствами модель можно экспортировать в скрипт, выбрав команду в меню **[Файл/ Экспорт в скрипт].**

ЗАМЕЧАНИЕ: Для работы со скриптами рекомендуется установить Python SDK (www.python.org)

21.1 Конвертеры

Занесение больших объемов табличных данных занимает много времени и чревато ошибками пользователя при вводе. Для

автоматизации таких операций удобно использовать командный интерфейс моделирования.
Вместе со справочной системой программы поставляется конвертер данных, рассчитываемых в программах **Xlpocket** и **Xtltpad** (www.rmt-inc.com).

В этих программах (**Рис. 21.2**) проводится расчет коэффициентов жесткости и демпфирования различных типов подшипников скольжения (цилиндрические, эллиптические, сегментные) по режимам работы.

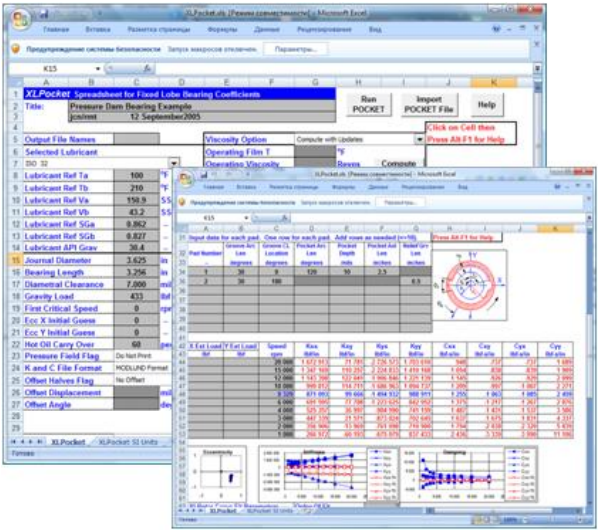


Рис. 21.2

Необходимо завести рассчитанные данные в программу DYNAMICS R4 (**Рис. 21.3**)

Speed rpm	Kxx lbf/in	Kxy lbf/in	Kyx lbf/in	Kyy lbf/in	Cxx lbf-s/in	Cxy lbf-s/in	Cyx lbf-s/in	Cyy lbf-s/in
20 000	1 672 913	71 781	-2 726 573	1 703 610	948	-737	-737	1 689
15 000	1 347 169	110 257	-2 224 833	1 410 168	1 054	-838	-839	1 909
12 000	1 143 398	122 041	-1 906 846	1 221 139	1 145	-926	-929	2 099
10 000	999 812	114 711	-1 686 963	1 094 737	1 209	-997	-1 007	2 271
8 329	871 093	99 666	-1 494 932	988 911	1 255	-1 063	-1 085	2 459
6 000	691 595	77 788	-1 223 625	842 952	1 375	-1 217	-1 267	2 876
4 000	525 357	36 997	-984 990	741 159	1 487	-1 431	-1 537	3 586
3 000	447 339	21 571	-873 024	702 645	1 637	-1 675	-1 831	4 337
2 000	356 906	-13 969	-761 098	710 900	1 794	-2 038	-2 320	5 839
1 000	266 972	-60 193	-675 079	837 433	2 436	-3 339	-3 990	11 106

Рис. 21.3

Как видно из таблицы, рассчитаны данные по 8 коэффициентам жесткости и демпфирования для 12 режимов. Вручную пришлось бы завести в DYNAMICS R4 модели 8 переменных, создать связь с несимметричной матрицей жесткости, присоединить к каждому коэффициенту в матрицах по переменной. А в самих переменных завести по 12 режимов. Эта механическая работа требует больших затрат времени в случае работы с несколькими опорами или несколькими вариантами.

