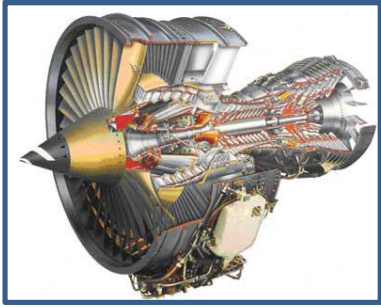


# Виртуальное моделирование элементов двигателя на базе многодисциплинарных моделей

## Лекция 5.

Кинематика и динамика: расширенные возможности  
MSC. ADAMS



## Отличие расчёта с отображением движения (симуляции) от анимации

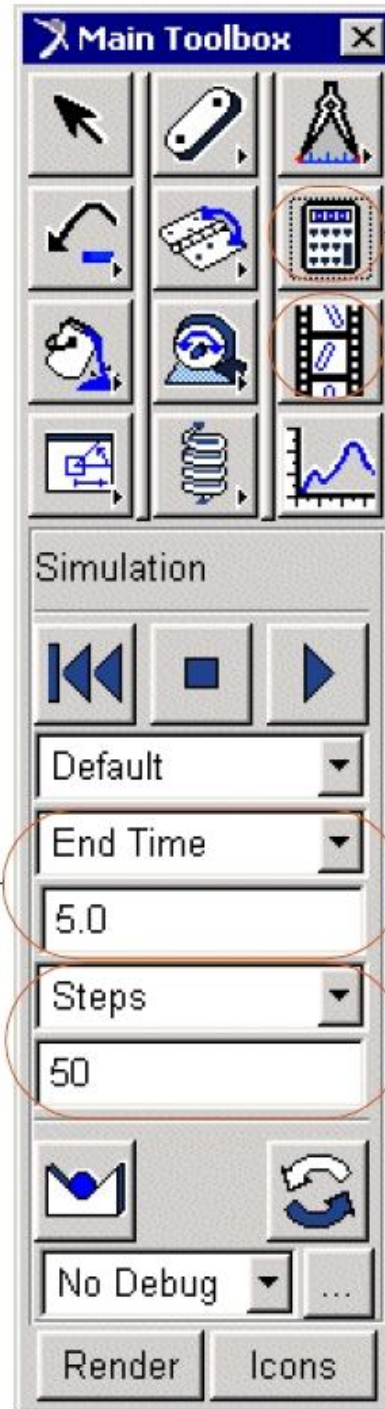
Симуляция – это решение уравнений, описывающих движение механической системы.

Анимация – это визуальное отображение на экране результата ранее проведённой симуляции (расчёта).

Simulation time interval

**End time:** absolute point in time to stop simulation

**Duration:** relative amount of time to simulate over



Simulation tool

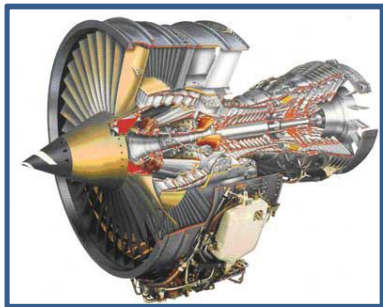
Animation tool

Возможно проведение расчёта без отображения движения модели, что существенно его ускоряет.

Simulation output

**Step size:** amount of time between steps

**Steps:** total number of steps in a specified amount of time



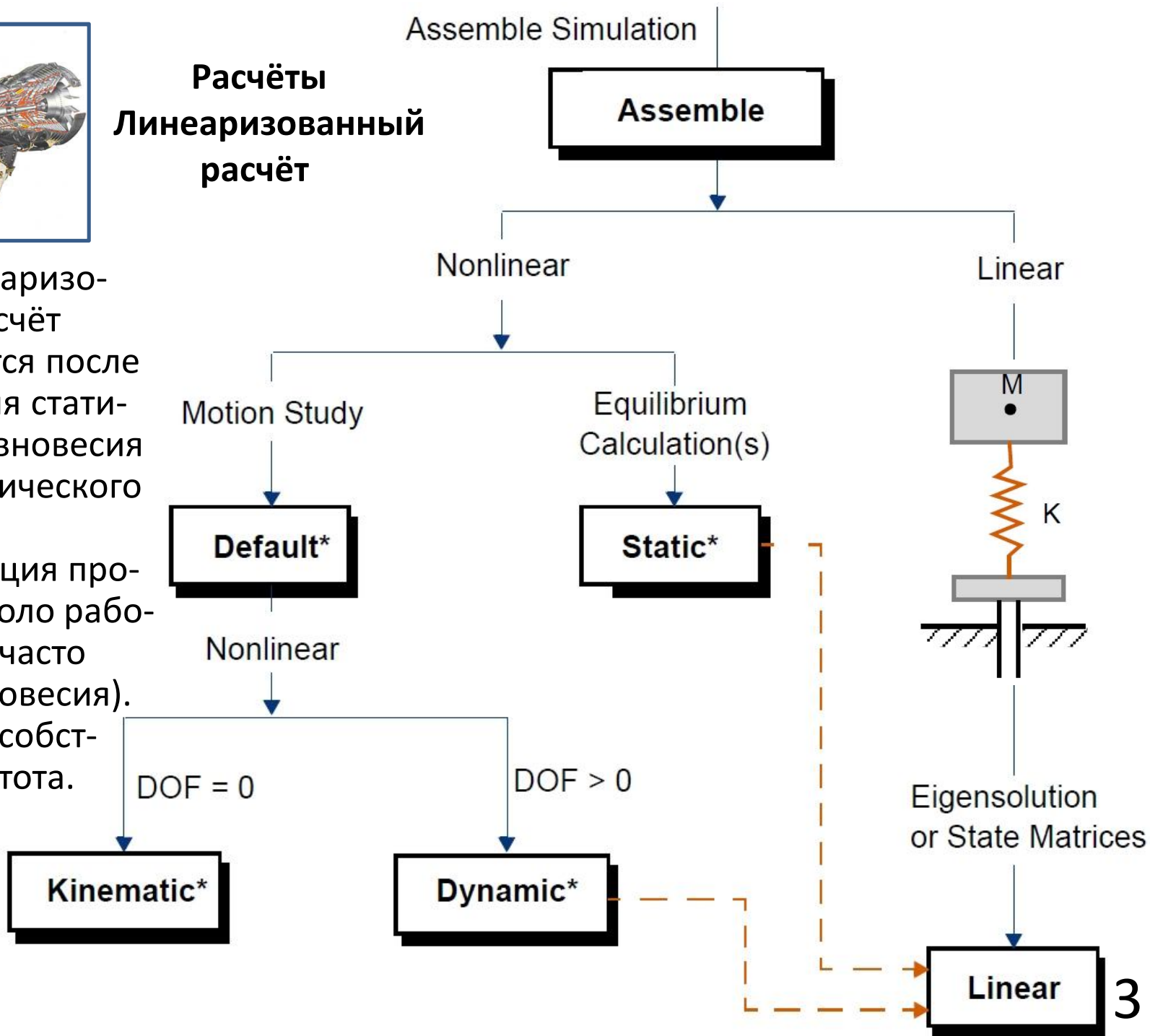
## Расчёты Линеаризованный расчёт

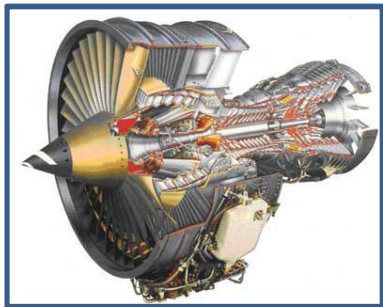
Часто линеаризованный расчёт используется после нахождения статического равновесия или динамического расчёта.

Линеаризация проводится около рабочей точки (часто точки равновесия).

Находится собственная частота.

$$\sqrt{\frac{K}{M}}$$

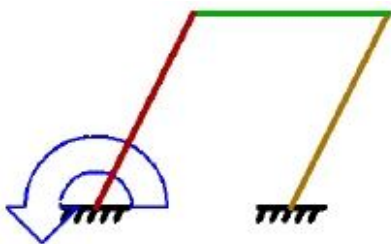
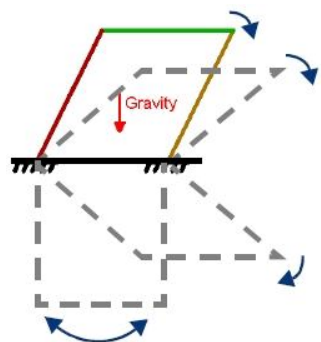
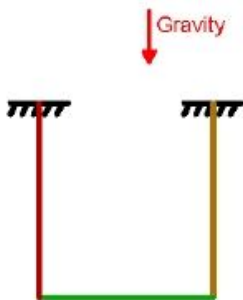




## Расчёты

### Линеаризованный (собственные формы)

ADAMS/Solver может линеаризировать нелинейные уравнения движения относительно конкретной рабочей точки. Из полученной линейной системы уравнений, можно провести расчёт собственных форм, чтобы получить собственные значения и собственные вектора для линеаризованной системы, что позволит отобразить формы колебаний и их собственные частоты для системы, а затем сравнить их с экспериментом или расчётом МКЭ.



### Статический (точка равновесия)

Степени свободы системы  $> 0$ .

Все скорости и ускорения в системе устанавливаются на ноль. Может не сойтись, если положение равновесия слишком сильно отличается от начального состояния.

### Динамический

Степени свободы системы  $> 0$ .

Движение от набора внешних сил и возбуждений.

Решаются нелинейные дифференциальные и алгебраические уравнения (DAEs).

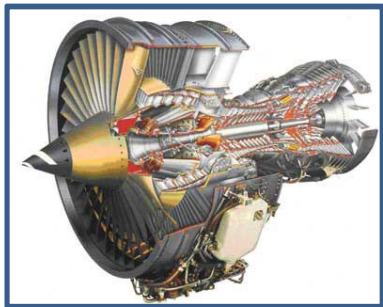
### Кинематический

Степени свободы системы  $= 0$ .

Движение от связей (генераторов движения).

Решаются только уравнения связей (алгебраические).

Рассчитываются (измеряются) реакции в шарнирах.



## Расчёты

В ADAMS/View есть два способа запуска расчёта:

### Interactive



### Scripted



## Расчёт со скриптами

Способ запрограммировать расчёт до его начала.

Позволяет быстро повторить моделирование с тем же набором параметров.

Позволяет выполнить более сложные расчёты.

Требуется для design studies (изучение конструкции), design of experiments (сравнение с экспериментом), and optimization simulations (оптимизационный расчёт).

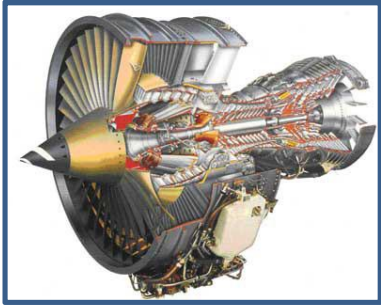
Скрипты расчёта входят в иерархию модели, и таким образом, сохраняются в командном файле.

