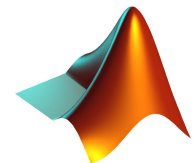




FlightSim

Программный комплекс
для моделирования и
анализа динамики ЛА
в MATLAB/Simulink



MATLAB R2009a

Введение

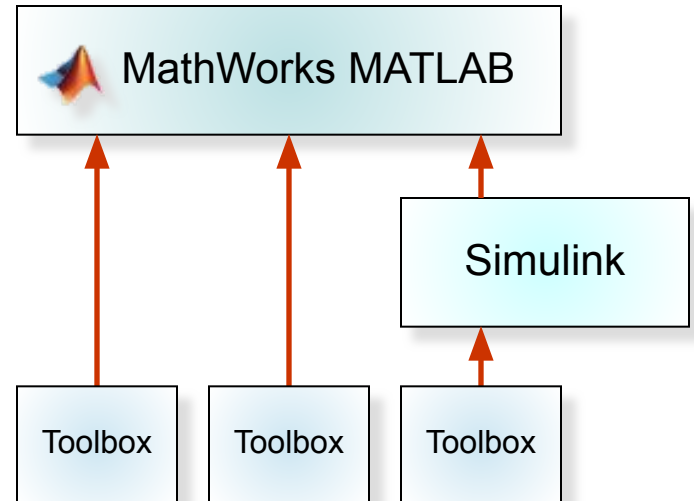
Что такое **MATLAB**, **Simulink**,
пакеты расширения (toolbox),
FlightSim



Что такое MATLAB?

Система компьютерной математики
MATrix **LAB**oratory
(работа с данными в виде матриц):

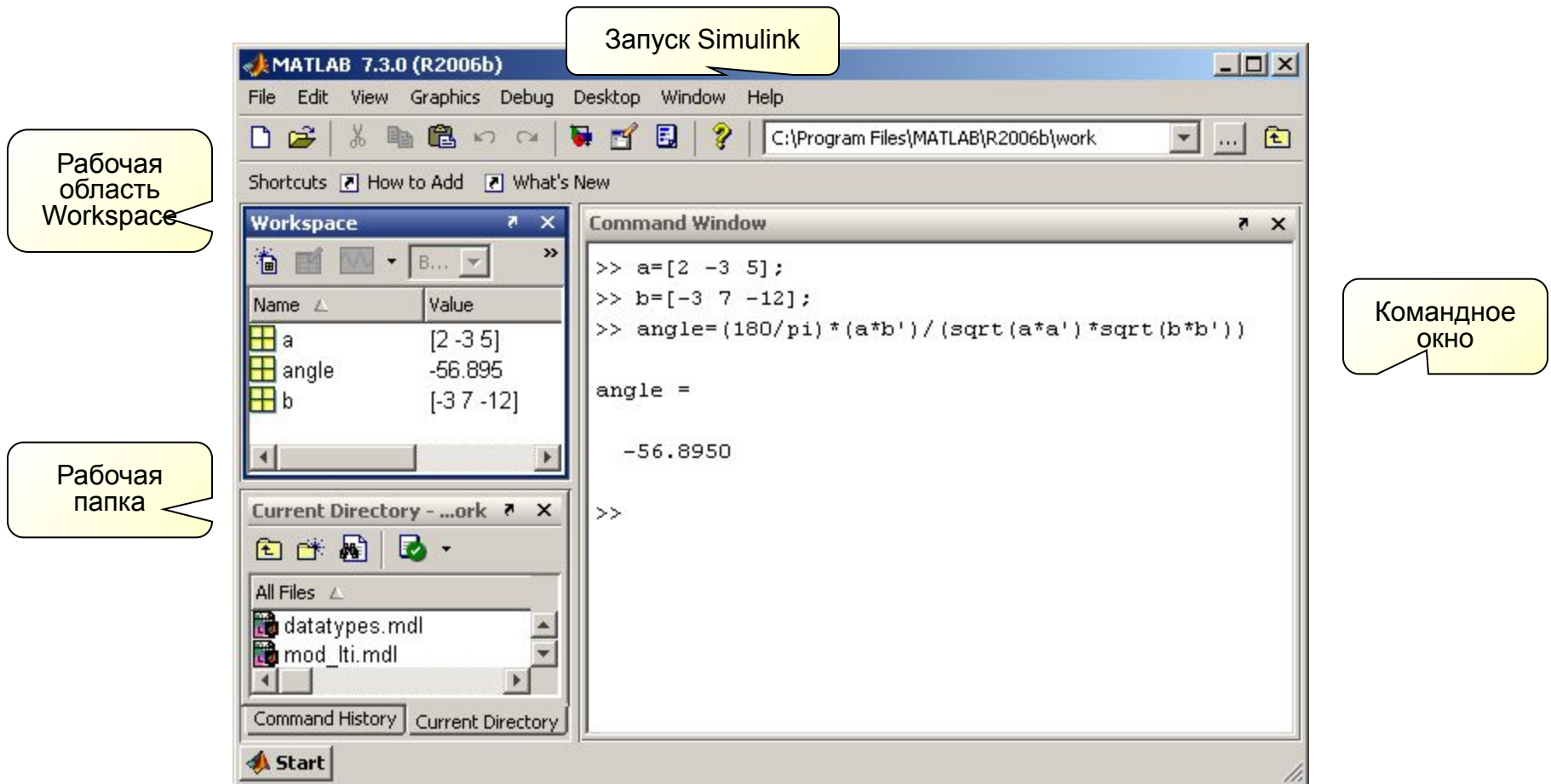
- ✓ высокоуровневая оболочка для технических расчетов (суперкалькулятор)
- ✓ высокоуровневый язык программирования, основанный на операциях с матрицами
- ✓ обширная библиотека математических функций
- ✓ визуализация расчетов, 2-D и 3-D графика
- ✓ средства для визуального программирования, имитационного моделирования и анализа динамических систем (Simulink)
- ✓ множество пакетов расширения для решения узких задач (MATLAB Toolbox)



Особенности:

- ✓ открытость системы, взаимосвязь различных пакетов
- ✓ возможность подключения программ пользователя, легкость обмена программами

Рабочая среда системы MATLAB

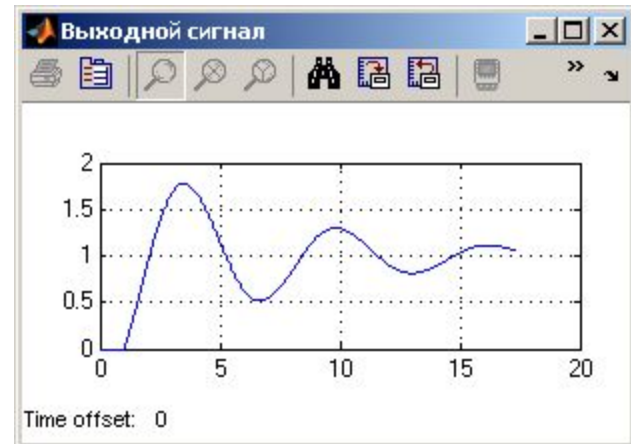
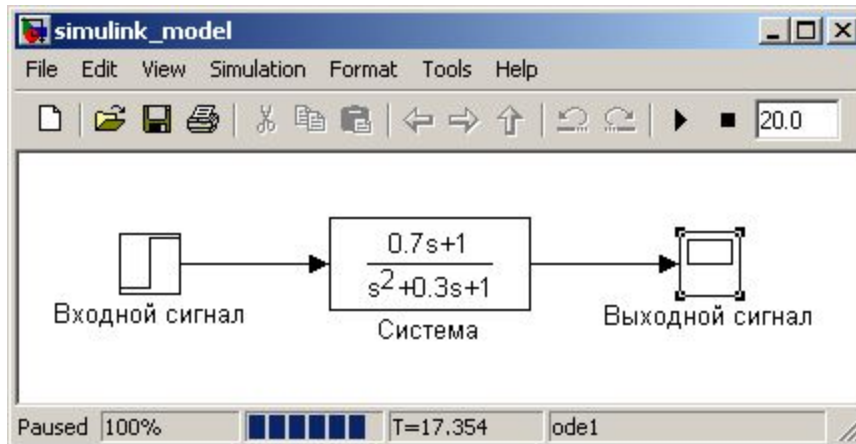


Результаты вычислений в Командном окне содержатся в Рабочей области (Workspace). Набор вычислений в Командном окне можно объединить в файл программы на языке MATLAB. Синтаксис языка ничем не отличается от синтаксиса команд в Командном окне!

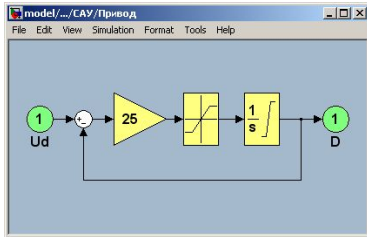
Что такое Simulink?

Среда для сборки в графическом виде (визуального, или блочного, программирования), моделирования и анализа динамических систем:

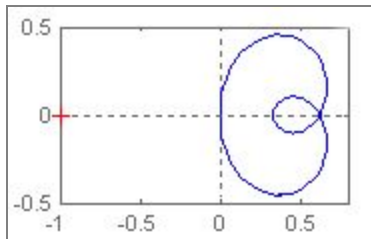
- ✓ обширная библиотека стандартных элементов (блоков) для сборки моделей
- ✓ возможность создания собственных стандартных элементов с диалогами настройки
- ✓ возможность использования блоков, написанных на языках MATLAB, C++, Fortran, ADA (S-функции для Simulink)
- ✓ легкость обмена блоками и моделями между пользователями



Некоторые пакеты расширения MATLAB



- ✓ Моделирование динамики ЛА в **Simulink**:
сборка, балансировка, линеаризация, исследование моделей,
стендовое моделирование



- ✓ Специальные пакеты расширения для создания моделей ЛА
Aerospace Toolbox, **Aerospace Blockset**



- ✓ Пакет для разработки систем управления
Control System Toolbox:
исследование, настройка динамических систем: устойчивость,
динамические и частотные характеристики (годографы, запасы
устойчивости, переходные процессы и т.д.)



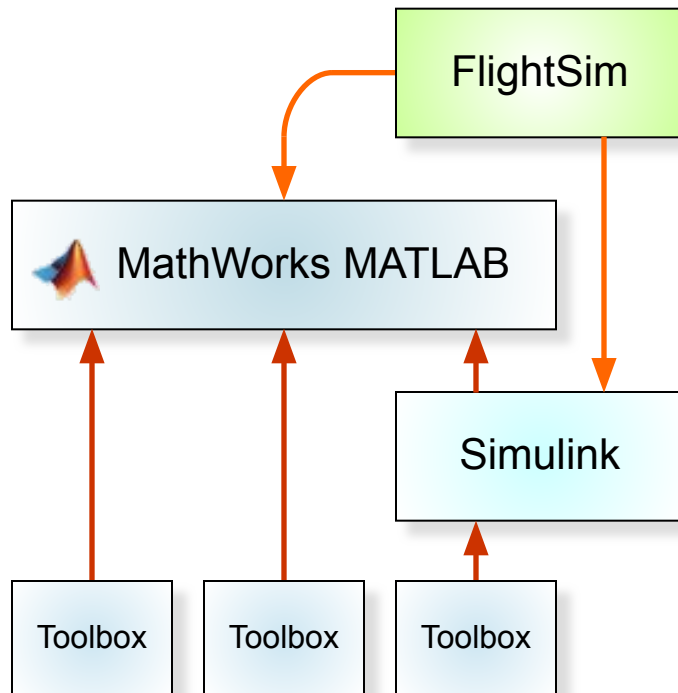
- ✓ Пакет трехмерной визуализации движения (для ПК)
Simulink 3D Animation

- ✓ Пакет для сетевого обмена и связи с аппаратурой
xPC Target (приборы, пилотажные стенды и тренажеры)

Что такое FlightSim?

FlightSim – особый набор программ и блоков Simulink для расширения возможностей MATLAB в области динамики полета ЛА и для ускорения и упрощения исследований и расчетов.

Программный комплекс позволяет проводить полный цикл исследований по динамике и системам управления самолетов (от расчетных исследований характеристик устойчивости и управляемости до моделирования на пилотажных и полунатурных стендах).



Особенности:

- ✓ Замена набора встроенных пакетов расширения MATLAB
- ✓ Современные формы уравнений движения ЛА с учетом особенностей динамики и математического описания самолета
- ✓ Представление результатов в форме, принятой при анализе динамики самолета
- ✓ Учет многолетнего опыта практического анализа динамики и систем управления самолета
- ✓ Русскоязычный интерфейс
- ✓ Российская система обозначений и координат


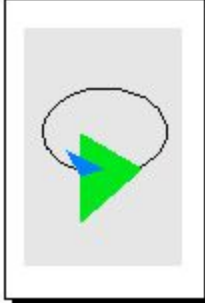

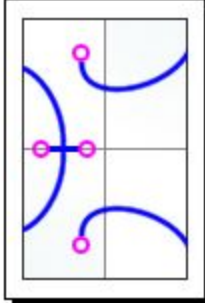
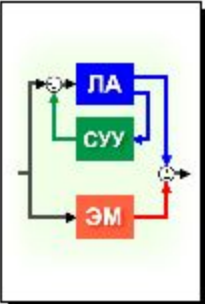



Состав программного комплекса

- ✓ библиотека элементов для создания математических моделей движения самолета: блоки уравнений различных видов движения, блоки приводов и датчиков и т. п.
- ✓ примеры моделей динамики самолетов с САУ
- ✓ библиотека вспомогательных элементов для визуализации и документирования результатов моделирования
- ✓ библиотека программ визуализации движения ЛА с использованием технологии виртуальной реальности
- ✓ программа поддержки баз данных аэродинамических характеристик самолетов
- ✓ пакет программ расчета балансировочных характеристик ЛА и балансировки моделей
- ✓ библиотека программ расчета динамических характеристик (характеристик устойчивости и управляемости) самолета с САУ
- ✓ функции для использования программного комплекса на пилотажных стендах и тренажерах (блоки реального времени, сетевого обмена)
- ✓ библиотека для создания независимых приложений (EXE, DLL) из моделей Simulink
- ✓ библиотека вспомогательных функций

Библиотеки блоков FlightSim

FlightSim_r2009a

File Edit View Simulation Format Tools Help

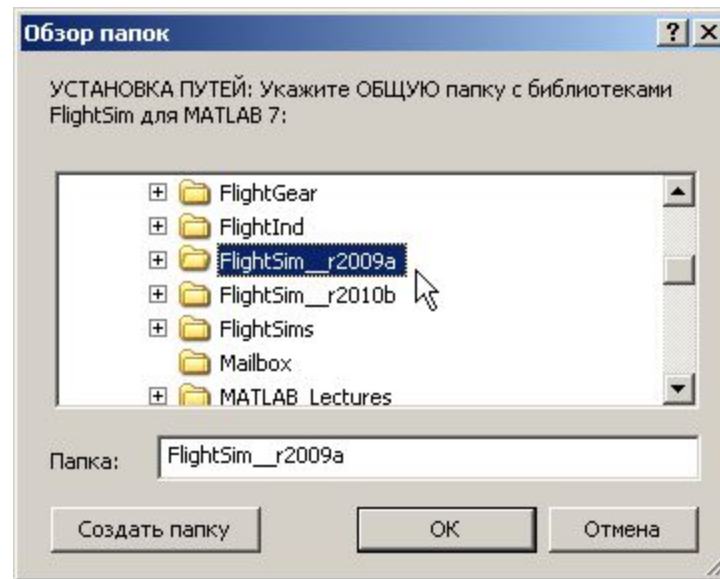
			
Библиотека блоков для создания моделей движения ЛА с системой управления	Библиотека элементов для визуализации и документирования результатов моделирования	Библиотека элементов для визуализации движения ЛА по технологии виртуальной реальности	Библиотека программ для расчетов характеристик ЛА с системой управления
			
Библиотека программ для построения эквивалентной модели согласно MIL-1797	Библиотека элементов для моделирования на пилотажных и полунатурных стендах	Библиотека элементов для создания независимых приложений из моделей Simulink	Библиотека блоков вспомогательных функций для работы в MATLAB и Simulink

Программа автоматической установки

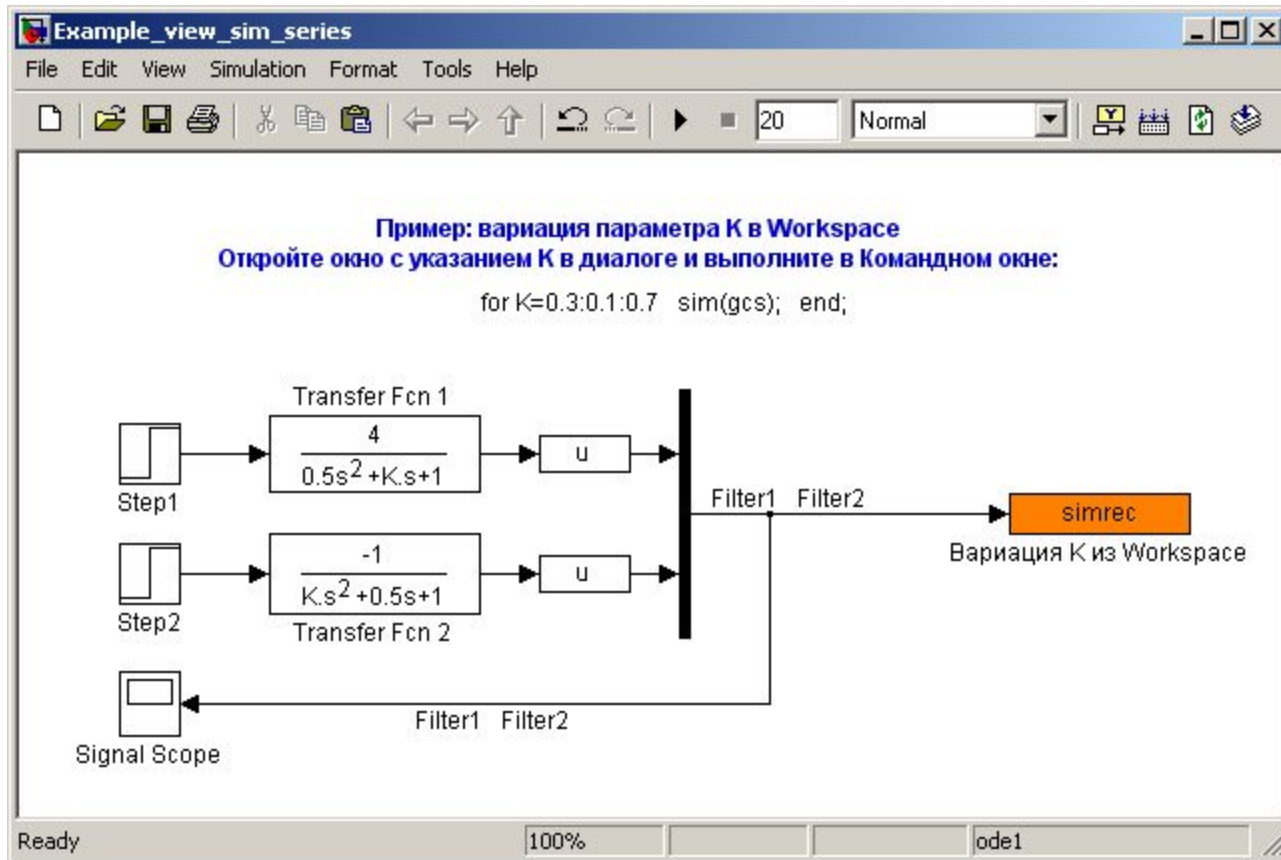
fs_install – автоматическая установка программного комплекса на ПК пользователя

