

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ NASTRAN ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, КУЛАЧКОВЫХ И РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

The application of Nastran programming package for the designing of mechanisms is described. Tooth gearing, cam and lever mechanisms are considered as examples. The designing of the latter is considered in more detail.

**Введение.** В настоящее время вычислительная техника все шире применяется в задачах проектирования и исследования движения различных механизмов, протекания физических процессов и во многих случаях является единственным средством для решения сложных задач. Совершенствование программного обеспечения персональных компьютеров, разработка пакетов для символьных преобразований, создание пакетов, составляющих и решающих уравнения Лагранжа для систем со многими степенями свободы, позволяют ставить вопрос о практически полной замене аналитических и графоаналитических расчетов компьютерными методами [1,2]. Одним из таких программных пакетов является Nastran [3].

Пакет VisualNastran Desktop 4D предназначен для моделирования механических процессов. Он используется преимущественно для анализа уже спроектированных механизмов, поскольку здесь отсутствует возможность программирования. Данный пакет также может применяться для анализа вибраций, устойчивости, расчета напряжений в телах. Одно из преимуществ пакета Nastran состоит в том, что он требует лишь задания расположения звеньев, наложенных на них связей и приложенных сил. Составление дифференциальных уравнений движения, их интегрирование, графическое и численное представление результатов расчета относятся к функциям пакета.

Ниже рассмотрим методику расчета напряжений в зубчатых колесах, кулачковых механизмах и моделирования рычажных механизмов в пакете Nastran.

**1. Зубчатые колеса.** Рассмотрим применение пакета Nastran для анализа напряжений в зубчатом колесе. Для этого необходимо, в первую очередь, иметь трехмерное изображение (геометрическую модель) исследуемого колеса. Возможности данной версии пакета по созданию геометрических тел ограничиваются построением простейших объектов (шар, параллелепипед, цилиндр). И поскольку средствами Nastran невозможно получить более сложные формы, то для решения поставленной задачи можно прибегнуть к помощи других пакетов. Соз-

дать трехмерное изображение зубчатого колеса можно при помощи программы Autocad, предварительно написав программу на любом из языков, результатом работы которой будет строка, содержащая поочередно координаты точек профиля зубчатого колеса. В качестве среды программирования был выбран пакет Mathcad, поскольку он имеет ряд встроенных функций (решение уравнений, построение графиков и т. д.), позволяющих сэкономить время на написании этих функций самостоятельно [4]. Такая программа рассчитывает профили обоих колес зубчатого зацепления в зависимости от введенных параметров (число зубьев, модуль, смещение зубчатой рейки). Координаты точек профиля записываются в формате (command "\_PLINE" "x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>" "x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>" "x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>" ... "\_C"), и такая строка через системный буфер обмена копируется во встроенный в Autocad интерпретатор Autolisp, который и вычерчивает колесо. Далее применяется функция выдавливания и колесо сохраняется в формате acis, который затем можно открыть в Nastran. Такой подход позволяет создать колесо произвольной формы, модифицируя текст программы или добавляя необходимые элементы в Autocad. Теперь, когда есть геометрическая модель колеса, можно в Nastran получить механическую модель зубчатого зацепления – на полученные колеса наложить связи и приложить моменты сил, задать скорость вращения и характеристики материалов.

Такая модель позволяет получить детальную информацию о напряженном состоянии колес, недостижимую в реальных экспериментах. В частности можно получить распределение напряжений в объеме тела, определить реакции опор или проанализировать вибрации. Для выполнения требуемых расчетов нужно лишь указать вид анализа и сделать некоторые настройки, например задать размер конечных элементов. На рис. 1 показан результат вычисления распределения напряжений в объеме зубчатого колеса. Здесь изображение переведено в черно-белый формат, и поэтому различие между некоторыми цветами недостаточно

контрастно. Визуализация результатов расчета осуществляется закрашиванием областей колеса цветом, которому приведено в соответствие значение напряжения, показанное на шкале (рис. 1, слева). По результатам моделирования можно судить о возможности применения зубчатых колес с выбранными параметрами в механизмах с заданной нагрузкой, наиболее напряженных участках либо получить другую необходимую информацию.

