

**РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПО ІМАД
НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА АЭРОУПРУГОСТИ
ДЛЯ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА**



ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	3
2.	ОСОБЕННОСТИ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА	3
3.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЫШИ И КЛАВИАТУРЫ.....	4
4.	ЗАПУСК ЗАДАЧИ IMAD	6
5.	РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ АЭРОУПРУГОСТИ.....	8
5.1.	Постановка задачи.....	8
5.2.	ГЕОМЕТРИЯ И ПРОФИЛЬ КРЫЛА.....	9
5.3.	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ, УЗЛЫ НАВЕСКИ, МАССЫ, ДАТЧИКИ.....	14
5.4.	МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.....	17
5.5.	БАЛАНСИРОВКА.....	19
5.6.	АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ АЭРОУПРУГОСТИ.....	21
5.7.	ВЫХОД ИЗ ЗАДАЧИ.....	25
6.	РАСЧЕТ ФЛАТТЕРА	26
6.1.	ЗАГРУЗКА ФАЙЛА ЗАДАЧИ.....	26
6.2.	МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.....	27
6.3.	БАЛАНСИРОВКА.....	29
6.4.	РАСЧЕТ ФЛАТТЕРА.....	30

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее руководство описывает процесс работы в ПО «IMAD. Интерактивное многодисциплинарное проектирование летательных аппаратов» (далее - IMAD) на примерах, входящих в комплект поставки ПО


2. ОСОБЕННОСТИ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Интерфейс ПО IMAD не является типичным с точки зрения организации оконного интерфейса Windows, т.к. содержит собственный обработчик для работы с окнами.

Во время работы с IMAD на экране появляются и исчезают группы прямоугольных окон, причем новая группа окон размещается поверх предыдущей. Окно или группа окон, появившиеся на экране последними, являются *активными*, переключение между окнами невозможно. Для смены активного окна необходимо закрыть текущее окно, тогда предыдущее окно становится активным.

Название окна располагается в его левом верхнем углу. Каждое окно или группа окон IMAD обслуживаются собственным программным обеспечением - специальным *севером* для представления и редактирования графической и текстовой информации. Как правило, редактирование данных в окнах IMAD производится с помощью ряда стандартных операций.

Ниже показан пример окна IMAD с графической сценой (Рисунок 1). Управляя левой кнопкой мыши, пользователь может редактировать представленную кривую и получать различную информацию: точки экстремумов, интеграл и производные, спектральное разложение функции и т. д.

Почти все окна IMAD снабжены всплывающими подсказками с краткими пояснениями. Чтобы получить справку по активному окну, надо найти в окне курсор  и оставить мышь без движения. Через две секунды на экране появится желтое окошко со строками подсказки.

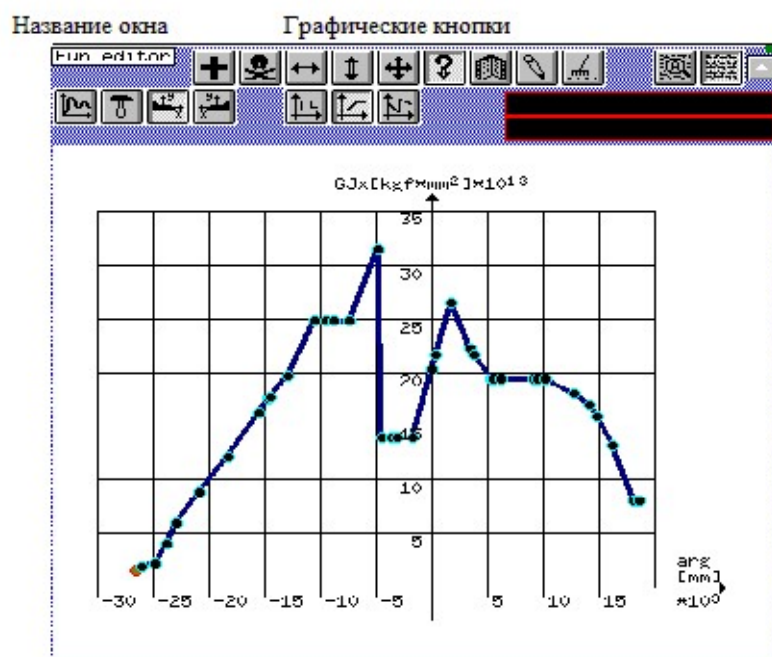







Рисунок 1. Окно IMAD с графической сценой и графическими кнопками управления

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЫШИ И КЛАВИАТУРЫ








Левая кнопка двухкнопочной мыши используется для выделения объекта. Одновременное нажатие левой кнопки мыши и клавиши **[Shift]** используется для редактирования размеров окон.

При работе с графической анимацией левая кнопка мыши используется для замедления скорости анимации, правая - для ускорения анимации, одновременное нажатие левой кнопки и клавиши **[Shift]** останавливает анимацию.

На рабочем поле IMAD расположено большое число *графических объектов*, в том числе т. н. *селекторов* в начале текстовых строк (, , , , ), различных графических кнопок, клавиш и т. д. Вид курсора на экране зависит от позиции мыши на рабочем поле. *Выбрать текстовую строку или графический объект* означает навести на селектор строки или на объект курсор мыши так, чтобы значок курсора на экране принял соответствующий вид, после чего нажать левую кнопку мыши.
















Так, в левом верхнем углу рабочего поля IMAD размещен ряд иконок (*icons*), нажатие на которые вызывает появление служебных окон IMAD специального вида (Таблица 1).

Таблица 1. Виды курсора мыши в левом верхнем углу рабочего поля IMAD

Курсор	Значение
	Вызвать <i>Таблицу единиц измерения</i>
	Вызвать <i>Калькулятор</i>
	Вызвать окно <i>Toolbox</i> с примерами задач, имеющих аналитическое решение
	Вызвать окно <i>Task Defaults</i> с установками задачи <i>KSB</i> , которые используются по умолчанию
	Вызвать окно <i>Show Protocol</i> с протоколом задачи <i>KSB</i>
	Вызвать <i>Аккумулятор Графиков (Graph Accumulator)</i>
	Вызвать <i>Сервисные окна</i>

Ниже перечислены часто применяемые в IMAD виды курсора мыши (Таблица 2).

Таблица 2. Популярные виды курсора мыши

Курсор	Значение
	Выбрать объект; закрыть окно
	Выбрать объект; вызвать окно
	Вызвать книгу
	Копировать объект
 	Сместиться вверх (вниз) на страницу
 	Сместиться вверх (вниз) на строку
 	Вызвать список возможностей и сделать выбор из списка
 	Записать (читать) данные в файл (из файла)
	Позиция курсора при редактировании строки
	Строка не может быть отредактирована; вызов анимации тона собственных колебаний конструкции
	Курсор находится вне активных окон

В таблице перечислены некоторые специальные клавиши, используемые в IMAD (Таблица 3).

Таблица 3. Клавиши, используемые в IMAD

Клавиша	Значение
[F3]	Выход из сессии IMAD с подтверждением ([y])
[F5]; [F6]	Занести число в <i>калькулятор</i> из текстовой строки; вставить вычисленное значение из <i>калькулятора</i> в текстовую строку

4. ЗАПУСК ЗАДАЧИ IMAD

При запуске IMAD путем исполнения Imad.exe на экране появляется приветственное окно IMAD (Рисунок 2).



Рисунок 2. Приветственное окно IMAD

После появления приветственного окна нажмите любую клавишу, появится окно с вопросом об имени пользователя:

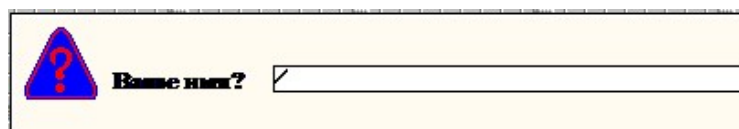


Рисунок 3. Окно запроса имени пользователя

В демонстрационной версии достаточно ввести символ «/» и нажать [Enter]. Появится окно диспетчера файлов, показанное ниже (Рисунок 4).

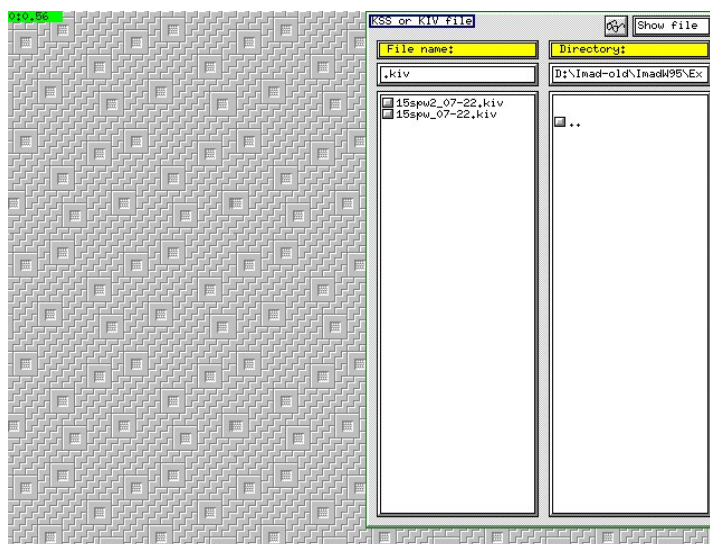






Рисунок 4. Рабочее поле IMAD после успешного входа в систему

Поиск файлов производится в директории, выбранной из списка директорий (справа). Наведите курсор мыши на селектор , расположенный в начале строки с именем нужной директории, найдите курсор  и нажмите левую кнопку мыши. Имя выбранной директории появится в окне «*Directory:*». Список директорий изменится в соответствии со сделанным выбором.

В списке файлов (слева) отображаются все файлы текущей директории того же типа, который указан в окне «*File name:*» (*.kiv или *.kss). Наведите курсор мыши на селектор в начале строки с именем нужного файла в списке, найдите курсор  и нажмите левую кнопку мыши. Имя выбранного файла появится в окне «*File name:*».

Если поместить курсор мыши в окно «*File name:*» или «*Directory:*» и найти текстовый курсор , можно редактировать имя директории или имя файла с помощью клавиатуры.

Для перехода из *Диспетчера файлов* в основную сцену задачи KSB найдите на верхнем поле окна «*KSS_or_KIV_File*» курсор  и нажмите левую кнопку мыши.

5. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ АЭРОУПРУГОСТИ

5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим численное исследование статической аэроупругости маленького алюминиевого крыла с углом стреловидности 15° .

Крыло является тонкой профилированной пластиной с осью X_s , ориентированной в направлении полета, осью Y_s , направленной вверх по нормали к плоскости крыла, и осью Z_s , направленной вправо (Рисунок 5). Узлы крепления (0, 1, 2, 3) моделируют упругую заделку корневой хорды крыла.

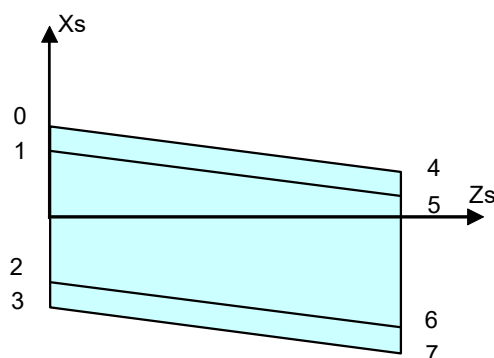




Рисунок 5. Вид крыла в плане

Координаты базовых точек перечислены ниже (Таблица 4).

Таблица 4. Координаты базовых точек

Номер	0	1	2	3	4	5	6	7
X , мм	26.3	19.7	-19.7	-26.3	-11.3	-17.9	-57.3	-63.9
Z , мм	0	0	0	0	140.33	140.33	140.33	140.33

Исходные данные задачи хранятся в файле «15spw2_07-22.kiv» в директории «KSB Samples». После успешного входа в IMAD на рабочем поле находится окно *Диспетчера файлов*. Наведите курсор мыши на селектор нужной строки с именем директории «KSB Samples» в списке справа и нажмите левую кнопку мыши с курсором . Имя файла «15spw2_07-22.kiv» появится в окне «File name:». Найдите на верхнее поле окна «KSS_or_KIV_File» курсор  и нажмите левую кнопку мыши, после чего на рабочее поле загрузится основная сцена задачи IMAD (Рисунок 6).