По одному действию:

- ✓ включение папок библиотек в пути MATLAB Path
- ✓ обновление блока Simulink Scope (белый фон, дополнительные возможности)
- ✓ включение возможности использования русского языка в моделях Simulink

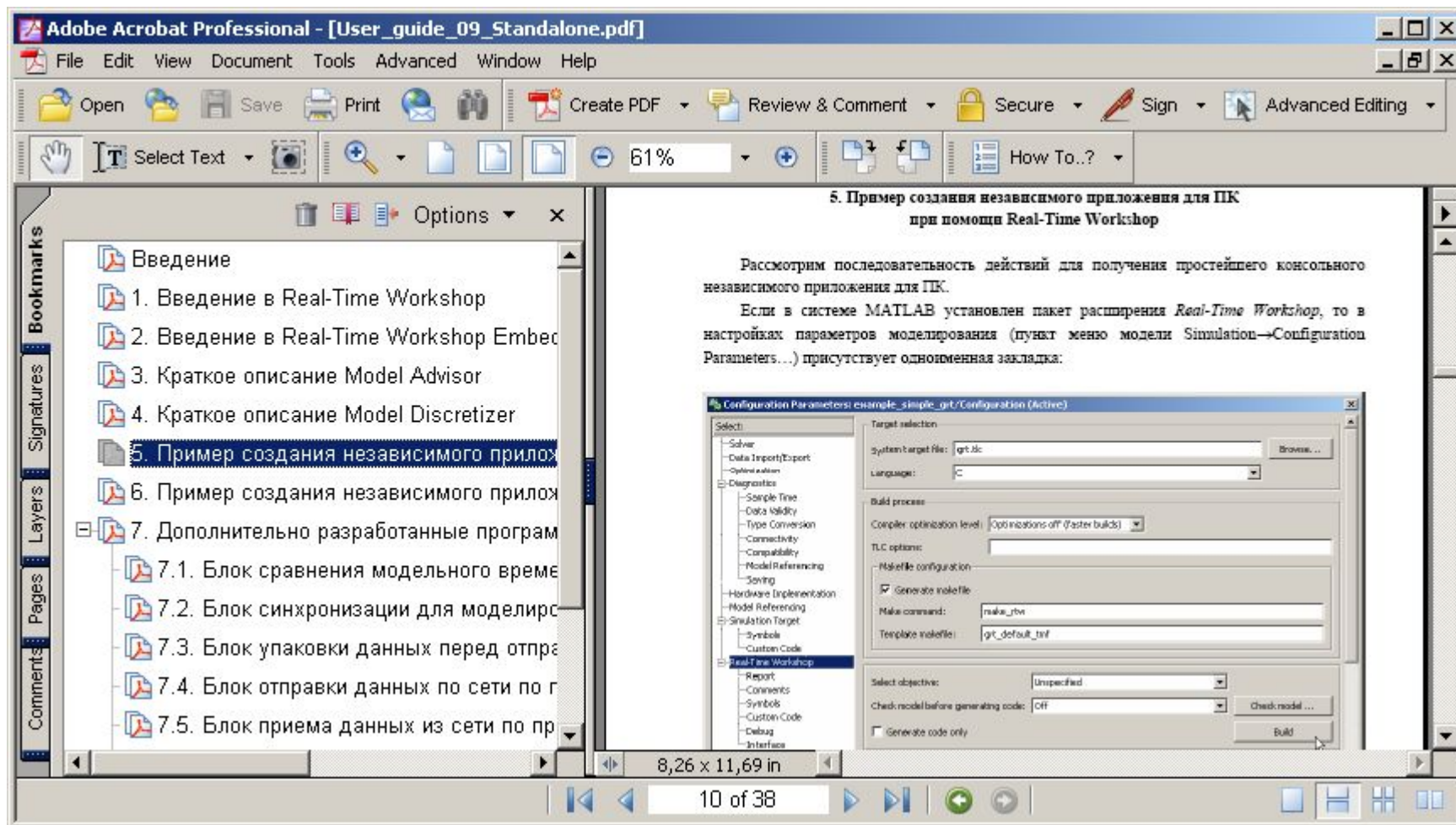


Примеры для каждой библиотеки



Наглядные примеры работы различных программ и блоков в моделях Simulink (аналог DEMO в MATLAB) в папке каждой библиотеки:

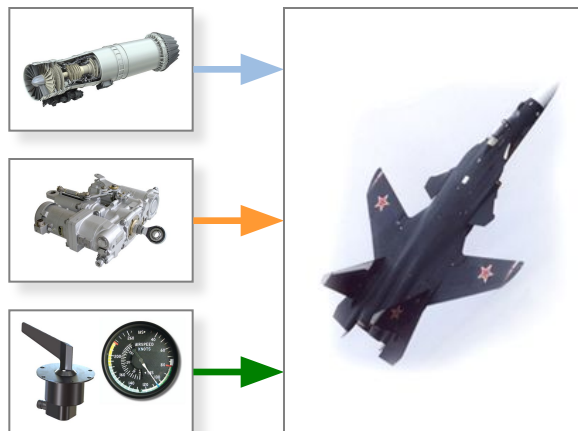
Руководство пользователя



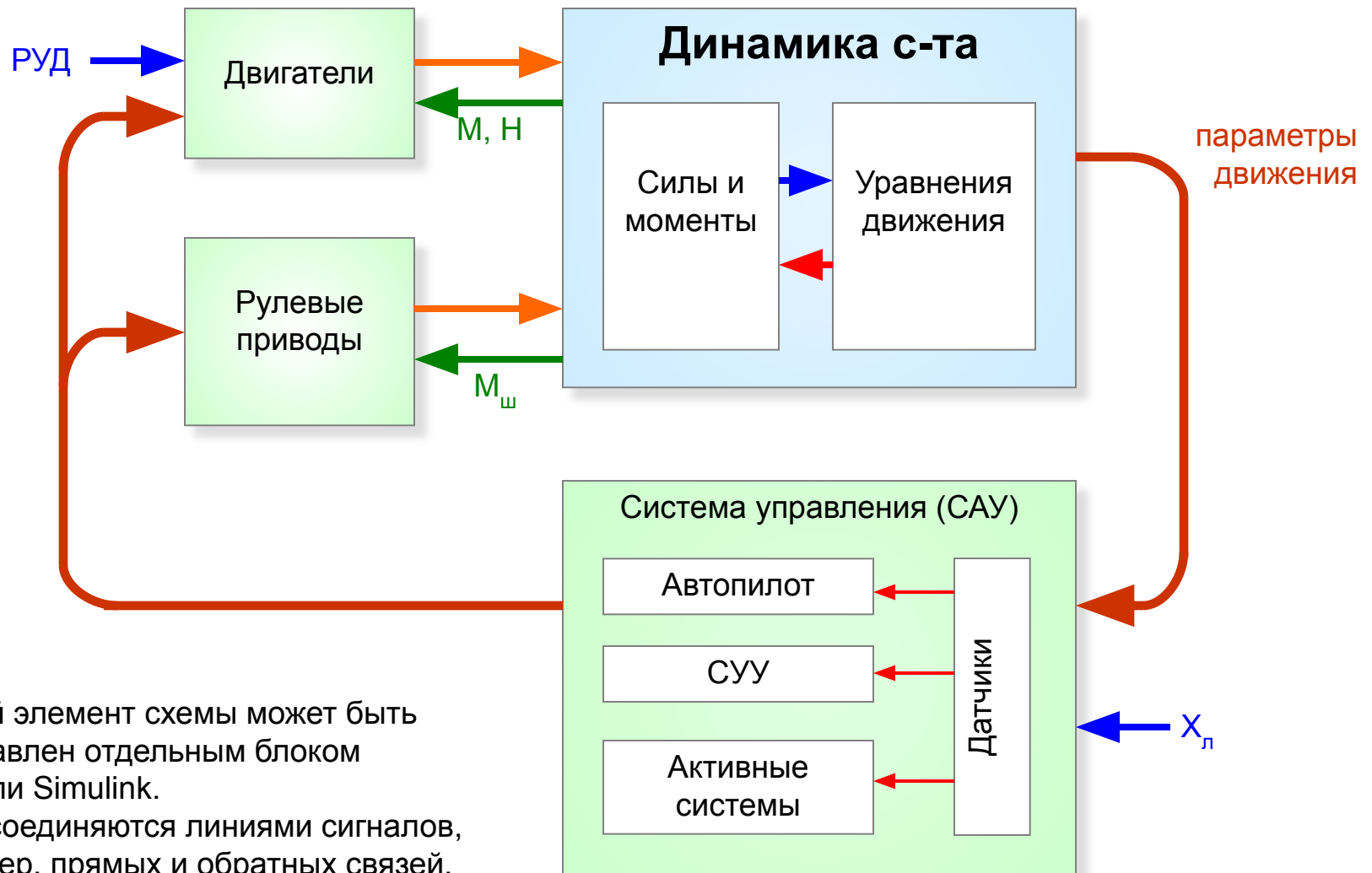
Подробная справка по каждой из библиотек в формате PDF

Часть 1

Создание модели ЛА в Simulink



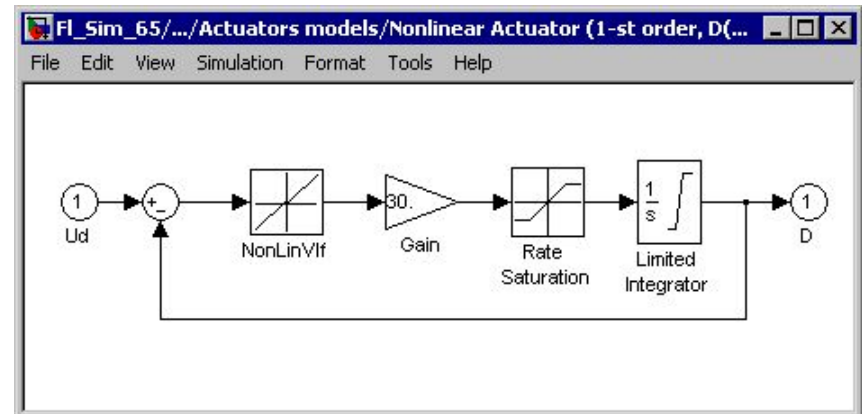
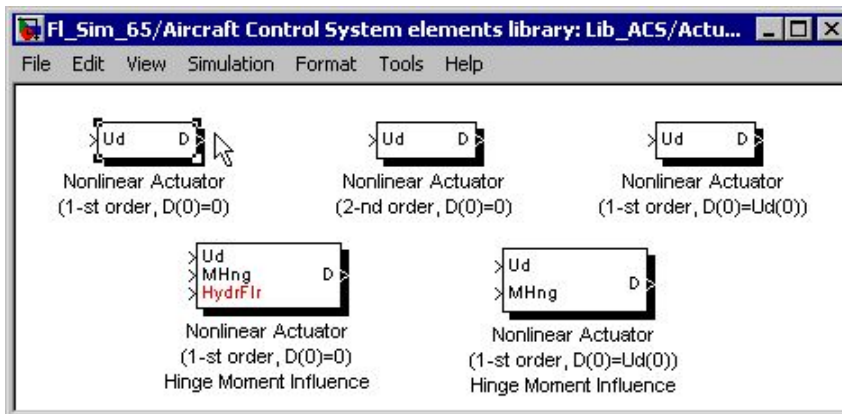
Типовая схема модели самолета



Каждый элемент схемы может быть представлен отдельным блоком в модели Simulink. Блоки соединяются линиями сигналов, например, прямых и обратных связей.

Библиотека для сборки моделей самолета с САУ

- ✓ библиотека уравнений движения самолета, в частности, блоки уравнений полного пространственного движения самолета в различных формах (в углах Эйлера, направляющих косинусах или параметрах кватерниона), блоки уравнений продольного и бокового движения, набор диалогов настройки начальных условий движения
- ✓ библиотека вспомогательных элементов для формирования модели динамики ЛА (стандартная атмосфера, измерения датчиков, переходы между различными системами координат и др.)
- ✓ библиотека математических моделей элементов системы управления ЛА, таких как нелинейные рулевые приводы (в том числе с учетом влияния шарнирных моментов), датчики, типовые элементы алгоритмов управления и т.п.



Уравнения пространственного движения

1. Уравнения сил (в Земной системе)

$$m \cdot d\mathbf{V}/dt = \mathbf{R}_g + \mathbf{G}$$

2. Уравнения моментов (для вектора момента количества движения в связанной системе)

$$d\mathbf{K}/dt + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{K} = \mathbf{M}$$

$$\left[\begin{array}{l} I_x \cdot d\omega_x/dt - I_{xy} \cdot d\omega_y/dt = M_{Rx} + (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_{xy} \omega_x \omega_z \\ I_y \cdot d\omega_y/dt - I_{xy} \cdot d\omega_x/dt = M_{Ry} + (I_z - I_x) \omega_x \omega_z + I_{xy} \omega_y \omega_z \\ I_z \cdot d\omega_z/dt = M_{Rz} + (I_x - I_y) \omega_x \omega_y + I_{xy} (\omega_x^2 - \omega_y^2) \end{array} \right.$$

3. Кинематические уравнения движения ц.м.

$$d\mathbf{r}_g/dt = \mathbf{V}$$

4. Кинематические уравнения углового движения (для $\psi, \vartheta, \gamma \dots$)

Общий порядок системы – 12.

Уравнения углового движения

В углах Эйлера

$$\begin{cases} d\psi/dt = (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma)/\cos\vartheta \\ d\vartheta/dt = \omega_z \cos\gamma + \omega_y \sin\gamma \\ d\gamma/dt = \omega_x - (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma)\tan\vartheta \end{cases}$$

Особенность: $\vartheta = \pm 90^\circ$

В направляющих косинусах

$$\begin{cases} da_x/dt = a_y \omega_z - a_z \omega_y \\ da_y/dt = -a_x \omega_z + a_z \omega_x \\ da_z/dt = a_x \omega_y - a_y \omega_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} db_x/dt = b_y \omega_z - b_z \omega_y \\ db_y/dt = -b_x \omega_z + b_z \omega_x \\ db_z/dt = b_x \omega_y - b_y \omega_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} d_x = a_y b_z - a_z b_y \\ d_y = -a_x b_z + a_z b_x \\ d_z = a_x b_y - a_y b_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi = -\text{ATAN2}(d_x, a_x) \\ \vartheta = \text{ASIN}(b_x) \\ \gamma = -\text{ATAN2}(b_z, b_y) \end{cases}$$

Численная коррекция:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{b} = 1, \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 0$$

FS2010

В параметрах кватерниона

$$\begin{cases} q_0 = \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ q_1 = \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \\ q_2 = \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ q_3 = -\sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} + \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} dq_0/dt = -(q_1 \omega_x + q_2 \omega_y + q_3 \omega_z)/2 \\ dq_1/dt = (q_0 \omega_x + q_2 \omega_z - q_3 \omega_y)/2 \\ dq_2/dt = (q_0 \omega_y - q_1 \omega_z + q_3 \omega_x)/2 \\ dq_3/dt = (q_0 \omega_z + q_1 \omega_y - q_2 \omega_x)/2 \end{cases}$$

Численная коррекция:

$$q_k = q_k / (q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)^{1/2}$$

17

Блоки уравнений движения

Модули уравнений пространственного движения (S-функции на языке С) позволяют проводить моделирование на всех режимах движения самолета, включая режимы взлета, посадки, пробега и руления с учетом модели шасси при скоростях движения $V \approx 0$, в том числе по движущейся ВПП.

Flight_Sim_7/Библиотека уравнений движ.: Lib_eq/Блоки уравнений пространственного движения в различных ...

File Edit View Simulation Format Tools Help

В углах Эйлера

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \cos \gamma + \omega_y \sin \gamma$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_x - (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \operatorname{tg} \vartheta$$

Уравнения
пространственного движ.
в углах Эйлера

В направляющих косинусах

$$\begin{cases} \frac{d\vec{a}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{a} = 0, \\ \frac{d\vec{b}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{b} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vartheta = \operatorname{ASIN}(b_x), \\ \gamma = -\operatorname{ATAN2}(b_z, b_y), \\ \psi = -\operatorname{ATAN2}(d_x, a_x). \end{cases}$$

Уравнения
пространственного движ.
в напр. кос.

В кватернионах

$$\begin{cases} \frac{de_0}{dt} = -\frac{(e_1\omega_x + e_2\omega_y + e_3\omega_z)}{2}, \\ \frac{de_1}{dt} = \frac{(e_0\omega_x + e_2\omega_z - e_3\omega_y)}{2}, \\ \frac{de_2}{dt} = \frac{(e_0\omega_y - e_1\omega_z + e_3\omega_x)}{2}, \\ \frac{de_3}{dt} = \frac{(e_0\omega_z + e_1\omega_y - e_2\omega_x)}{2}. \end{cases}$$

Уравнения
пространственного движ.
в кватернионах

Настройка начальных условий для уравнений

Блок начальных условий
вставляется в модель с
уравнениями:

"Кликнуть"
для настройки
Начальных Условий
Настройка и инициализация
начальных условий для
продольного движения



Установочный файл: D:\FS7\Lib_1_Simulation\SplnCnd_ru.par

Набор начальных условий | Вычисление начальной скорости

Задание начальных условий в продольном движении ЛА

Тангаж $Teta0 =$	<input type="text" value="1"/>	град	Дальность $X0 =$	<input type="text" value="0"/>	м
Крен $Gamma0 =$	<input type="text" value="2"/>	град	Высота $H0 =$	<input type="text" value="1900"/>	м
Рыскание $Psi0 =$	<input type="text" value="3"/>	град	Боковое смещение $Z0 =$	<input type="text" value="0"/>	м
Угл. скорость крена $wx0 =$	<input type="text" value="4"/>	град/с	Скорость $V0 =$	<input type="text" value="176"/>	м/с
Угл. скорость рыскан. $wy0 =$	<input type="text" value="5"/>	град/с	Угол атаки $Alpha0 =$	<input type="text" value="4.35"/>	град
Угл. скорость тангажа $wz0 =$	<input type="text" value="6"/>	град/с	Угол скольжения $Beta0 =$	<input type="text" value="0"/>	град

Фугоидное движение

☒ Включить параметр $Swfg$ фугоидного движения

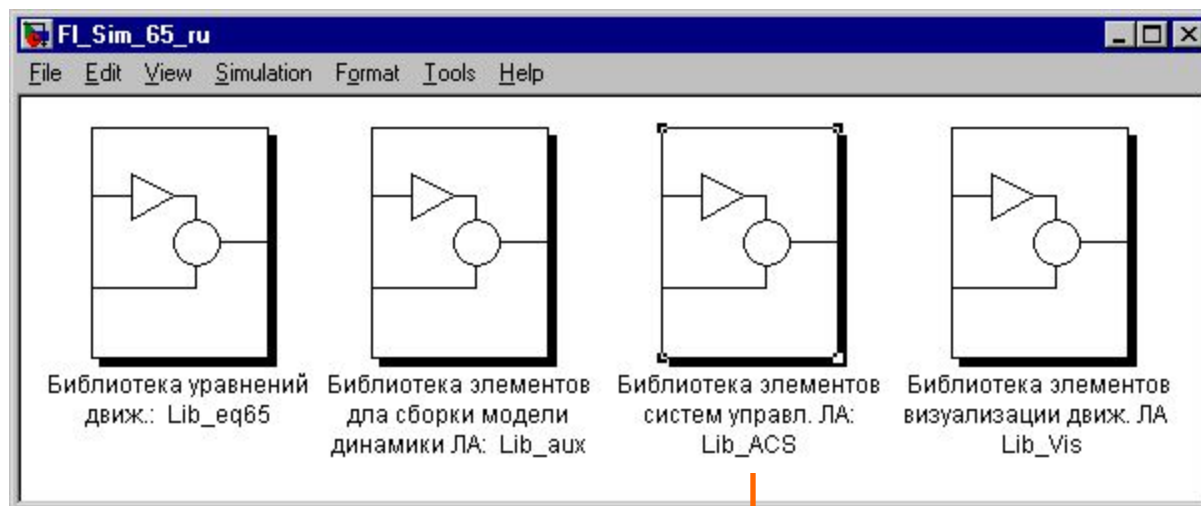


Для уравнений пространственного движения
начальные условия считываются из
специального установочного файла.