Для ускорения работы и исключения ошибок при вводе были написаны скрипты, которые эти действия выполняют автоматически. Для их работы необходимо исходные данные перевести из таблицы в файл Brgs_Input.py и сформировать массив Bearing1(имя произвольное)

```
Bearing1=[
20000,1672913,71781,-2726573,1703610,948,-737,-737,1689,
15000,1347169,110257,-2224833,1410168,1054,-838,-839,1909,
12000,1143398,122041,-1906846,1221139,1145,-926,-929,2099,
10000,999812,114711,-1686963,1094737,1209,-997,-1007,2271,
8329,871093,99666,-1494932,988911,1255,-1063,-1085,2459,
6000,691595,77788,-1223625,842952,1375,-1217,-1267,2876,
4000,525357,36997,-984990,741159,1487,-1431,-1537,3586,
3000,447339,21571,-873024,702645,1637,-1675,-1831,4337,
2000,356906,-13969,-761098,710900,1794,-2038,-2320,5839,
1000,266972,-60193,-675079,837433,2436,-3339,-3990,11106
]
```

1. Таблица с коэффициентами жесткости и демпфирования копируется в пустой файл таблицы Excel. Последним столбцом добавляется какая-нибудь буква.
2. Файл сохраняется как csv с запятыми в качестве разделителей.
3. Затем сохраненный файл открывается в текстовом редакторе (например, в notepad). Если вместо разделителей запятых стоят ";", то меняем их на запятые (ctrl+H), также удаляем все буквы из последнего столбца и запятую после последнего элемента. Данные по подшипнику готовы для вставки в скрипт.
4. Вставляем полученный массив внутрь квадратных скобок

В приложенном в справочной системе архиве приведен пример импорта данных по трем подшипникам. В модель добавляются также переменная для скоростей, подключенная к созданной подсистеме. Для каждой связи с несимметричными матрицами (работают только в модальных алгоритмах - все кроме Базиса) дополнительно добавляется обычная связь с постоянными коэффициентами жесткости для базиса

Состав архива:

BldrBearings.py - данный файл запускается из меню Файл "Запуск скрипта"
Brgs_Input.py - модуль для определения исходных данных по подшипникам
Bearing.py - вспомогательный модуль, редактирование не требуется
Interpolation.py- вспомогательный модуль, редактирование не требуется

ЗАМЕЧАНИЕ: Значения коэффициентов жесткости и демпфирования в переменных заведены в системе Си (N/m, N*s/m). В созданных связях необходимо заменить единицы с N/mm на N/m. Разделителем разрядов в скрипте должна быть точка. Не должно быть пробелов - разделителей групп разрядов

22 КАЛЬКУЛЯТОР МАТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

В работе инженера при моделировании сложных конструктивных узлов может возникнуть необходимость в матричных вычислениях. Например, в результате моделирования в МКЭ программах общего назначения были получены матрицы податливости опорных узлов двигателя. Для ввода данных о полученных упругих свойствах в модели с помощью связей может потребоваться операция инвертирования матрицы податливости в матрицу жесткости.

Для удобства пользователя в DYNAMICS R4 был добавлен калькулятор для матричных операций. Вызывается из меню «Сервис \ Матричный калькулятор», **Рис. 22.1.**