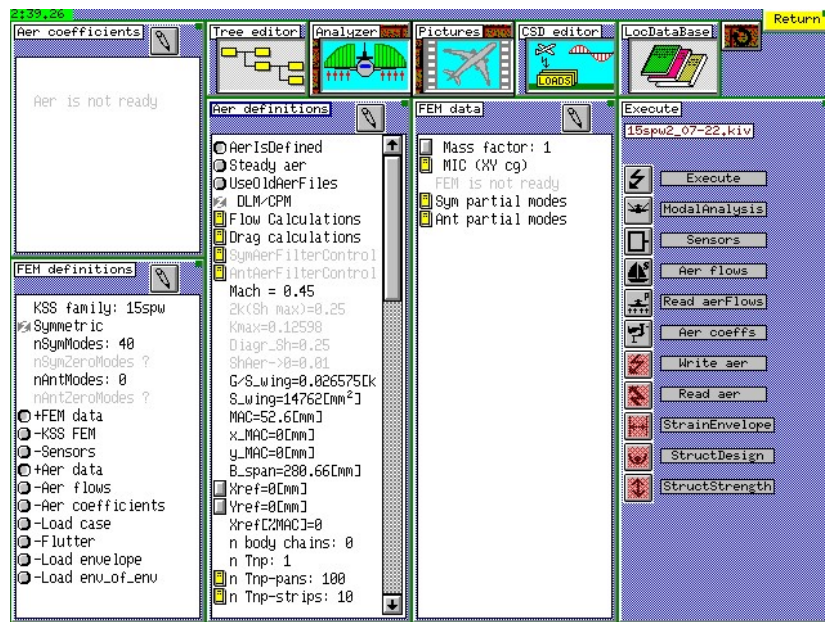
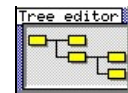



Рисунок 6. Основная сцена задачи IMAD

5.2. ГЕОМЕТРИЯ И ПРОФИЛЬ КРЫЛА

В IMAD крыло моделируется с помощью тонкой несущей поверхности (подконструкция *TNP*). Познакомимся с заданием геометрии и профиля крыла.



Нажмите на графическое окно «*Tree editor*» с курсором . На экране появится окно «*Tree editor*» (редактор дерева подконструкций) со схематическим изображением подконструкций и связей между ними. В нашем случае дерево подконструкций состоит из единственного узла «*wing*» (Рисунок 7). Заметим, что в отличие от рисунка, на своем экране Вы увидите черный прямоугольник с белой надписью (что означает активное состояние узла «*wing*»).

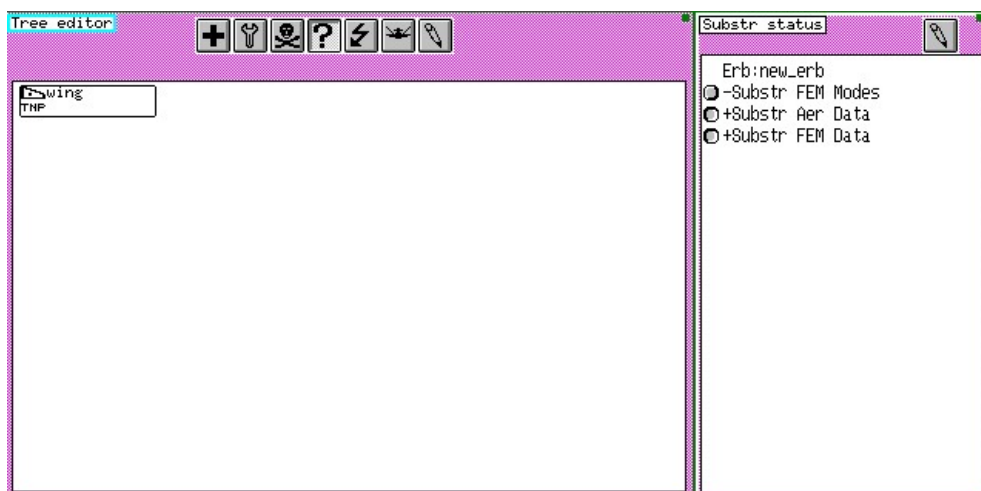



Рисунок 7. Окно «*Tree editor*» с подконструкцией «*wing*»

Нажмите прямоугольник «wing» с курсором . Загрузятся окна редактора TNP (Рисунок 8).

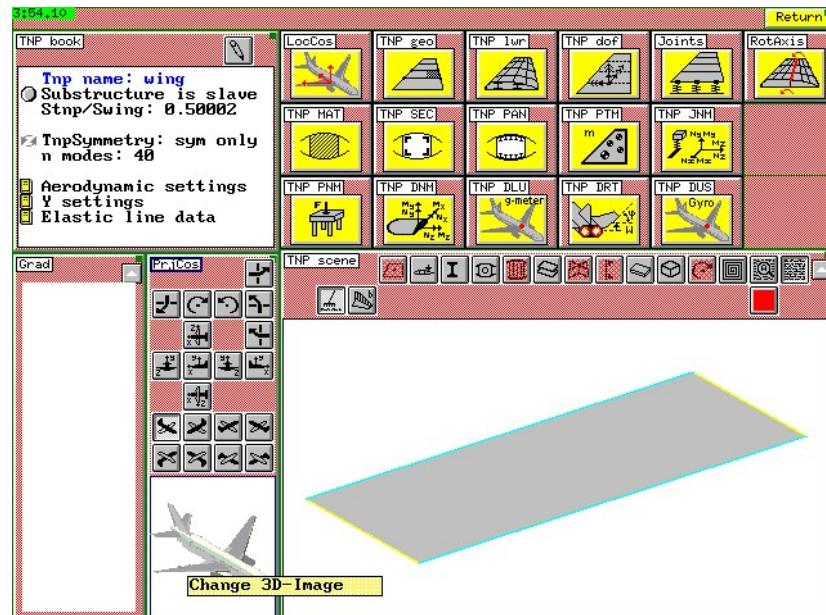




Рисунок 8. Окна редактора TNP

Нажмите окно «TNP geo»  с курсором . Загрузятся окна редактора геометрической модели TNP (Рисунок 9). Координаты базовых точек крыла можно видеть в окнах «Z of zones» и «Zone data». Число аэродинамических панелей 10×10 (аэродинамическая сетка задана в строках «n strips» и «n panels»).

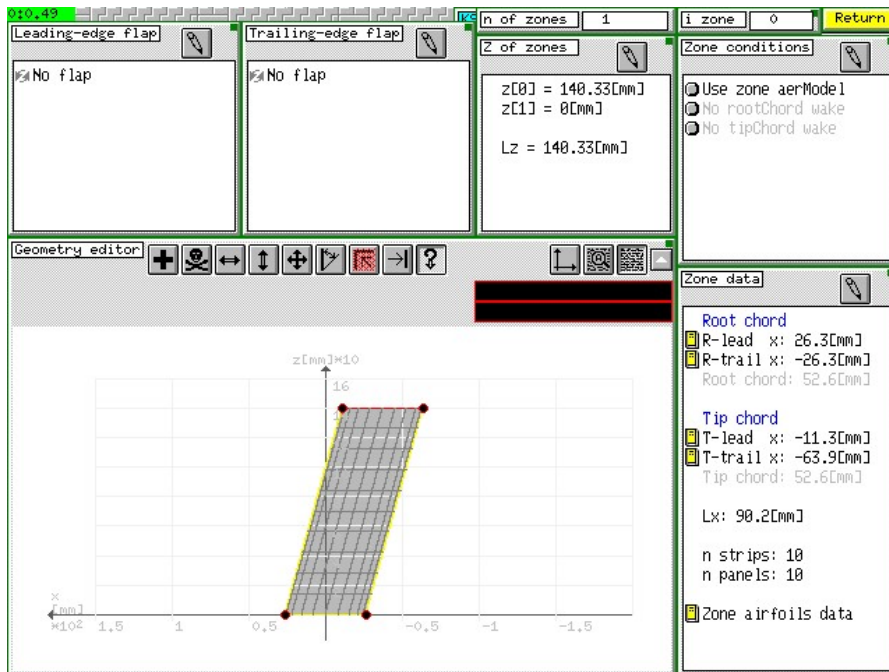



Рисунок 9. Геометрия крыла и аэродинамическая сетка

Для информации о профиле крыла необходимо выполнить ряд последовательных действий. В окне «Zone data» селектируйте строку «Zone airfoils data» с курсором  для вызова окна «Zone airfoils data» (Рисунок 10).

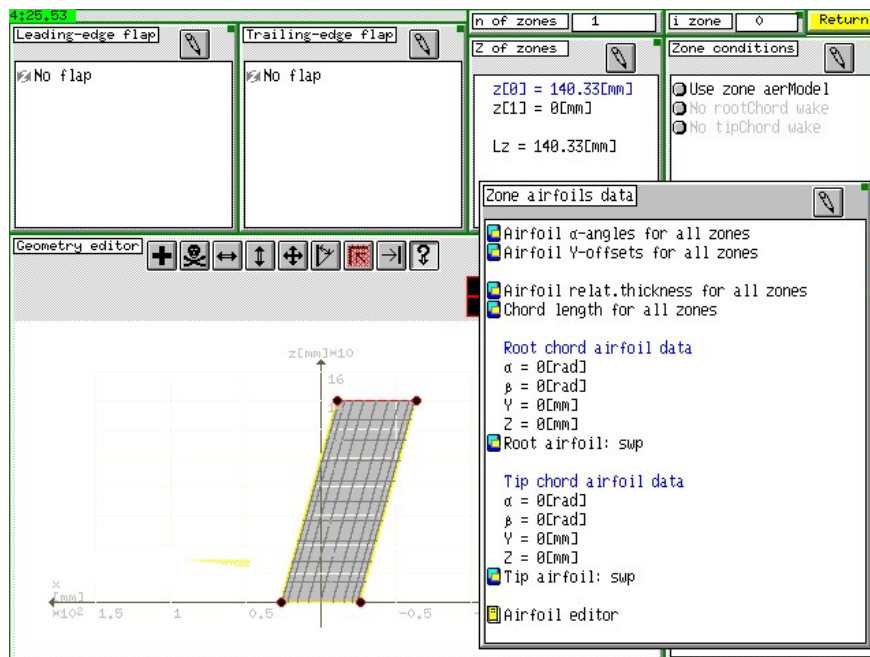



Рисунок 10. Открыто активное окно «Zone airfoils data»

В активном окне «Zone airfoils data» селектируйте строку «Airfoil editor» с курсором  для вызова окна «Airfoil editor» (Рисунок 11).

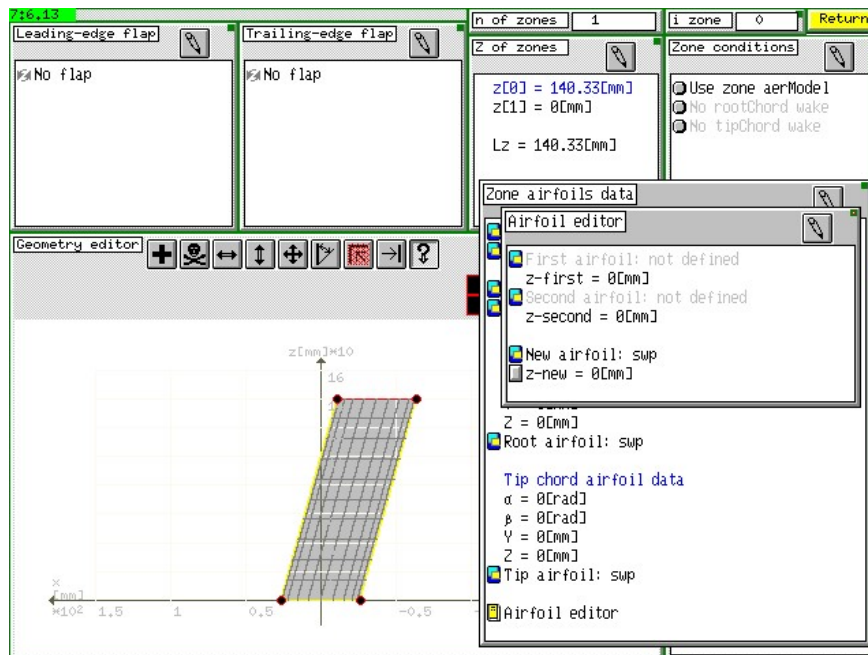



Рисунок 11. Активное окно «Airfoil editor»

В окне «Airfoil editor» в строке «New airfoil» должно быть указано имя профиля крыла: *swp*. Селектируйте строку «New airfoil: *swp*» с курсором  для вызова окна библиотеки аэродинамических профилей (Рисунок 12).

