

## **ВХОДНОЙ – ВЫХОДНОЙ УРОВЕНЬ ИНФОРМАЦИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ ANSYS И MIRELLA+**

У статті розглядаються два різних підходи до організації вхідного та вихідного рівня інформації на прикладі САПР ANSYS та MIRELLA+

### **INPUT AND OUTPUT LEVEL OF INFORMATION IN COMPUTER COMPLEX ANSYS AND MIRELLA+**

Two different approaches to organizing input and output of information in SAP ANSYS and MIRELLA+ are considered in the article.

Многие задачи, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться исследователям и инженерам, не поддаются аналитическому решению либо требуют огромных затрат на экспериментальную реализацию. Зачастую единственной возможностью экспрессного анализа инженерной проблемы является компьютерное математическое моделирование. Прогресс в разработке численных методов позволил существенно расширить круг задач, доступных анализу. Полученные на основе этих методов результаты используются практически во всех областях науки и техники. В анализе НДС конструкций широкое применение получил метод конечных элементов.

Расчет конструкций методом конечных элементов можно представить в виде трех взаимосвязанных последовательных процессов:

- 1) подготовка исходных данных – конечно-элементная дискретизация рассчитываемого объекта, его топология, кинематические и силовые граничные условия, физико-механические характеристики материала и т.д.;
- 2) численный расчет конечно-элементной модели – вычисление коэффициентов матрицы жесткости конечных элементов, формирование глобальной системы разрешающих уравнений и её решение;
- 3) обработка результатов решения – вычисление параметров напряженно-деформированного и температурного состояния конструкции; их визуальное представление в виде таблиц, графиков, двумерных либо трехмерных изображений.

Эти процессы численной реализации, как принято в автоматизированных расчетах, выполняются тремя подсистемами – препроцессором, процессором и постпроцессором, соответственно.

В данной статье на примере САПР ANSYS и MIRELLA+ описываются два различных подхода к организации входного – выходного уровня информации современных систем автоматизации проектирования в машиностроении и строительстве.

Данные для решения конкретной задачи в рамках системы MIRELLA+ задаются входной программой, которая может быть настроена на одну из управляющих ветвей УЭЛМА, НЭЛМА, ВЭЛМА, ТЕРЭЛ, ВРЭМА, ТЕРМЭЛ, МРЭМА,

ПРОКОМ, ДИНЭМА, КОЭЛА, ДОЛЭМА [1]. Эти данные описывают топологию дискретной модели, граничные и начальные условия, физико-механические характеристики, геометрию, силовые и температурные воздействия, законы состояния нелинейно-упругого тела, ядра релаксации вязкоупругого тела, параметры управления режимами работы вычислительного алгоритма, необходимые ресурсы внешних запоминающих устройств, модификации режима обработки и выдачи результатов расчета. Процедуре составления «входной строки» предшествует процедура выбора расчетной схемы объекта и подготовки входной информации. Для описания конструкции вводятся две системы координат – базисная декартова система координат  $z^{k'}$ , в которой задаются геометрические координаты узлов, поля нагрузок и граничных условий и местная криволинейная система координат  $x^i$ , в которой задается нумерация и сеточные координаты узлов. Для задания геометрии имеется библиотека фигур стандартных типоразмеров: призматические, цилиндрические, сферические, конические и тела вращения. Геометрия нестандартных объектов задается посредством опорных точек, которые являются точками изменений в очертании фигуры.