Типы расчёта со скриптами в ADAMS/View

Простой запуск

Команды ADAMS/View

Команды ADAMS/Solver



## Расчёты

Скриптовые расчёты основаны на командах ADAMS/Solver  
Команды ADAMS/Solver позволяют выполнять сложные элементы расчёта, такие как:

Изменение параметров модели в процессе расчёта.

Использование различного размера шага для различных интервалов модельного времени (по сравнению с указанием только одной длительности и выходного размера шага).

Использование различных параметров расчёта (таких как величина сходимости) для различных интервалов.

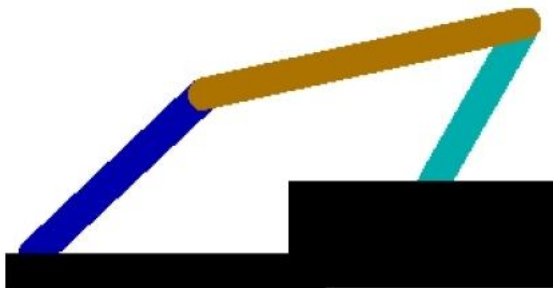
Пример расчётного скрипта, который изменяет топологию модели (отключает шарнир id = 3) во время расчёта:

```
simulate/dynamic, end=3.0, steps=30
```

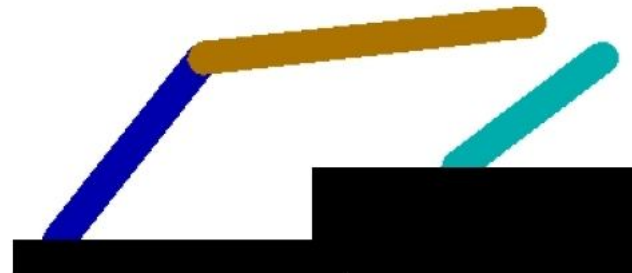
```
deactivate/joint, id=3
```

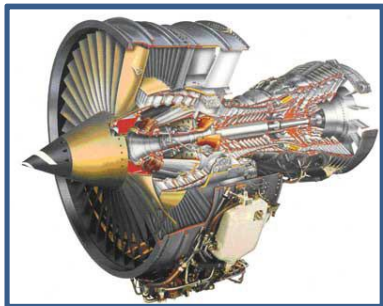
```
simulate/dynamic, duration=2.0, steps=200
```

До:



После:





## Файлы ADAMS/Solver

### ADAMS/Solver dataset files (.adm)

Состав модели, включающий в себя такие элементы, как части, связи, силы и т.д.

Выражения, которые описывают величину элементов, таких как силы или генераторы движения.

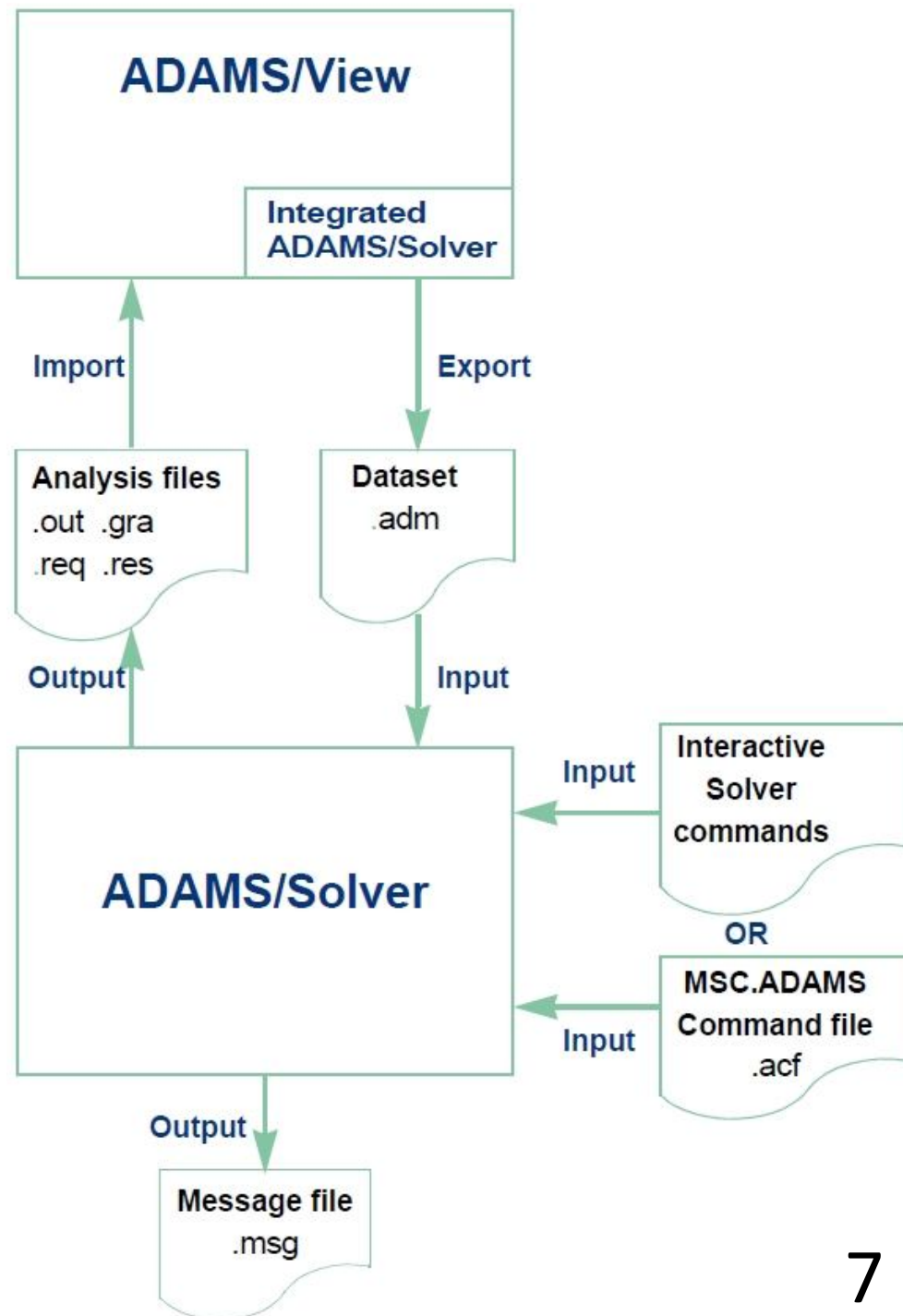
### ADAMS/Solver command files (.acf)

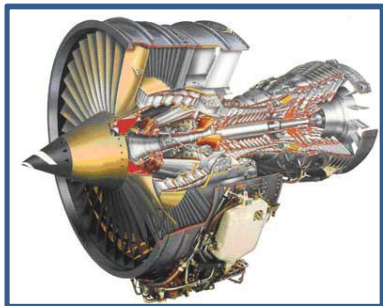
Команды определяют действия, которые необходимо выполнить во время расчёта.

Расчёты при автономном использовании ADAMS/Solver:

**interactive:** без скриптов или с ними (используя (.acf)).

**batch** - выполнять несколько заданий в фоновом режиме, используя ADAMS/Solver command file (.acf).





## Фазы решения

Две основные составляющие: Predictor и Corrector

### Фаза 1

#### Предсказание начального решения

Предсказание начального значения, используя явный метод: Predictor, зная предыдущее значение, пытается угадать решение в следующий момент времени.

Основные уравнения G не решены.

### Фаза 2

Это просто хорошая отправная точка для следующей фазы.

#### Коррекция предсказания

Вычисление G. Если G близко к нулю, корректор заканчивает работу и расчёт переходит к фазе 3. Если же нет, то используется метод Newton-Raphson для коррекции предсказания. Решение для  $\Delta y$ . Обновление  $y$ .

Повторение итераций до  $||\Delta y|| < \text{corrector error tolerance}$  (допуск)

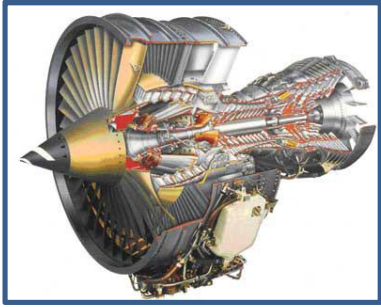
$$f(q) = q^2 + \sin q - 1.841471 = 0$$

$$f' = 2q + \cos q$$

As a first guess, set  $q = 2$

STEP	$q$	$f'(q)$	$f(q)$
1	2	3.5838	3.0678
2	$2 - 3.0678/3.5838 = 1.1439$	2.7109	0.3775
3	$1.1439 - 0.3775/2.7109 = 1.004$	2.5451	0.0107

The exact answer is  $q = 1.0$



## Фазы решения

### Фаза 3

Оценка качества решения (принятие решения)

Оценка локальной погрешности

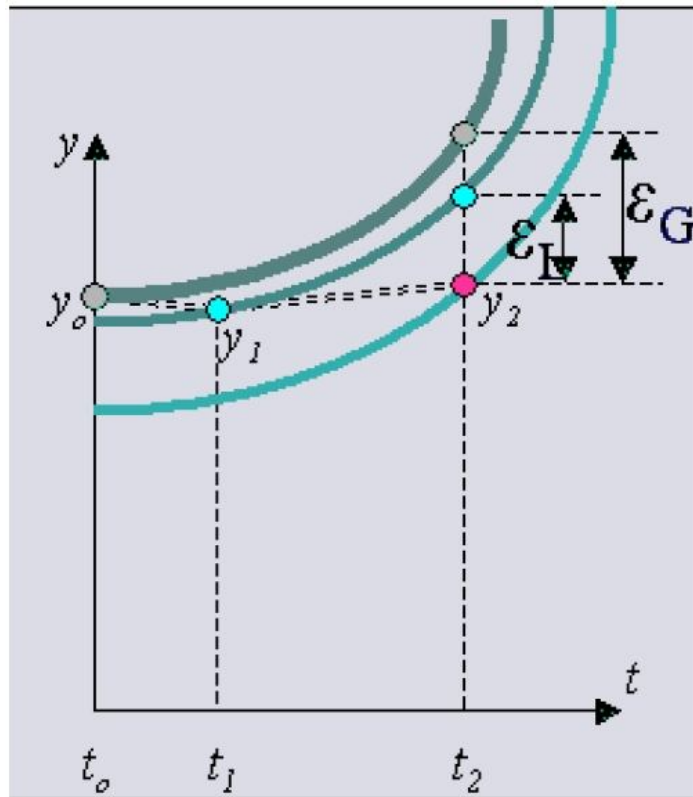
Если погрешность  $\leq (\epsilon_l)$

Да  $\rightarrow$  Решение верно. Переход к фазе 4

Нет  $\rightarrow$  Решение неверно. Возврат к фазе 1 и 2 с новым размером шага

**Global Error ( $\epsilon_G$ ):** Различие между текущим решением и правильным решением

**Local Truncation Error ( $\epsilon_l$ ):** Локальная ошибка (на одном шаге)



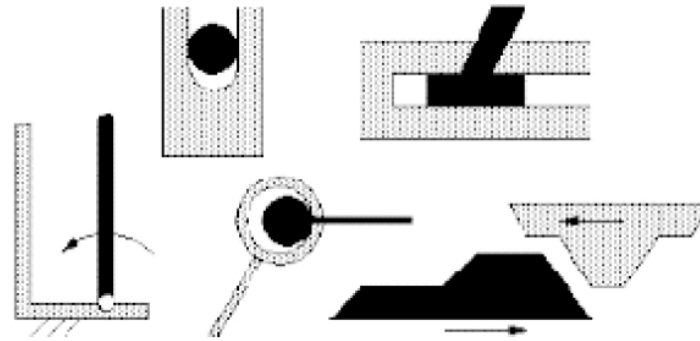
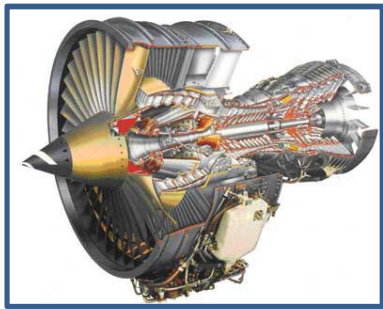
### Фаза 4