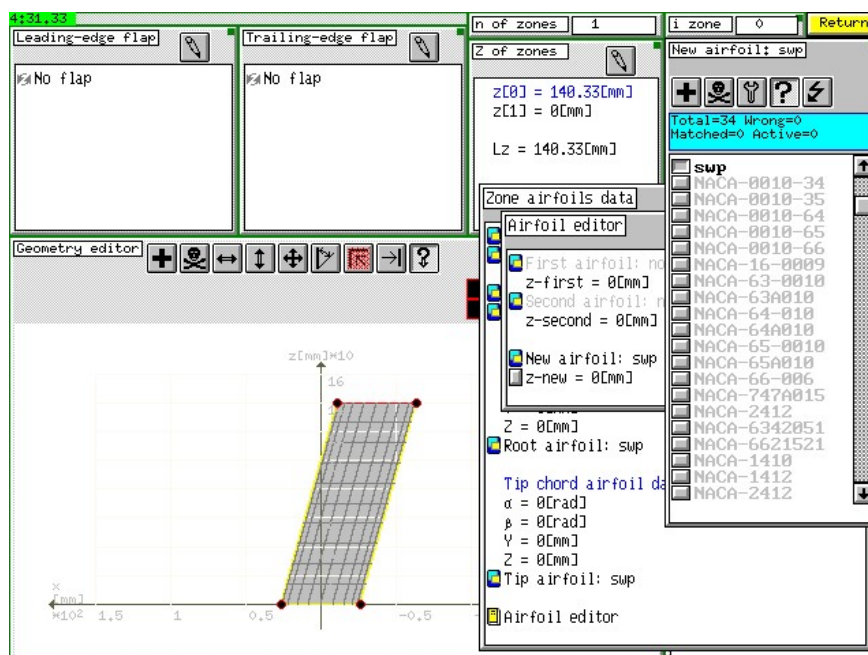




Рисунок 12. Активное окно библиотеки аэродинамических профилей

В окне библиотеки аэродинамических профилей нажмите графическую кнопку  (возможность редактировать профиль) и в списке имен профилей нажмите на селектор строки с именем профиля «*swp*» с курсором . Загрузятся

окна редактора аэродинамических профилей, который позволяет задавать и редактировать форму аэродинамического профиля в сечении крыла (Рисунок 13).

Для выхода из редактора аэродинамических профилей нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

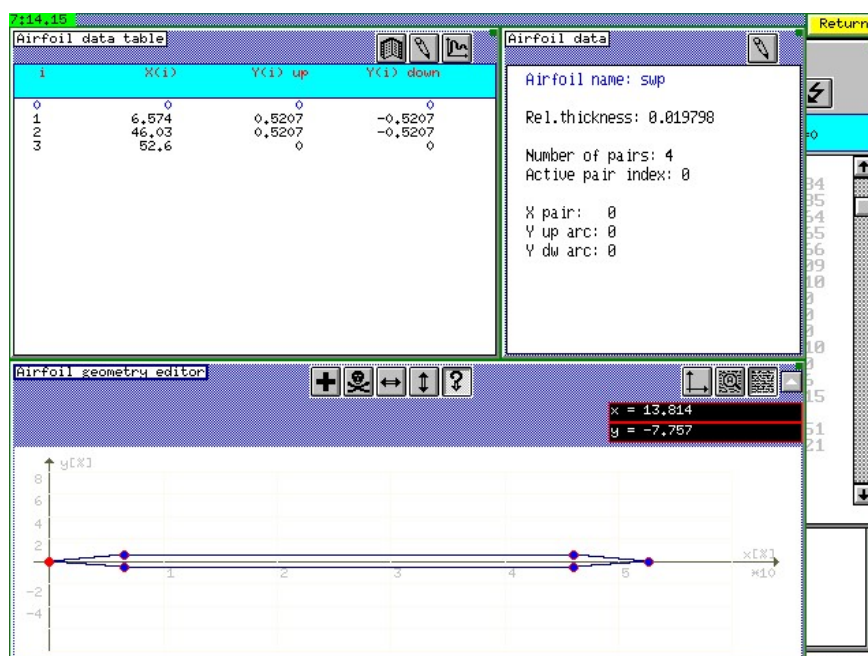







Рисунок 13. Профиль крыла

Для возвращения в редактор TNP надо проделать обратный путь, последовательно закрывая редакторы и активные окна, нажимая на клавиши «Return» или на верхнюю зону активных окон с курсором .

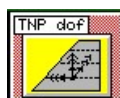
- для выхода из библиотеки аэродинамических профилей нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .
- для выхода из активного окна «Airfoil editor» нажмите верхнюю серую зону окна с курсором .
- для выхода из активного окна «Zone airfols data» нажмите верхнюю серую зону окна с курсором .
- для выхода из редактора «TNP geo» нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

5.3. СТЕПЕНИ СВОБОДЫ, УЗЛЫ НАВЕСКИ, МАССЫ, ДАТЧИКИ

Ниже перечислены обобщенные степени свободы хорд крыла (Таблица 5).
Корневая хорда предполагается жесткой.

Таблица 5. Обобщенные степени свободы хорд крыла

U	V	W	φ_x	R_x	R_z	Индекс хорды
1	10	2	9	0	0	0 ÷ 9
1	2	2	1	0	0	10 (корневая хорда)



Нажмите окно «TNP dof» с курсором. Загрузятся окна редактора степеней свободы TNP, который позволяет задать степени свободы для каждой хорды (Рисунок 14). В примере необходимы степени свободы заданы. Для выхода из редактора нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором.

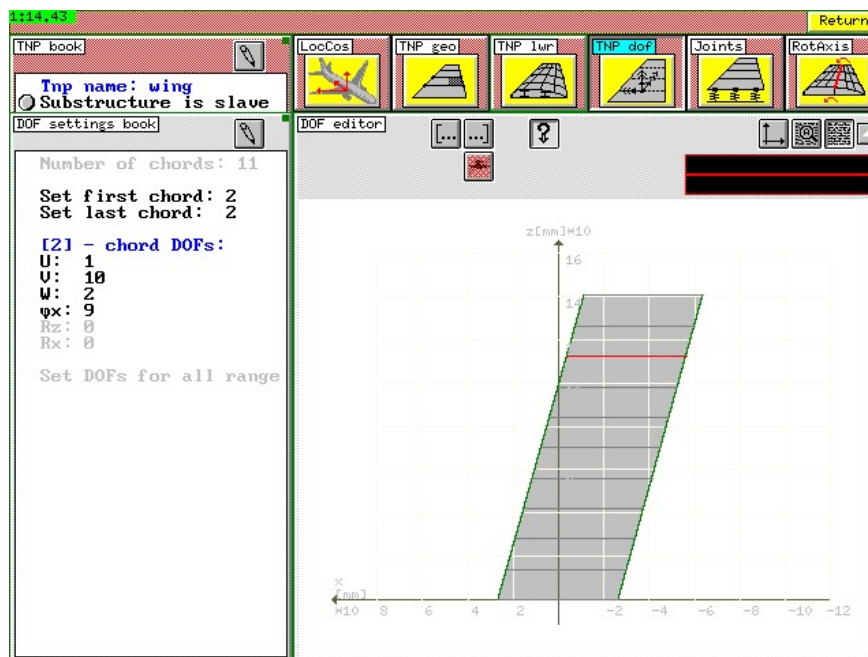




Рисунок 14. Окна редактора степеней свободы TNP



Нажмите окно «Joints» с курсором. Загрузятся окна редактора узлов навески TNP, который позволяет установить положение и задать жесткости узлов навески крыла (Рисунок 15). В примере заданы 4 узла навески, переключение

между узлами осуществляется нажатием  и последующим выбором узла (флажков с номерами 0 - 3). Для выхода из редактора нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

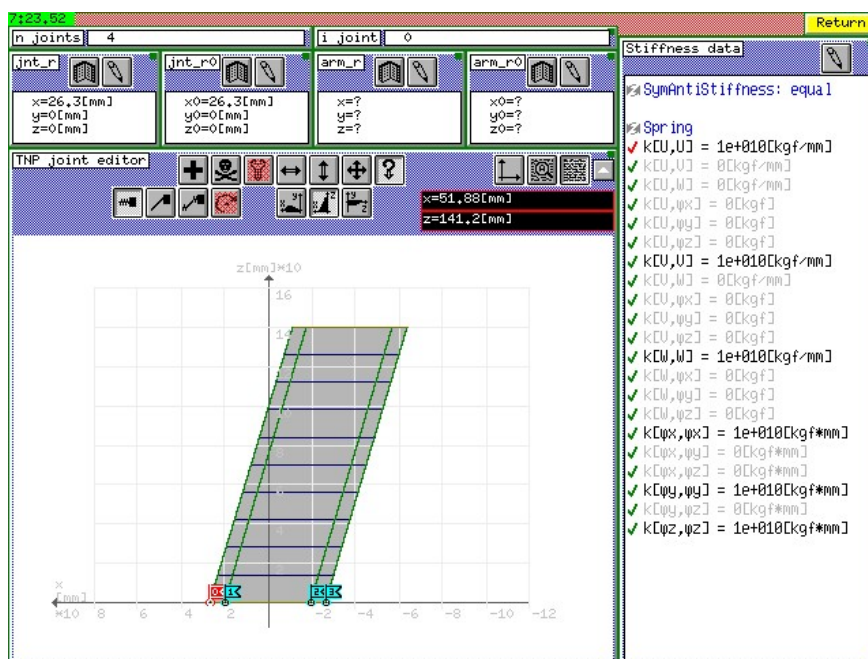
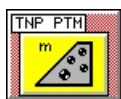
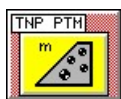




Рисунок 15. Окна редактора узлов навески TNP

Массово-инерционные характеристики крепления крыла заданы в виде двух сосредоточенных масс по $0.01 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{мм}$ на корневой хорде крыла на расстояниях $X = \pm 22 \text{ мм}$.



Нажмите окно «TNP PTM»  с курсором . Загрузятся окна редактора сосредоточенных масс и моментов инерции TNP, который позволяет установить положение и задать значение сосредоточенных массово-инерционных факторов (Рисунок 16).