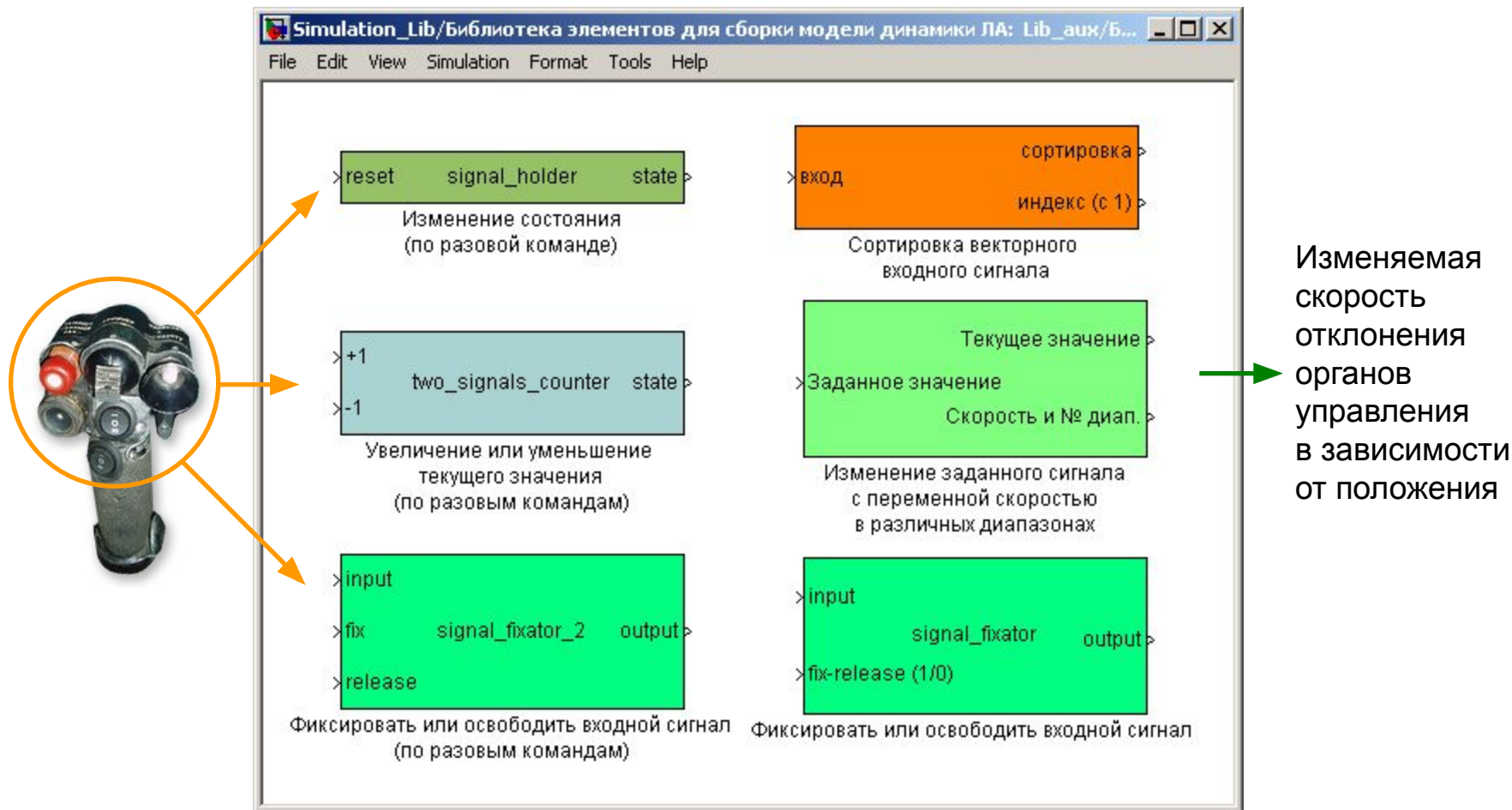


Для уравнений продольного и бокового
движения начальные условия загружаются
из рабочей области Workspace.

Библиотека элементов систем управления



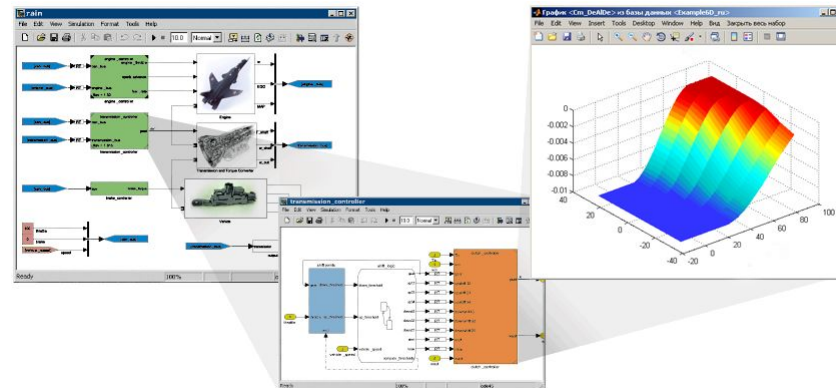
Блоки вспомогательных S-функций



Блоки разовых команд удобны для приема сигналов кнопок джойстика на ПК или из кабины пилотажного стенда

Часть 2

Примеры моделей самолетов в Simulink. База данных характеристик самолета.



Примеры моделей динамики самолета

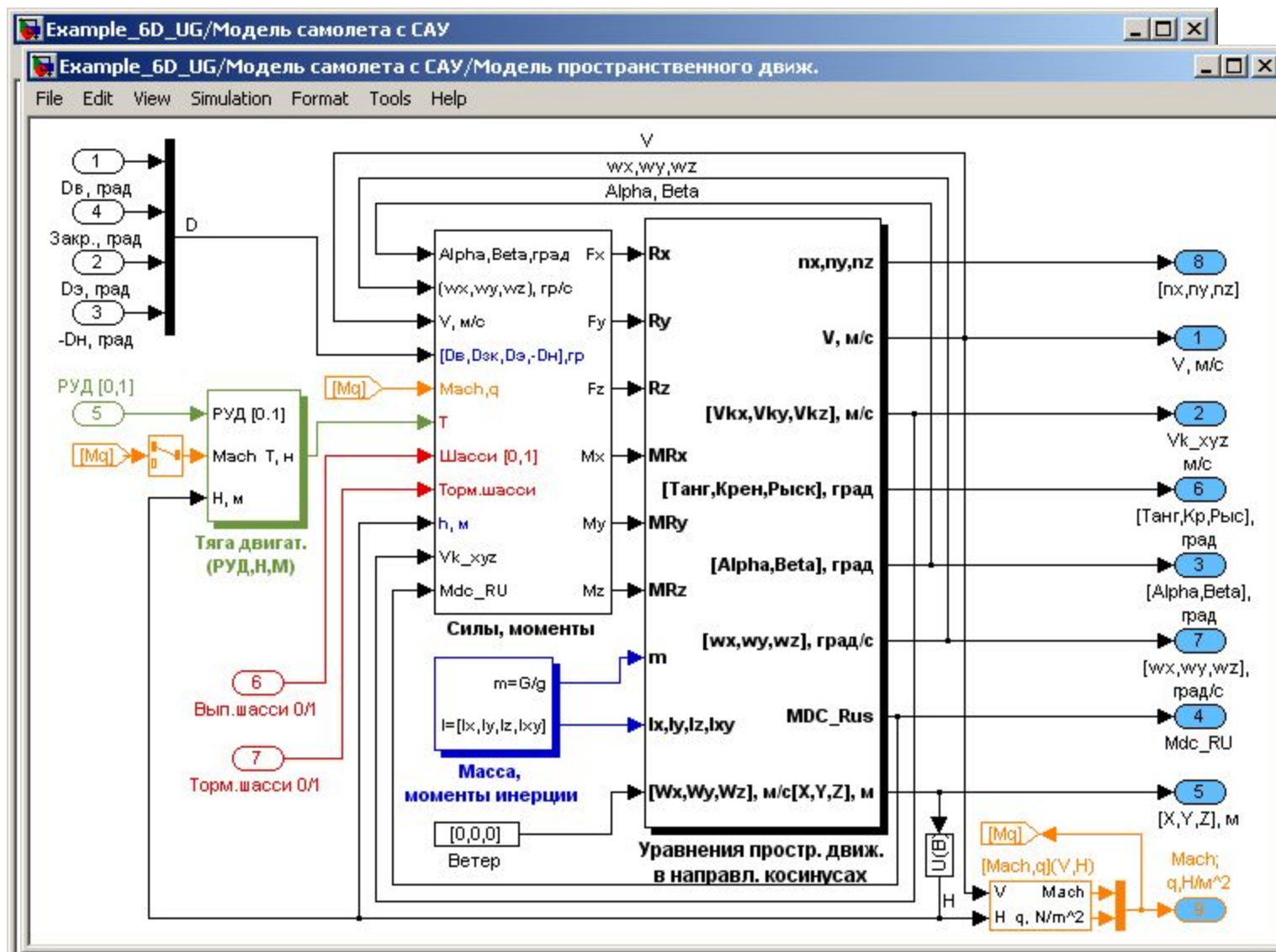
FlightSim содержит примеры моделей движения **гипотетического самолета**:

- ✓ нелинейные аэродинамические характеристики в широком диапазоне углов атаки и чисел M
- ✓ сложная современная система управления
- ✓ модели Simulink для полного пространственного, продольного и бокового движений с подключенными программами балансировки, расчета динамических характеристик, и другими программами из FlightSim

Целесообразно использовать примеры в качестве основы (шаблона), сохраняя структуру модели и основные связи между блоками:

- ✓ сокращается время сборки и отладки новой модели в Simulink
- ✓ снижается вероятность внесения ошибок

Образец: модель пространственного движения



Основные блоки расположены и соединены согласно типовой схеме модели самолета в Simulink

Управляющая программа для баз данных

В сложных моделях (~ 10 уровней в Simulink) может быть до 200 одномерных, двумерных и трехмерных таблиц интерполяции: аэродинамика, ВСХ двигателя, параметры САУ и т.д.

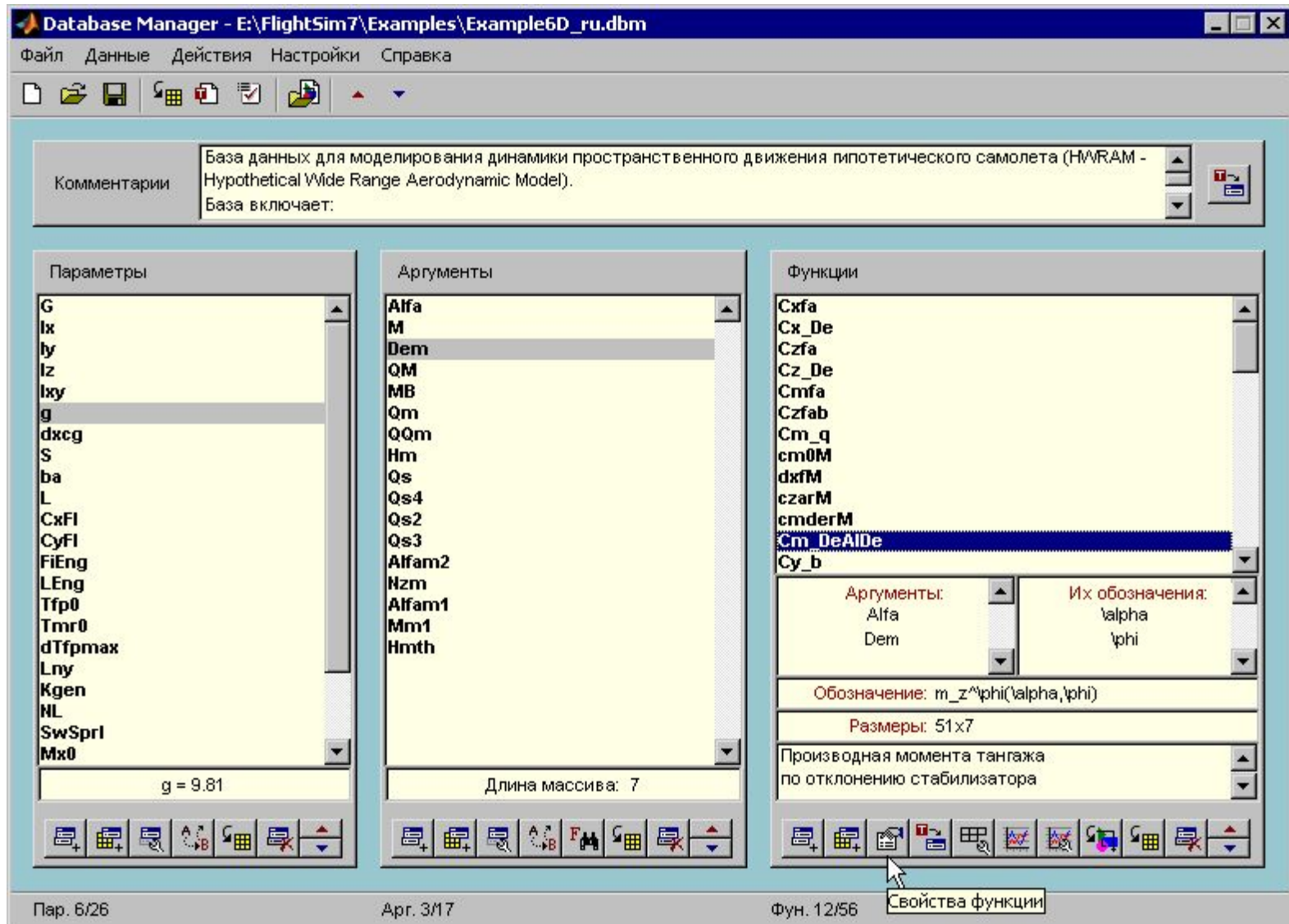
В процессе разработки самолета или при его модификациях эти данные уточняются, изменяются, дополняются и т.п.

dbm – программа поддержки баз данных (**Database Manager**) для любых моделей среды Simulink с блоками таблиц интерполяции.

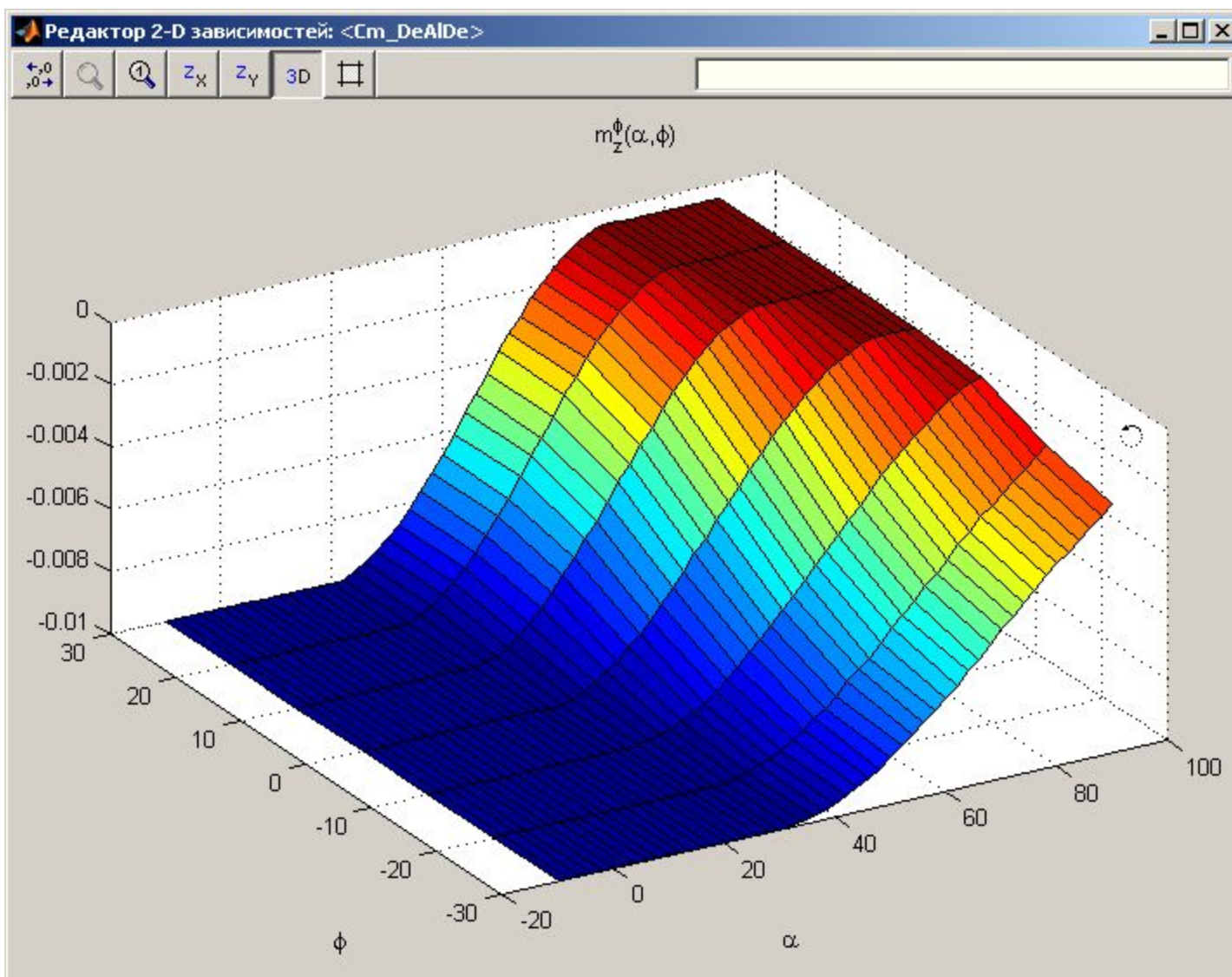
Возможности:

- ✓ создание новых баз данных и дополнение существующих путем “захвата” числовых массивов из различных источников
- ✓ текстовое или графическое редактирование содержимого базы данных, например, редактирование данных таблиц аэродинамических характеристик ЛА
- ✓ автоматизированное формирование блоков таблиц Simulink, содержащих выбранные табличные данные, для быстрой сборки модели
- ✓ экспорт в независимые текстовые и mat-файлы
- ✓ вспомогательные операции (сравнение, объединение с другими базами, проверка на наличие ошибок, сортировка данных по различным признакам и т.д.)