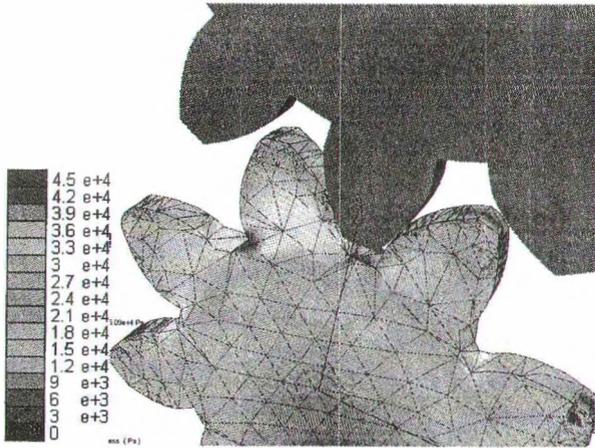


Рис. 1. Напряжения в зубчатом колесе

**2. Кулачковые механизмы.** Аналогичным образом разрабатывается модель кулачкового механизма, которую можно использовать для дальнейшего исследования либо в качестве подсистемы, входящей в состав более сложного механизма. Отличие моделирования кулачковых механизмов от зубчатых колес заключается в необходимости написания программы, результатом работы которой будет строка, содержащая поочередно координаты точек профиля кулачка. Такая программа была написана в Mathcad. Она рассчитывает профиль кулачка в зависимости от введенных параметров (вид и закон движения толкателя, максимальный угол давления). Как и при моделировании зубчатого зацепления, координаты точек профиля записываются в формате (command "\_SPLINE" "x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>" "x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>" "x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>" ... "\_C"). Созданный в Autocad кулачок импортируется в Nastran, а толкатель с роликом можно изобразить и непосредственно в программе Nastran в виде цилиндров. После того, как все тела созданы, остается задать связи между ними (взаимодействие при контакте между кулачком и роликом, шарниры между толкателем и роликом, толкателем и нулевым звеном, кулачком и нулевым звеном). На рис. 2 показаны варианты моделирования кулачковых механизмов с различными толкателями (поступательно движущимся роликовым, тарельчатым, качающимся).

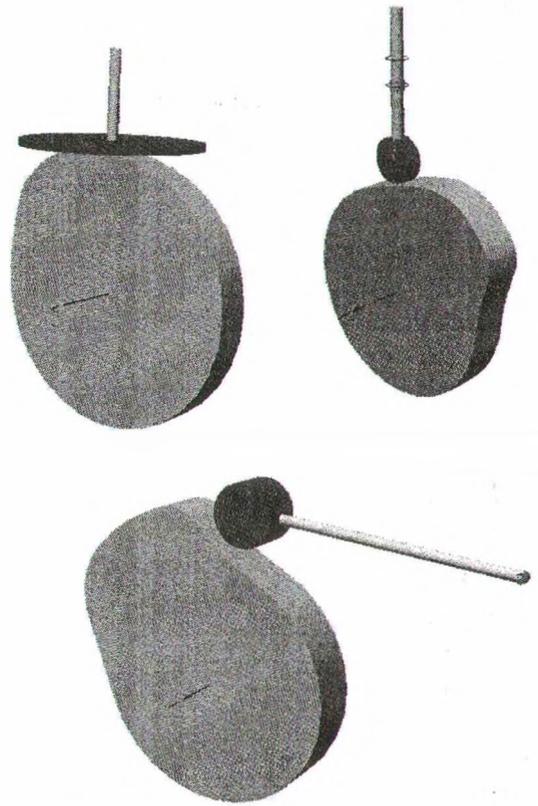


Рис. 2. Изображения кулачковых механизмов в Nastran

Далее такие модели можно использовать для различных целей, например для получения значений напряжений в кулачке при различных его положениях или для исследования графиков, например график изменения скорости толкателя в зависимости от времени (рис. 3).

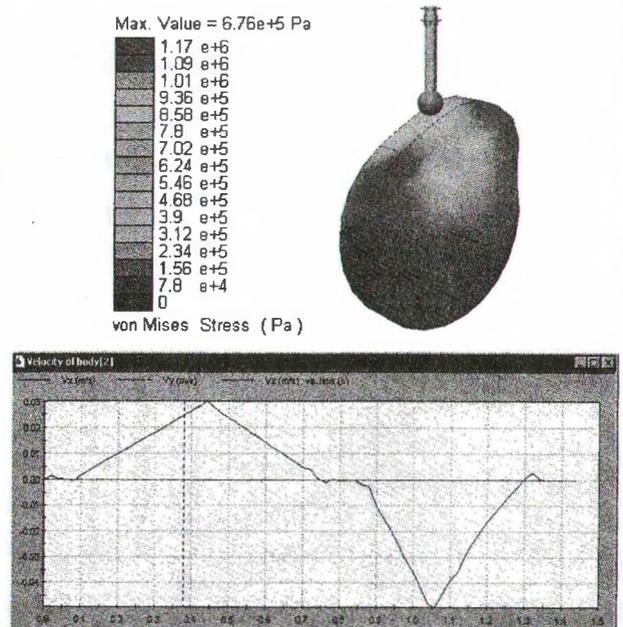


Рис. 3. Напряжения в кулачке и график изменения скорости толкателя

**3. Рычажные механизмы.** Nastran очень удобно использовать для анализа рычажных механизмов с заранее известной кинематической схемой.