Подготовка к следующему шагу

Обновление производных высокого порядка, используемых для предсказания на следующем шаге

Определение размера шага интегрирования и порядка для следующего шага

Возврат к фазе 1 и начало нового шага



## Синтаксис функции IMPACT

$IMPACT(q, q', q_0, k, e, c_{max}, d)$

$q$  – фактическое расстояние между двумя объектами (задаётся с использованием функции перемещения)

$q'$  – скорость изменения переменной  $q$

$q_0$  – расстояние срабатывания, используется для определения момента, когда включается или выключается контактная сила; постоянная величина, тип вещественная (real)

$k$  – коэффициент жёсткости

$e$  - степень

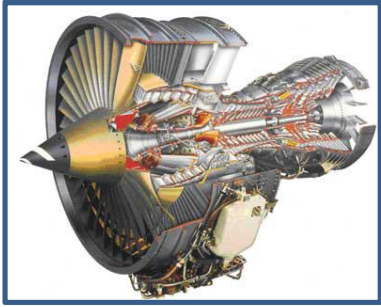
$c$  – коэффициент демпфирования

$d$  – глубина включения демпфирования

Этот силовой элемент используется для моделирования контактов, ударов, столкновений и т.д. По сути, это нелинейная пружина с демпфированием, которые включаются и выключаются в зависимости от расстояния между двумя объектами.

✕ Create Contact
✕

Contact Name	.model_1.CONTACT_1
Contact Type	Solid to Solid
I Solid(s)	LINK_1
J Solid(s)	BOX_2
<input checked="" type="checkbox"/> Force Display <span style="float: right;">Red</span>	
Normal Force	Impact
Stiffness	1.0E+005
Force Exponent	2.2
Damping	10.0
Penetration Depth	0.1
<input type="checkbox"/> Augmented Lagrangian	
Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.3
Dynamic Coefficient	0.1
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Close"/>	



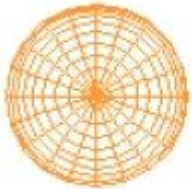
**В MSC.ADAMS контактная сила вычисляется как:**

$$F = 0 \text{ if } q > q_0$$

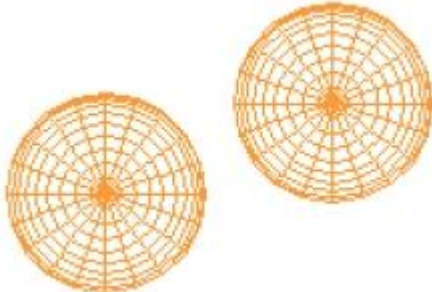
$$F = k(q_0 - q)^e - c_{max} \dot{q} * \text{STEP}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) \text{ if } q \leq q_0$$



solid-to-solid

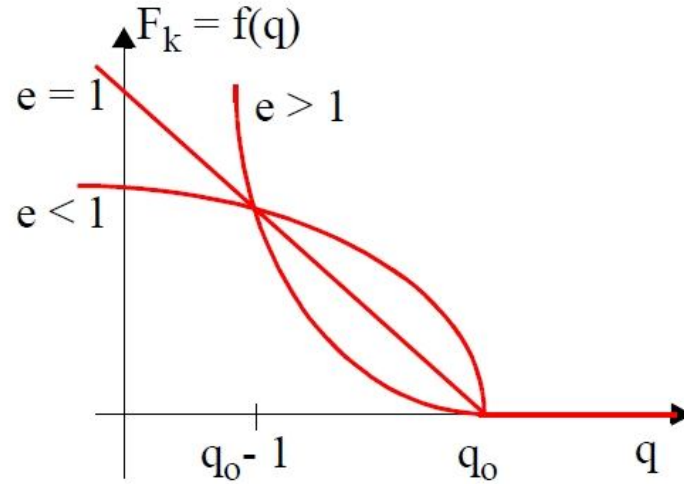


sphere-to-plane

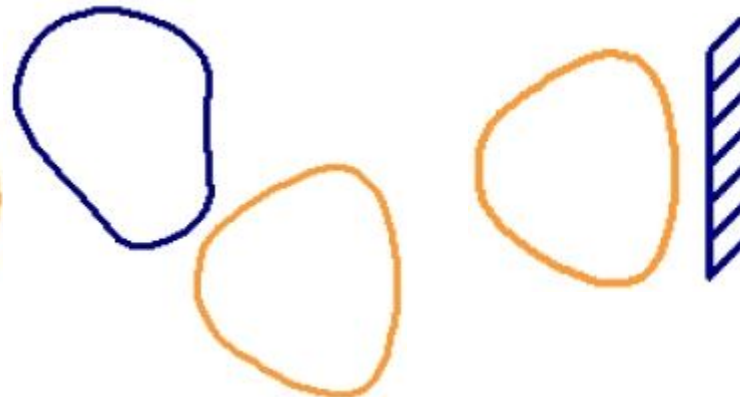
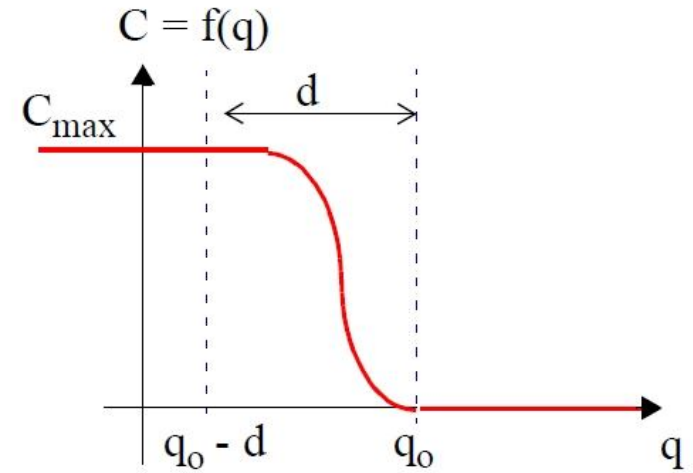


sphere-to-sphere

Compression-only spring force from one-sided IMPACT function

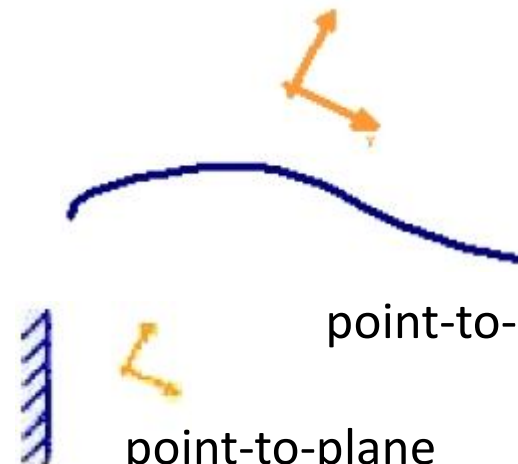


Compression-only damping force from one-sided IMPACT function



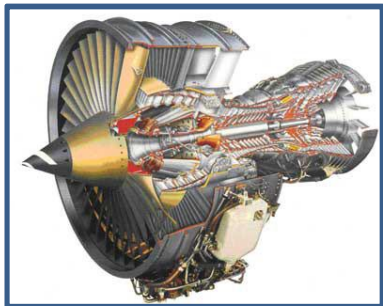
curve-to-curve

curve-to-plane



point-to-curve

point-to-plane

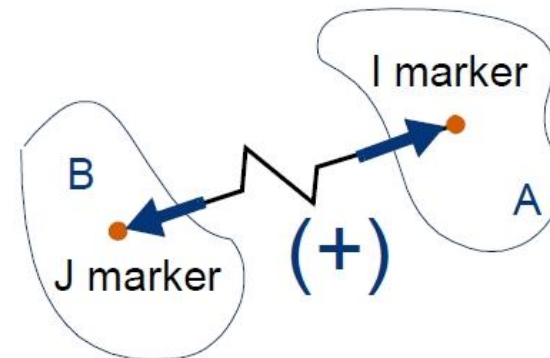


## Пружинный демпфер в MSC.ADAMS

Это предварительно заданные силы.

Для них характерно:

1. Создаются между двумя телами;
2. Зависят от деформации;
3. Действуют вдоль или вокруг оси.



