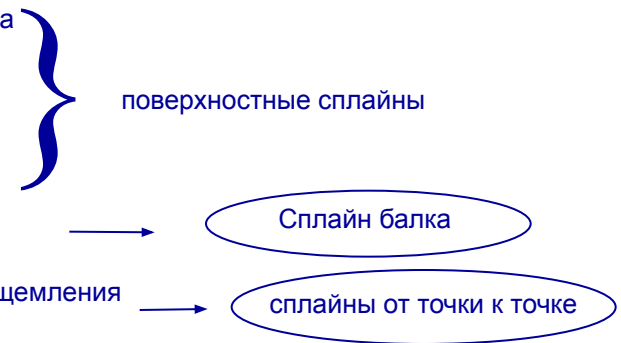


Раздел 3.1

Аэроупругость. Обзор.

Связь структурной и аэродинамической моделей

- Структурная и аэродинамическая модели независимы до связи их сплайнами, которые используются для создания интерполяционной матрицы
- Матрица используется для определения перемещений в аэродинамической модели в зависимости от перемещений упругой (структурной) модели.
- Существует 5 видов сплайнов:
 - Infinite plate spline – сплайн бесконечная пластина
 - Thin plate spline - сплайн тонкая пластина
 - Finite plate spline – сплайн конечная пластина
 - Linear (beam) splines - линейный (балка) сплайн
 - Explicit constraint relation – выражение явного защемления
- В аэроупругости MSC.Nastran используются степени свободы структурной модели



Связь структурной и аэродинамической моделей

- Используются два уравнения перехода:

$$\{u\}_k = [G^d_{kG}]\{u\}_g$$

$$\{F\}_g = [G^p_{Gk}]\{F\}_k$$

- где k = обозначает множество аэродинамических точек
 g = множество структурных точек
 G_{kG} = сплайн-матрица для преобразования перемещений структурной модели в перемещения аэродинамической модели
 G_{Gk} = сплайн-матрица для преобразования аэродинамических нагрузок в силы, действующие на конструкцию
 F = вектор сил
 u = вектор перемещений

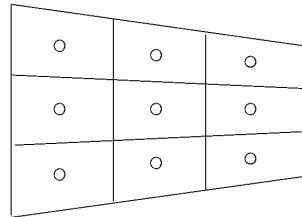
- Принцип возможных перемещений

$$G^p_{Gk} = G^d_{kG}{}^T$$

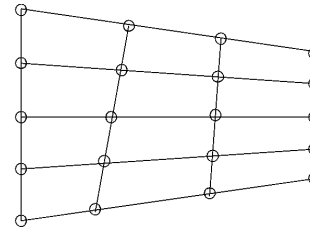
- Это уравнение может быть использовано, но не всегда успешно

Поверхностные сплайны

- Поверхностные сплайны применяются для связи массива четырехугольных панелей со структурными узлами.



Аэродинамическая пластина
и узловые точки



Структурная модель и
узловые точки

- Для описания поверхностных сплайнов используют уравнения из теории пластин
 - Дано: Поперечная деформация дискретного множества точек (структурных узлов)
 - Имеет место: Функция сглаживания деформаций для всех точек, основанная на уравнениях из теории пластин
 - Получаем: Деформации второго дискретного множества (аэродинамических узлов)