В таблице и на схеме редактора показаны две заданные сосредоточенные массы. Для выхода из редактора нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

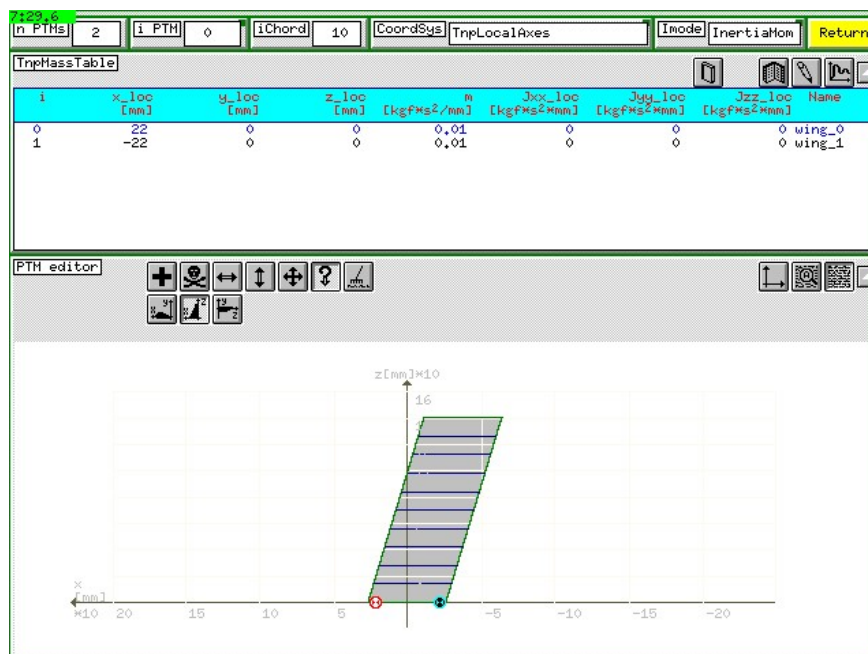





Рисунок 16. Окна редактора массово-инерционных характеристик TNP



Нажмите окно «TNP DRT» с курсором . Загрузятся окна редактора датчиков перемещений и углов поворота TNP, который позволяет расположить датчики для измерения смещений и углов поворота в выбранных точках конструкции (Рисунок 17). В примере заданы 8 датчиков упругих перемещений, переключение между узлами осуществляется нажатием  и последующим выбором узла (флажков с номерами 0 – 7). Для выхода из редактора нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

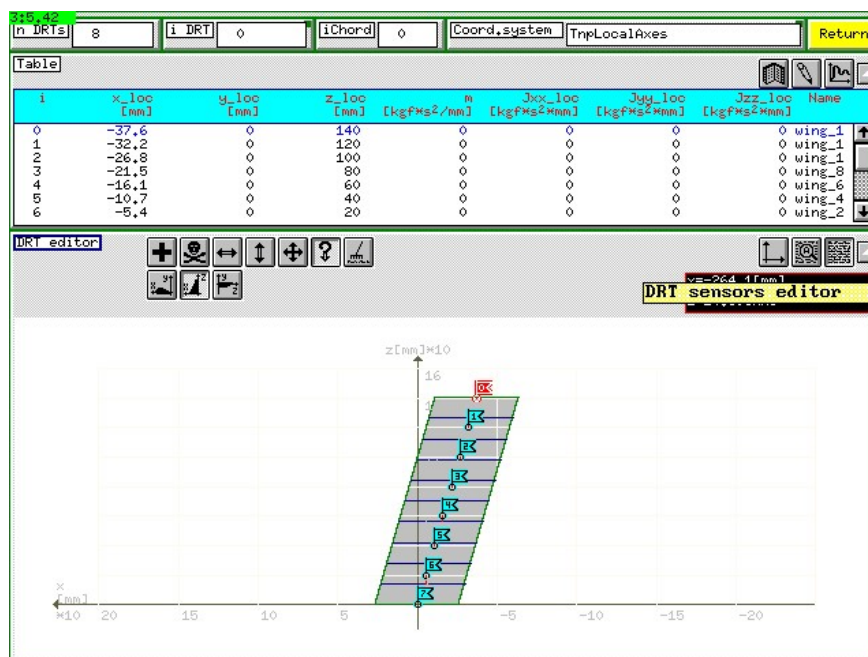






Рисунок 17. Окна редактора датчиков перемещений и углов поворота TNP

5.4. МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Для выполнения модального анализа вернемся в основную сцену задачи. Для выхода из редактора дерева подконструкций нажмите желтую клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

Задан расчет 40 тонов симметричных собственных колебаний конструкции, антисимметричных тонов нет. После модального анализа запускается расчет стационарной аэродинамики с числом Маха 0.45 (строки «Steady aer», «Mach = 0.45» в окне «Aer definitions»).

Для выполнения модального анализа и расчета стационарной аэродинамики нажмите в правом окне «Execute» основной сцены задачи KSB графические кнопки , «Aer flows», , «Modal Analysis» и  «Execute». Ниже показан вид основной сцены задачи KSB по окончании расчета (Рисунок 18).

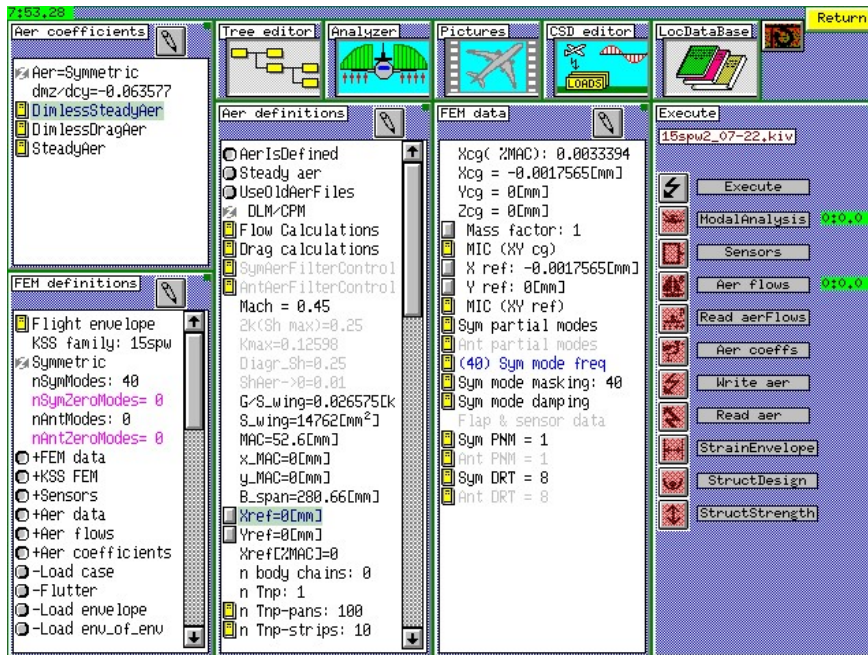



Рисунок 18. Вид основной сцены задачи KSB по окончании расчета частот и форм симметричных тонов собственных колебаний крыла

В окне «FEM data» нажмите селектор строки «(40) Sym mode freq» с курсором  для вызова окна с частотами симметричных тонов собственных колебаний конструкции (Рисунок 19).

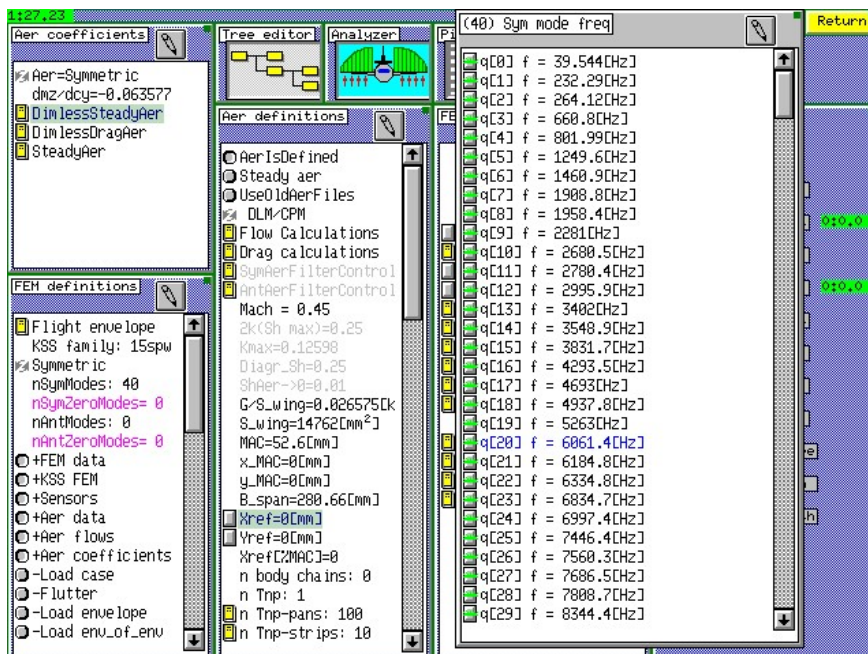




Рисунок 19. Частоты симметричных тонов собственных колебаний

Для визуализации 0-го тона собственных колебаний крыла поместите курсор мыши в активное окно «(40) Sym mode freq» и нажмите на текст первой строки

« $q[0] f = 39.544[Hz]$ » с курсором . На экране появится сцена с визуализацией 1-го тона собственных колебаний изгиба крыла с частотой 39.54 Гц (Рисунок 20).

Для остановки анимации нажмите [Shift] + левую кнопку мыши. Для возврата в активное окно «(40) *Sym mode freq*» нажмите клавишу «Return» в правом верхнем углу анимационной сцены.

Аналогично можно визуализировать любой тон собственных конструкции. Для выхода из активного окна «(40) *Sym mode freq*» нажмите желтую клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

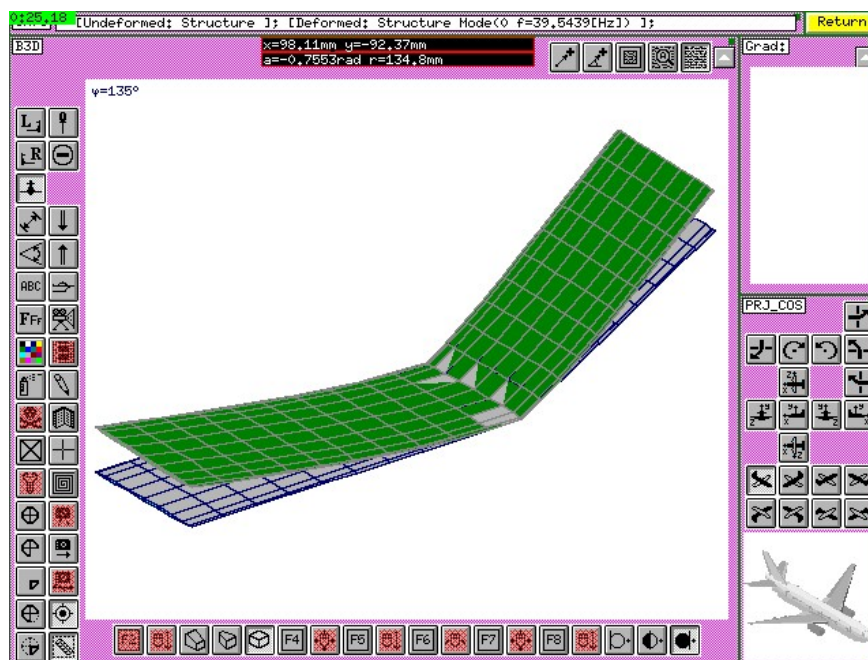








Рисунок 20. Анимация 1-го тона симметричных изгибных колебаний крыла

5.5. БАЛАНСИРОВКА

Результаты расчета аэродинамических коэффициентов находятся в окне «*Aer coefficients*» (вверху слева в основной сцене задачи *IMAD*). Поскольку величина $C_z^\beta = 0$, для балансировки крыла следует задать вручную $C_z^\beta = 1$. Для этого нажмите селектор  верхней строки окна «*Aer=Symmetric*» с курсором . В открывшемся активном окне с двумя возможностями «*Symmetric*» или «*Antisymmetric*» выберите строку «*Antisymmetric*» с курсором . Закройте активное окно, нажав на его верхнюю зону с курсором .

В окне «Aer= Antisymmetric» нажмите селектор строки «DimlessSteadyAer» с курсором  и в открывшемся активном окне установите $C_z^\beta = 1$ (Рисунок 21). Для выхода из активного окна «DimlessSteadyAer» нажмите верхнюю серую зону окна с курсором .