Расчёт их величины зависит от:

**Коэффициентов жёсткости и демпфирования**  
(линейная постановка) или

**Сплайнов, основанных на внешних данных**  
(нелинейная постановка)

Рассмотрим, как вычисляется сила на основе коэффициентов жёсткости и демпфирования  
Выражение может быть записано как:

$$Force_{SPDP} = -k(q - q_0) - c\dot{q} + F_0 \quad \text{где:}$$

$q$  – расстояние между концами пружинного демпфера

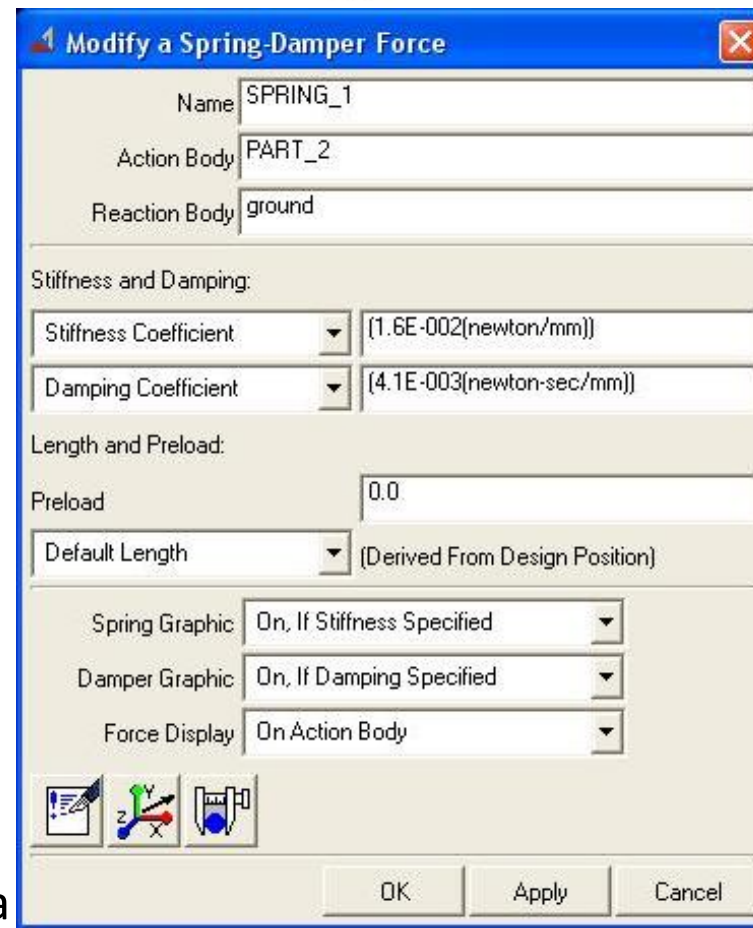
$\dot{q}$  - скорость деформации вдоль (вокруг) оси

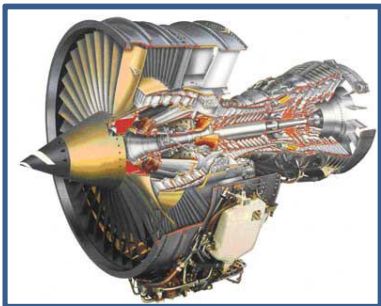
$k$  – коэф. жёсткости пружины (всегда  $> 0$ )

$c$  – коэф. вязкого трения (всегда  $> 0$ )

$F_0$  – начальное усилие в пружине (натяг)

$q_0$  – свободная длина (для преднагрузки, всегда  $> 0$ )



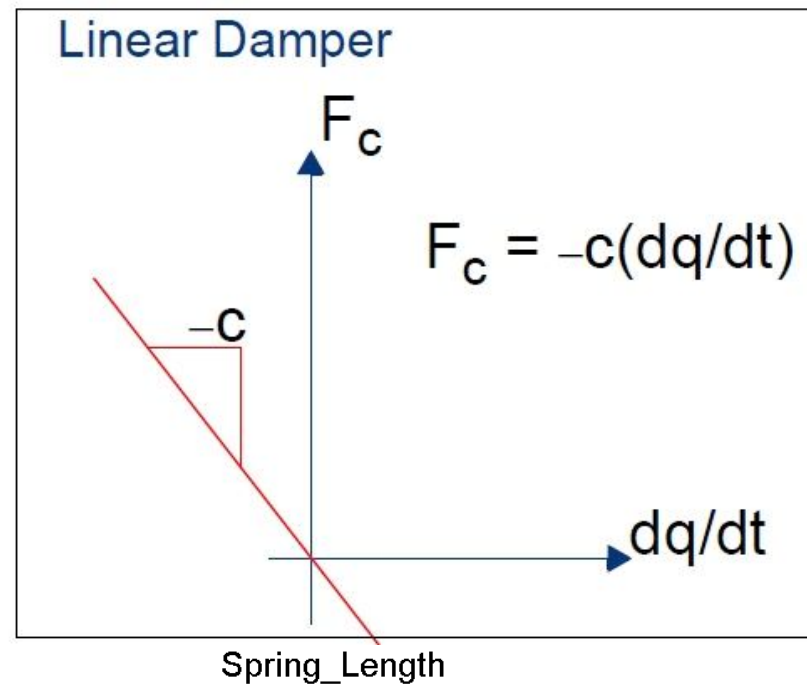
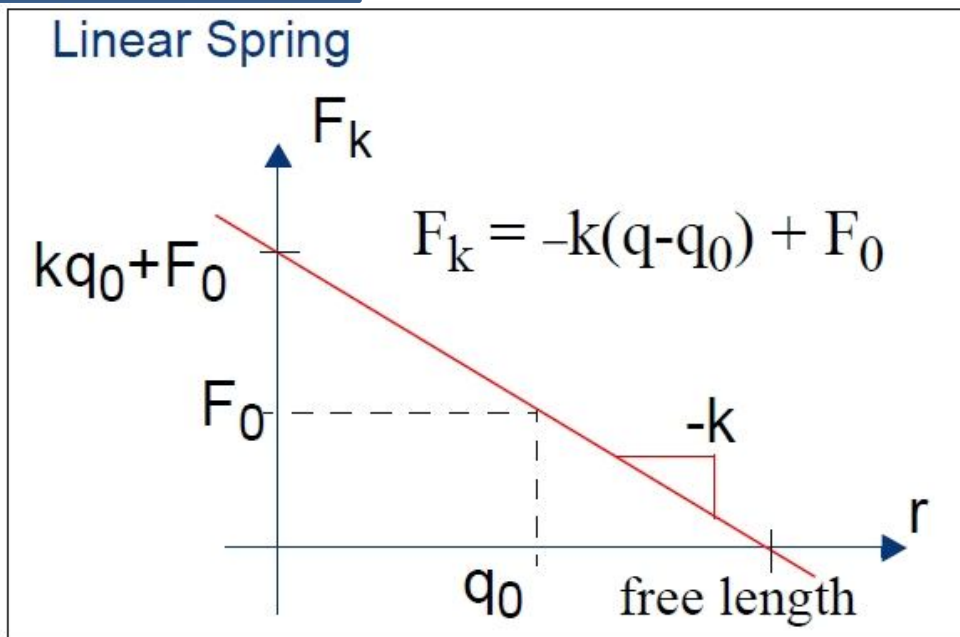


## Пружинный демпфер в MSC.ADAMS

В ADAMS/Solver данное выражение записывается в виде:

$$-k*(DM(I, J) - q_0) - c*VR(I, J) + F_0$$

t – время

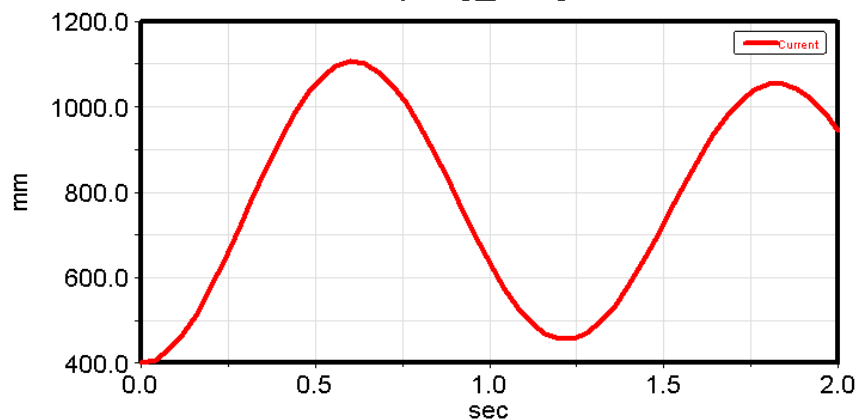


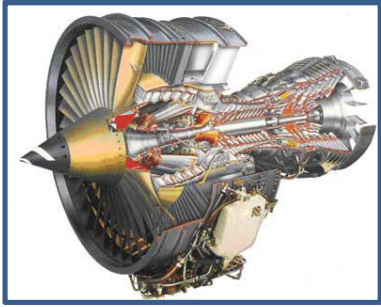
Коэффициент жесткости можно вводить в виде сплайна

*Сила = f(деформация),*

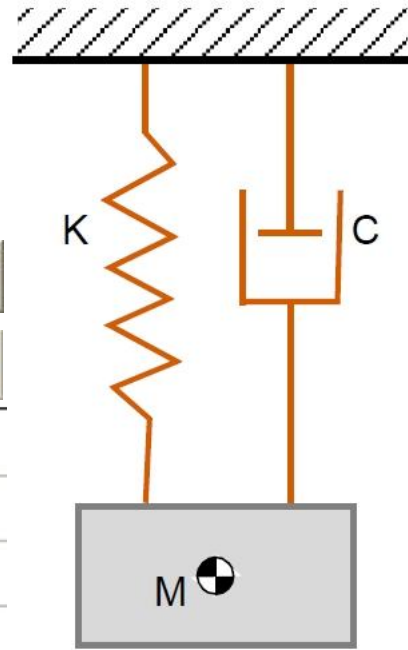
а коэффициент демпфирования – в виде сплайна