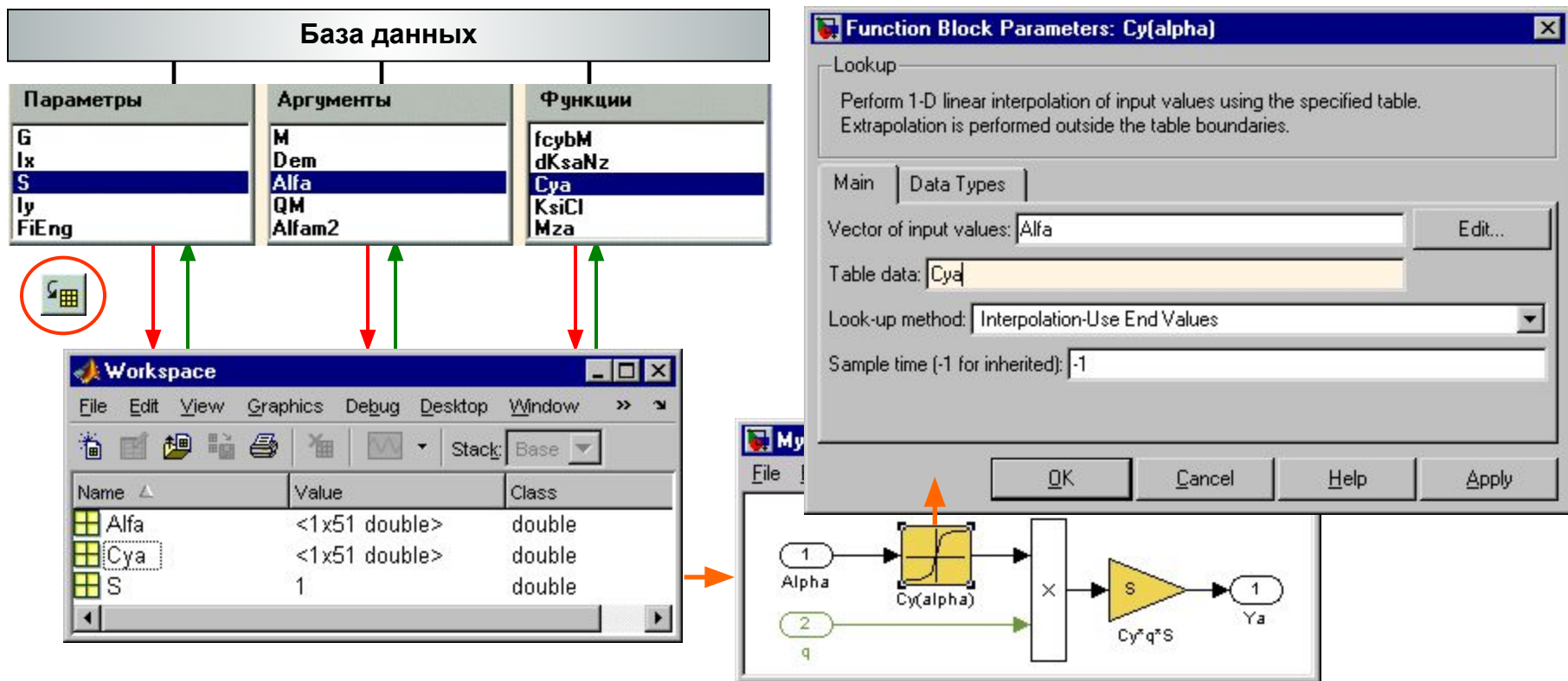
Главное окно программы для баз данных



Пример: графический редактор 2-D



Взаимодействие с моделями Simulink

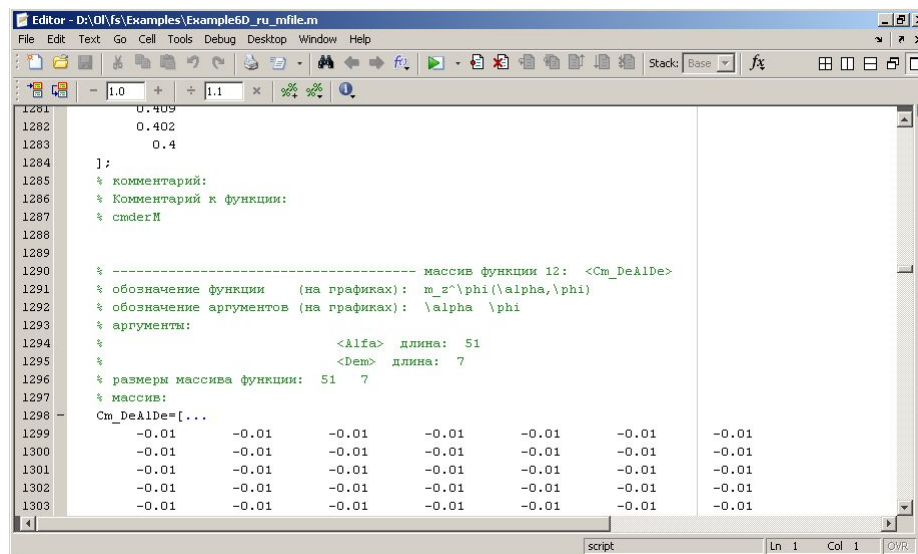


- ✓ возможность использования общей неизменяемой базы данных для нескольких моделей
- ✓ возможность использования для одной модели нескольких баз данных, в которых имена массивов одни и те же, а содержимое массивов различно
- ✓ быстрая загрузка и перезагрузка данных для моделирования

Работа с MATLAB Workspace

Управляющая программа **dbm**:

1. Встроенные возможности сравнения данных с массивами из Workspace, проверка на совпадение имен при загрузке в рабочее поле.
2. Создание исполняемого скрипта (*.m) и mat-файла – возможность автозагрузки данных Workspace в при открытии модели Simulink.

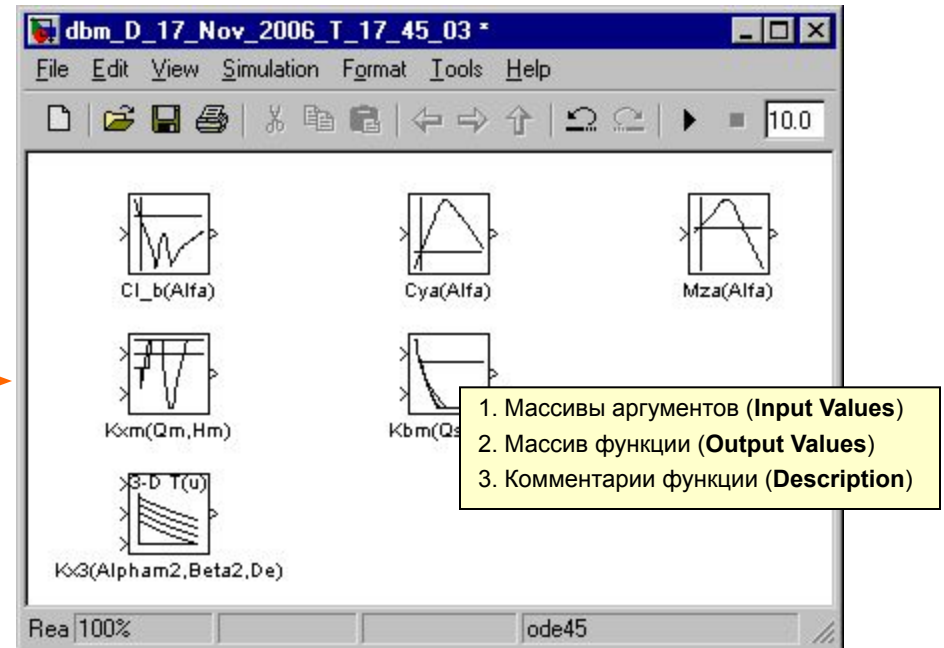
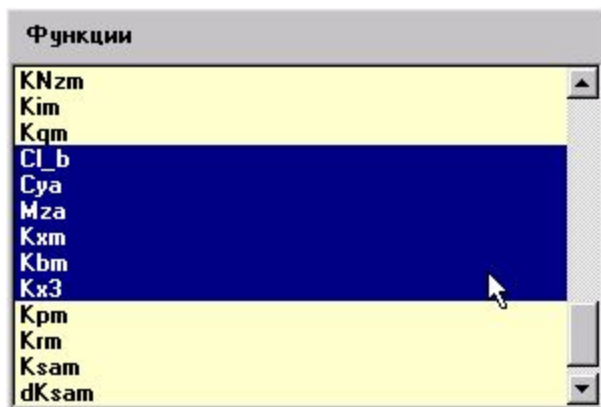


```
1281 0.409
1282 0.402
1283 0.4
1284 ];
1285 % комментарий:
1286 % Комментарий к функции:
1287 % cnderM
1288
1289 % ----- массив функции 12: <Cm_DeAlDe>
1290 % обозначение функции (на графиках): m_x\phi(\alpha,\phi)
1291 % обозначение аргументов (на графиках): \alpha \phi
1292 % аргументы:
1293 %
1294 % <Alfa> длина: 51
1295 % <Dem> длина: 7
1296 % размеры массива функции: 51 7
1297 % массив:
1298 Cm_DeAlDe=[...
1299 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01
1300 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01
1301 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01
1302 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01
1303 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01
```

Вспомогательная программа упрощенной загрузки файлов баз данных в Workspace **dbm_load**: нет GUI, есть проверка на совпадение имен при загрузке в рабочее поле.

Создание блоков таблиц для модели ЛА

При автоматизированном создании набора блоков таблиц значительно сокращается время, затрачиваемое на сборку модели в Simulink



Блоки типа Look-Up Table и Look-Up Table (2-D) с линейной интерполяцией и экстраполяцией для 1-D и 2-D массивов функций, блоки типа Look-Up Table (n-D) с различными способами интерполяции и экстраполяции для 1-D, 2-D и 3-D массивов функций.

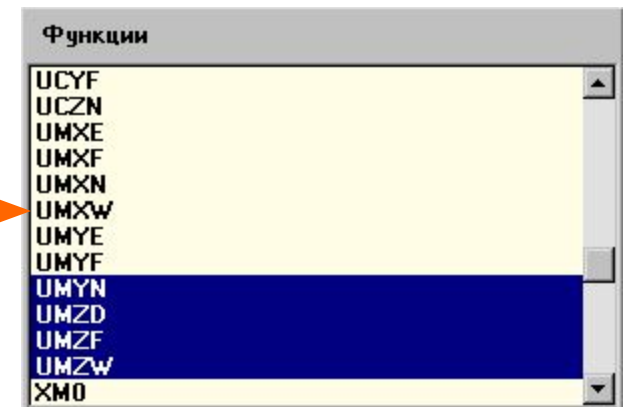
Выбор типа таблиц и их настройка – через диалог.

Перевод данных из САПР “Динамика”

The screenshot shows a Windows Notepad window titled "Lister - [D:\Mailbox\BankSAPR.TXT]". The window displays a text file with a table of data. The table has columns for names (Имя), various codes (N/A1, M/A1, P/A1, S/A1, N/A2, M/A2, P/A2, S/A2, N/), and numerical values. The data is organized into sections by group names: UMYN, UMZD, UMZF, and UMZW. A dialog box is overlaid on the window, displaying the file path "D:\Mailbox\BankSAPR.TXT" and the message "Обработка функций (формат 12). Ждите..." (Processing functions (format 12). Please wait...). The dialog box also features a red progress bar.

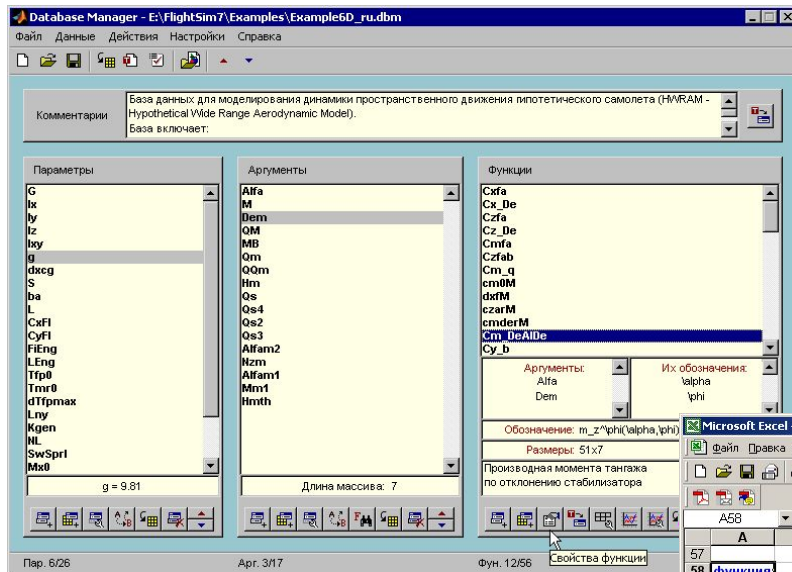
Имя	N/A1	M/A1	P/A1	S/A1	N/A2	M/A2	P/A2	S/A2	N/
UMYN	H29		6	0	AM	AM91	9	0	
1.0000		0.9320		0.8660		0.8200		0.6100	
1.0000		0.9440		0.8910		0.8540		0.6770	
1.0000		0.9560		0.9120		0.8820		0.7370	
1.0000		0.9820		0.9600		0.9460		0.8780	
1.0000		0.9920		0.9800		0.9740		0.9400	
1.0000		0.9960		0.9930		0.9900		0.9700	
UMZD	H52		6	0	AM	AM34	6	0	
1.0000		0.8800		0.7000		0.2100		0.1600	
1.0000		0.9100		0.7600		0.3300		0.2700	
1.0000		0.9300		0.8100		0.4400		0.3800	
1.0000		0.9300		0.8200		0.3200		0.6800	
1.0000									
1.0000									
UMZF	H								
1.0000									
1.0000									
1.0000									
1.0000									
1.0000									
1.0000		0.9880		0.9820		0.9700		0.9590	
UMZW	H52		6	0	AM	AM34	6	0	
1.0000		0.9200		0.8400		0.6900		0.6500	
1.0000		0.9350		0.8600		0.7300		0.6900	
1.0000		0.9500		0.8850		0.7700		0.7390	
1.0000		0.9750		0.9400		0.8600		0.8400	
1.0000		0.9890		0.9710		0.9300		0.9100	
1.0000		0.9900		0.9800		0.9650		0.9500	

Распечатка банка данных САПР “Динамика”
содержит массивы аргументов и функций



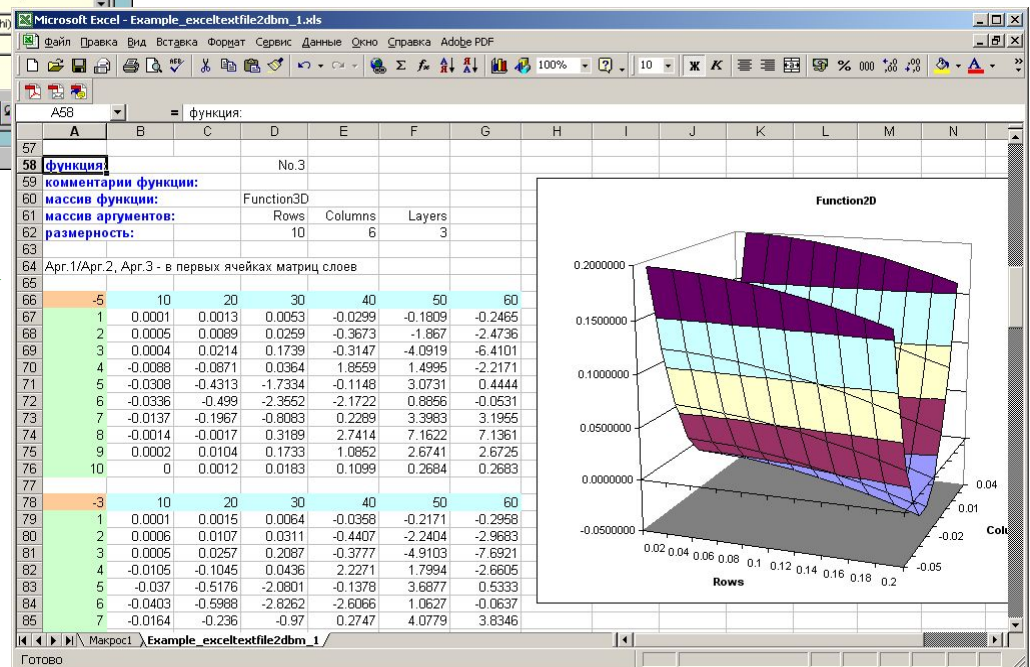
Специальная программа **sapr2dbm** позволяет получить базу данных в среде MATLAB из текстовой распечатки банка данных за несколько секунд