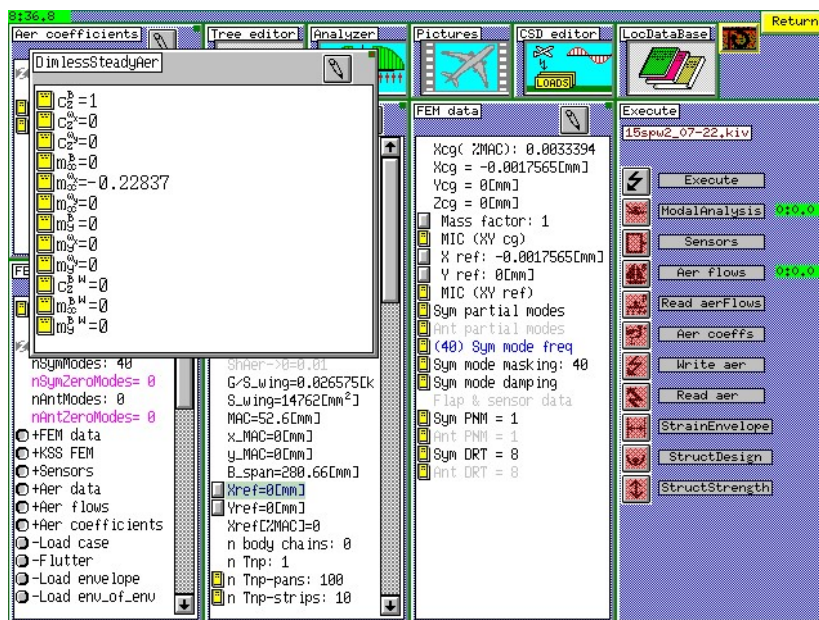



Рисунок 21. Редактирование аэродинамического коэффициента C_z^β



Нажмите окно «Analyzer» с курсором . Загрузятся окна редактора нагрузок, которые используются при исследовании стационарной аэроупругости конструкции (Рисунок 22).

Данные балансировки приведены в окне «Load par» (слева). Относительная величина ускорения свободного падения g_{rel} задана равной 0.037225, чтобы обеспечить угол атаки корневой хорды крыла $\alpha = .17454 \text{ rad} (10^\circ)$.

На поле центрального окна «Analyzer» схематически представлены результаты ζ -анализа для аэродинамических коэффициентов по числу Маха в виде разноцветных мини-диаграмм. Если вид окна «Analyzer» на экране отличается от приведенного на рисунке, нажмите селектор строки «HorFlight» в окне «Load lib» (справа внизу).

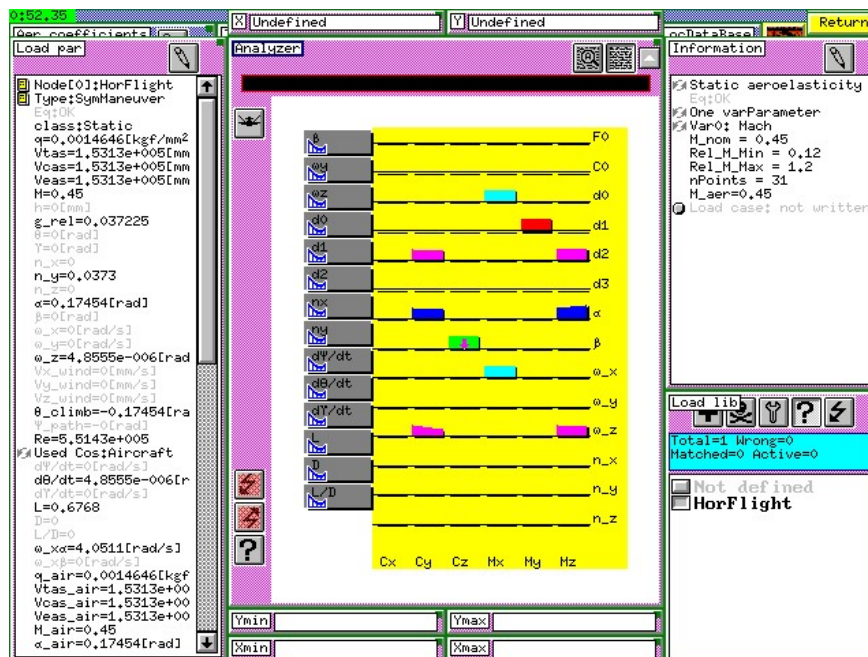





Рисунок 22. Окна редактора нагрузок с данными балансировки и ζ -анализа

5.6. АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ АЭРОУПРУГОСТИ

Условия ζ -анализа по числу Маха заданы в окне «*Information*» редактора нагрузок (вверху справа): относительные пределы варьирования числа Маха от «*Rel_M_Min*» = 0.12 до «*Rel_M_Max*» = 1.2 с числом точек «*nPoints*» = 31.

Чтобы получить диаграмму влияния упругости конструкции на аэродинамический коэффициент C_y^α как функцию числа Маха надо в центральном окне «*Analyzer*» навести курсор мыши на синий квадратик (мысленное пересечение C_y внизу и α справа) и нажать левую кнопку мыши с курсором . Результаты ζ -анализа для C_y^α представлены графически в окне «*C_y^\alpha - Diagram*» (Рисунок 23). Если теперь нажать на первую диаграмму вверху слева (т. е. выделить диаграмму) и на графическую кнопку , получим графическую зависимость, представленную ниже (Рисунок 24). Для возвращения в редактор нагрузок нажать на верхнюю зону окна «*C_y^\alpha - Diagram*» с курсором .

Аналогичные действия позволят получить диаграмму влияния упругости конструкции на аэродинамический коэффициент m_z^α как функцию числа Маха (пересечение M_z внизу и α справа, Рисунок 25) и т. д.

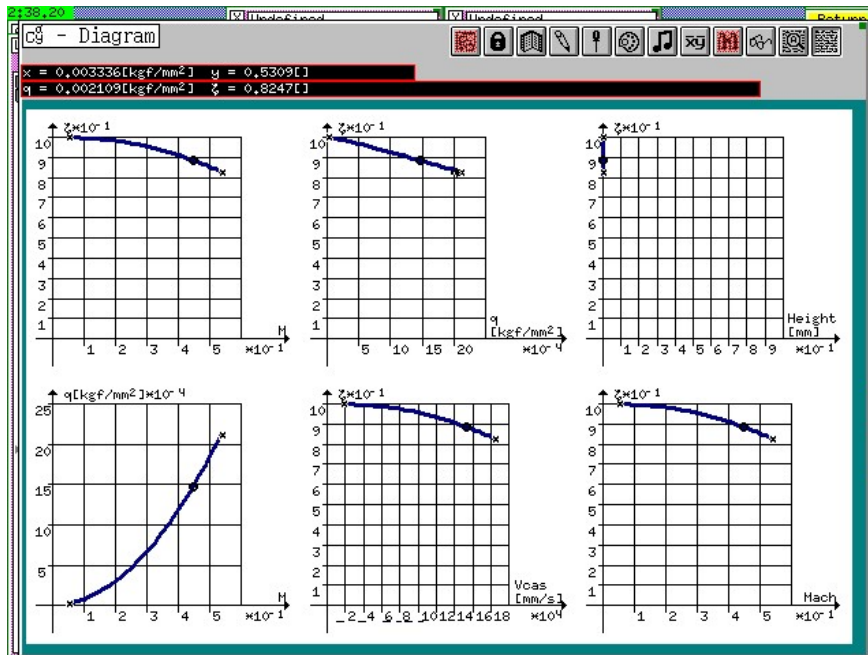


Рисунок 23. Результаты ζ -анализа для C_y^α

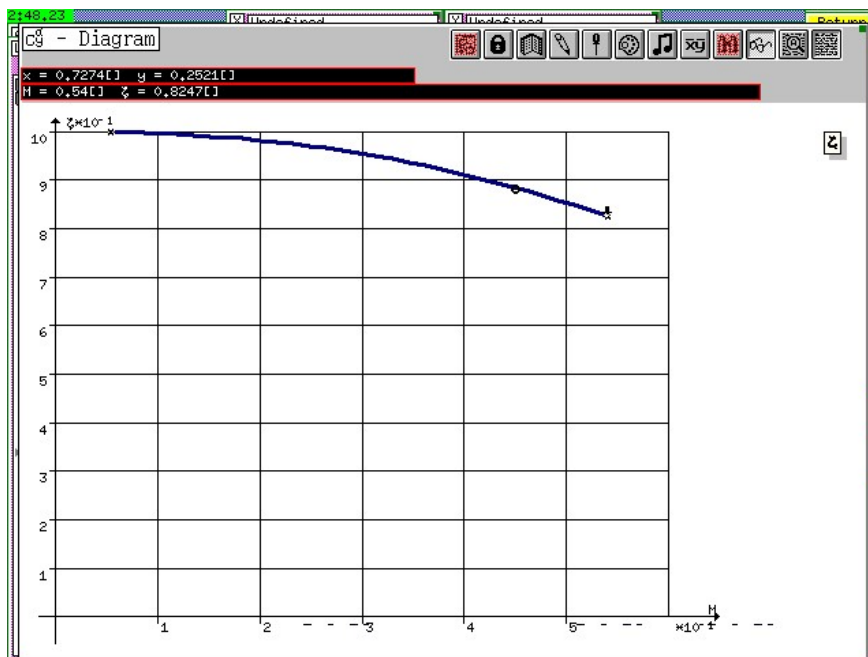


Рисунок 24. Влияние упругости конструкции на C_y^α как функция числа Маха

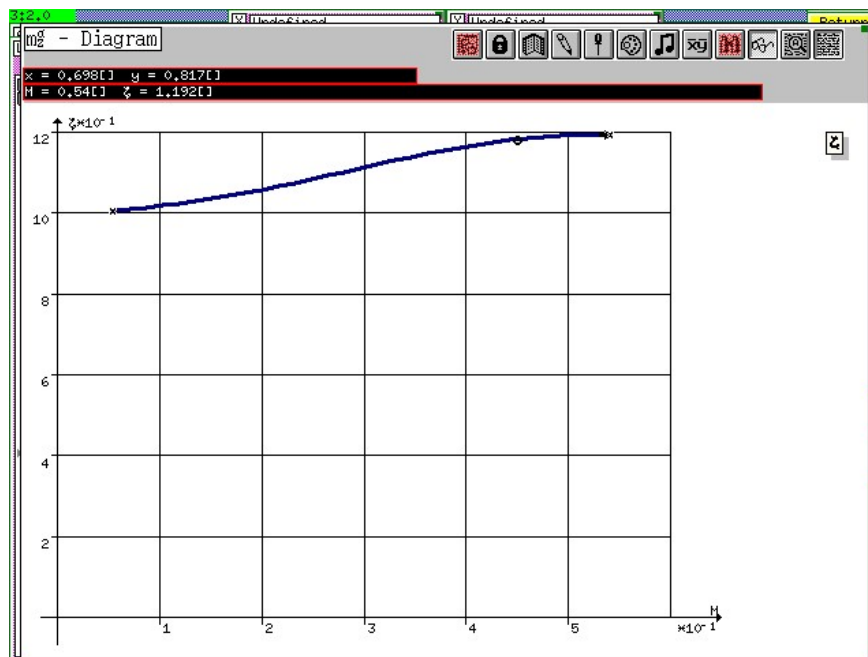





Рисунок 25. Влияние упругости конструкции на m_z^α как функция числа Маха

Чтобы получить показания датчиков *DRT*, измеряющих перемещения и углы поворота средней линии крыла, нужно последовательно вызвать ряд окон IMAD:

в окне редактора нагрузок «*Load par*» (слева) нажать на селектор первой строки «*Node[0]:HorFlight*» с курсором  (Рисунок 26);

в появившемся активном окне «*Node[0]:*» нажать на селектор строки «*Contral_Law*» с курсором  (Рисунок 27);

в появившемся активном окне «*Contral_Law*» нажать на селектор строки «*Right DRTs*» с курсором .

Показания датчиков *DRT* – упругие перемещения и углы поворота средней линии крыла - приведены на рисунке (Рисунок 28), вертикальные смещения средней линии крыла показаны на графике (Рисунок 29).