*Сила = f(скорость деформации).*

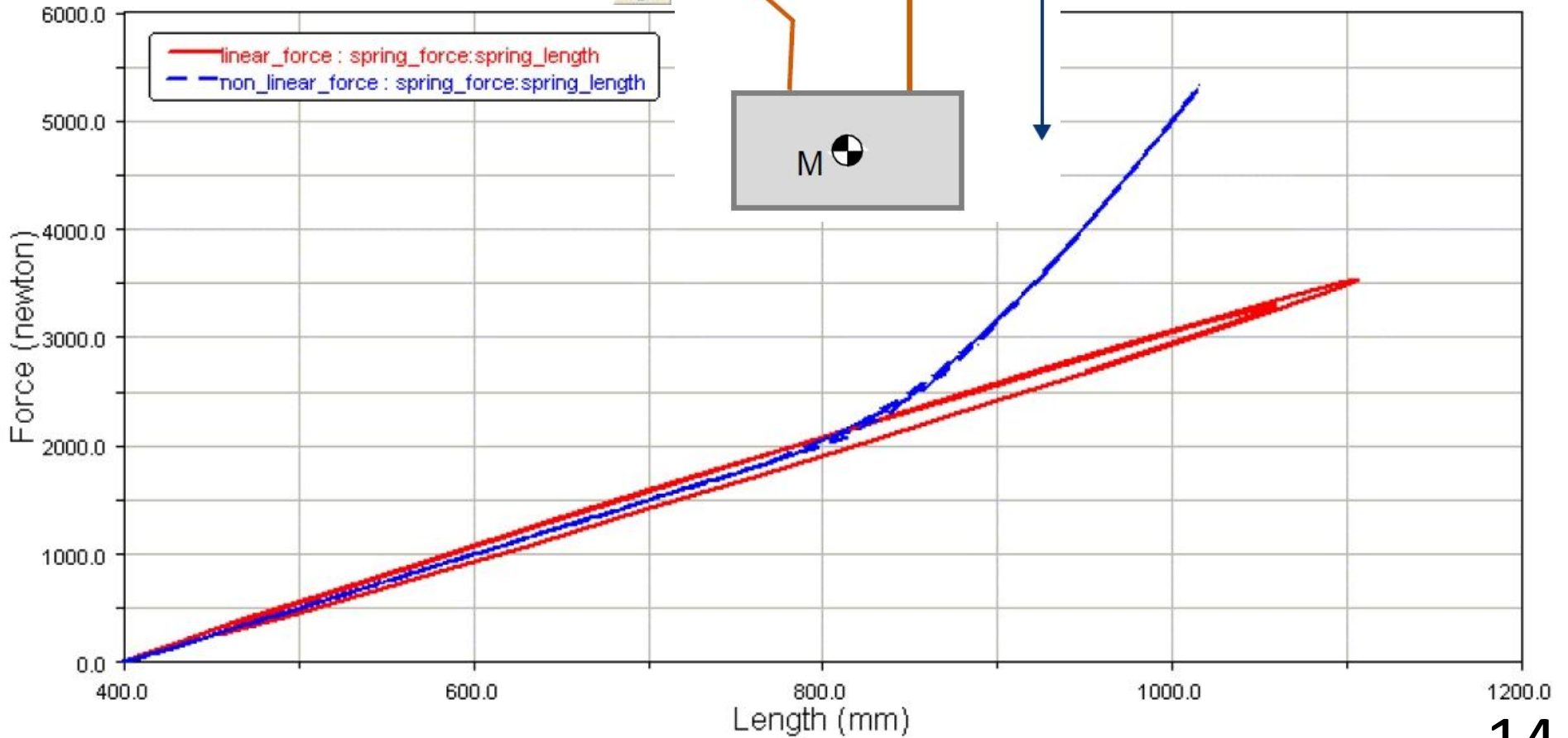


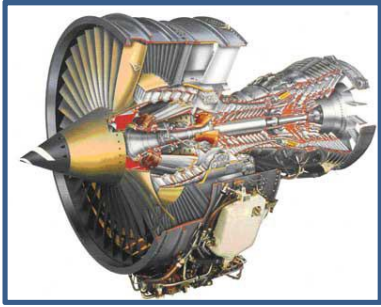


## Пружинный демпфер в MSC.ADAMS



Сила пружинного демпфера становится плохо определённой, если конечные точки совпадают, поскольку становится непонятным направление.





**Modify Bushing ...**

Name: BUSHING\_1

Action Body: Lower\_Arm

Reaction Body: ground

Translational Properties (x,y,z components):

Stiffness: (2.9e7),(2.9e7),(1e8)

Damping: (7.3e5),(7.3e5),(1.5e6)

Preload: 0.0,0.0,0.0

Rotational Properties (x,y,z components):

Stiffness: (1e6),(1e6),(0)

Damping: (4e5),(4e5),(0)

Preload: 0.0,0.0,0.0

Force Display: On Action Body

OK Apply Cancel

$K_{matrix}$	$C_{matrix}$	Preload <sub>matrix</sub>
$\begin{bmatrix} 2.9e7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9e7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1e6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.3e5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.3e5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5e6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4e5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4e5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Translational K	Translational C	
		Rotational C
		Rotational K

## Упруго-демпфирующая втулка

Предустановленные силы.

Действуют:

Между двумя телами.

Вдоль или вокруг трёх векторов.

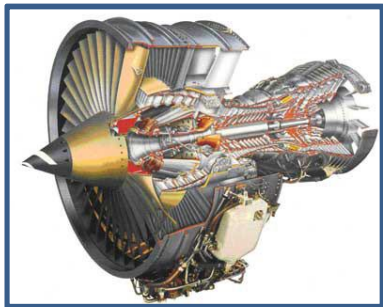
Величина

$$(F_x, F_y, F_z + T_x, T_y, T_z)$$

Расчётные уравнения основаны на:

Матрице жёсткости, [K]

Матрице демпфирования, [C]



## Моделирование трения



Трение в шарнире может быть приложено к:



Поступательному шарниру



Вращательному шарниру



Цилиндрическому шарниру



Сферическому шарниру



Гука/Универсальному шарниру

Силы трения ( $F_f$ )

Не зависят от площади контакта между двумя телами.

Действуют в направлении, противоположном относительной скорости между двумя телами. Пропорциональны нормальной силе ( $N$ ) между двумя телами ( $\mu$  – коэффициент трения).

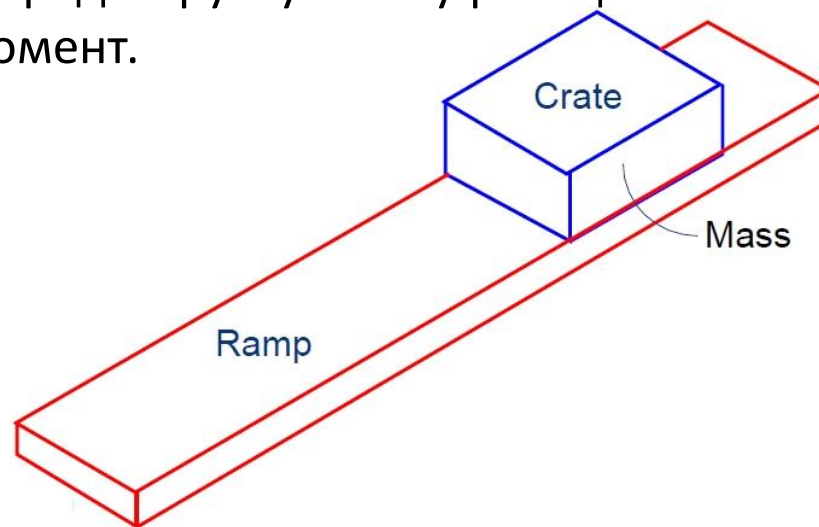
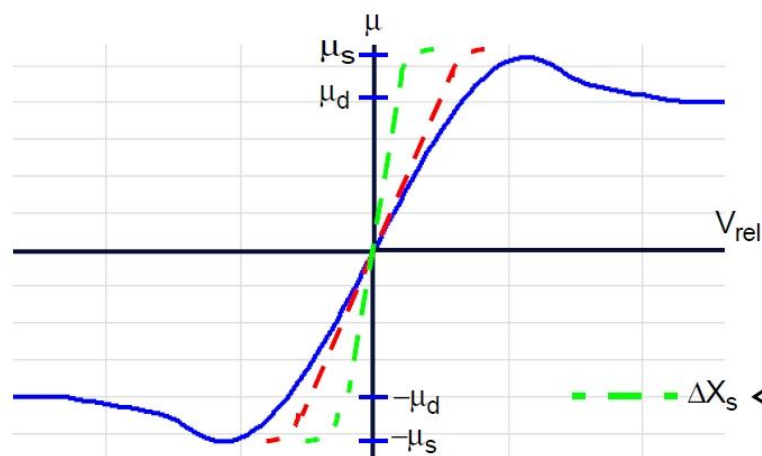
$$F_f = \mu N$$

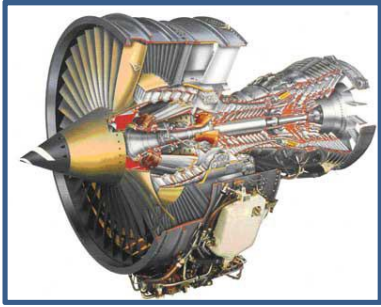
Есть три вида контактных сил: 1. Покоя; 2. Переходная; 3. Скольжения

При вводе силы трения всегда включайте преднагрузку и силу реакции.

Можно также указать изгиб и крутящий момент.

### Effect of maximum deformation on friction





### Stiction

### Transition

### Velocity $V_s$ –

определяет абсолютную величину пороговой скорости чувствительности при переходе от динамического к статическому трению.

## Idealized case

■ Stiction:  $|V_{rel}| = 0$

$$0 < \mu < \mu_s$$

■ Transition:  $0 < |V_{rel}| = V_1$

$$\mu_d < \mu < \mu_s$$

■ Dynamic:  $V_1 < |V_{rel}|$

$$\mu = \mu_d$$

## ADAMS/Solver case

■ Stiction:  $|V_{rel}| < \Delta V_s$

$$0 < \mu < \mu_s$$

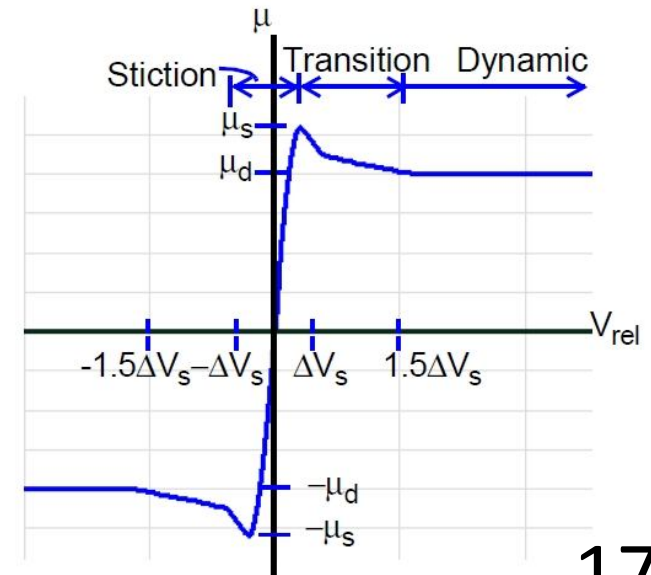
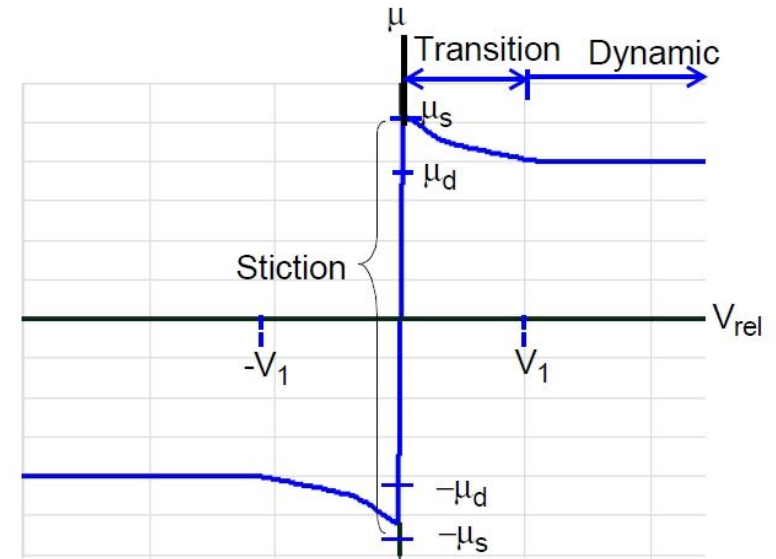
■ Transition:  $\Delta V_s < |V_{rel}| < 1.5\Delta V_s$

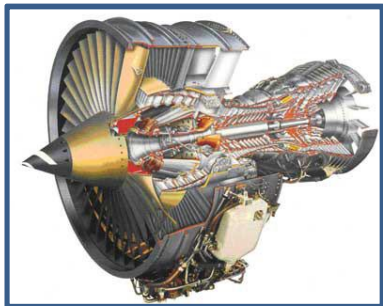
$$\mu_d < \mu < \mu_s$$

■ Dynamic:  $1.5\Delta V_s < |V_{rel}|$

$$\mu = \mu_d$$

## Моделирование трения





## Сенсоры

Отслеживают любой интересный параметр в модели во время расчёта и выполняют заданное действие, когда значение величины достигает или превышает критическое.