Взаимодействие с Excel

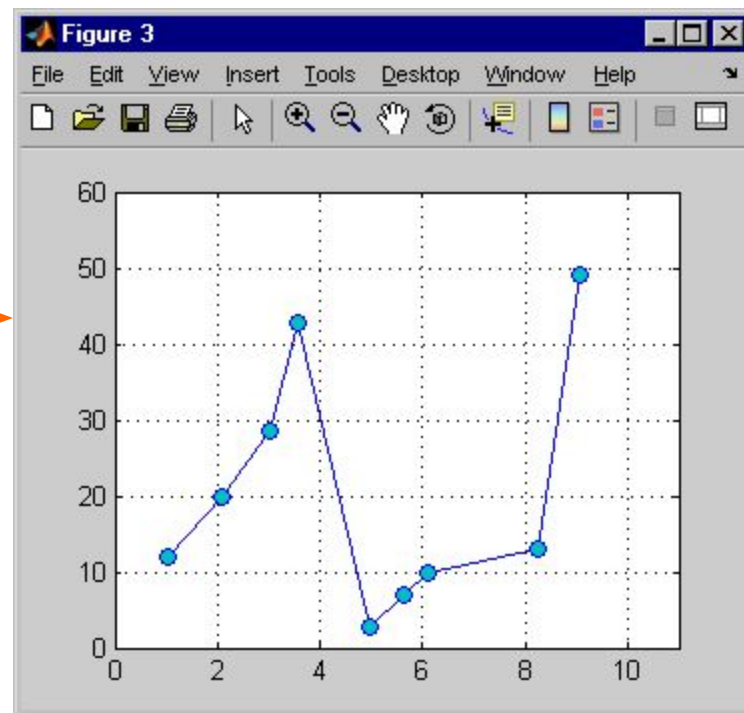
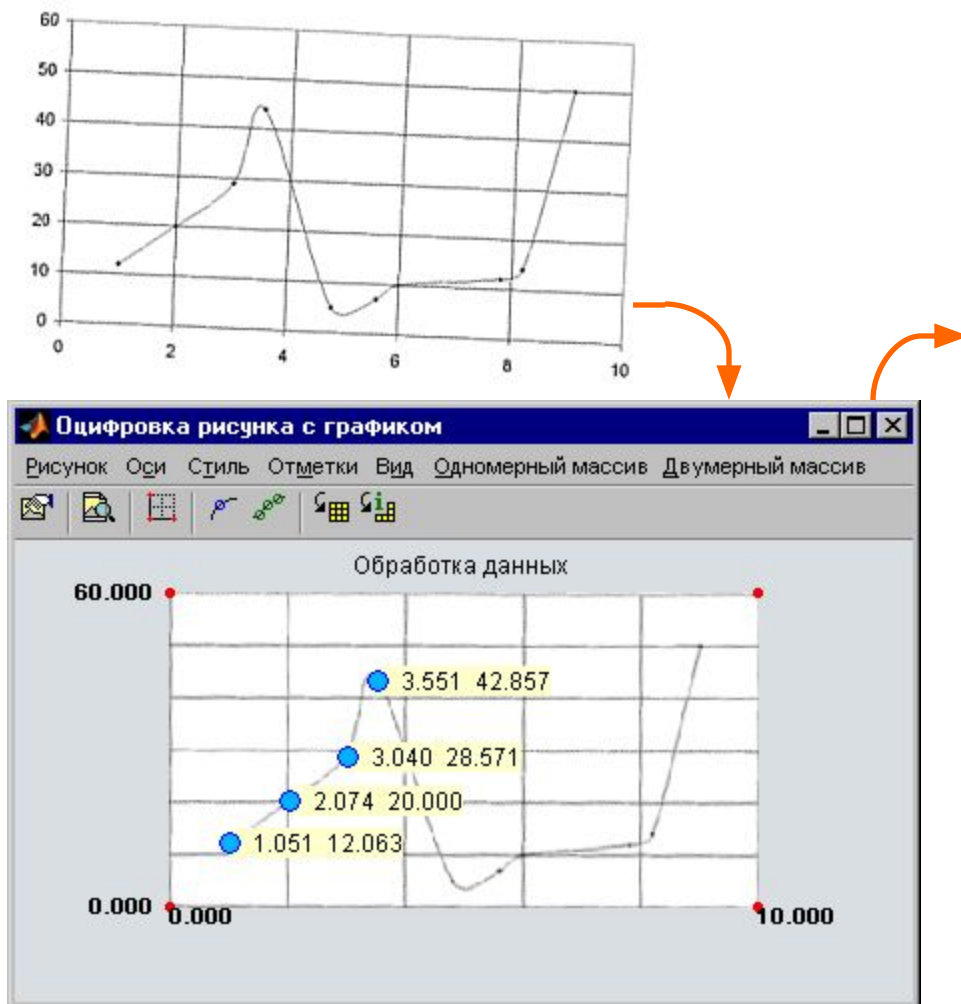


Автоматическое создание базы данных из файла Excel определенного формата (через текстовый файл):
вспомогательная программа
exceltextfile2dbm

Создание из базы данных текстового файла для Excel с возможностью построения 1D, 2D графиков



Программа оцифровки рисунков



Графическая обработка сканированных одномерных и двумерных диаграмм, оцифровка с возможной интерполяцией для включения в базы данных: **im2gr**

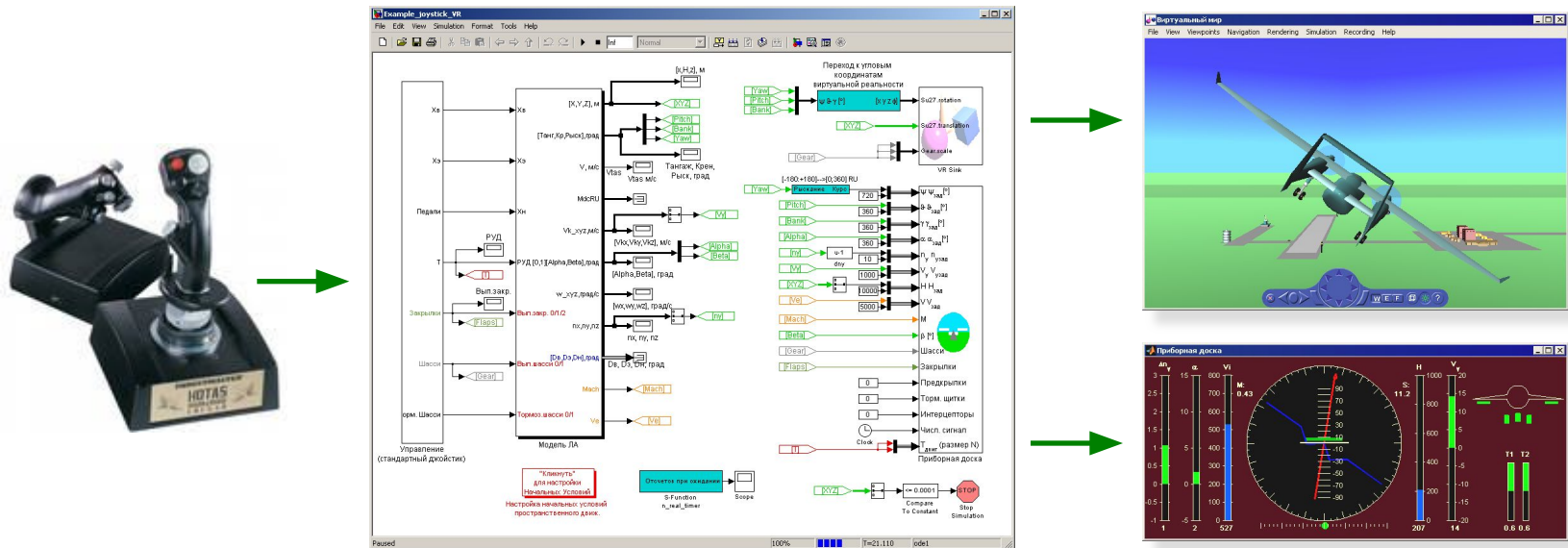
Моделирование движения ЛА на персональном компьютере



Моделирование на ПК

Задачи:

1. быстрая проверка, отладка создаваемой модели
2. подготовка к переносу на пилотажный стенд (настройка структуры и связей)



Средства FlightSim:

- ✓ синхронизация с “реальным” временем в Windows
- ✓ прием сигналов джойстика
- ✓ блоки визуализации различных видов

Перенос модели с ПК на пилотажный стенд

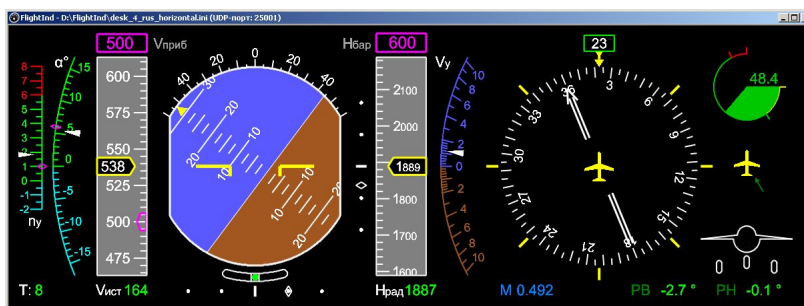
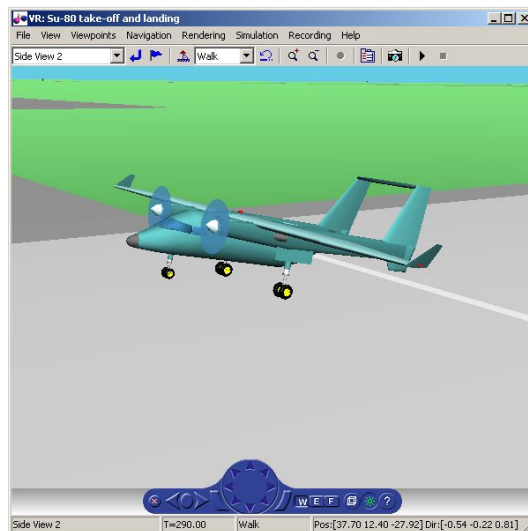
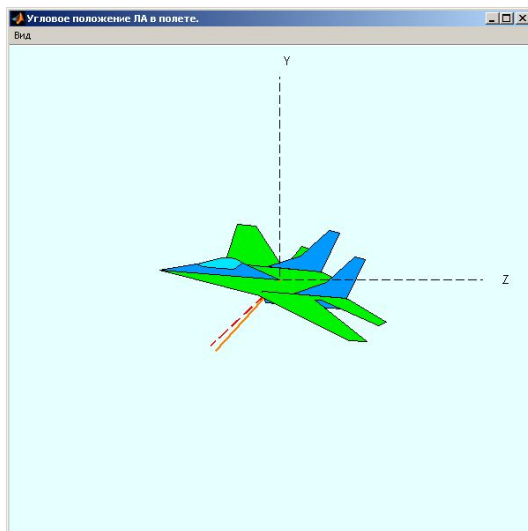


Мини-стенд на одном или нескольких ПК



Модель ЛА, собранная и проверенная на ПК,
в целом сохраняется (все связи отлажены),
меняются только отдельные
блоки визуализации и блоки управления
(минимальные и несложные изменения)