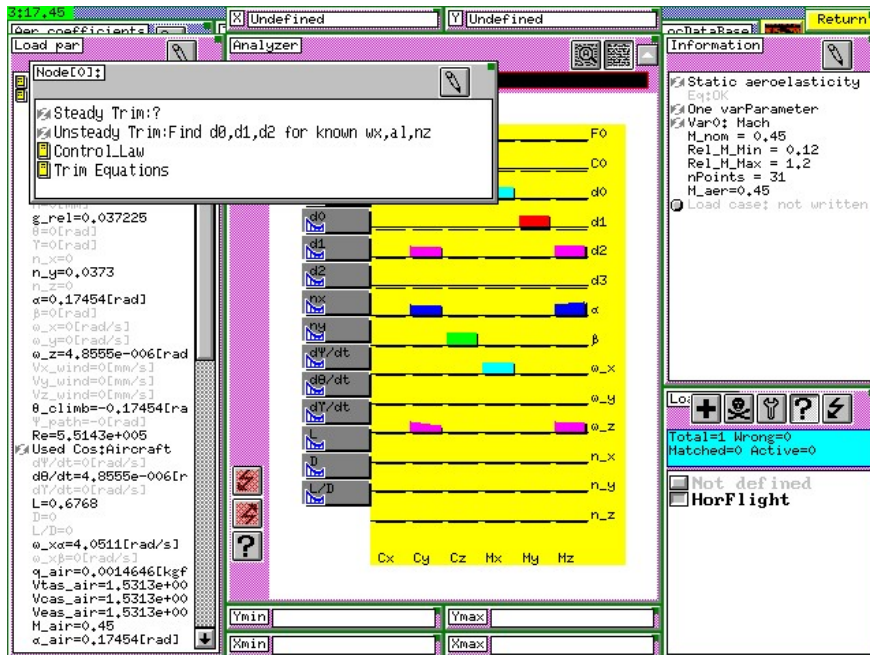


Рисунок 26. Активное окно «Node[0]:»

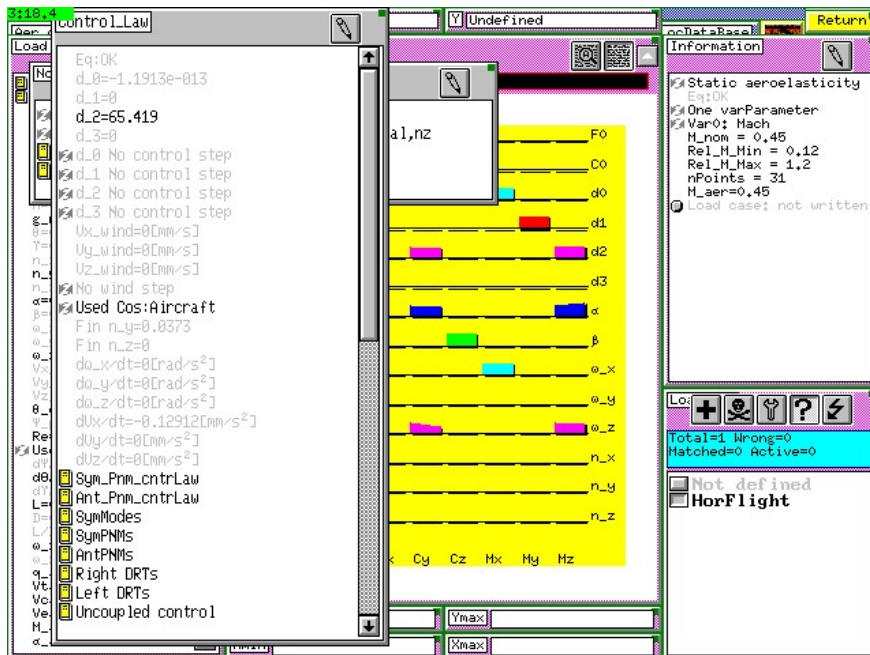


Рисунок 27. Активное окно «Control_Law»

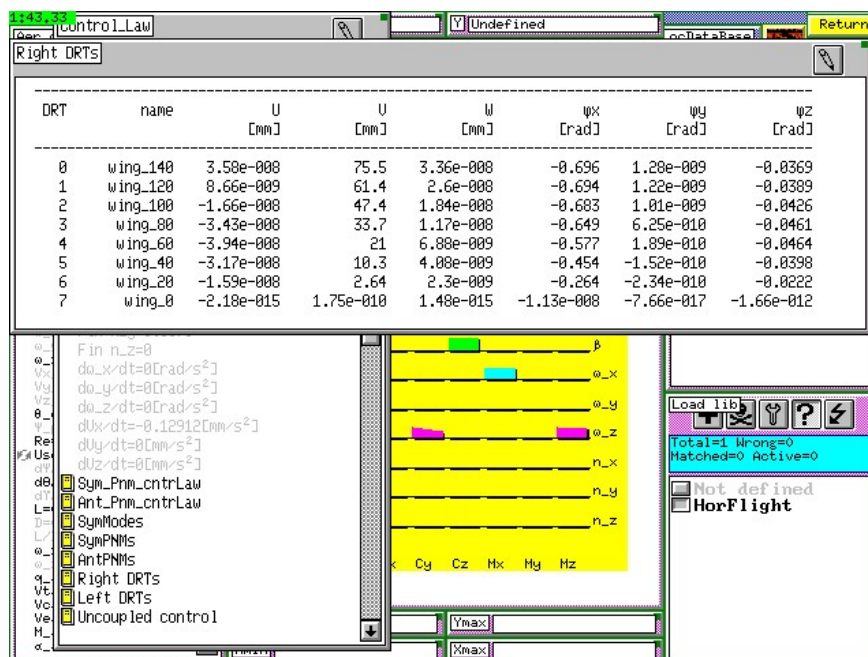


Рисунок 28. Показания датчиков DRT (перемещения и углы поворота средней линии крыла)

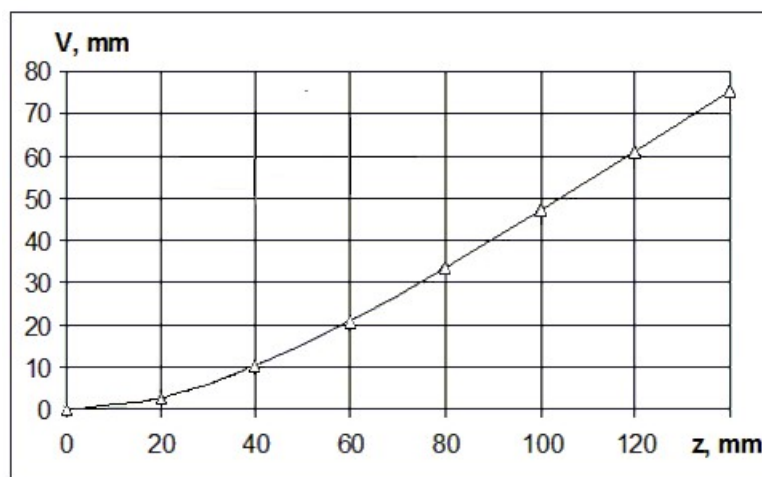




Рисунок 29. Вертикальные смещения V средней линии крыла

Для возврата из редактора нагрузок в основную сцену задачи KSB последовательно закрывайте все открытые окна, нажимая на верхнюю зону каждого открытого окна, а затем на клавишу «Return» редактора нагрузок с курсором .

5.7. ВЫХОД ИЗ ЗАДАЧИ

Для выхода из задачи IMAD нажмите на клавишу «Return» основной сцены с курсором .

На экране появятся служебные окна IMAD с несколькими возможностями выхода из задачи (Рисунок 30):

- возврат к выполнению вычислений в текущей задаче (клавиша «Cancel»);
- выход из задачи с сохранением локальной базы данных в текущем файле или в файле с другим названием с расширением «.kiv» или «.kss» (клавиша «Save»);
- выход без сохранения локальной базы данных (клавиша «Quit»).

Нажмите клавишу «Quit» для выхода из задачи без сохранения локальной базы данных IMAD и перехода к окну Диспетчера файлов.

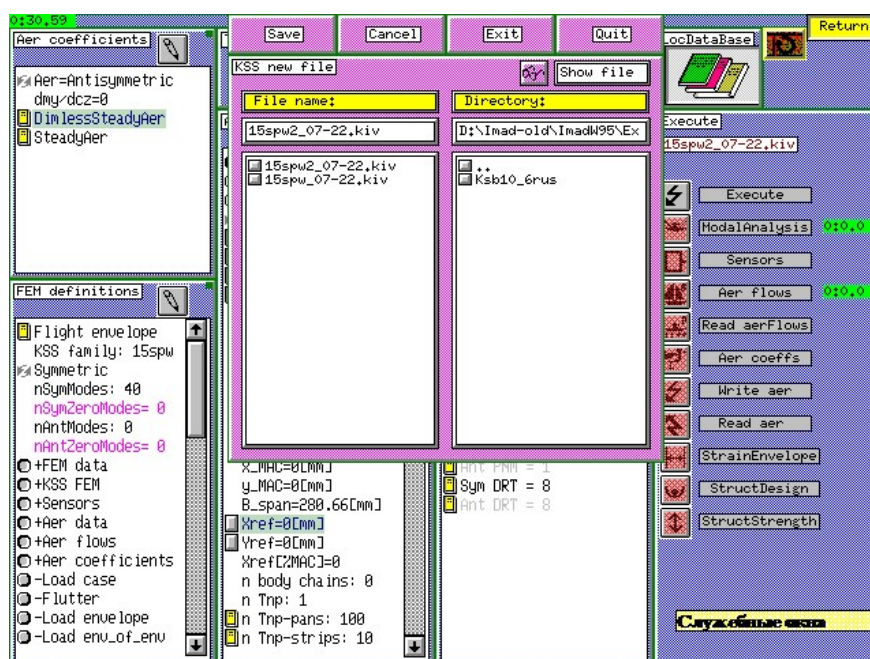




Рисунок 30. Выход из основной сцены задачи KSB

6. РАСЧЕТ ФЛАТТЕРА

6.1. ЗАГРУЗКА ФАЙЛА ЗАДАЧИ

Исходные данные задачи находятся в файле «15spw_07-22.kiv». В окне Диспетчера файлов в списке файлов нажмите на селектор строки с указанным именем с курсором , так, чтобы имя файла «15spw_07-22.kiv» появилось в окне «File name:». Для загрузки основной сцены задачи найдите на верхнем поле окна «KSS_or_KIV_File» курсор  и нажмите левую кнопку мыши.

Крыло в задаче «15spw_07-22.kiv» отличается от предыдущего примера только заданием степеней свободы корневой хорды (Таблица 6), а также отсутствием сосредоточенных масс.

Таблица 6. Степени свободы хорд крыла

U	V	W	ϕ_x	R_x	R_z	Индекс хорды
1	10	2	9	0	0	0 ÷ 9
1	7	2	6	0	0	10

6.2. МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Задан расчет 4 тонов симметричных собственных колебаний конструкции, антисимметричных тонов нет. Расчет производится с применением нестационарной аэродинамики с числом Маха 0.45 (строки «Unsteady aer», «Mach = 0.45» в окне «Aer definitions»). Задан интервал значений чисел Струхала Sh от 0 до 0.25 (строка « $2k(Sh\ max) = 0.25$ » в окне «Aer definitions»).

Для выполнения модального анализа и расчета нестационарной аэродинамики нажмите в правом окне «Execute» основной сцены задачи KSB графические кнопки «Aer flows», «ModalAnalysis» и «Execute». Ниже показан вид основной сцены задачи KSB по окончании расчета (Рисунок 31).