Варианты действий:

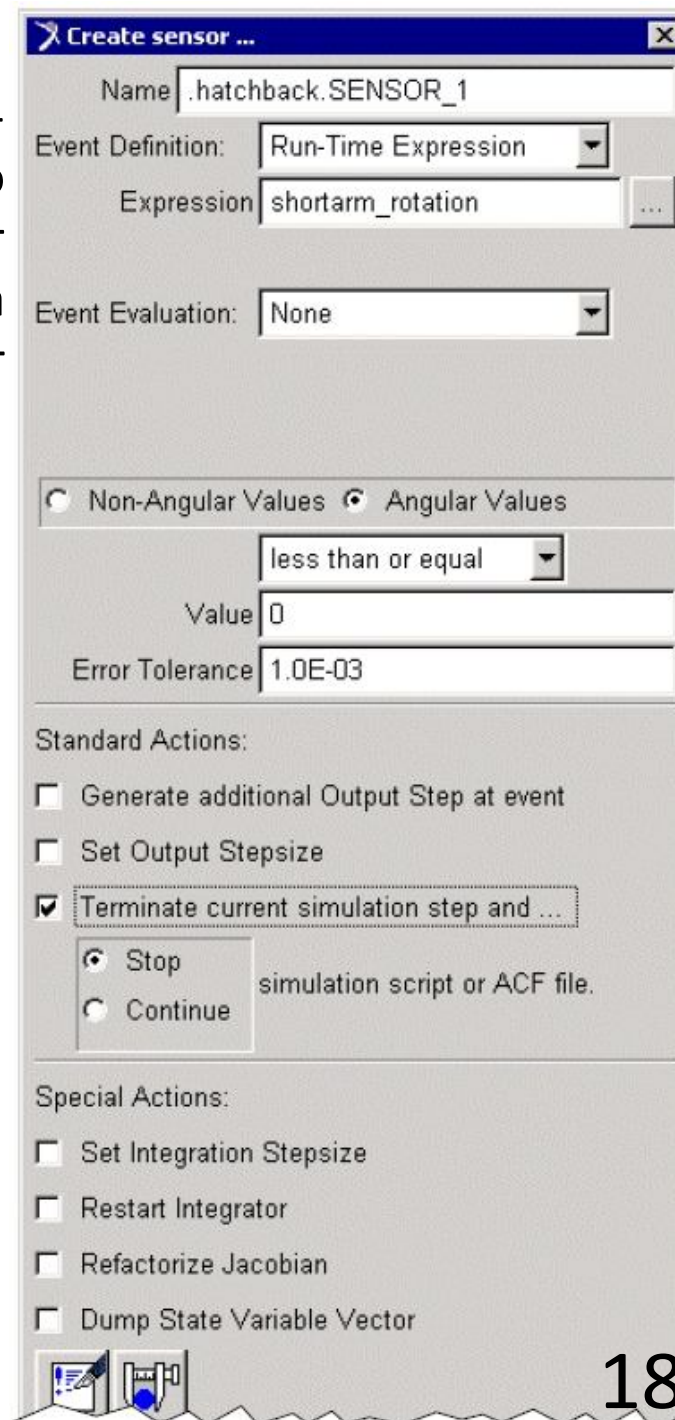
Полностью остановить расчёт.

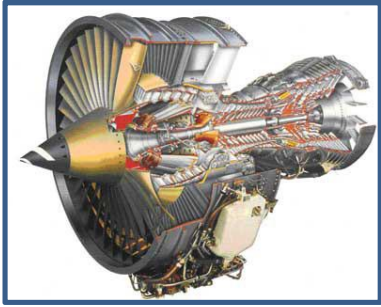
Если используется вместе со скриптом, сенсор прерывает текущий расчёт и продолжает со следующей команды скрипта.

Может быть использован для оценки некоторых выражений, когда требуется условный переход. Создать сенсор можно функцией ADAMS/Solver SENVAL.

Сенсор представляет собой функцию *Если/То*:  
*If* величина = значению (+/- допуск)  
*Then* выполняется заданное действие

Пример использования сенсора со скриптом:  
Отслеживание реакции в шарнире и деактивация (отключение) шарнира, когда реакция превышает указанное значение.





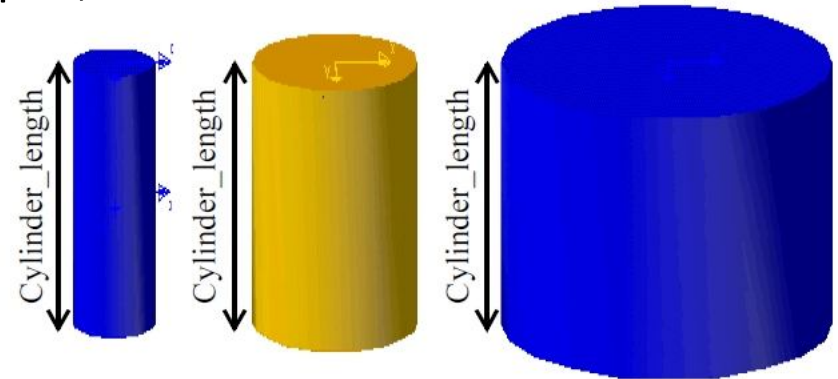
## Конструкторские переменные и редактор таблиц

Пример: можно создать конструкторскую переменную, названную *cylinder\_length*, чтобы управлять длиной всех трёх цилиндров, как показано ниже:

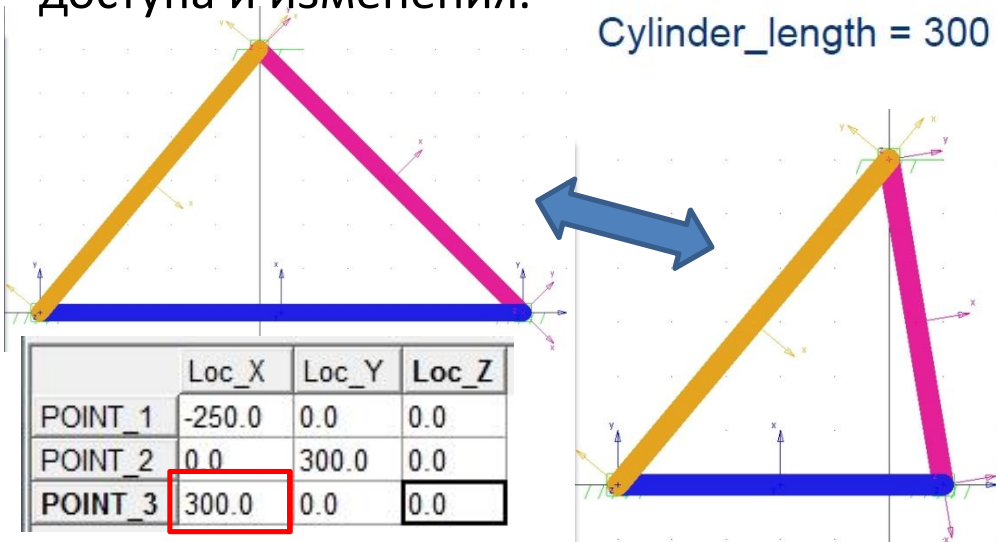
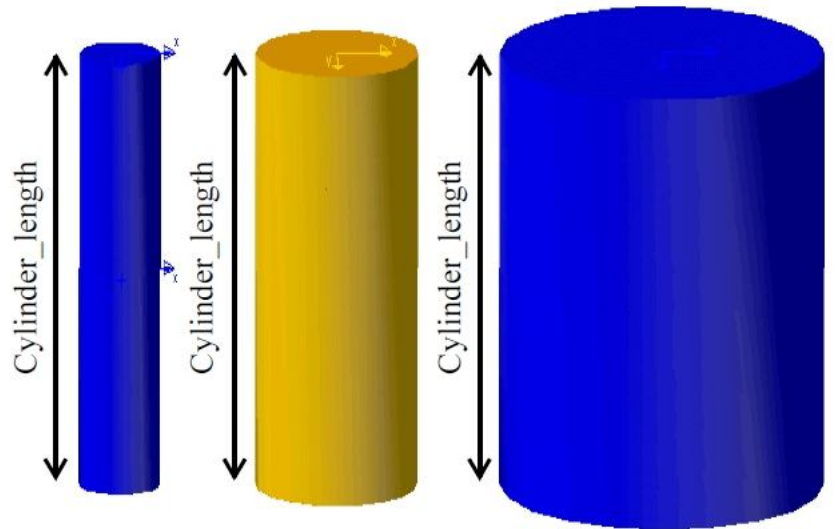
Задание независимых переменных, которые могут быть связаны с объектами.

Объединение важных параметров конструкции в краткий список значений для лёгкого доступа и изменения.