Средства визуализации движения



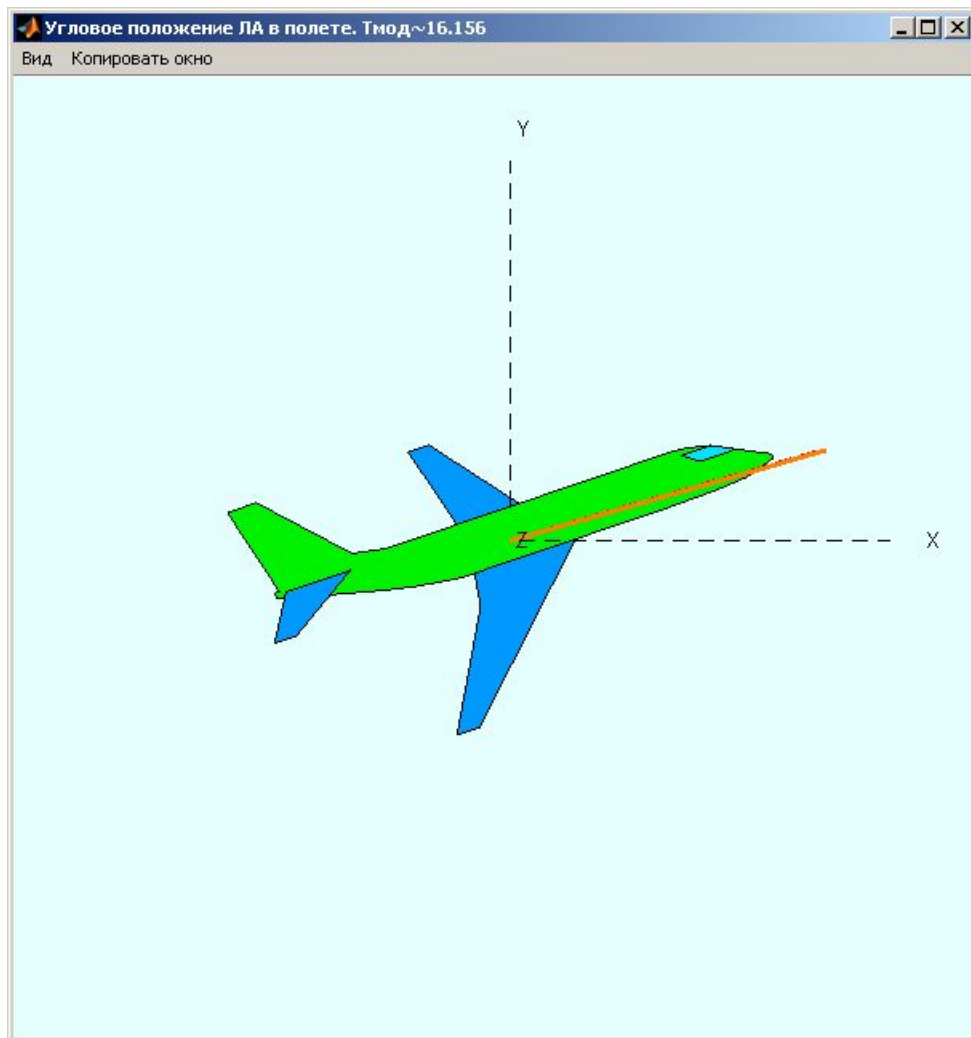
1. Встроенная графика MATLAB

2. Simulink 3D Animation

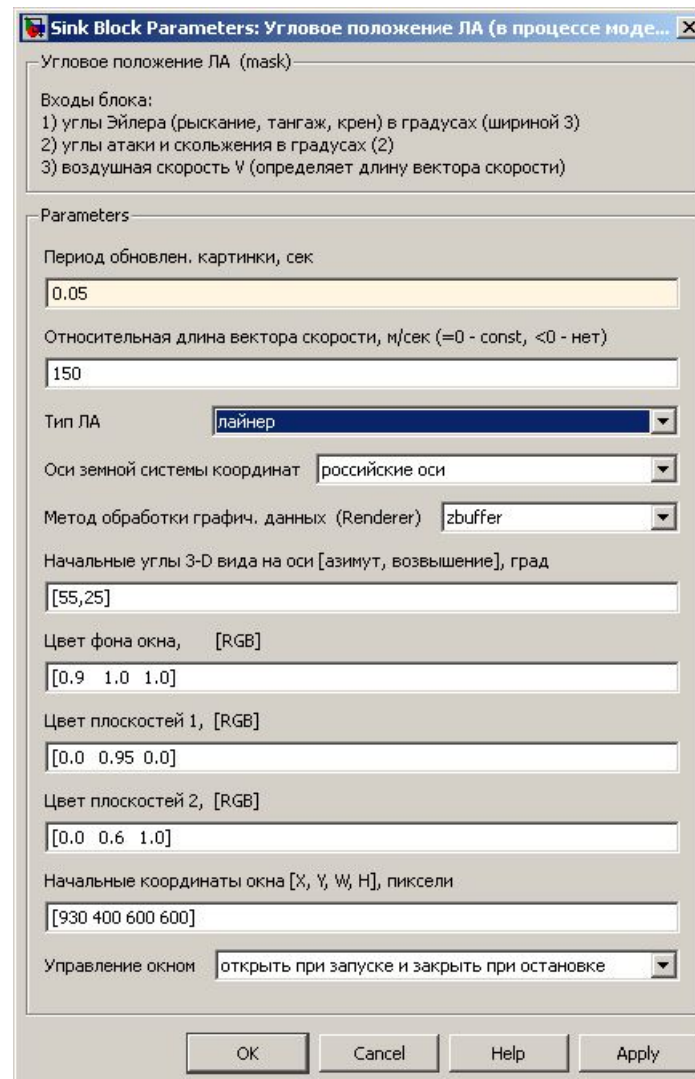
3. Независимые приложения

Визуализация в течение моделирования

vis_aircraft_angles, настройка параметров блока



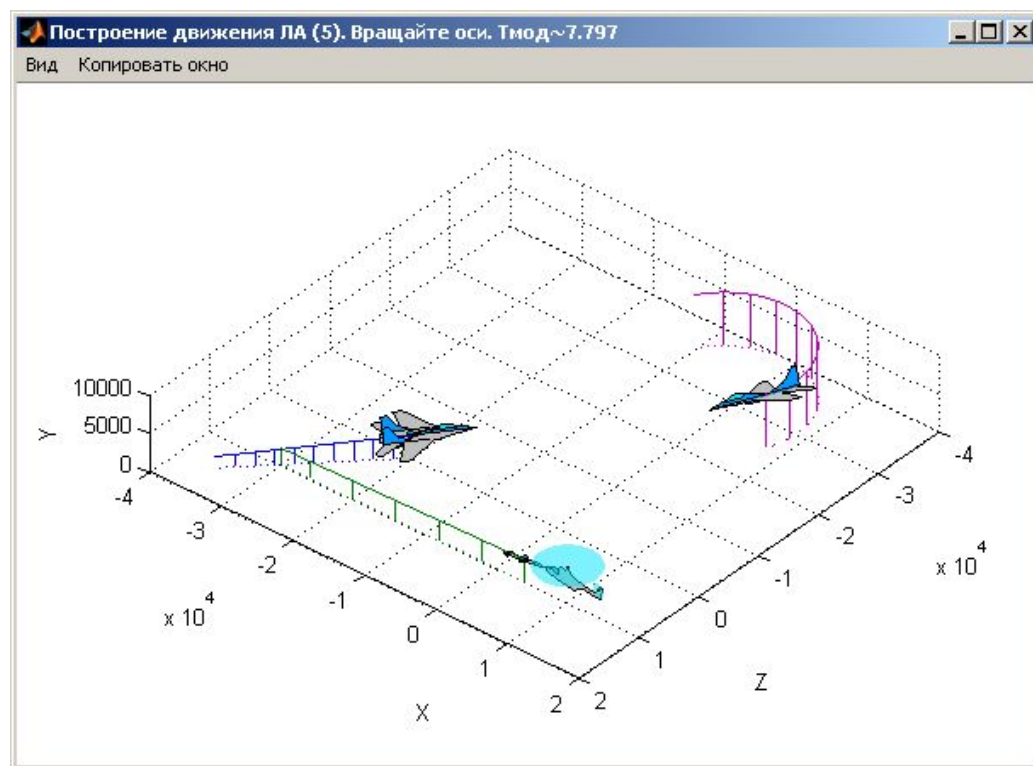
FS2010



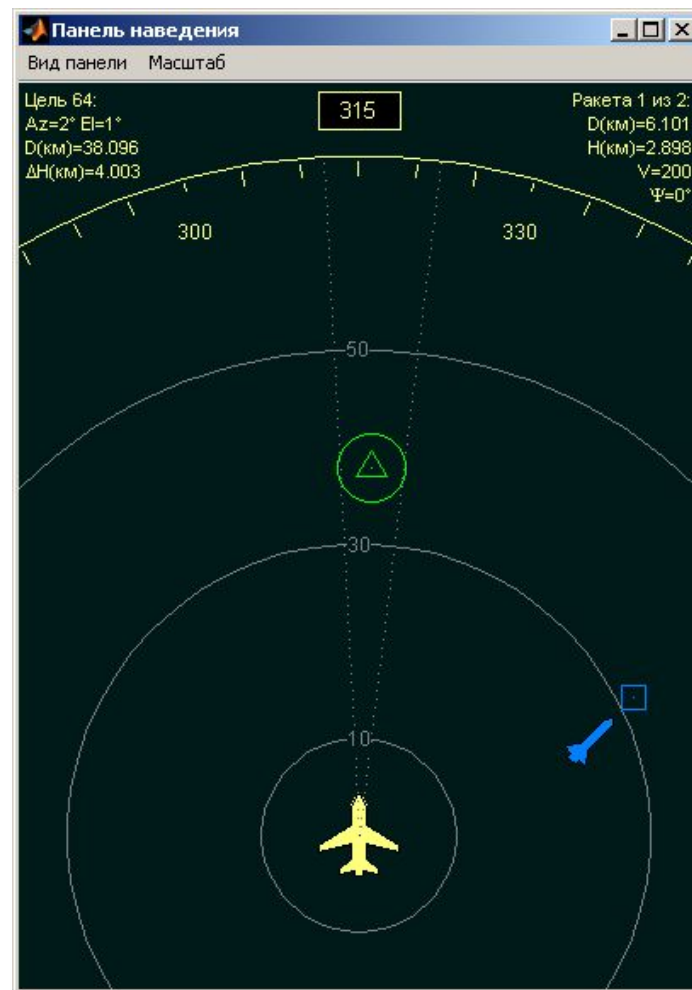
38

Пример визуализации при моделировании

Средства визуализации для отладки модели с расчетом движения нескольких ЛА



vis_aircrafts_motion

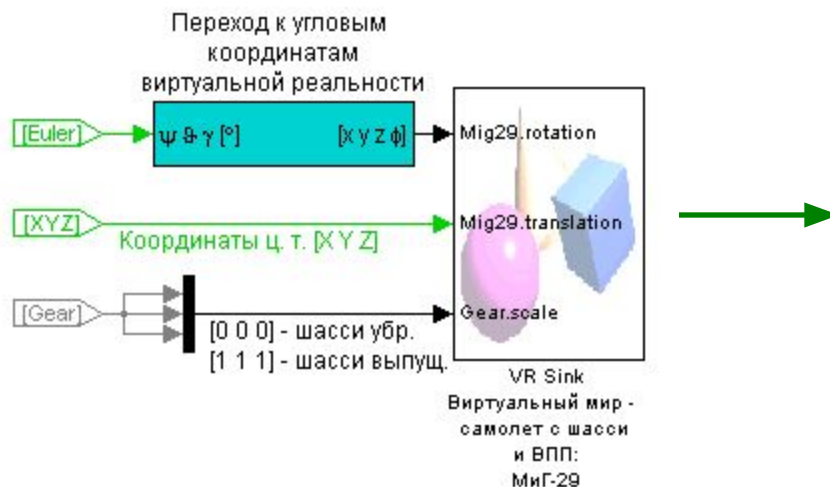


Визуализация в течение моделирования – 3D

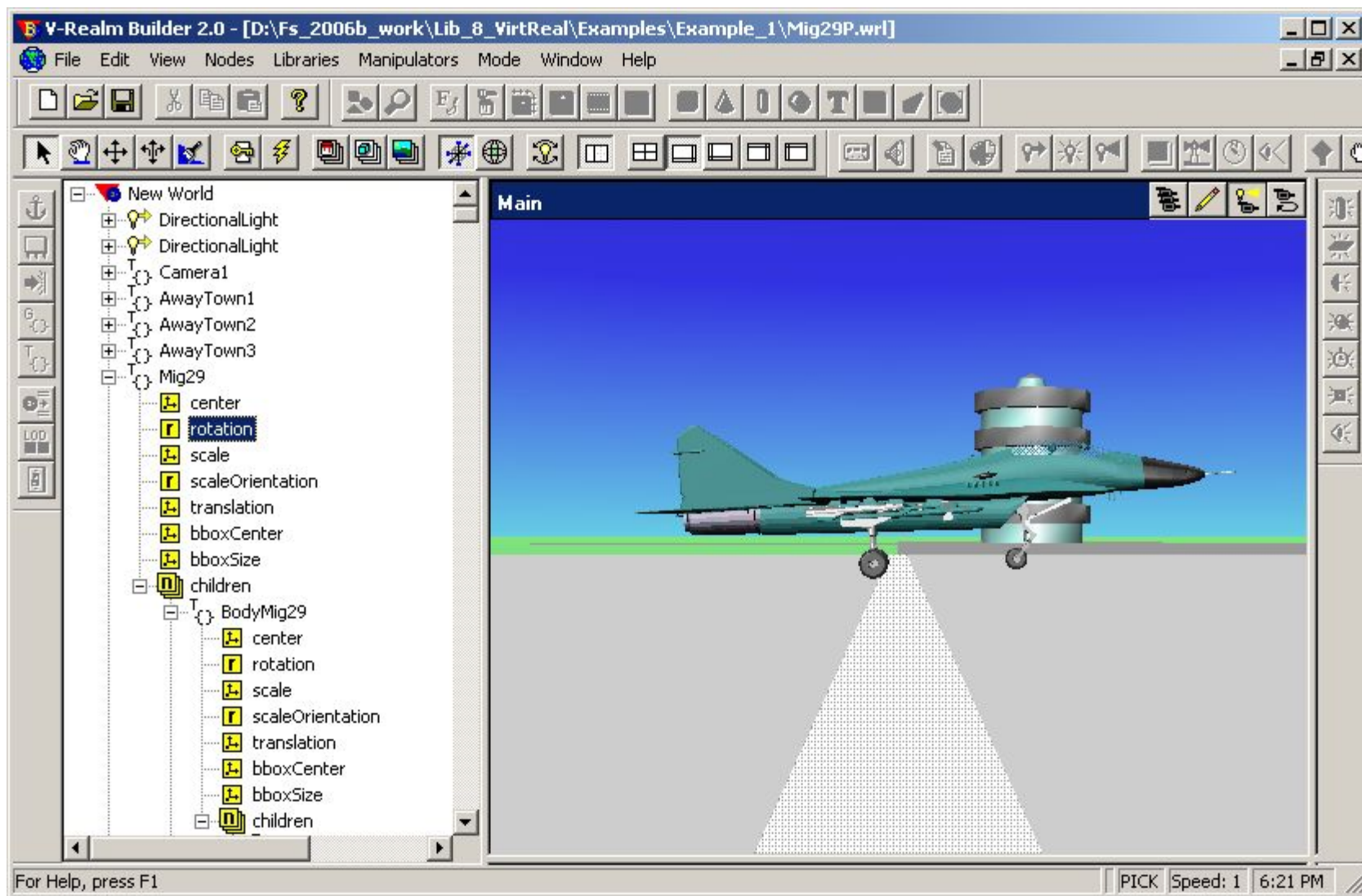
Simulink 3D Animation:

быстрое создание красочной трехмерной сцены (виртуального мира) силами пользователя без программирования

Блок вычисления вращательных координат VRML:



Редактор файлов виртуальных миров



Визуализация в течение моделирования – FG

FlightGear – независимое приложение:

- ✓ Популярный мощный бесплатный авиасимулятор: www.flightgear.org
- ✓ Мощная графика, высокое быстродействие на обычном ПК.
- ✓ Подключение 3D-моделей разных ЛА.
- ✓ Обмен данных с MATLAB по UDP на одном или различных ПК.
- ✓ Образец подключения к MATLAB в Aerospace Blockset.
- ✓ FlightSim содержит блоки обмена с FlightGear как для моделирования в Simulink, так и для создания независимых приложений из моделей Simulink.



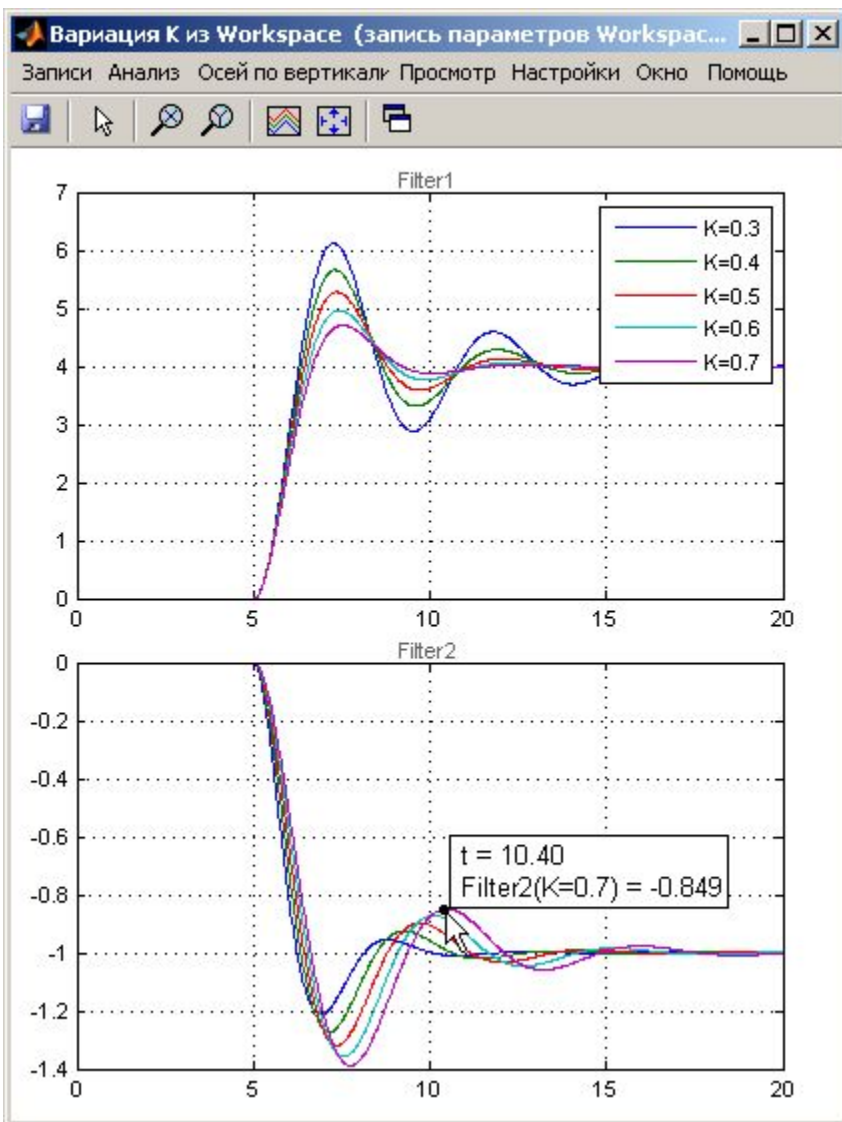
Визуализация в течение моделирования – FI

FlightInd – независимое приложение:

- ✓ Прием данных от приложений по UDP на одном и том же или различных ПК.
- ✓ Полноэкранный или оконный режим, масштабирование окна.
- ✓ Быстрая и простая установка кол-ва, расположения и типа приборов:
 - авиагоризонт типа Vc3 и VcBC,
 - директорные планки 2-х видов,
 - индикация заданных значений автопилота или ОПР,
 - индикация произвольного кол-ва численных параметров.
- ✓ Сохранение установок в файлах начальных настроек.

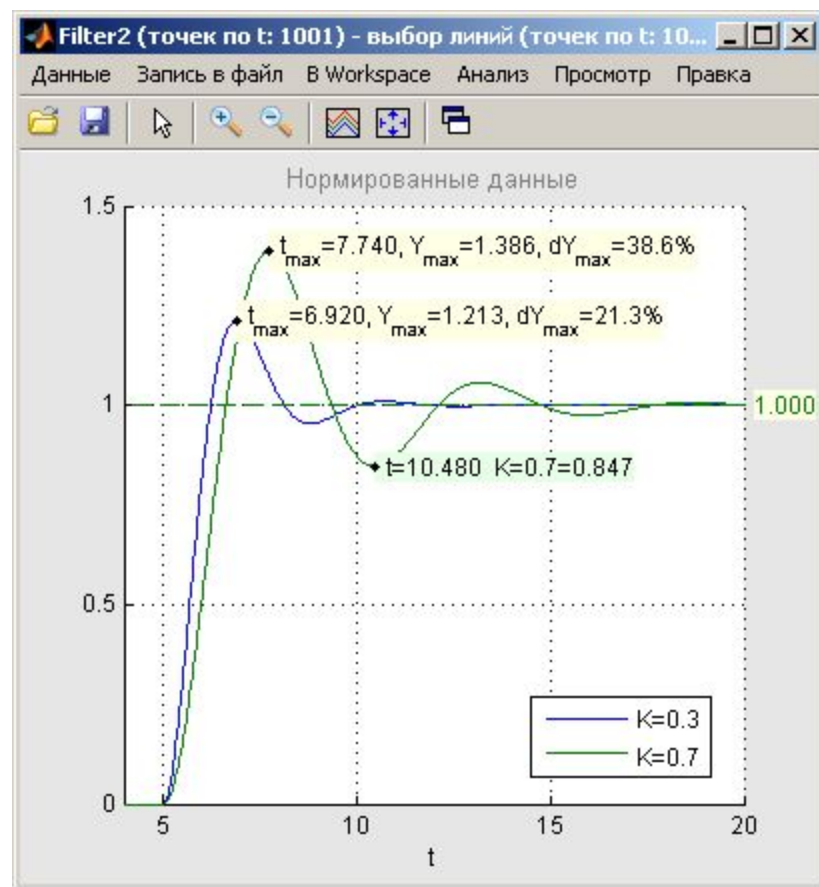


Запись в различных сеансах моделирования



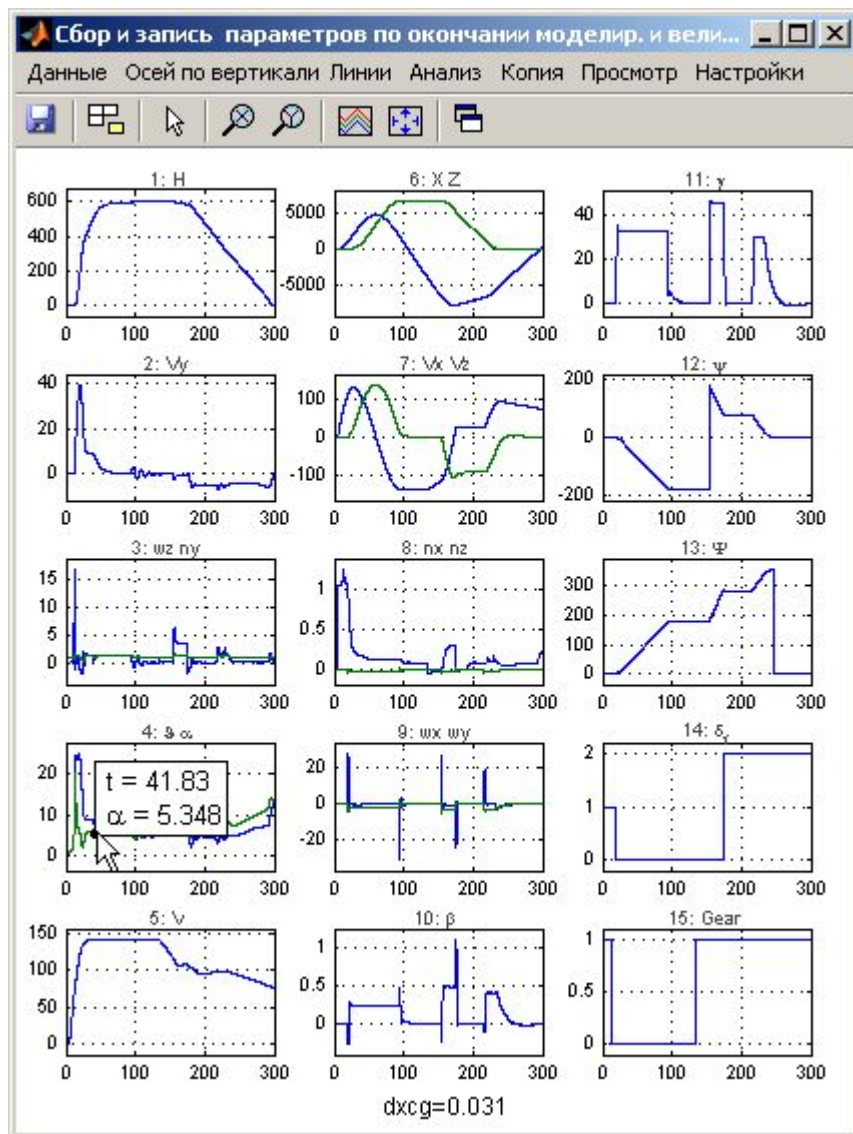
FS2010

Переходные процессы, полученные в различных сеансах моделирования (в т.ч. **программно** через цикл пусков), их последующий анализ: **view_sim_series**