Число и характер разбиений выбирают в зависимости от ожидаемой неравномерности напряженного состояния, при этом нежелательно, чтобы размеры одной ячейки отличались от другой более чем в 10 раз. Тип конечного элемента и закон аппроксимации задается параметрами  $M, N, L$ :  $M=2$  – линейный,  $3$  – квадратичный,  $4$  – кубический. Размеры сеточной области –  $M1 \times M2 \times M3$ , где  $M1$  – количество узлов разбиений по оси  $x^1$ ;  $M2$  – по оси  $x^2$ ;  $M3$  – по оси  $x^3$ . Поле координат узлов сеточной области задается в базисной декартовой системе и формируется в массиве  $X(NUX, 3)$ , где  $NUX$  – зарезервированный размер массива. В массиве  $NF(NUX)$  – топология и граничные условия, рассчитываемого объекта. Топология расчетного объекта отражает всевозможные полости, вырезы и трещины, имеющиеся в исследуемой конструкции. Другими словами топология отражает наличие или отсутствие конечных элементов в соответствующей части геометрического объекта и формируется обращением к подпрограмме TELOS:

CALL TELOS(N1, N2, N3, K1, K2, K3, NF),

где  $N1, N2, N3$  – начальные;

$K1, K2, K3$  – конечные сеточные координаты области, которые задаются в местной системе координат  $x^i$ .

Для узлов, в которых в положительном направлении всех осей координат есть конечный элемент, формируется признак 71, а в которых его нет – 7. Граничные условия формируются относительно базисной системы координат  $z^i$  обращением к подпрограмме ZAKREP:

CALL ZAKREP(N1, N2, N3, K1, K2, K3, NA, NF),

где параметр  $NA$  определяет тип граничного условия.

Граничные условия задаются в перемещениях:

$NA=1$  – запрещение перемещений вдоль оси  $z^1$ ;

$NA=2$  – запрещение перемещений вдоль оси  $z^2$ ;

$NA=3$  – запрещение перемещений вдоль осей  $z^1$  и  $z^2$ ;

NA=4 – запрещение перемещений вдоль оси  $z^3$ ;

NA=5 – запрещение перемещений вдоль осей  $z^1$  и  $z^3$ ;

NA=6 – запрещение перемещений вдоль осей  $z^2$  и  $z^3$ ;

NA=7 – полное закрепление.

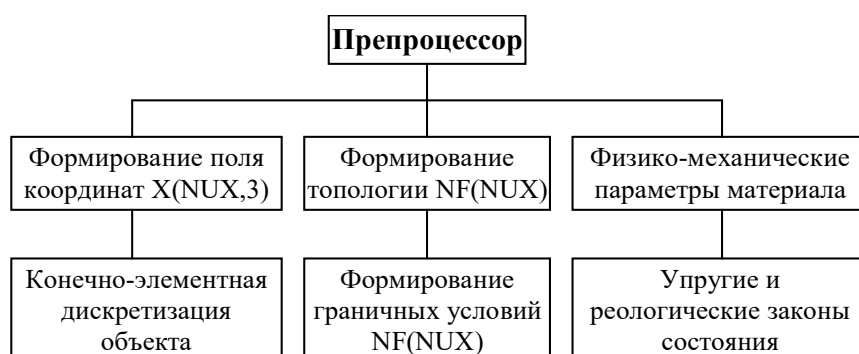


Рис. 1 – Структура препроцессора MIPELA+

В подпрограммах-функциях ETEM и ANUT задаются упругие постоянные материала конструкции:  $\mu$  – модуль сдвига,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Вычисляются параметры системы уравнений для задачи упругости NEQ – количество уравнений и NST – ширина ленты матрицы системы уравнений:

$$NEQ = 3 \cdot M1 \cdot M2 \cdot M3 ;$$

$$NST = 3 \cdot (2 + M1 + M1 \cdot M2) .$$

Подпрограммы HAGPO3 и HAGKVA формируют в массиве Q(NUX, 3) вектор узловых нагрузок линейного и квадратичного КЭ по заданной интенсивности QIN на поверхностях конструкции:

CALL HAGPO3(N1, N2, N3, K1, K2, K3, NA, X, NF, Q, QIN).

В узлах грани КЭ, на которой приложена нагрузка, для квадратичного элемента грузовая площадь умножается на соответствующий коэффициент. В узлах, расположенных в вершинах грани, коэффициент равен  $-1/12$ , в промежуточных узлах на ребрах КЭ он равен  $1/3$ .