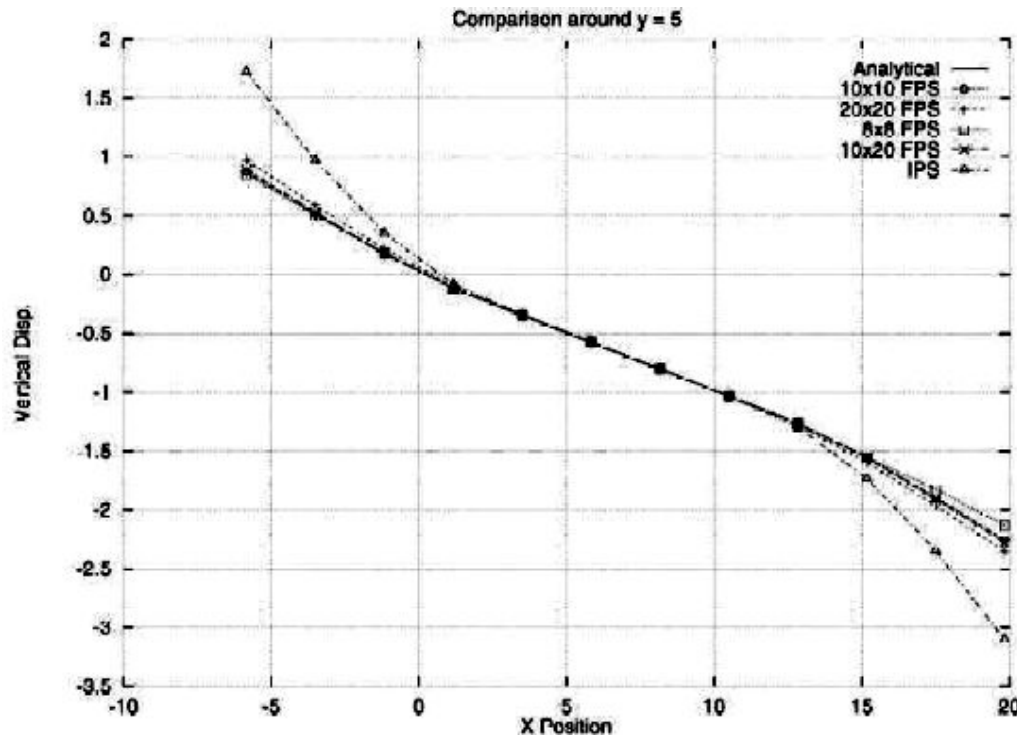
Свойства поверхностных сплайнов

- **Сплайн бесконечная пластина**
 - Классический метод построения моделей, применяемый в *MSC.Nastran Aeroelasticity*
 - Используются уравнения для двумерных бесконечных пластин
 - Аналитические выводы представлены в разделе 2.4 *MSC.Nastran Aeroelastic Analysis User's Guide*

- **Сплайн тонкая пластина**
 - Является расширенным сплайном бесконечной пластины и позволяет провести более точные расчеты для узлов не лежащих в одной плоскости.
 - Предназначен для аэродинамических систем более высокого порядка
 - Если структурные узлы компланарные то преобразуется в сплайн бесконечной пластины
 - Исследование этого вопроса содержится в разделе 4.4 *MSC.Nastran V70.5 Release Guide*

Свойства поверхностных сплайнов

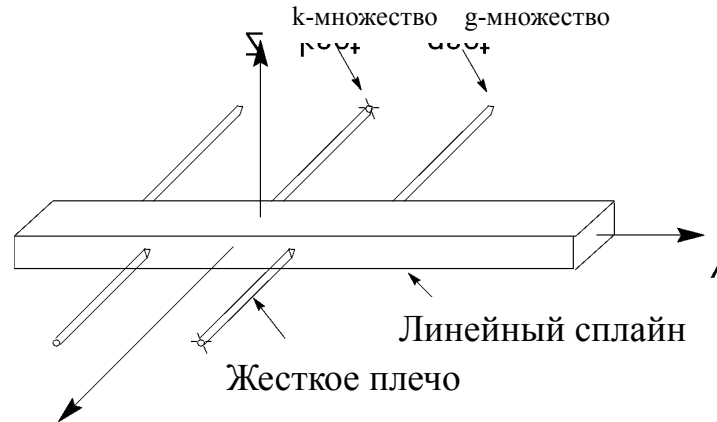
- ◆ Конечный плоский сплайн
 - В методе конечных пластин используется интерполяция для четырехугольных пластин
 - Избегайте эффекта «картофельных чипсов» на границе конструкций, который требует экстраполяцию из аэродинамических пластин.
 - Обсуждение этого вопроса содержится в разделе 4.2 *MSC.Nastran V70.7 Release Guide*
 - Сравнение линейных экстраполяций