44

Быстрый просмотр и запись параметров



FS2010

Большое кол-во параметров моделирования (ПК или стенд) и переменные из Workspace, запись в текстовые файлы для последующего воспроизведения и анализа (сравнения):

view_lines_from_sim
view_lines_from_txt

Editor - D:\Temp\pattern_flight.txt

File Edit Text Go Tools Debug Desktop Window Help

9 dxcg = 0.031

10

11 Формат записи данных: %16.6g

12 Количество точек по времени (t): 3001

13 Количество записанных сигналов: 21

14 Количество осей по вертикали: 5

15

16 No. столбца: 1

17 No. осей: 5

18

19 t V

20

21 0 0.1

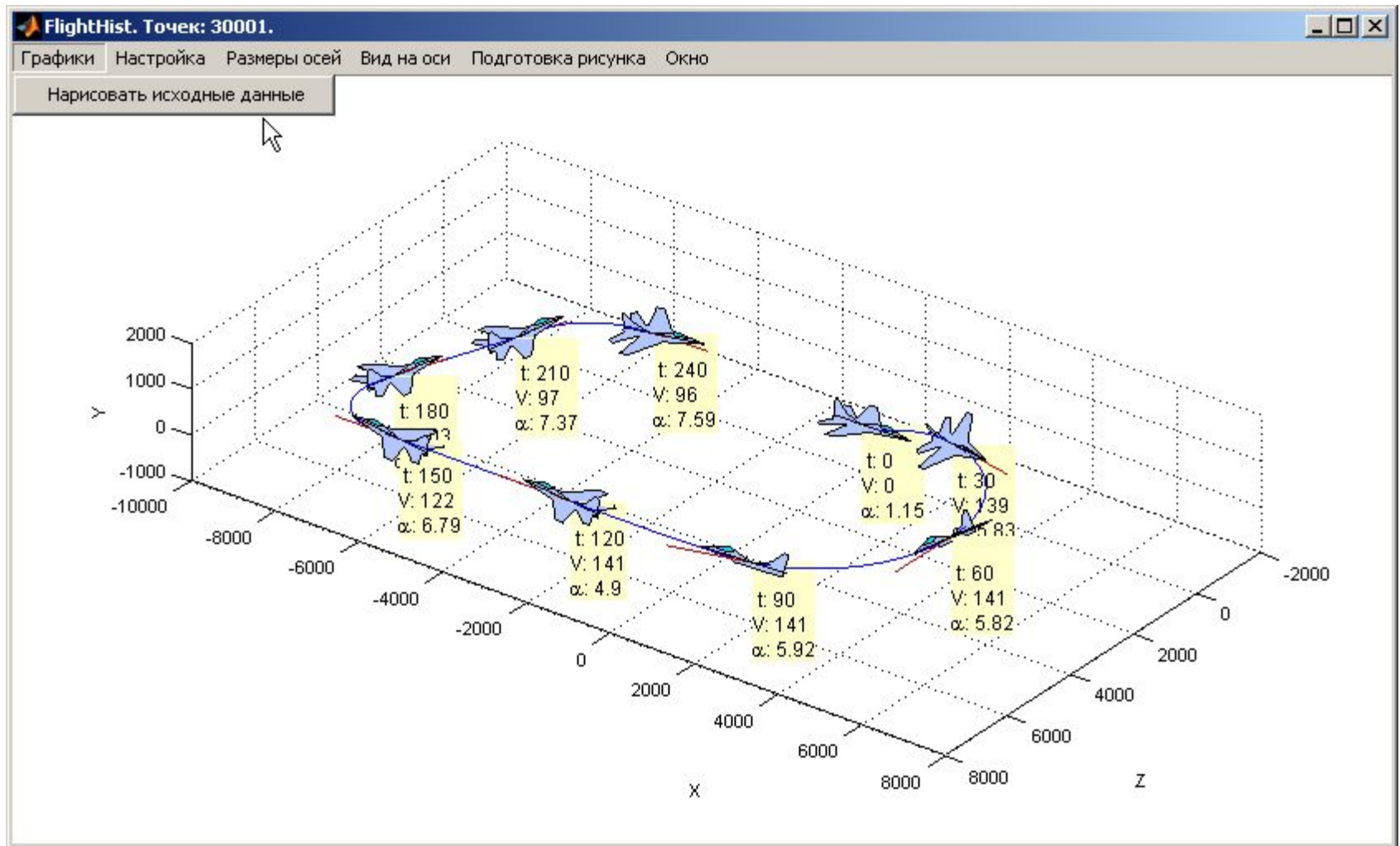
22 0.1 0.371753

23 0.2 0.623991

plain text file Ln 1 Col 1 OVR

45

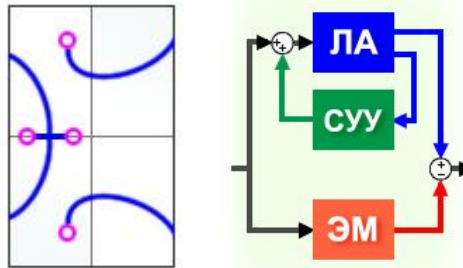
История полета



Построение картины движения по окончании моделирования: **flight_histories_from_sim**
или по записям из текстового файла используемого формата: **flight_history_from_txt**

Часть 4

Балансировка моделей самолетов. Расчет динамических характеристик.



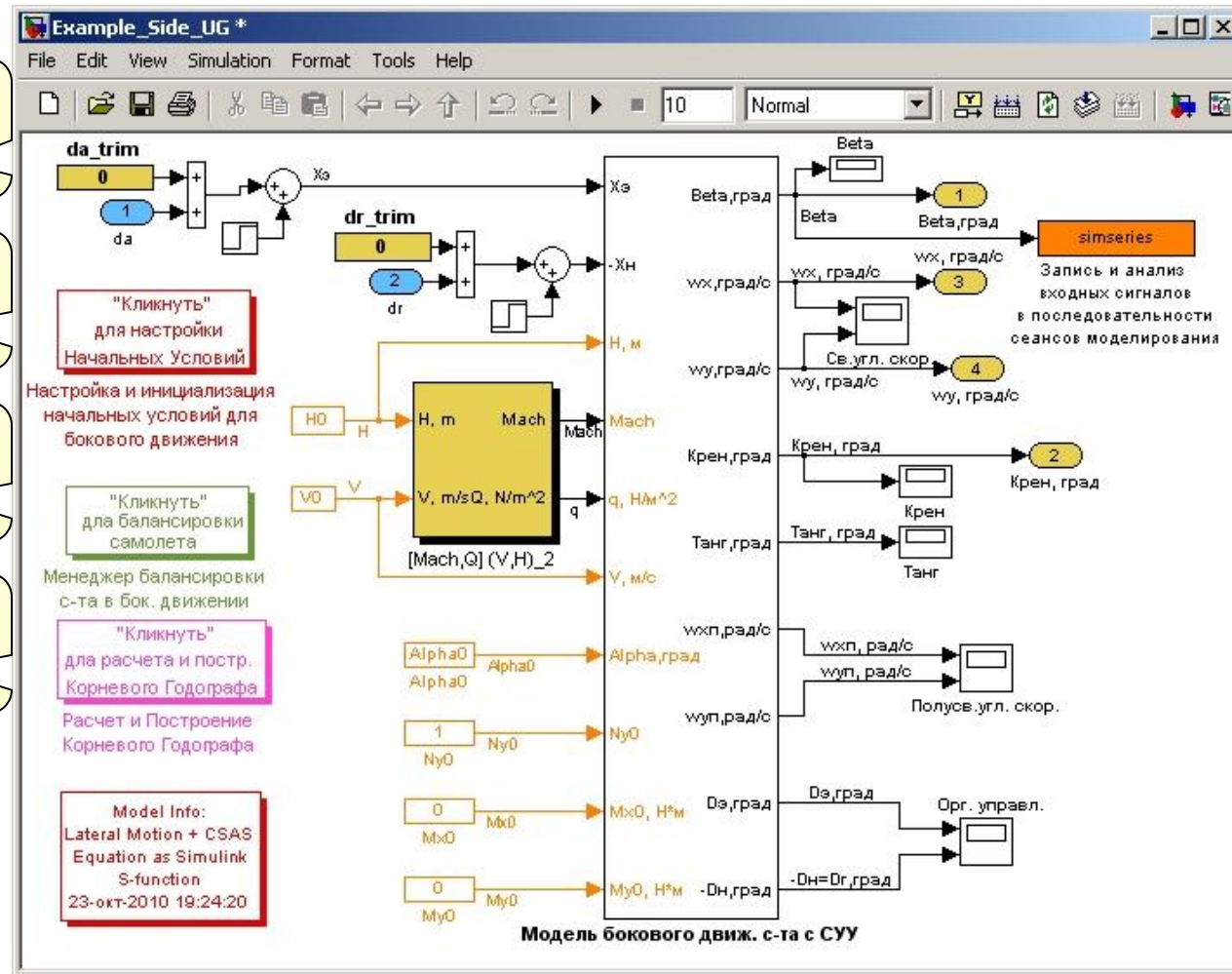
Программы FlightSim в моделях Simulink

Вычисление
частотных
характеристик

Настройка
начальных
условий

Балансировка
модели
с-та с САУ

Вычисление
корневых
годографов



Запись и
анализ
переходных
процессов

Модель бокового движения самолета с САУ

FS2010

Программы балансировки самолета

Поиск баланси́ровочных значений параметров движения и баланси́ровочных отклонений органов управления для модели самолета с нелинейными аэродинамическими характеристиками и современными сложными алгоритмами системы управления в Simulink:

- ✓ поиск балансировки в установившемся режиме полета ($V_{\text{зад}}$, $H_{\text{зад}}$, $n_{y \text{ зад}}$, $\theta_{\text{зад}}$...)
- ✓ поиск балансировки при компенсации постоянно действующих возмущающих сил и моментов
- ✓ расчет и построение баланси́ровочных характеристик при варьировании $n_{y \text{ зад}}$
- ✓ расчет и построение баланси́ровочных характеристик по области режимов полета и варьировании параметров модели (центровки,...)
- ✓ поиск балансировки для модели всего самолета с САУ или последовательно для отдельных подсистем модели (аэродинамика, система управления ...)



Все программы балансировки предназначены для моделей самолетов в Simulink с использованием блоков уравнений движения из FlightSim!

Пример: балансировка в продольном канале

Балансировочные значения

Входы модели

Блок программы

Выходы модели

The screenshot displays the 'Example3_Long_trm_UG' software interface. The top window shows a block diagram of the longitudinal channel balancing process. It includes inputs for de_trim (2.0347) and T_trim (0.1868), which are processed through a 'РУД' (Pitch Rate Derivative) block. The diagram also shows various outputs such as L, m , H, m , $Tangr, град$, $teta, град$, $V, m/c$, $Alpha, град$, $wz, град/c$, $dN_y_c_g$, n_x , and n_x, ny . Below the diagram is a control panel titled 'Управление балансировкой в продольном движении: Example3_Long_trm_UG'. This panel includes sections for 'Задание фиксированных условий полета' (Flight conditions), 'Результаты поиска балансировки' (Balancing search results), and 'Выходы' (Outputs). The 'Задание фиксированных условий полета' section contains input fields for speed (V_0 in m/s), altitude (H_0 in m), and trajectory angle (in degrees). The 'Результаты поиска балансировки' section shows a table of parameters, including initial and balanced values for $U1$ (pitch control), $U2$ (pitch rate control), and $Alpha$. The 'Выходы' section displays the final balanced values for $Alpha, deg$, De, deg , $РУД$, $dN_y_c_g$, n_x , $teta, град$, and $wz, град/c$. The interface also includes buttons for 'Получить' (Get), 'Балансировать всё' (Balance all), 'Балансировать остаток' (Balance remainder), 'Сохранить установки' (Save settings), 'Обновить нач. значения' (Update initial values), 'Начать поиск' (Start search), 'Последов. поиск (остат)' (Sequential search (remainder)), 'Последов. поиск (всё)' (Sequential search (all)), 'Освободить модель' (Free model), 'Установить X0' (Set X0), 'Балансировать модель' (Balance model), and 'Выход' (Exit).

Задание фиксированных условий полета

Значение скорости V_0 в м/с: 176

Значение высоты H_0 в м: 1900

Значение угла наклона траектории в град: 0

Значение приращения перегрузки $dny_зад$: 0

Сохранять тягу горизонтального полета при $dny=0$: ☒

Значение параметра управляемости dX/dn : 0

Результаты поиска балансировки

Значения параметров:	Балансируемые параметры:	Варьируемые переменные:	Начальные значения:	Балансировочные значения:
0.0000	<input checked="" type="checkbox"/> Момент тангажа Mz/Az	$U1$ -управление тангажом <input checked="" type="checkbox"/>	0.0000	2.03467
-0.0000	<input checked="" type="checkbox"/> Касательная перегрузка n_x	$U2$ -управление тягой <input checked="" type="checkbox"/>	0.0000	0.08680
0.0000	<input checked="" type="checkbox"/> Нормальная перегрузка dny	$Alpha$ <input checked="" type="checkbox"/>	0	3.65044

Выходы

$Alpha, deg$: 3.6504

De, deg : 2.0347

$РУД$: 0.1868

$dN_y_c_g$: 0.0000

n_x : -0.0000

$teta, град$: 0.0000

$wz, град/c$: 0.0000

Расчет и анализ динамических характеристик

- ✓ Расчет и построение частотных характеристик
- ✓ Прямое измерение частотных характеристик с помощью виртуального анализатора частотных характеристик
- ✓ Расчет и построение корневых годографов
- ✓ Построение и анализ переходных процессов
- ✓ Расчет статистических характеристик (в том числе спектральных плотностей) при действии мелкомасштабной турбулентности
- ✓ Генерирование реализаций случайного ветра по моделям Кармана и Драйдена
- ✓ Расчет статистических характеристик (в том числе спектральных плотностей) по реализации случайных сигналов

Расчет и построение частотных характеристик

Вход и выходы модели:



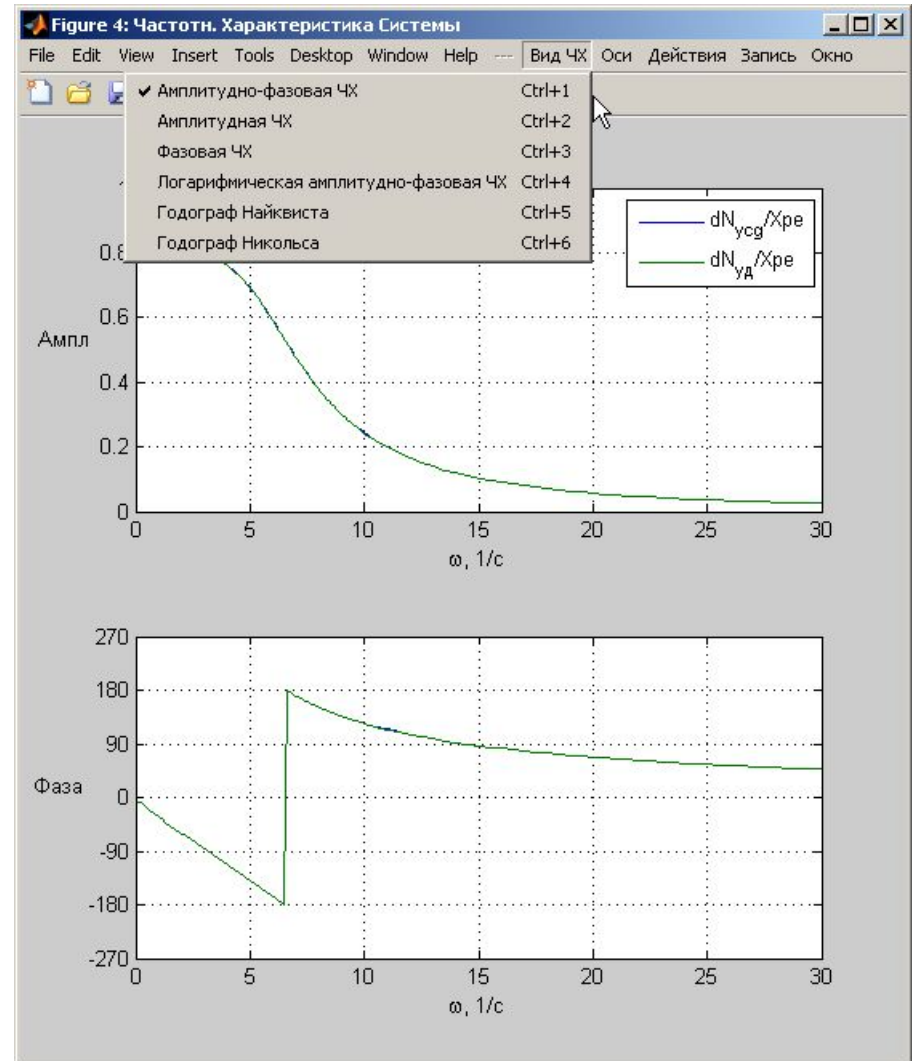
Формирование массива частот:

Параметры Настройки Диапазонов Частот ω , 1/с

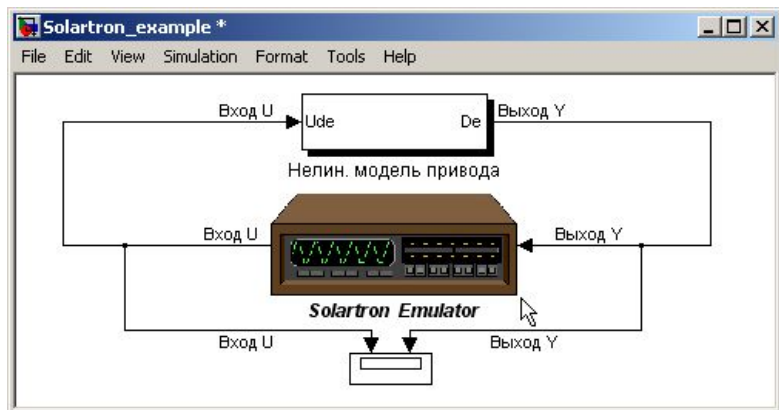
Начальная Частота	Конечная Частота	Шаг по Частоте
0.1	10	0.1
10	30	0.5

Добавить Диапазон Исключить Диапазон

OK OK/Save Save Cancel



Измерение частотных характеристик



Анализатор Частотных Характеристик

Параметры времени измерения

	$f < 0.1$ Hz	$f < 1$ Hz	$f \geq 1$ Hz
Число периодов установ.	4	10	20
Число периодов измерений	4	10	20

Сохранить числа

Установка амплитуды входного сигнала

Массив амплитуд входного сигнала: 1 0.5 0.2 0.1 0.05 0.03

Сохранить массив

Течение процесса измерения

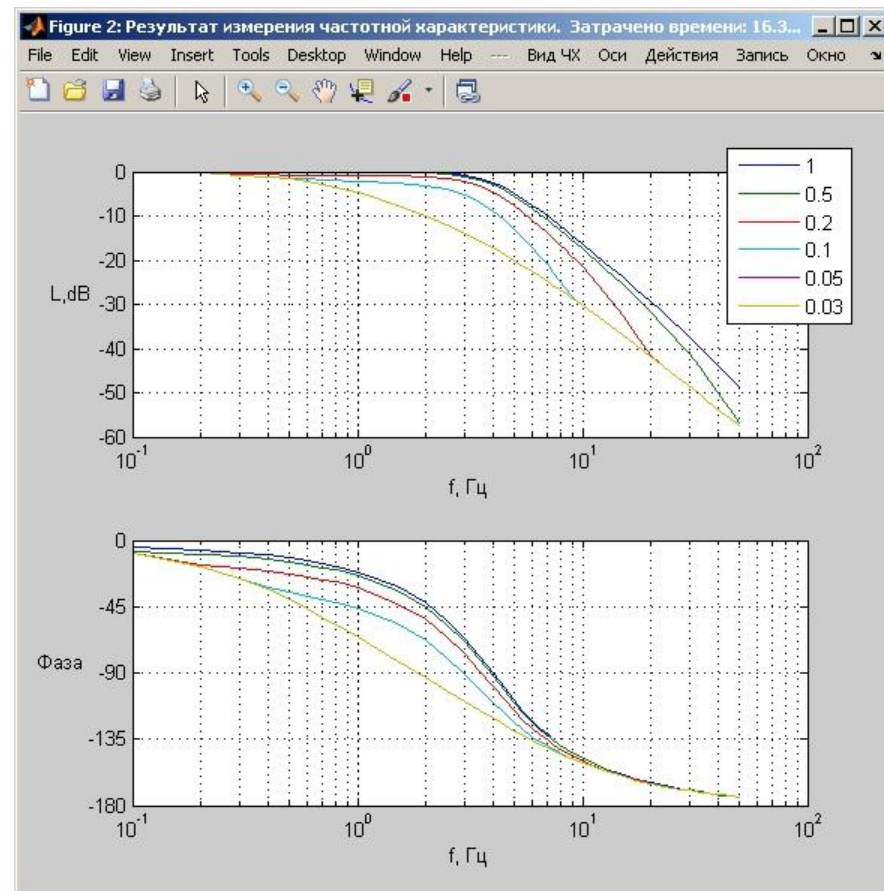
Текущая амплитуда: 0.1 Текущая частота: 0.3