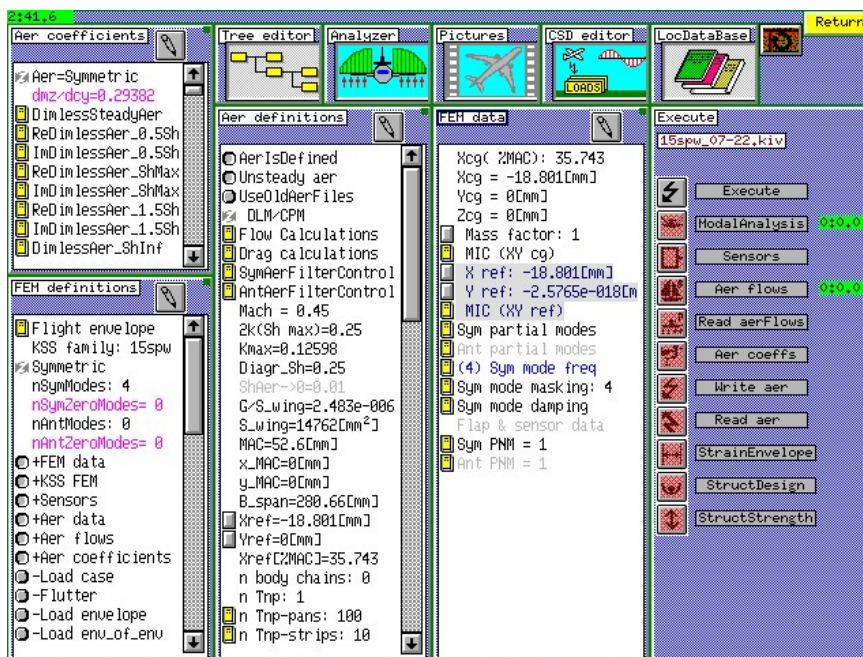



Рисунок 31. Вид основной сцены задачи KSB по окончании модального анализа и расчета нестационарной аэродинамики

В окне «Execute» нажмите селектор строки «(4) Sym mode freq» с курсором  для вызова окна с частотами симметричных тонов собственных колебаний конструкции (Рисунок 32).

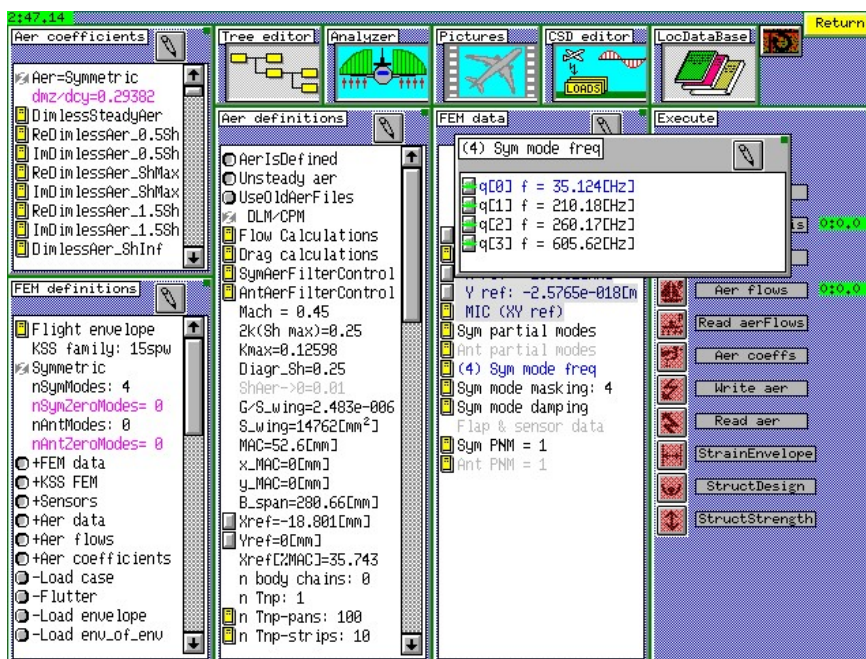




Рисунок 32. Активное окно с частотами симметричных тонов собственных колебаний

Для визуализации 0-го тона собственных колебаний поместите курсор мыши в активное окно «(4) Sym mode freq» и нажмите на текст первой строки «q[0] f = 35.124[Hz]» с курсором . На экране появится сцена с визуализацией 1-го тона собственных колебаний изгиба крыла с частотой 35.12 Гц (Рисунок 33).

Для остановки анимации нажмите [Shift] + левую кнопку мыши. Для возврата в активное окно «(4) Sym mode freq» нажмите клавишу «Return» в верхнем правом углу анимационной сцены.

Аналогично можно визуализировать 1-й тон собственных колебаний кручения крыла с частотой 210.18 Гц (Рисунок 34) и т. д. Для выхода из активного окна «(4) Sym mode freq» нажмите желтую клавишу «Return» в правом верхнем углу с курсором .

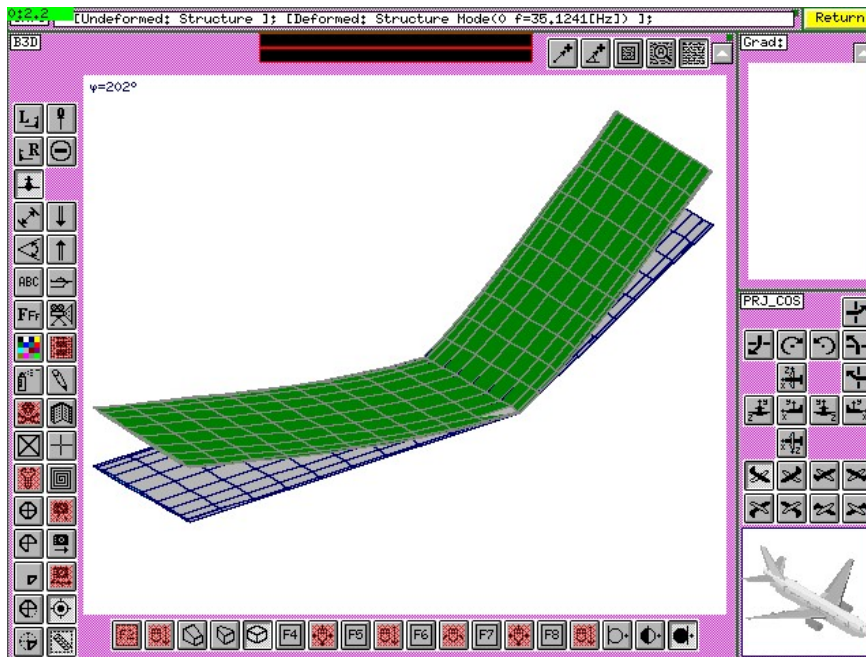


Рисунок 33. Анимация 1-го тона симметричных изгибных колебаний крыла

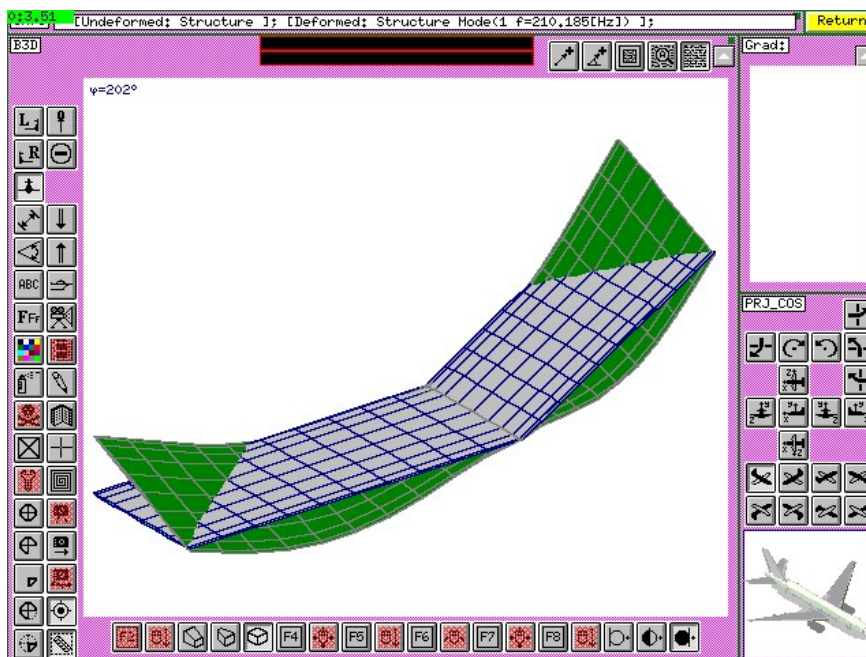








Рисунок 34. Анимация 1-го тона симметричных крутильных колебаний крыла

6.3. БАЛАНСИРОВКА

Результаты расчета аэродинамических коэффициентов находятся в окне «*Aer coefficients*» (вверху слева в основной сцене задачи *Imad*). Для балансировки конструкции следует вручную задать величину аэродинамического коэффициента

$C_z^\beta = 1$. Для этого нажмите на селектор  верхней строки окна «*Aer=Symmetric*» с курсором . В открывшемся активном окне с двумя возможностями «*Symmetric*» или «*Antisymmetric*» выберите строку «*Antisymmetric*» с курсором . Для закрытия активного окна нажмите на его верхнюю серую зону с курсором .

В окне «*Aer= Antisymmetric*» нажмите селектор строки «*DimlessSteadyAer*» с курсором  и в открывшемся активном окне установите $C_z^\beta = 1$ (Рисунок 35). Для выхода из активного окна «*DimlessSteadyAer*» нажмите верхнюю серую зону окна с курсором .

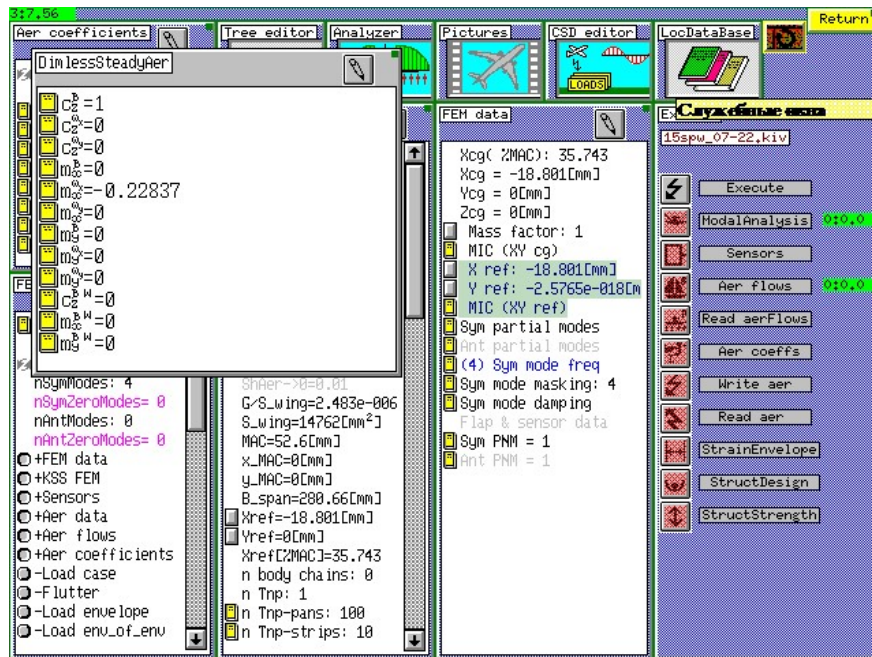




Рисунок 35. Редактирование аэродинамического коэффициента C_z^β

6.4. РАСЧЕТ ФЛАТТЕРА

В основной сцене задачи *KSB* нажмите окно «*Analyzer*»  с курсором . Загрузятся окна редактора нагрузок, которые используются при исследованиях флаттера (Рисунок 36).