Рассмотрим применение Nastran на примере моделирования рычажного механизма (рис. 4) с целью подбора двигателя и маховика. Предполагаются заданными длины, массы и моменты инерции всех звеньев, сила полезных сопротивлений и средняя угловая скорость приводного звена.

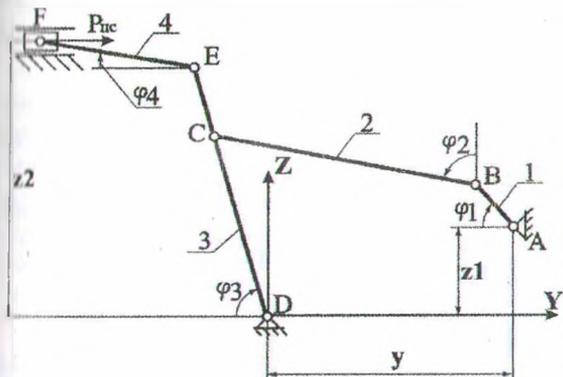


Рис. 4. Кинематическая схема механизма

**3.1. Создание геометрии объекта.** Прежде всего необходимо задать сами звенья. Поскольку в Nastran можно работать только с трехмерными телами, будем задавать звенья 1–4 в виде цилиндров, а ползун 5 – в виде параллелепипеда. Цилиндры можно либо создавать при помощи кнопки Cylinder на панели инструментов Sketch, либо задать узловые точки и воспользоваться функцией Connecting Body из меню Insert. В данном случае проще использовать второй вариант. Механизм расположим в плоскости YOZ.

Для начала при помощи инструмента Coord создается 10 точек, произвольно расположенных в рабочей области. Затем задаются координаты каждой из них. Для всех точек координату X принимаем равной нулю, а Y и Z следует задать таким образом, чтобы обеспечить требуемые длины звеньев. Проще всего принять звенья параллельными одной из осей:

1. точка (A1) –  $Y=0.8, Z=0.3$ ;
2. точка (B1) –  $Y=0.8, Z=0.44$ ;
3. точка (B2) –  $Y=0.74, Z=0.4$ ;
4. точка (C2) –  $Y=0, Z=0.4$ ;
5. точка (C3) –  $Y=0, Z=0.4$ ;
6. точка (D3) –  $Y=0, Z=0$ ;
7. точка (E3) –  $Y=0, Z=0.56$ ;
8. точка (E4) –  $Y=-0.5, Z=1.1$ ;
9. точка (F4) –  $Y=-0.5, Z=0.5$ ;
10. точка (F5) –  $Y=-0.5, Z=0.5$ .

Далее точки выделяются попарно и соединяются цилиндрами. Например, выделим точки A1 и B1 и выберем команду Connecting Body из меню Insert. То же самое осуществляется и с другими парами точек B2, C2 и D3, E3 и E4, F4.

Затем изображается параллелепипед. С этой целью в закладке Pos окна Properties устанавливаются его координаты ( $X=0, Y=-0.5, Z=0.5$ ), а в закладке Vox – линейные размеры ( $X=0.05, Y=0.1, Z=0.02$ ).

Точку C3 необходимо присоединить к звену 3, а E5 – к звену 5 (параллелепипеду). Для этого выбираем сначала звено 3 и точку C3 и применяем команду Attach to Body из меню Object, а затем выбираем звено 5 и точку E5 и применяем эту же команду.

Далее, созданные звенья соединяем кинематическими парами. Для этого выделяем сначала точку A1 и выбираем команду Create Constraint. В открывшемся окне выбираем вид кинематической пары Revolute Motor и нажимаем кнопку Create. При этом звено 1 соединяется точкой A с двигателем. Для правильной ориентации звена нужно выбрать двигатель и в закладке Constraint окна Properties в поле Rotate Around вместо Z выбрать X.

Аналогично выбираем точки D3, создаем кинематическую пару при помощи кнопки Create Constraint вида Revolute Joint, меняем ориентацию с Z на X.

Выбираем точки C2 и C3, создаем кинематическую пару при помощи кнопки Create Constraint вида Revolute Joint (следует указать Split constraint), меняем ориентацию с Z на X.

Аналогично соединяем пары точек B1 и B2, F4 и F5, E3 и E4.

Для создания ползуна выбираем звено 5, создаем кинематическую пару при помощи кнопки Create Constraint вида Rigid Joint on Slot (следует указать Split constraint).

Если все выполнено верно, то при нажатии на кнопку Run в строке моделирования (или Меню World-Run) механизм должен начать работать, а рабочая область будет иметь вид, показанный на рис. 5.