Печать исходных данных в виде полей координат X, признаков NF, нагрузок Q и их визуализация выполняется подпрограммой PRINDA. Результаты расчета конструкции могут быть представлены в виде таблиц перемещений, деформаций и напряжений в узлах и центрах конечных элементах дискретной области, а также графически в виде муаровых полос, изолиний или поверхностей функций перемещений и напряжений по объему или в заданных сечениях. Визуальное представление осуществляется в виде двумерного или трехмерного изображения с помощью полутоновой или цветной картины, где каждому оттенку или цвету соответствует определенный диапазон числовых значений соответствующей функции [2].

Работать с программой ANSYS можно с помощью как графического интерфейса пользователя (ГИП) – интерактивный режим, так и с помощью команд – командный режим.

Каждый процессор предоставляет доступ к различным функциям и командам.

Комплекс ANSYS имеет возможность применения следующих методов создания модели:

- создание геометрической модели средствами ANSYS;
- использование прямой генерации (узлов и элементов);

- импорт моделей, созданных средствами CAD.

Комплекс ANSYS имеет несколько типов систем координат:

- глобальные и локальные системы координат, используемые для указания места расположения объектов (узлов, точек и т. п.) в пространстве;
- дисплейные системы координат, используемые для просмотра объектов;
- узловые системы координат, используемые для определения направлений степеней свободы в узлах и направления узловых расчетных результатов;
- элементные системы координат, используемые для определения направления свойств материалов и направления элементных расчетных результатов;
- системы координат результатов, используемые для преобразования узловых и элементных результатов к виду, требующемуся для просмотра в текстовом и графическом вариантах, а также для иных операций в препроцессоре POST1 [3, 4].

Комплекс предоставляет возможность создание геометрических моделей сверху-вниз (операции с геометрическими примитивами) и снизу-вверх (точки-линии-поверхности-объемы). Построение твердотельной модели возможно в ANSYS двумя путями и их комбинацией: при помощи набора готовых примитивов (как то – параллелепипед, цилиндр и др.) и булевых операций над ними, либо последовательным иерархическим построением, начиная с опорных точек, далее линии, сплайны, и т.п. до твердого тела. Наличие обоих вариантов дает гибкие возможности для быстреего создания сложных моделей только средствами ANSYS. Средства связи ANSYS Connection обеспечивают взаимодействия для переноса геометрической информации, созданной средствами CAD-систем (с UG, Pro/E, CATIA, CADDs прямой интерфейс) и чтение нейтральных геометрических форматов IGES, SAT, Parasolid в среду комплекса ANSYS.

Библиотека элементов ANSYS содержит более 100 различных типов элементов. Каждый элемент имеет свое имя, описывающее семейство элементов, необходимых для моделирования соответствующего объекта, и номер. Типом элемента определяются:

- степени свободы элемента (которые в свою очередь влияют и на тип анализа – механический, термический, магнитный, электрический);
- модель объекта – одномерная, двумерная или трехмерная.

У каждого типа элементов обычно необходимо задать опции. Эти опции позволяют управлять различными параметрами элемента. Для некоторых элементов необходимо задавать константы элемента. В основном, константы задаются для элементов, которые используются для моделирования трехмерных моделей сплошной среды моделями низшей размерности, например, в случае ферменных, балочных и оболочечных элементов.

В зависимости от задачи в ANSYS могут быть заданы следующие свойства материала:

- линейные или нелинейные;
- изотропные, ортотропные и анизотропные;
- зависящие от температуры или не зависящие.

В ANSYS есть два метода создания конечно-элементной модели – это твердотельное моделирование и прямое моделирование. Твердотельное моделирование – это вначале создание геометрической модели объекта, т.е. описание его геометрической формы, а затем построение сетки конечных элементов на ней. Прямое моделирование – это непосредственное геометрическое задание узлов элемента. В ANSYS есть наличие отдельной операции оптимизации и сглаживания уже имеющейся сетки, создание сеток при



Рис. 2 – Структура препроцессора ANSYS

экструдировании линий и поверхностей по произвольному пути, функция проверки качества сетки со средствами визуализации, сгущение (как двух, так и трехмерное) на уже имеющемся разбиении, широчайший набор опций к алгоритму разбиения (количество итераций, коэффициент прироста длины стороны элемента, автоматическое сгущение при локальном увеличении кривизны и т.д.).