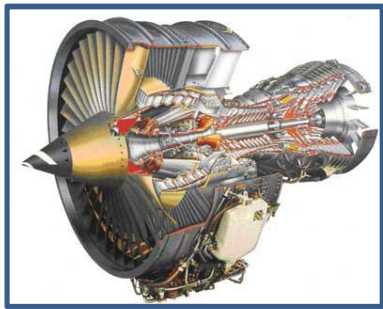
Cylinder\_length = 150



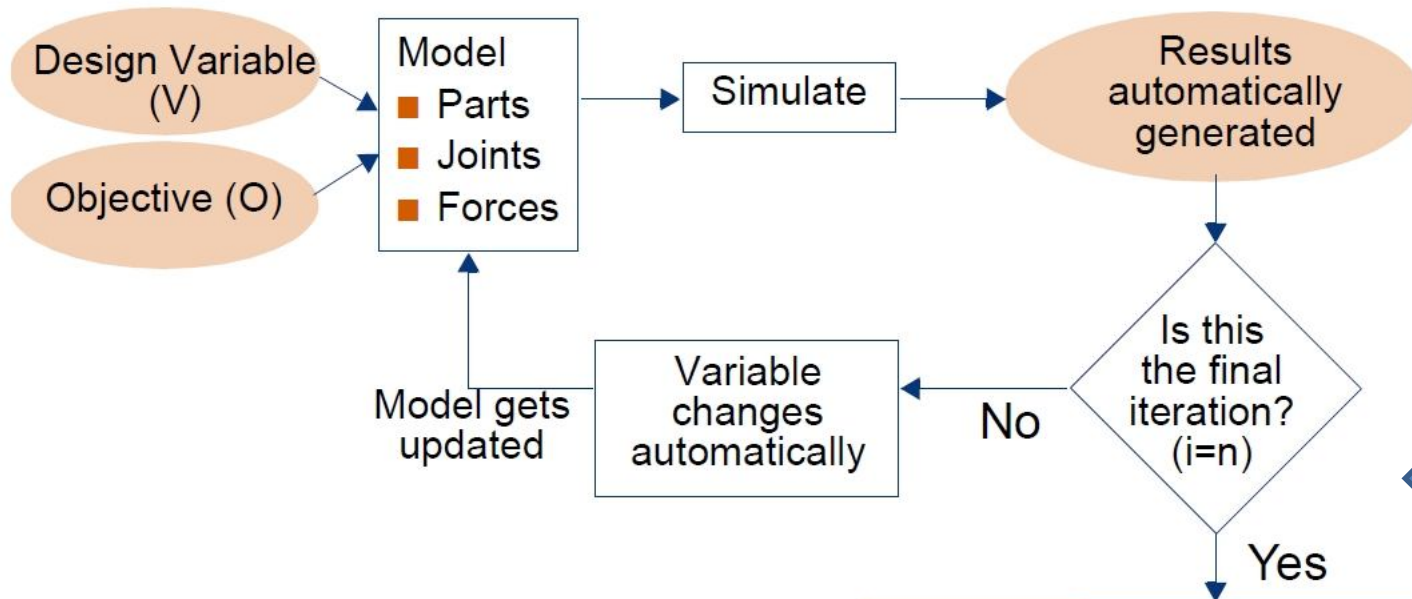
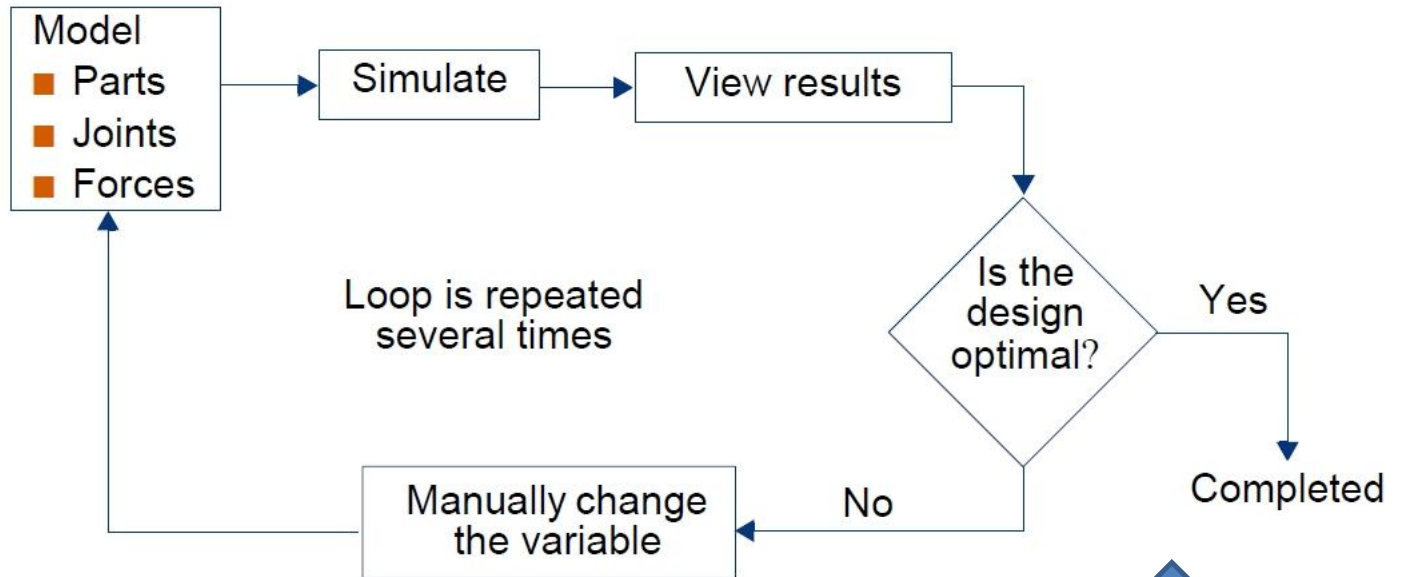
Cylinder\_length = 300



	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
POINT_1	-250.0	0.0	0.0
POINT_2	0.0	300.0	0.0
POINT_3	50.0	0.0	0.0



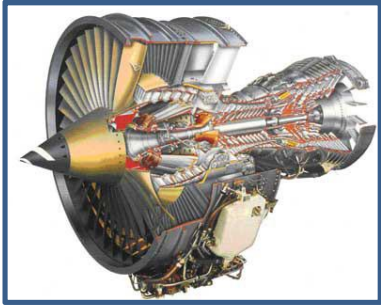
## Изучение конструкции (Design Studies)



The loop goes through specified number of iterations ( $i=1,n$ )

Метод проб и ошибок  
(ручной поиск решения)

Метод изучения конструкции  
(автоматизированный поиск решения)



## Изучение конструкции

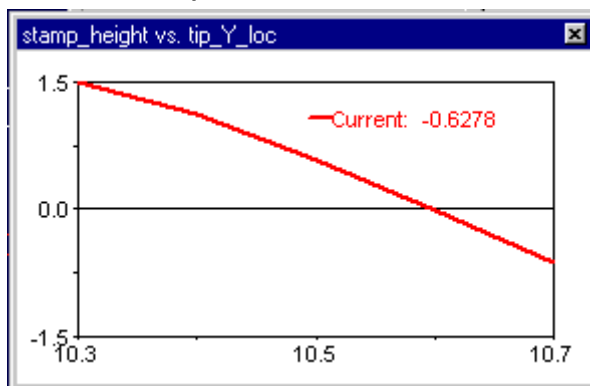
Варьирует значение одной конструкторской переменной ( $V$ ) по диапазону значений.

Выполняет расчёт при каждом значении. Записывает значение датчика для каждого расчёта.

Из полученных результатов можно определить:

Наилучшее значение  $V$  среди рассчитанных.

Чувствительность конструкции к изменению  $V$  (скорость изменения характеристик датчика при изменении  $V$ ).



Design Evaluation Tools

Model: .target\_practice

Simulation Script: .target\_practice.SIM\_SCRIPT\_1

Study a:  Measure  Objective

Last Value of: target\_error

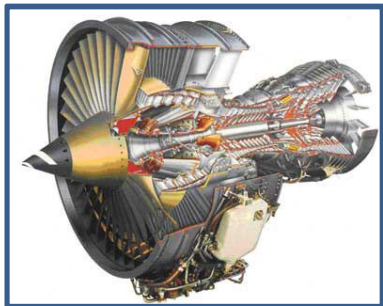
Design Study  Design of Experiments  Optimization

Design Variable: launch\_spr\_stiffness

Default Levels: 6

Settings: Display... Output... Optimizer...

Start



## История деформируемых тел в ADAMS

MDI совершила первую попытку организовать взаимодействие с ПО, использующим метод конечных элементов (FEM) в продукте, названном ADAMS/FEA. В ADAMS/FEA использовался метод «Guyan Reduction», чтобы автоматически конденсировать весь набор степеней свободы FEM для снижения числа степеней свободы.

В этом методе, ещё называемом «Статической редукцией или конденсацией», набор заданных пользователем мастер-узлов (главные) сохраняется, а все остальные подчинённые узлы удаляются методом конденсации. В процессе конденсации учитываются только жесткостные свойства, а инерционная связь главных и подчинённых узлов игнорируется.

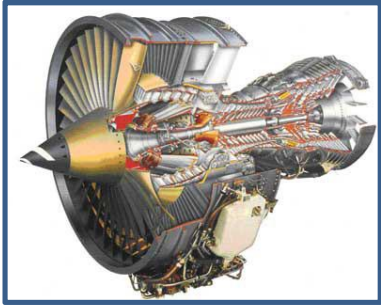
Редукция Guyan конденсирует большие, разряженные FEM матрицы масс и жесткостей в небольшие, плотно упакованные матрицы, сгруппированные относительно степеней свободы мастер-узлов.

Задачей ADAMS/FEA было преобразовать мастер-узлы, используя элементы PART и NFORCE. Сгущённая жёсткость может быть корректно описана элементом NFORCE, плотная, сгущённая матрица масс, полученная редукцией Guyan не всегда поддаётся представлению в виде «эквивалентной» матрицы сосредоточенных масс.

Критерии соответствия

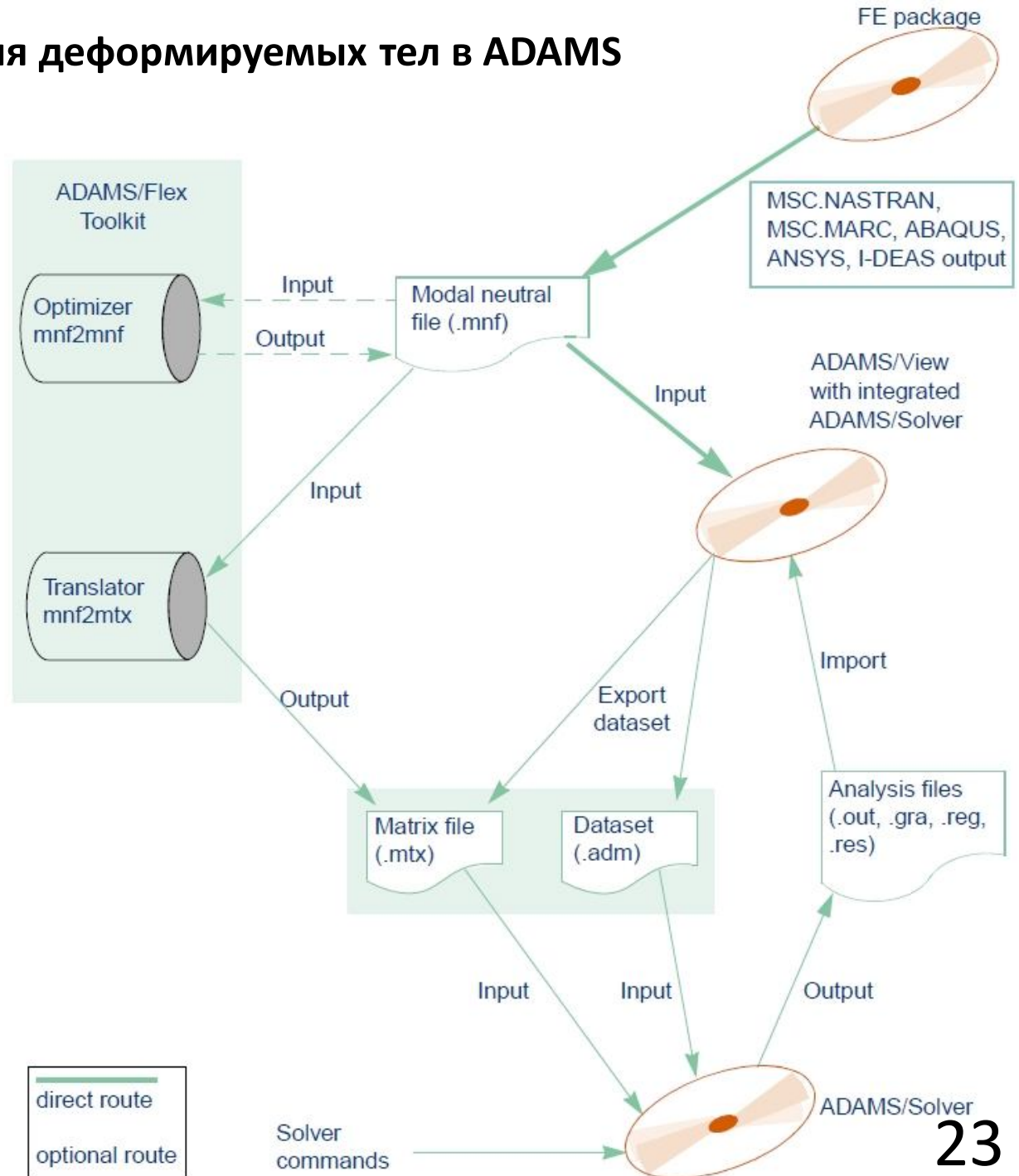
- общая масса
- положение центра масс
- моменты инерции
- собственные частоты