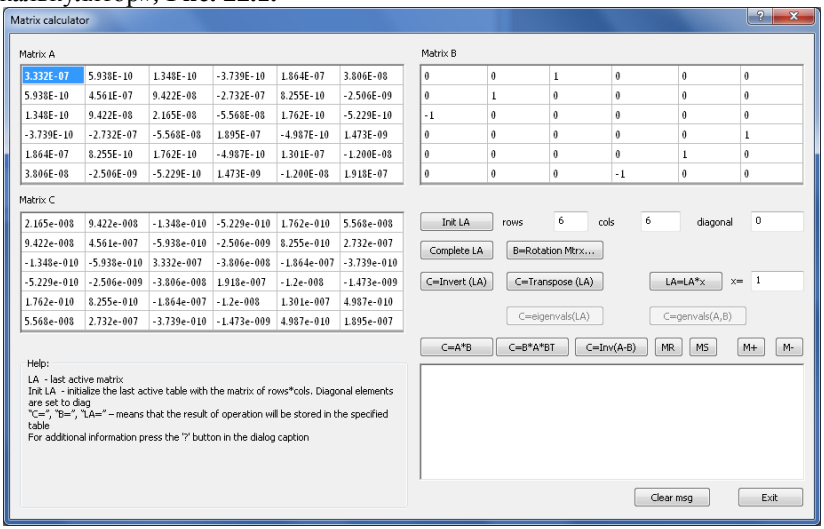


Рис. 22.1

Окно калькулятора состоит из трех таблиц, представляющих данные по матрицам A, B, C, кнопок операций над матрицами и окна сообщений. Матрицы могут быть вставлены из буфера обмена. Они могут быть скопированы из других таблиц в программе, файлов протокола, Excel, Word или из текстового файла (разделители – запятые и табуляция).
Перед вставкой матриц необходимо задать в таблице необходимое количество строк и столбцов. Пометка “LA” на кнопке означает, что операция будет производиться над матрицей из последней активной таблицы (Last Active). Пометки “C=”, “B=”, “LA=” указывают, куда будет записан результат операции.

Описание операций:

“**Init LA**” – инициализация последней активной матрицы (LA) по заданному количеству строк и столбцов с заполнением диагонали.

“**Complete LA**” – заполнение левого нижнего угла матрицы по верхнему правому. Может использоваться при вставке матриц из связей в DYNAMICS R4.

“**B=Rotation Matrix…**” – вызов диалога формирования матрицы поворота 6*6 из одной правой системы координат в другую.

“**C=Invert(LA)**” – инвертирование LA с записью результата в C (перевод матриц податливости в жесткости и обратно)

“**C=Transpose (LA)**” – транспонирование LA с записью результата в C

“**LA=LA*x**” – умножение LA на число

“**C=A*B**” – перемножение матриц A и B с записью результата в C

“**C=B*A*BT**” – операция разворота/перестановки матрицы

“**C=Inv(A-B)**” – инвертирование результата вычитания матрицы B из A. (компенсирующие связи)

“MR, MS, M+,M-” – операции работы с памятью и LA - чтение из памяти в LA; сохранение LA в память; суммирование LA с матрицей в памяти; вычитание из матрицы в памяти LA

Получение матрицы поворота

При нажатии на кнопку “**B=Rotation Matrix…**” вызывается диалог получения матрицы поворота для перехода из одной системы координат в другую. Используется для перевода матрицы жесткости или податливости (6*6)

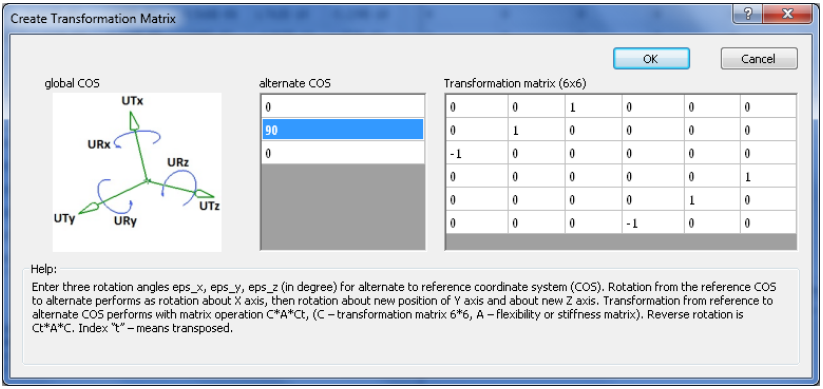


Рис. 22.2

Введите три угла поворота eps_x, eps_y и eps_z для альтернативной системы координат (СК), **Рис. 22.2**. Единицы измерения - градусы. Поворот глобальной СК в альтернативную производится путем последовательных поворотов вокруг оси X (eps_x), затем вокруг нового положения Y(eps_y), затем вокруг нового положения Z (eps_z). Переход из глобальной СК в альтернативную производится следующей матричной операцией: C*A*Ct, где C - матрица поворота 6*6, A - матрица жесткости или податливости в глобальной СК. Обратный переход - Ct*A*C.