Тип анализа выбирается в зависимости от условий нагружений и вычисляемых параметров.

Программа ANSYS предлагает следующие типы анализа: статический или стационарный, нестационарный, гармонический, модальный, спектр, продольный изгиб и подструктурирование. Все нагрузки, используемые в программе ANSYS, можно разбить на шесть категорий:

- ограничивающие условия DOF (степень свободы);
- силы;
- поверхностные нагрузки;
- объемные нагрузки;
- инерционные нагрузки;
- сопряженные нагрузки.

Как только решение вычислено, можно получить доступ к результатам, используя в зависимости от типа получаемых данных два постпроцессора POST1 и POST26.

Постпроцессор POST1 (General Postprocessor – общий постпроцессор) используется для обзора результатов в стационарной задаче или в течение отдельного шага решения в нестационарной задаче. Этот постпроцессор используется для получения линий уровня напряжений, деформаций и др. Постпроцессор POST26 (Time History Postprocessor – временной постпроцессор) используется для обзора результатов в виде

$$u = u(t),$$

где  $t$  – параметр нагрузки, частоты и др.

Приведенный выше анализ вычислительных комплексов позволяет сделать вывод, что графическое представление входных данных, оказывается значительно более наглядным и эффективным, чем печать таблиц числовых данных. Кроме того, при представлении на экране видеотерминала исходных данных имеется возможность исправлять какие-то несоответствия в разбивке конструкции на элементы или вносить другие коррективы. Это позволяет, например, вносить изменения в жесткости элементов конструкции, учитывать большее или меньшее количество сил и т.д. При этом всегда можно оптимизировать количество изменений в зависимости от условий задачи и имеющегося машинного времени.

Рассмотрим в качестве примера консольную балку, расчетная схема которой представлена на рис. 3. Точное решение, определяющее максимальный прогиб свободного конца консольной балки, полученное по формуле

$$f = -\frac{Pl^4}{24EJ} \cdot \left( 3 - 4\frac{a^3}{l^3} + \frac{a^4}{l^4} \right), \quad (1)$$

где  $P$  – давление на свободном конце балки;

$l$  – общая длина балки;

$E$  – модуль упругости материала;

$J$  – момент инерции поперечного сечения балки;

$a$  – длина балки без нагрузки; составляет  $f = 8,5$  мм [5].

Численные результаты расчета были получены в вычислительных комплексах MIPELA+ и ANSYS.

В таблице 1 приведены параметры использованных конечноэлементных моделей и результаты расчета перемещений  $UY$ . Численный анализ полученных результатов (табл. 1 и рис. 4, рис. 5), а также их сравнение с точным решением, дает возможность утверждать о достоверности полученных результатов. Очевидно, что для рассмотренной задачи наиболее рациональным является использование конечноэлементной модели из элементов BEAM4 в комплексе ANSYS [8]. Что касается комплекса MIPELA+, то решение задачи проводилось с учетом сгущения сетки КЭ, в результате чего был получен оптимальный результат распределение перемещений.

Чтобы иметь представление о достоверности полученных результатов, не проводя анализа всех возможных конечноэлементных моделей, можно обратиться за качественной оценкой адекватности выбранной КЭ модели с использованием опыта и представления о предполагаемом поведении конструкции [1, 2, 6, 7, 9].