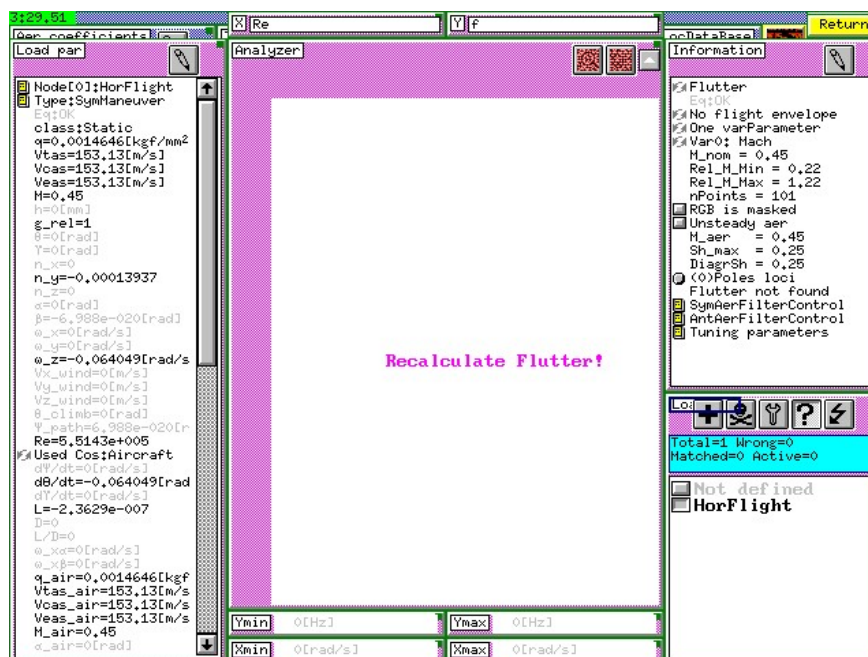



Рисунок 36. Окна редактора нагрузок при анализе динамической устойчивости конструкции

Условия расчета приведены в окне «*Information*» (вверху справа). Анализ динамической устойчивости конструкции выполнен с применением нестационарной аэродинамики без учета твердотельных движений (строки «*Unsteady aer*» и «*RGB is masked*»).

Расчет выполняется на постоянной нулевой высоте (строка « $h = 0$ [mm]» в окне «*Load par*» с условиями балансировки). Режим вычислений «на постоянной высоте» означает, что рассматриваемому объекту в горизонтальном полете необходимо двигаться с увеличивающейся скоростью для увеличения скоростного напора. Условия варьирования по числу Маха: от «*Rel_M_Min*» = 0.22 до «*Rel_M_Max*» = 1.22 с числом точек «*nPoints*» = 101.

Нажмите на центральное окно «*Analyzer*» с курсором , на поле окна появятся изображения корневых годографов тонов в плоскости $Re - Im$. Чтобы детально рассмотреть результаты расчета надо отредактировать минимальное значение оси аргументов Re (действительная ось комплексных полюсов корневых годографов) и максимальное значение вертикальной оси f (частоты тонов). Для этого найдите текстовый курсор в поле окна «*Xmin*» (в окне «*Analyzer*», внизу слева) и с помощью клавиатуры поменяйте значение в окне на «-150[rad/c]». Аналогично поменяйте значение в окне «*Ymax*» на «300[Hz]». Окно «*Analyzer*» примет вид, пока-

занный ниже (Рисунок 22). Цифровой ввод с клавиатуры осуществляется с помощью верхнего ряда цифр без задействования цифрового блока.

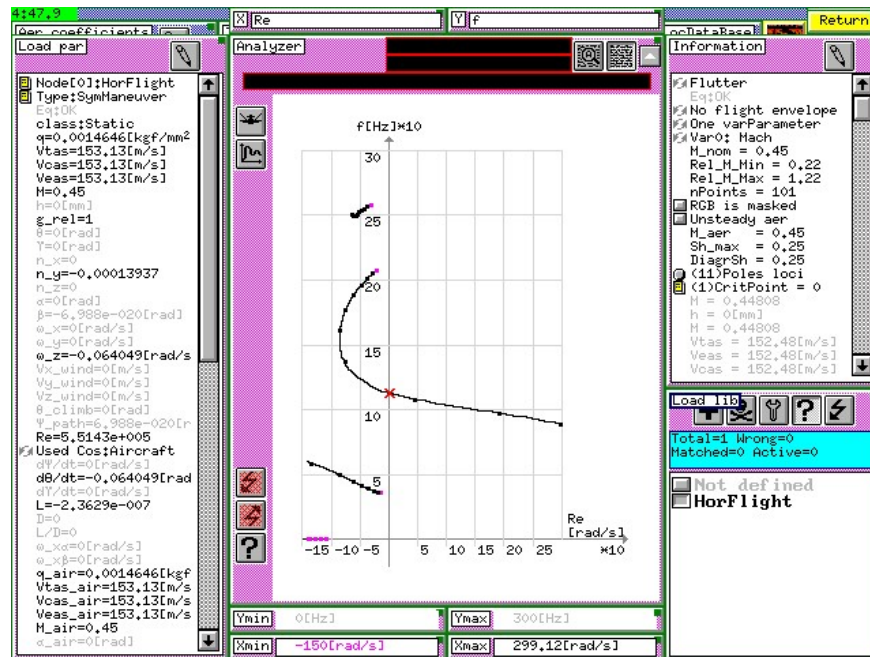


Рисунок 37. Корневые годографы тонов собственных колебаний

В случае, когда корневой годограф покидает левую полуплоскость $Re - Im$, динамическая система становится неустойчивой. Пересечение годографом вертикальной оси соответствует явлению флаттера. Если навести курсор мыши на красный крест в точке пересечения годографом вертикальной оси на поле окна «Analyzer», появится комментарий с характеристиками критической точки флаттера: критическая скорость 152.48 км/ч, критическая частота 112.78 Гц (Рисунок 38).

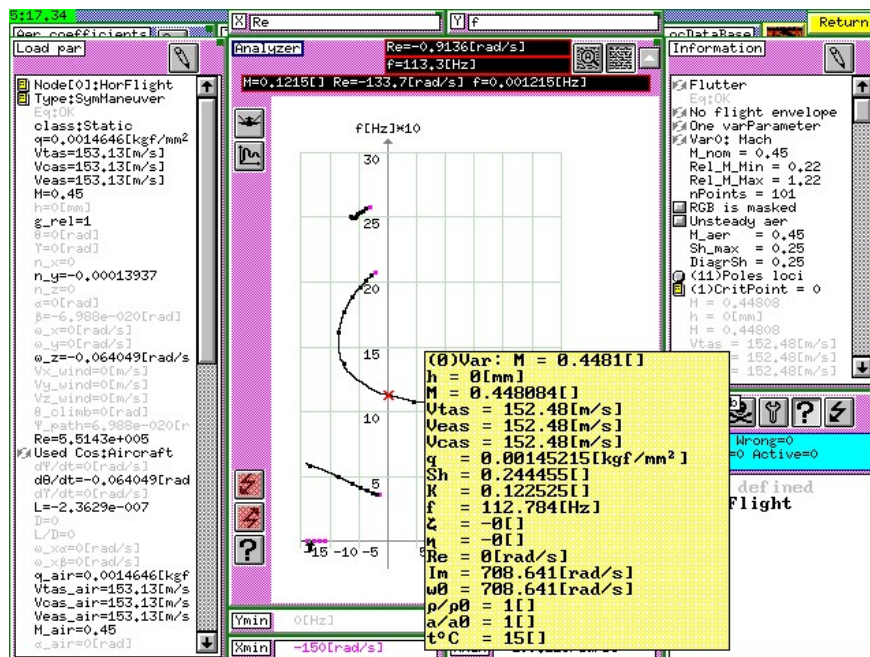


Рисунок 38. Характеристики флаттера

Если повторно нажать на красный крест, появится сцена с анимацией колебаний конструкции при флаттере (Рисунок 39). Для остановки анимации нажмите [Shift] + левую кнопку мыши. Для возврата в редактор нагрузок нажмите клавишу «Return» в верхнем правом углу анимационной сцены.

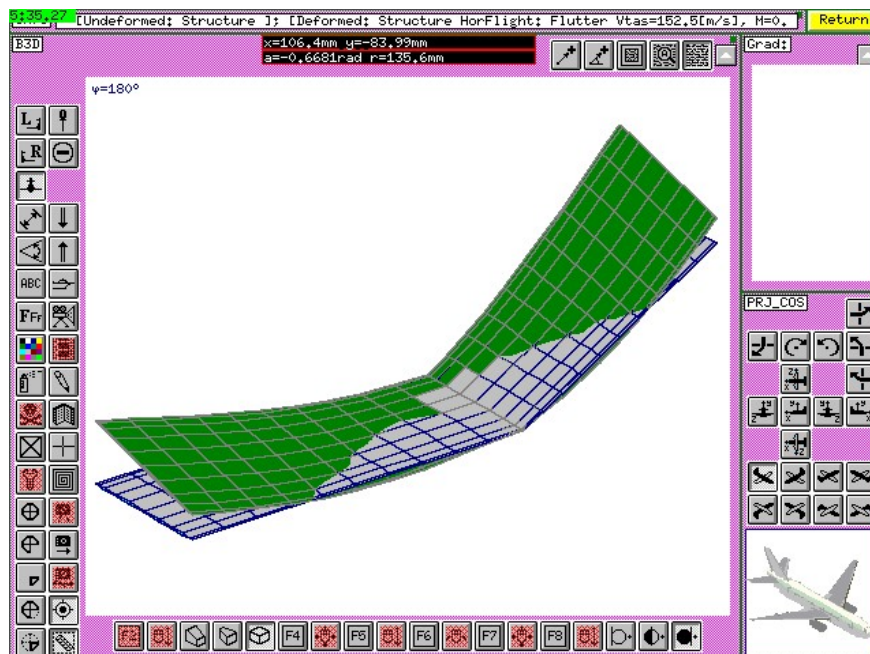



Рисунок 39. Анимация колебаний конструкции при флаттере

Воспользуйтесь вертикальным лифтом в окне «Information» и нажмите селектор строки «State vector diagram». На экране появится диаграмма вектора состо-

яния системы, которая отражает вклад собственных тонов конструкции и наглядно демонстрирует природу выявленного изгибно-крутильного флаттера крыла. Для выхода из активного окна «*State vector diagram*» нажмите верхнюю серую зону окна с курсором .

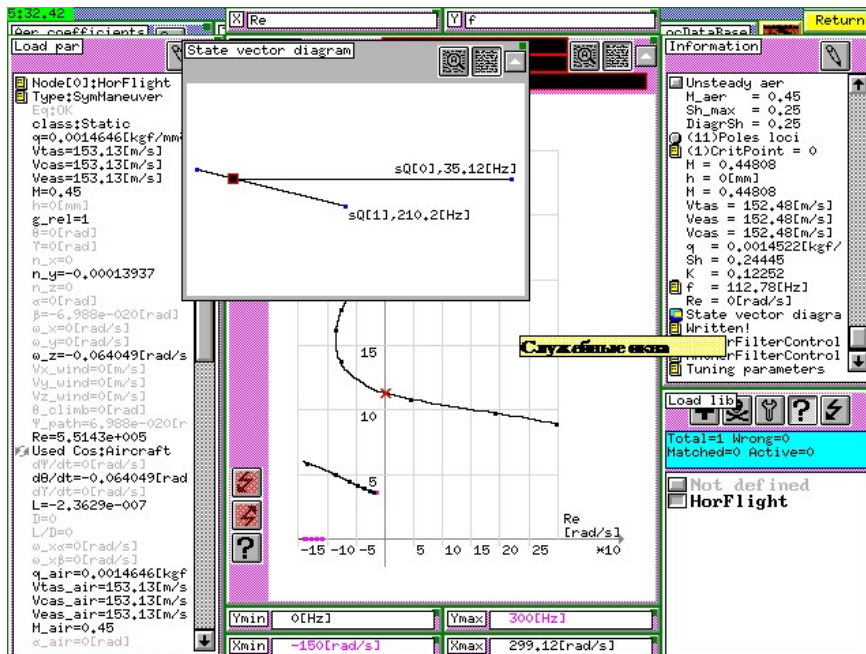


Рисунок 40. Диаграмма вектора состояния системы

На этом ознакомления с возможностями IMAD закончено. Для завершения работы в IMAD нажмите клавишу [F3] и подтвердите действие нажатием клавиши «y».