23 ЗАМЕНА ЭЛЕМЕНТОВ [ЖЕСТКАЯ СВЯЗЬ]

Вследствие некорректного моделирования в сложных моделях при интенсивном использовании элементов типа [Жесткая связь] при расчете базиса формы могут рассчитываться с плохой ортогональностью. Об этом свидетельствуют относительно большие значения в матрице ортогональности (1e-5…1) для недиагональных элементов.

Это может происходить, например, при перезакреплении в некоторых сечениях. Несколько жестких связей подходят к одному или близким сечениям. Для проверки причин плохой ортогональности есть возможность автоматической замены элементов типа [Жесткая связь] на эквивалентные упругие элементы [Связь].

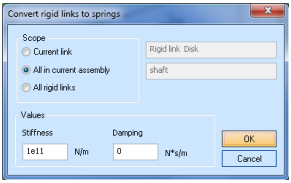


Рис. 23.1

В эквивалентной упругой связи большая жесткость назначается только для тех степеней свободы, которые были закреплены в жесткой связи. При выборе меню [Сервис\Замена жестких упругими связями] откроется диалоговое окно с настройками замены (Рис. 23.1).

С помощью этих настроек можно задать эквивалентную жесткость (рекомендуемые значения 1e10-1e12 Н/м) и характер производимой замены. Помимо текущей связи, могут быть заменены все жесткие связи в текущей сборке или во всей модели.

Замечание: более подробная информация присутствует в «Методических указаниях».

24 ГОРЯЧИЕ КЛАВИШИ

Для ускорения некоторых операций в программе имеются следующие горячие клавиши. ЛКМ – левая кнопка мыши.

Горячие клавиши	Контекст	Описание
Ctrl +G	Группа	Включает-отключает текущую группу
Ctrl +G	Группы	Добавляет новую группу
Ctrl +G	Точечный элемент	Добавляет текущий элемент в последнюю использованную группу
Ctrl	2D Панель	Старый режим выделения активных элементов, выделяются элементы только активной сборки
Ctrl	Переменнные, Библиотека	Структурирование групп переменных. При зажатой клавише Ctrl и неактивном элементе Переменные в дереве модели на добавлении двойным кликом выдает запрос на выбор родительского элемента
Ctrl+Shift+V	Переменные, Дерево модели	Создать новую переменную в выделенном в дереве модели узле Переменные
Ctrl+Shift+V	Параметр элемента	Создать новую переменную и присоединить к текущему параметру активного элемента

Ctrl+L	2D Панель, Дерево модели	Создает элемент [Связь] в активной сборке
Ctrl+Shift+L	2D Панель, Дерево модели	Создает элемент [Связь] с запросом родительской сборки
Shift+L	2D Панель, Дерево модели	Добавляет элемент [Квазилинейная связь]
Ctrl +ЛКМ click	2D Панель, Дерево модели	Элемент добавляется с размерами по положению курсора, а не размерами предыдущего элемента.
Ctrl+2	Параметр элемента	Умножает текущий параметр элемента на 2
Ctrl+4	Параметр элемента	Умножает текущий параметр элемента на 2
Ctrl+Shift+2	Параметр элемента	Делит текущий параметр элемента на 2
Ctrl+Shift+4	Параметр элемента	Делит текущий параметр элемента на 4
Shift	Перенос элемента	При зажатой клавише Shift перенос объекта ведет к копированию элемента в новое положение, и удаление из старого
ctrl+shift+Z	Дерево модели	Перемещение по истории активных элементов. Активирует предыдущий активный элемент
ctrl+shift+Y	Дерево модели	Перемещение по истории активных элементов. Активирует следующий активный элемент

25 ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А.В.** Расчет резонансных режимов газотурбинных двигателей, Труды Московского авиационного института, т. 245, 1972, стр. 66-77.

2. **M.K. Leontiev, E.V.Borzdyko and S.L.Zvonarev.** Gas-turbine dynamic response analysis through simulation. Proceedings of the international conference on rotating machine dynamics ROTORDYNAMICS'92. Poster Session Papers. Hotel Des Bains, Venice, Italy, 28-30 April 1992, pp. 1-10.