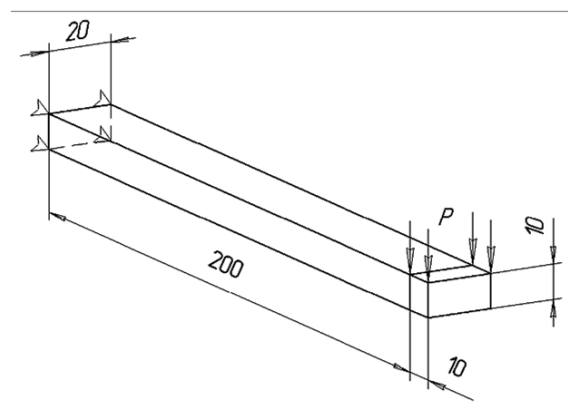


Рис. 3 – Расчетная схема консольной балки

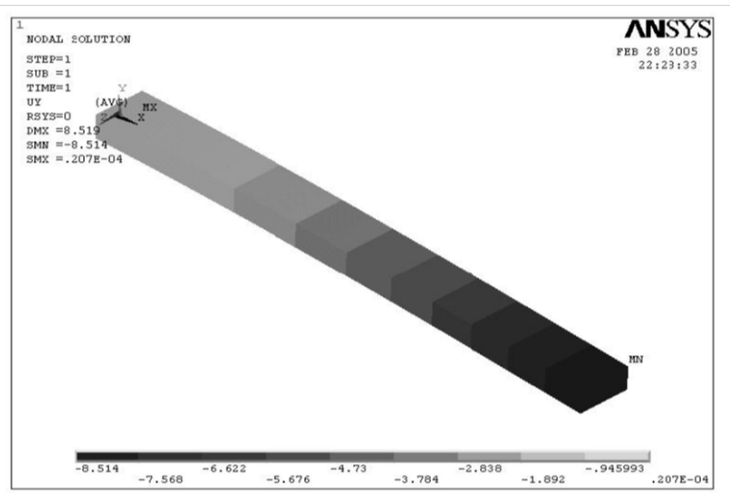


Рис. 4 – Распределения полей перемещений  $U_y$  в модели из элементов BEAM4

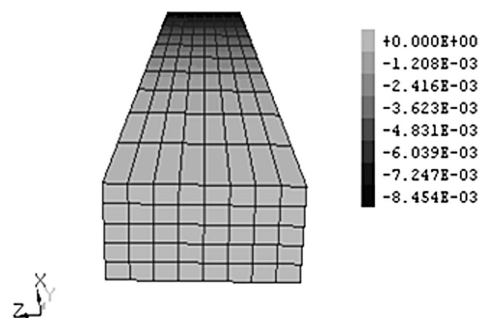


Рис. 5 – Распределения полей перемещений  $U_x$  в вычислительном комплексе MIPELA+

Таблица 1 – Параметры конечно элементных моделей и основные результаты

Модуль упругости, $E$	210000 МПа				
Коэффициент Пуассона	0,3				
Тип элемента [3]	SOLID45		SOLID95		BEAM4
Длина грани элемента по умолчанию, мм	10	2,5	10	2,5	10
Количество элементов	42	2688	42	2688	21
Количество узлов	132	3825	412	14065	22
Давление, $P$	100 МПа				
$U_{y \max}$ , мм	-8,449	-8,456	-8,41	-8,462	-8,514

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «MIPELA+» / Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Гоменюк С.И., Киричевский Р.В., Гребенюк С.Н.– К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.
2. Киричевский В.В. Метод конечных элементов в механике эластомеров. – К.: Наук. думка, 2002. – 655 с.
3. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
4. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 512 с.
5. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
6. Crawford, John. Guidelines for good Analysis: A step-by-step process for obtaining meaningful results // ANSYS Solutions. – Fall 2003. – P. 69-74.
7. Crawford, John. Evaluating Mesh Density // Ansys Solutions. – 1999. – Vol. 1, N 2. – P. 12-16.
8. ANSYS Element Reference // ANSYS Release 8.1 Documentation. ANSYS Inc., 2004.
9. Crawford John. Interpreting Your Analysis Results: Spend time reviewing the answers to understand what they really mean // ANSYS Solutions. – Spring 2004. – P. 36-38.