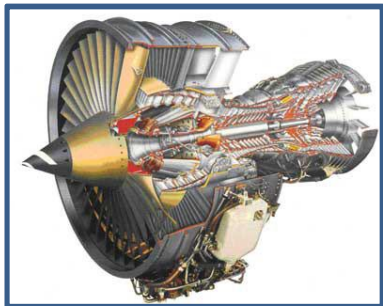
не всегда могут быть удовлетворены.



## История деформируемых тел в ADAMS

ADAMS/FEA был труден в использовании и не завоевал популярности у пользователей MDI. В 1996 году MDI представила альтернативный метод модальных деформаций в продукте, названном ADAMS/Flex. Вместо того, чтобы использовать элементы ADAMS, такие как ЧАСТЬ и СИЛА, ADAMS/Flex ввел новое инерционное тело «FLEX BODY» (деформируемое тело).





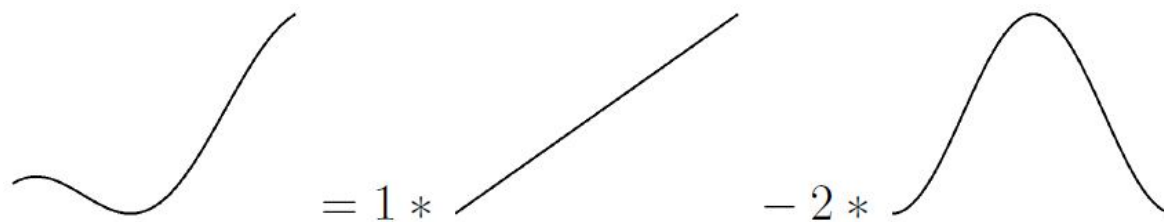
## Суперпозиция форм (Modal superposition)

Самым важным допущением, лежащим в основе введения FLEX BODY является то, что тела работают только при малых деформациях, т.е. деформации тела являются малыми относительно его системы координат, в то время как сама ЛСК совершает большие нелинейные перемещения.

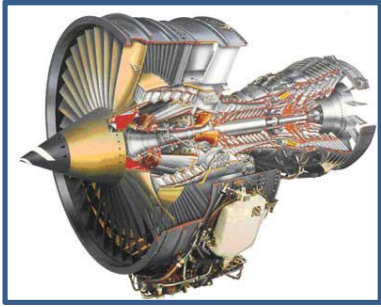
Дискретизация деформируемого компонента в КЭ-модели приводит бесконечное число степеней свободы тела к конечному, но очень большому числу степеней свободы конечных элементов. Линейные перемещения узлов этой КЭ-модели,  $\mathbf{u}$ , могут быть аппроксимированы меньшим числом линейных комбинаций векторов форм (или форм колебаний),  $\phi$ .

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^M \phi_i q_i \quad (1)$$

В качестве примера того, как сложная форма строится в виде линейной комбинации простых форм, обратите внимание на следующую иллюстрацию:



Основная предпосылка суперпозиции форм состоит в том, что характер деформации компонента с очень большим количеством узловых степеней свободы может быть описан гораздо меньшим количеством модальных степеней свободы. Это сокращение числа степеней свободы можно назвать «модальным усечением».



## Modal superposition

Уравнение (1) часто представляют в виде матрицы

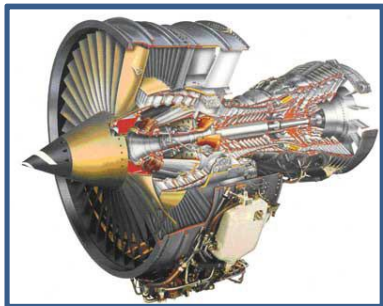
$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{q} \quad (2)$$

где  $\mathbf{q}$  – это вектор модальных координат, а формы  $\phi_i$  размещаются в столбцах матрицы форм,  $\Phi$ .

После модального усечения  $\Phi$  становится прямоугольной матрицей. Матрица форм  $\Phi$  обеспечивает обратный переход от небольшого числа модальных координат,  $\mathbf{q}$ , к большому числу физических координат,  $\mathbf{u}$ .

Это поднимает вопрос: Как выбрать формы колебаний так, чтобы максимальное количество интересующих нас деформаций было описано минимальным числом модальных координат? Другими словами, как производится оптимизация деформируемого тела, описываемого формами колебаний?

R. R. Craig and M. C. C. Vampton. Coupling of substructures for dynamics analyses. AIAA Journal, 6(7): 1313–1319, 1968. (Связывание подструктур для динамического анализа).



## Создание отдельных форм (CMS) — метод Крейга-Бамптона.

На момент релиза ADAMS/Flex предполагалось, что собственные формы колебаний могли бы обеспечить удобную основу метода форм. Во избежание случайных ограничений в системе было рекомендовано использовать собственные формы незакреплённой системы (свободного тела).

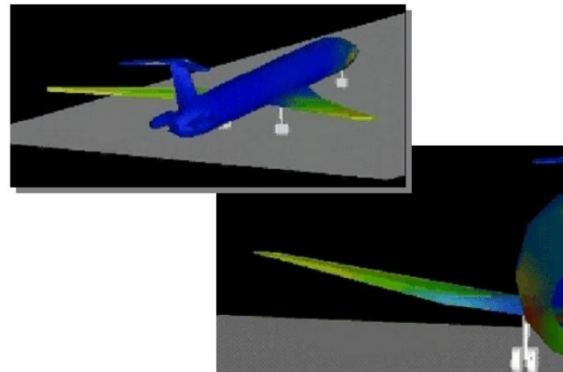
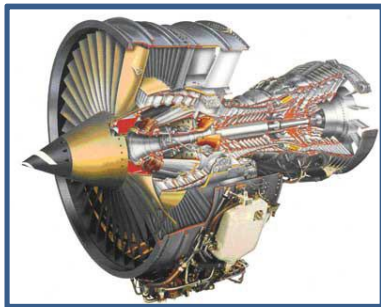
Однако пользователям необходимо было учитывать влияние закреплений (связей) деформируемого тела для его интеграции в модель. В итоге для достижения правильности модели часто требовалось чрезмерное количество форм. Собственные формы определялись, чтобы обеспечить достаточную основу при моделировании на уровне системы (состоящей из различных тел, деформируемых и нет).

Решение было найдено в использовании методов Component Mode Synthesis (CMS), MDI приняла самый общий из них - метод Крейга-Бамптона.

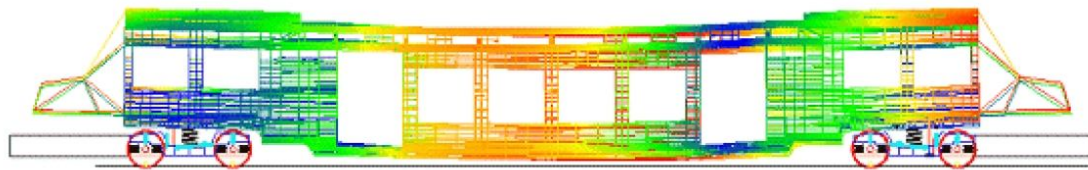
Метод Крейга-Бамптона позволяет пользователю выбрать подмножество степеней свободы, которые исключаются из суперпозиции форм. Эти степени свободы, которые называются «граничными» (а также «для присоединения» или «для взаимодействия»), сохраняются отдельно в виде собрания форм Крейга-Бамптона. Эти степени свободы не теряют разрешения, когда отсекаются формы более высокого порядка.

Таким образом, метод Крейга-Бамптона использует очень простую схему. Степени свободы деформируемого тела делятся на граничные,  $u_b$ , и внутренние,  $u_i$ .

# Создание отдельных форм (CMS) — метод Крейга-Бамптона.



ADAMS/Rail vehicle model with flexible coach



**Custom Inertial Modeling**

Depicted below are the flexible body mass matrix and acceleration state vector. The figure illustrates how the flexible body mass properties are affected by deformation,  $q$ . Invariant 1 is the total mass. Invariant 2 is the center of mass location multiplied by the mass. Invariant 7 is the moment of inertia. Invariants 8 and 9 introduce 1st and 2nd order modification to the moment of inertia, etc.

$I^1$	$-\tilde{I}^2 - \checkmark \tilde{I}_j^3 q_j$	$\checkmark I^3$	$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{q} \end{bmatrix}$
	$I^7 - \checkmark I_j^8 q_j - \square I_{ij}^9 q_i q_j$	$\checkmark I^4 + \square I_j^5 q_j$	
		$\checkmark I^6$	

Note: Disabling Invariant 6 (modal mass) makes body rigid.

OK Apply Cancel

**Flexible Body Modify**

Flexible Body: manual\_opt

Damping Ratio: (none)  default

Datum Node: 0  LBRF

Location | Position ICs | Velocity ICs | Modal ICs

Mode Number: (none) of 42

Frequency: [ ]

Cycles: 3  Superimpose

Enable  Disable range auto

Graphics

Full MNF graphics

Outline

Plot Type: Contour

Mode Filter

Inertia modeling

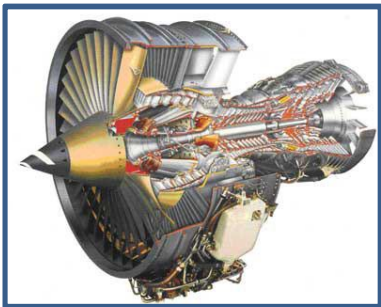
Rigid body

Constant

Partial coupling

Full Coupling

Custom



## ADAMS/Autoflex

Позволяет создавать деформируемые тела в MSC.ADAMS  
Позволяет легко заменять твёрдые тела в MSC.ADAMS модели на деформируемые  
Обеспечивает быстрое изменение деформируемых тел для подбора их характеристик в модели