3. **M.K. Leontiev, S.L.Zvonarev.** Improvement of Gas-Turbine Engine Dynamic Structure With Rotor Rubbing Through Mathematical Simulation. Proceedings of the international conference VIBRATION & NOISE '95. Venice, Italy, 1995, pp. 641-649

4. **Леонтьев М.К., Иванов А.В., Дегтярев А.А.** Программная система для расчета и анализа роторной динамики турбомашин Dynamics R3.1. Свидетельство об отраслевой разработке №2716. Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Государственный информационный центр информационных технологий. Министерство образования Российской Федерации. 2003 г.

5. **Леонтьев М.К.** Современные методы расчета динамических характеристик роторных систем. NASTRAN или DYNAMICS? “Двигатель”, 2004, №3 (33), С.14-16.

6. **Иванов А.В., Леонтьев М.К.** Модальный анализ динамических систем роторов. “Известия высших учебных заведений. Авиационная техника”. 2005, №3. С.31-35.

7. **Д.В. Хронин.** Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов, М.: Машиностроение, 1980 г.

8. **Ivanov A., Leontiev M., (2004)** Vibrations of multi-shaft systems with gears. Consulting agreement on rotordynamic analysis and other services. Stage 1. Technical Report, INA - Moscow aviation institute, 34 pp.

9. **Ivanov A., Leontiev M.** Vibrations of multi-shaft systems with gears. Consulting agreement on rotordynamic analysis and other services. Stage 5. Technical Report. INA- Alfa-Tranzit Co. Ltd, December, 2003. 40pp.

10. **Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.** Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение. 1993. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. Прикладная механика. М.:Высшая школа, 1989.

11. **А.И.Белоусов, В.Б.Балякин, Д.К.Новиков.** Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов. - Самара:Издательство СНЦ РАН. 2002. – 335 с.

12. **William T. Tomson.** Theory of Vibration with Applications. Prentice - Hall, 1981.

13. **Bohm,T. Tame** The Menace of Turbine Vibration, SAE Journal, February 1966, pp.44-48

14. **Hibner, H.** Dynamic Response of Viscous-Damped Multi-Shaft Jet Engines, AIAA J.Aircraft,Vol.12, No.4, 1975, pp.305-312.

15. **Childs, D.W. A** Modal Transient Rotor-Dynamic Model for Dual-Rotor Jet Engine Systems, Journal of Engineering for Industry. Trans.ASME, August 1976, pp.876-882.

16. **Gunter, E.J., Li,D.F**. Component Mode Synthesis of Large Rotor Systems, Trans.ASME, Vol.104, Jule 1982, pp.552-560.

17. **Marmol, A.A., Akin,J.T.** Rapid Verification of Engine Rotor Case Flexibilities by the Modal Comparison Algorithm, Journal Aircraft, Vol.12. No.4 1975.

18. **Mohan, S.Hahn,E.J.** Design of Squeeze-Film Damper Supports for Rigid Rotors, Journal of Engineering for Industry, Trans.ASME, August 1974, pp.976-982.

19. **Bhat, S.T., Buono,D.F., Hibner,D.H** Analysis of High Load Dampers, NASA-CR-165503, Final Report, 1981, pp.79.

20. **M.A. Prohl**, "A General Method for Calculating Critical Speeds of Flexible Rotors", Journal of applied Mechanics, Vol. 12, 1945, pp. 142-148.

21. **Timoshenko,** "Vibration Problems in Engineering", D. Van Nostrand Company, 3rd Edition, 1955.

22. **Gunter, E. J.,** "Dynamic Stability of Rotor Bearing Systems", NASA SP-113, Washington, D.C., NASA 1966.

23. **Johne M. Vance,**Rotordynamics of Turbomachinery, A Willey-Interscience Publication, 1988

24. **Hurty, W.S.,** 1965**,** “Dynamic Analysis of Structural Systems Using Component Modes”, AIAA Journal, Vol. 3, No.4, pp 678-685.