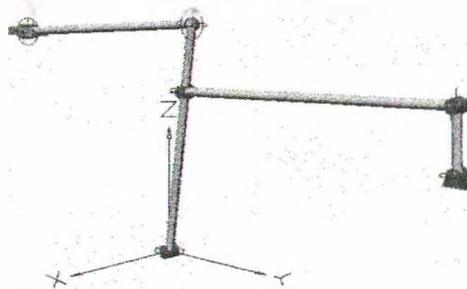


Рис. 5. Рычажный механизм в Nastran

**3.2. Задание масс, моментов инерции и силы полезных сопротивлений.** Задание масс и моментов инерции производится в закладке Central Inertia окна Properties. Масса выделенного тела задается в поле Mass, а для задания момента инерции в поле Density надо переключиться на Custom и задавать одинаковые значения момента инерции в верхнем левом и центральном прямоугольниках. Поскольку пятое звено не совершает вращательных движений, то его момент инерции можно не указывать.

Чтобы задать силу полезных сопротивлений, действующую на пятое звено, нужно выбрать инструмент Force панели инструментов Sketch (либо Меню Insert – Force) и указать на пятое звено. В рабочей области и в Менеджере объектов появится изображение вектора силы.

Чтобы задать значения силы на рабочем и холостом ходу, надо выделить силу и в закладке Structural Load окна Properties в полях X и Y задать нулевые значения, а напротив поля Z нужно написать "if(body[20].v.y>0,-200,0)".

**3.3. Выбор двигателя и задание его механической характеристики.** Для выбора двигателя сначала определяется ход ползуна. В Nastran можно определить ход ползуна, используя измерения. По графику перемещения определяются минимальное и максимальное значения координаты Y ползуна. Их разность и будет максимальным перемещением (ходом) ползуна.

Момент, приложенный к приводному звену, вычисляется по формуле(1), мощность двигателя – по формуле(2):

$$M_1 = \frac{P_{pc} \cdot H}{2\pi}; \quad (1)$$

$$P_{дв} = M_1 \cdot \omega_1. \quad (2)$$

Выбирается двигатель, и из табличных данных определяются остальные его параметры.

Чтобы задать механическую характеристику двигателя в Nastran, нужно в закладке Motor окна Properties выбрать Torque, возле поля Value нажать на кнопку с многоточием. В раскрывшемся окне Edit Formula нажать кнопку Insert Table. В окне Edit Table в поле Lookup пишется "body[13].w.y", в Interpolation выбирается Piecewise Constant, ниже, в левой колонке, задается угловая скорость, а в правой – момент.

**3.4. Подбор момента инерции маховика.** Подбор момента инерции маховика осуществ-

ляется путем постепенного увеличения момента инерции звена 1 и нахождения коэффициента неравномерности движения приводного звена до тех пор, пока этот коэффициент не станет меньше предельно допустимого.

Средняя угловая скорость приводного звена, заданная по условию, равна 40 об/мин, что соответствует 240 град/с (именно в градусах в секунду производится задание угловой скорости в Nastran). При допустимом коэффициенте неравномерности движения 0,1 разница между максимальной и минимальной угловыми скоростями в установившемся режиме не должна превышать 24 град/с.

Чтобы ускорить завершение переходных процессов, нужно задать начальное значение угловой скорости приводного звена равным 240 град/с, т. е. его установившейся скорости. Для задания начальной угловой скорости нужно выделить звено 1 и в закладке Vel окна Properties во всех полях ввести 0, а в поле W<sub>y</sub> задать 240.

Для нахождения угловой скорости выбирается звено 1 и запускается команда Meter-Angular Velocity из меню Insert. Далее выбирается появившееся поле графика и в закладке Formulas окна Properties убираются все птички, кроме при W<sub>y</sub>.

Далее уже известным способом задается момент инерции звена 1 (для начала, например, 5 кгм<sup>2</sup>) и кнопкой Run запускается моделирование. Когда приводное звено совершит 2–3 оборота, моделирование останавливается кнопкой Stop, и вычисляется разность между максимальной и минимальной угловыми скоростями на последнем обороте входного звена. Если эта разность превышает 24 град/с, то дополнительно увеличиваем момент инерции и снова выполняем моделирование и вычисляем разность угловых скоростей, пока она не станет меньше 24 град/с.

## Литература

1. Попов С.А., Тимофеев Г.А. Курсовое проектирование по теории механизмов и механике машин. – М.: Высшая шк., 2002.

2. Бокун Г.С., Вихренко В.С., Гляков С.А. // Теоретическая и прикладная механика: Межведомственный сборник научно-методических статей. – Мн.: БНТУ, 2005. – Вып. 18. – С. 215–220.

3. Шимкович Д.Г., Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001.

4. Кирьянов Д.А. Самоучитель Mathcad 2001. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.