Линейная экстраполяция

Линейный сплайн

- **Линейные сплайны используются, когда конструкция является жесткой в одном из направлений**



- **Уравнения для линейных сплайнов получены из уравнений бесконечных балок**
- **Балки могут изгибаться относительно оси x и закручиваться относительно оси y**
 - Дано: поперечные деформации, углы наклонов и кручение множества дискретных точек на сплайне (структурные узлы присоединяются к жестким плечам)
 - Имеет место: поперечные деформации и кручение всех точек на сплайне
 - Получаем: деформации и углы наклона вдоль линии тока для аэродинамических узлов

Рекомендации по созданию сплайнов

- Сложные сплайны
 - Каждый аэродинамический узел может определяться только одним сплайном
 - Структурные узлы могут определяться несколькими сплайнами
- Аэродинамические узлы, не связанные со сплайнами, передающими перемещения, не будут перемещаться (аналогично: силы, действующие на аэродинамическую модель не будут передаваться на конструкцию, если нет сплайнов, передающих перемещения).
- Степени свободы структурной модели указываются в карте SET1 или карте SET2
- Ось сплайна для пластин определяется в карте SPLINE2 в Bulk Data. Для тел: ось сплайна совпадает с осью x тела.
- Связи сплайна происходят в системе осей сплайна (связи на виртуальной структуре)
- DTOR определяет отношение жесткости на кручение к жесткости на изгиб
 - Обычно принимается $DTOR = 1.0$
 - При больших значениях DTOR преобладают крутильные деформации
 - Важно что бы $DZ, DTHX, DTHY > 0$
 - По умолчанию DTOR равен 1.0

Рекомендации по созданию сплайнов

- Форсирование сплайна через каждую точку может привести к чрезмерно ограниченным состояниям.
- "Springs" может заменить вынужденные перемещения и выровнять сплайны.
- DZ контролирует поперечные перемещения
 - = 0 Неупругие. Сплайн использует известные перемещения.
 - > 0 Упругость пропорциональна заданной для известной точки DZ.
- DTHX и DTHY контролирует вращение вокруг X и Y
 - = 0 Неупругие (по умолчанию)
 - > 0 Упругость пропорциональна DTHX(Y)
 - = -1 Сплайн не присоединен к связанной степени свободы
- USAGE позволяет разделить множество узлов, выбранных с опциями FORCE и DISP; некоторые узлы могут быть неспособны обеспечивать нагружение.
- SPLINE4 и SPLINE5 – альтернативные объекты для описания линейного и поверхностного сплайнов, которые обеспечивают поддержку основных аэродинамических параметров.

SPECIAL CASES FOR THE SPLINE

- Если два или более структурных узла имеют одинаковое положение при проецировании на некоторую виртуальную плоскость, необходимо использовать принудительное упругое закрепление во избежание вырождения интерполяционной матрицы. Однако, рекомендуется удалять особые точки.
- Для линейных сплайнов: три структурных деформации с одинаковыми координатами сплайна Y будут переопределять интерполяционные деформации. Требуется введение дополнительного параметра DZ для того что бы интерполяционная матрица была не вырожденной.
- Для линейных сплайнов: два структурных угла поворота с одинаковыми координатами Y приведут к вырождению интерполяционной матрицы. Используйте $DTHX$ или $DTHY > 0$.
- Если для структурной модели вращательные степени свободы равны нулю, то крутильные связи линейного сплайна не должны быть связаны с этими нулевыми значениями.
- Аэродинамические элементы, которые были связаны со структурными посредством сплайнов с опцией $USAGE = DISP$, должны так же содержать опцию $USAGE = FORCE$.