25. **Craig, R.R. and Bampton, M.C.C**., 1968, “Coupling of Structures for Dynamic Analysis”, AIAA Journal, Vol.6, No.7, pp.1313-1319.

26. **Sellgren, U.,** 2003, “Component Mode Synthesis/A method for efficient dynamic simulation of complex technical systems”, Technical report. ISSN 1400-1179, pp.

27. **Geradin, M., Cardona, A**., 2000, ”Flexible Multibody Dynamics/A Finite Element Approach”, JOHN WILLEY & SONS, LTD, pp. 327

28. **Ivanov A., Leontiev M.,** (2004) Vibrations of multi-shaft systems with gears. Consulting agreement on rotordynamic analysis and other services. Stage 1. Technical Report, INA- Moscow aviation institute, pp. 34

29. **Felippa C.A., Park K.C.,** “The Construction of Free-Free Flexibility Matrices for Multilevel Structural Analysis”, Report No. CU-CAS-01-06, College of Engineering University of Colorado, June 2001, pp.33

30. **David P. Fleming, Jerzy T. Sawicki, J.V. Poplawski,** Unbalance Response Prediction for Accelerating Rotors With Load Dependent Nonlinear, June 2005, NASA/TM-2005-213801

31. **Childs, Dara.W.** “Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis”. JOHN WILLEY & SONS, INC.1993. pp. 476

32. **S. D. Cohen and A. C. Hindmarsh,** "CVODE, A Stiff/Nonstiff ODE Solver in C," Computers in Physics, Vol. 10, No. 2 (March-April 1996), pp. 138-143

33. **NASA Conference Publication 2250** “Rotordynamic Instability Field Problems, Rotordynamic Instability Problems in High Performance Turbomachinery”, Texas A&M University, May 10-12, 1982, pages 1-19.

34. **Jimming Li, Pranabesh De Choudhury, Mike Sharples, John Wright**“Experiences and Applications of API 617 Full Stability Analysis (Level - II) on Centrifugal Compressors”.

35. **Alford, J.S.,** 1965, “Protecting Turbomachineryfrom Self-Excited Rotor Whirl”, ASME Journal of Engineering for Power, 87 (4), pp.333-344

36. **J.C.Wachel**“Rotordynamic Instability Field Problems, Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery”, NASA Conference Publication 2250, Texas A&M University, May 10-12, 1982, pages 1-19.

37. **API Standard 617**, 2002, Axial and Centrifugal Compressors and Expander-Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services, Second Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C

38. **API Standard 684,** 2005, Tutorial on Rotordynamics: Lateral Critical Speeds, Unbalance response, Stability, Train Torsional and Rotor Balancing,, Second Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C.

39. **John Nicholas, John A. Kocur** “Rotordynamic design of Centrifugal Compressors in Accordance with the New API Stability Specification”, Proceedings of the 34-th Turbomachinery Symposium, TurbomachineryLabarotory, Texas A&M University, College Station, TX, pp. 25-34, 2005
40. **Heshmat H., Walowit J. A., Pinkus O.** “Analysis of gas-lubricated foil journal bearings”, Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, No. 4, 1983, pp. 647-655.
41. **Kim Y. C., Lee D. H., Kim K. W.** “Performance analysis of double-bump air foil bearings”, Tribology Transactions. Vol. 51, No. 3, 2008, pp. 285-295.
42. **Black, H. F., Jenssen, D. N.,** Dynamic Hybrid Bearing Characteristics of Annular Controlled Leakage Seals, Proc Instn Mech Engrs, 1970, Vol. 184, pp. 92- 100.
43. **Childs, D. W.** (July 1, 1983). "Dynamic Analysis of Turbulent Annular Seals Based On Hirs’ Lubrication Equation." ASME. J. of Lubrication Tech. July 1983; 105(3): 429–436.
44.

© Все права защищены
ООО “АЛЬФА-ТРАНЗИТ”® 2000-2021