☐ Замкнутая система

Запуск Остановка Выход

FS2010

Виртуальный анализатор частотных характеристик



53

Расчет и построение корневых годографов

Варьирование коэффициента усиления в модели Simulink или параметра в Workspace:

"Кликнуть"
для расчета и постр.
Корневого Годографа

Корневой годограф
при варьировании
параметра

"Кликнуть"
для расчета и постр.
Корневого Годографа

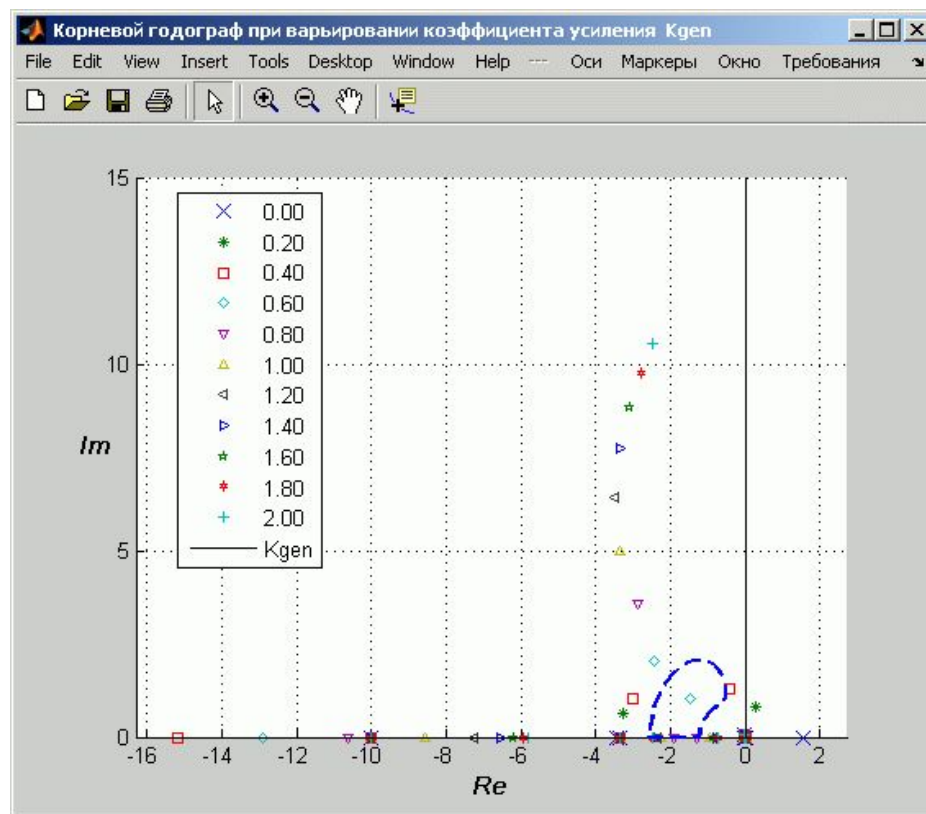
Корневой годограф
при варьировании
коэффициента усилен.

Диапазоны Вариации Параметра Kgen

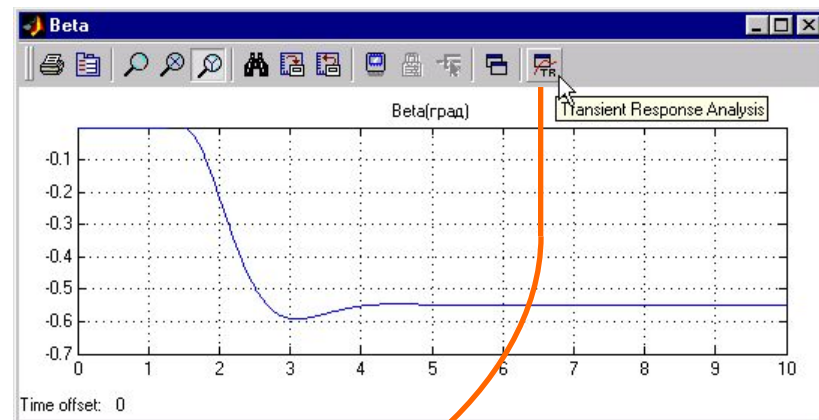
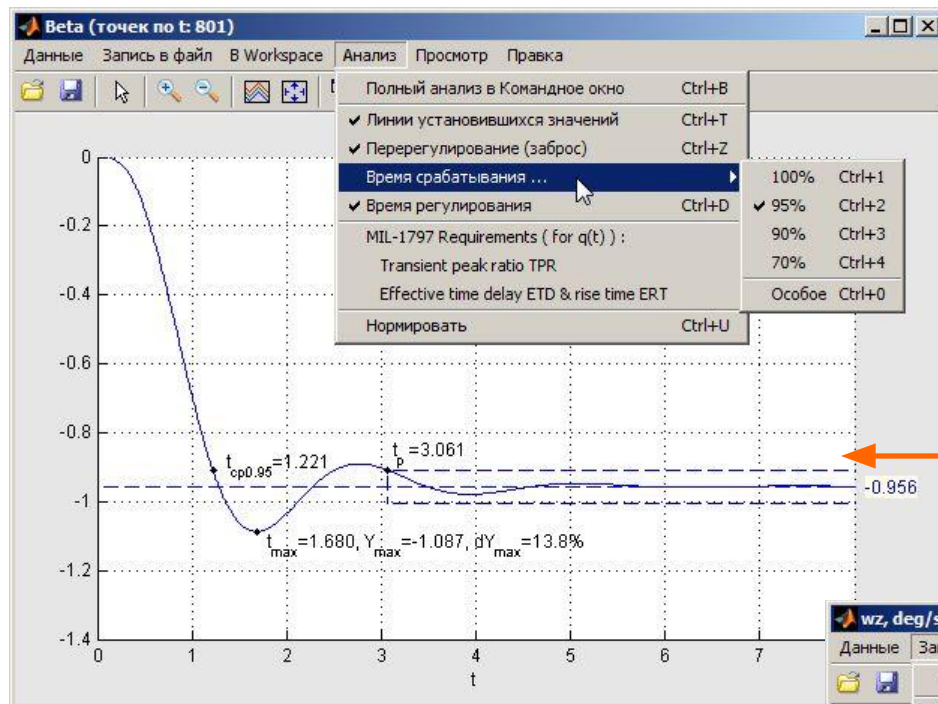
Начальный Kgen	Конечный Kgen	Шаг по Kgen
0	2	0.1

Добавить Диапазон Исключить Диапазон

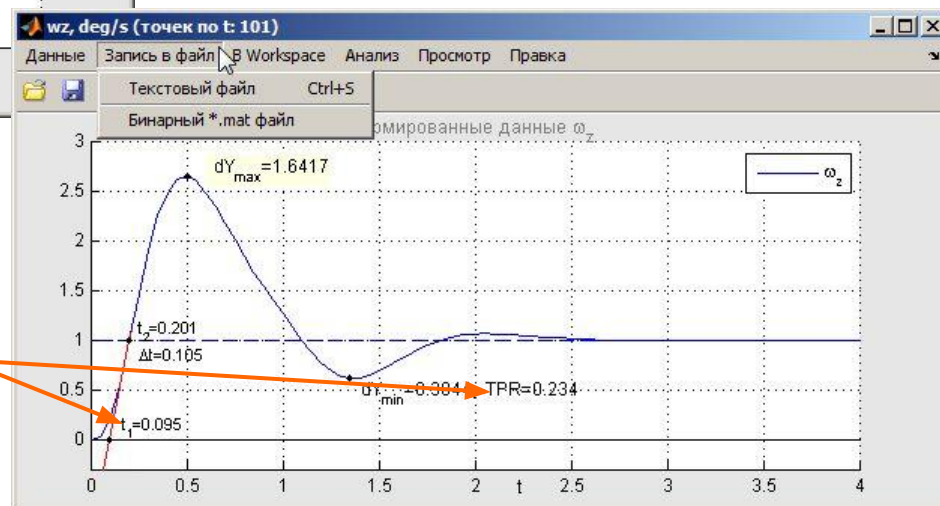
OK OK/Save Save Cancel



Анализ переходных процессов



Расчет показателей качества переходных процессов по классическим критериям и критериям стандарта MIL-1797



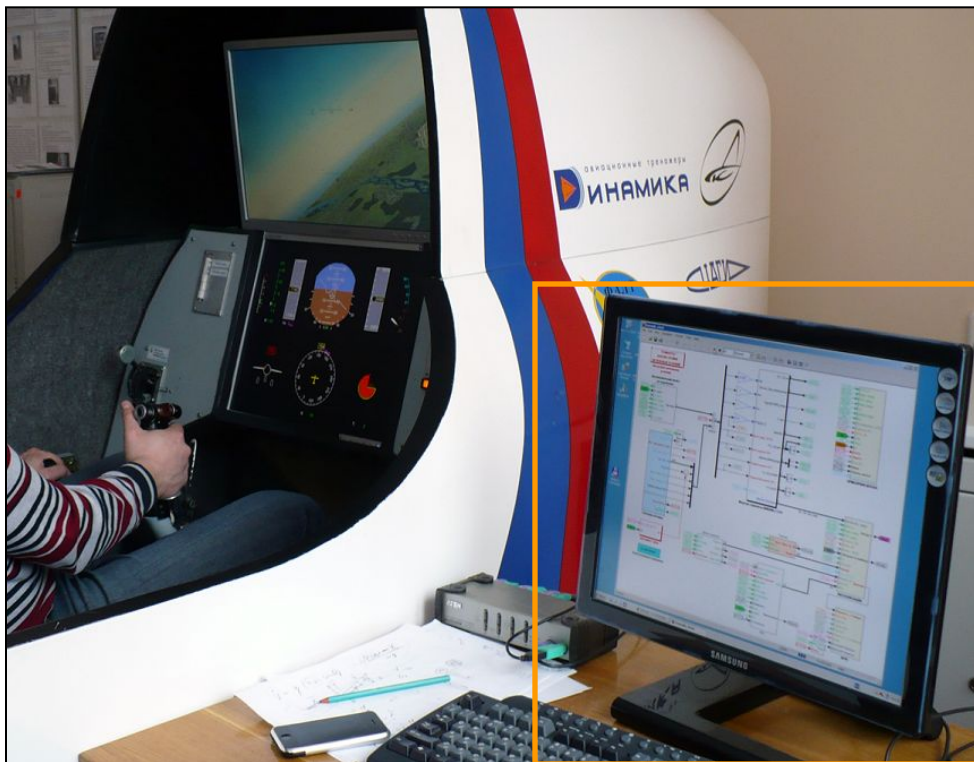
Часть 5

Применение FlightSim на пилотажных стендах и тренажерах



Примеры пилотажных стендов с FlightSim

Учебно-исследовательский пилотажный стенд



Вычислитель модели самолета
(MATLAB/Simulink, FlightSim)

Стенд ПСПК-102



Пилотажные стенды и тренажеры: структура

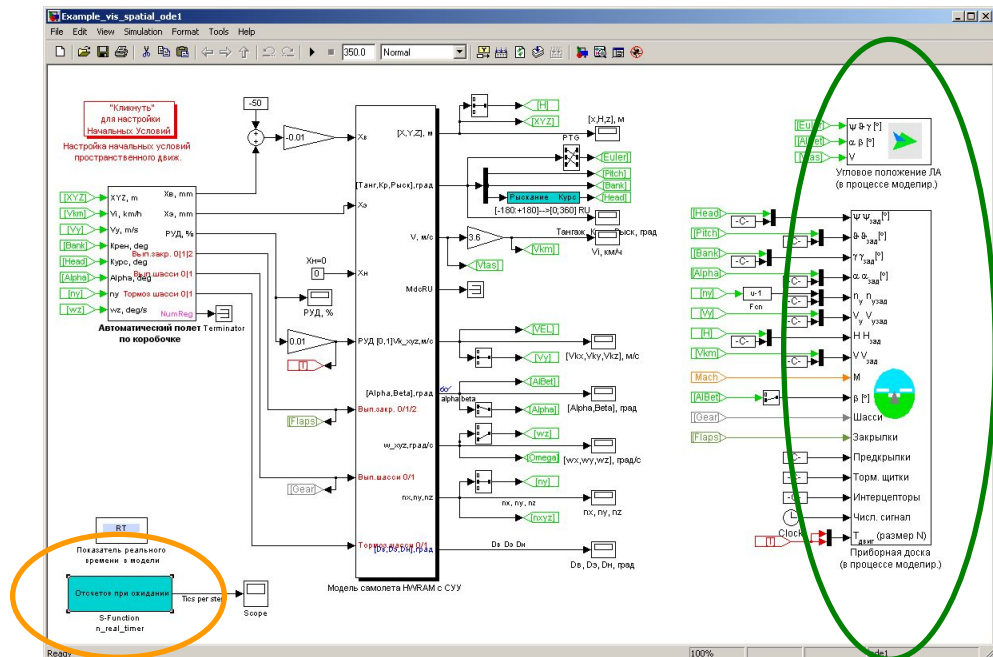


Блоки реального времени для Simulink

S-функции синхронизации с “реальным” временем Windows для моделей с фиксированным размером шага моделирования в Simulink:

- ✓ моделирование как на ПК, так и на пилотажных стендах:
real_timer – для решателя методом Эйлера 1-го порядка
x_real_timer – для произвольного решателя

- ✓ подключение к модели на ПК средств визуализации движения (**встроенная графика** и/или **виртуальная реальность**):
n_real_timer



Часть 6

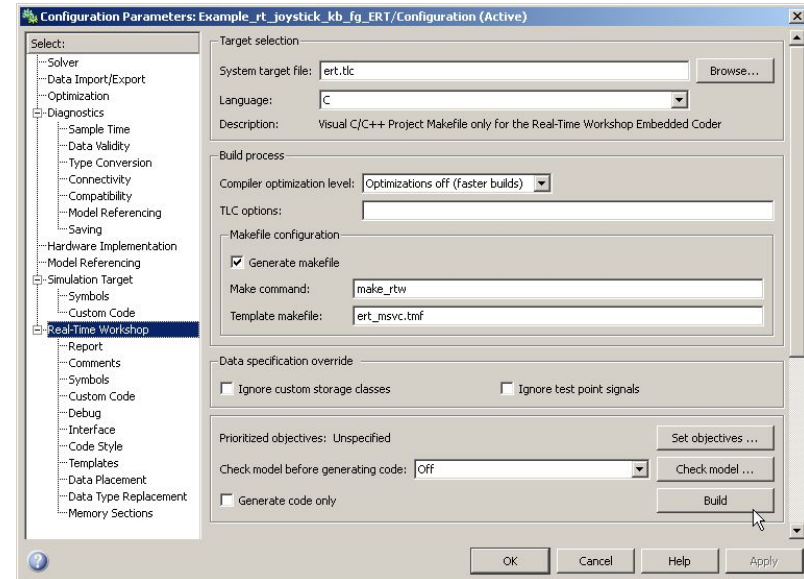
Создание независимых приложений из моделей Simulink



Пакеты расширения MATLAB

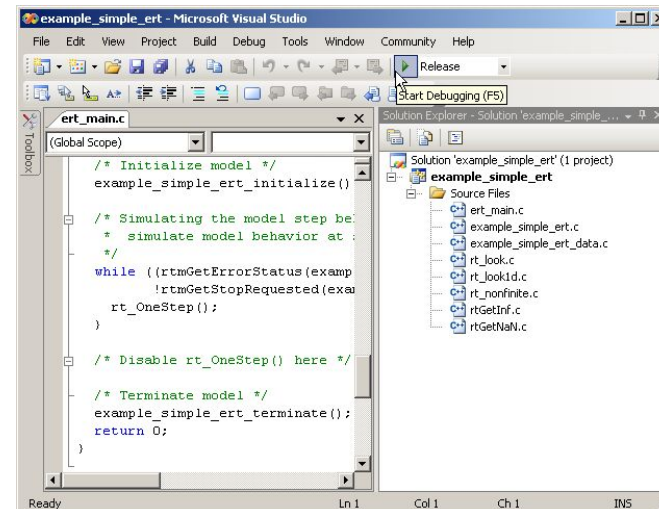
Для автоматического создания С-кода и независимых приложений из модели Simulink применяются пакеты расширения MATLAB:

- а) Real-Time Workshop
- б) Real-Time Workshop Embedded Coder



Возможности:

- ✓ дискретные и непрерывные блоки;
- ✓ S-функции пользователя (требуется их исходный код);
- ✓ запись в бинарные mat-файлы;
- ✓ “бесконечное” время моделирования.

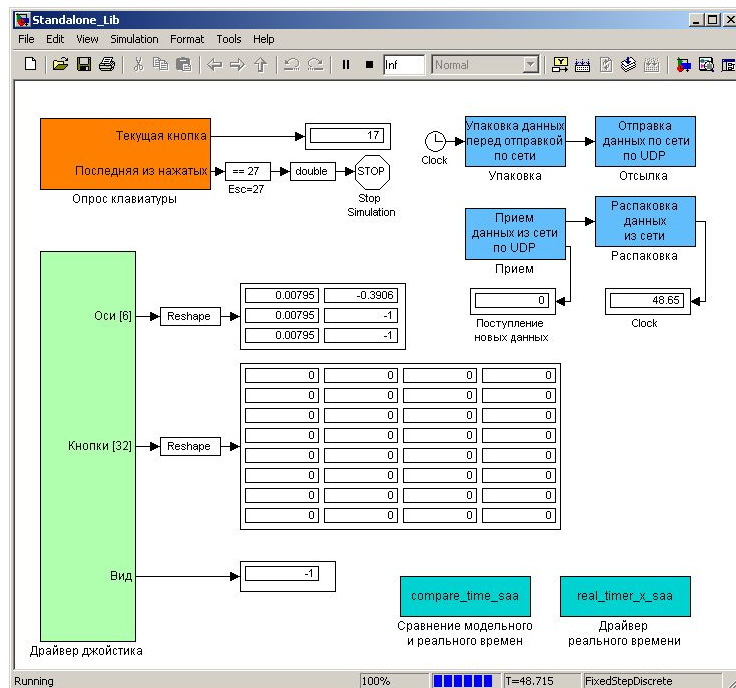


Библиотека блоков для создания НП

Универсальные блоки:

а) обычные S-функции в Simulink

б) C-код для создания независимых приложений



Обмен с FlightGear, FlightInd и другим ПО



1. Сетевой обмен по UDP (на базе xPC Target)
2. Сравнение и синхронизация с реальным временем
3. Прием сигналов стандартной клавиатуры и джойстика

Создание консольного приложения (exe)



RTW, RTW EC:
исходные коды +
независимое
приложение в
“реальном” времени
Windows

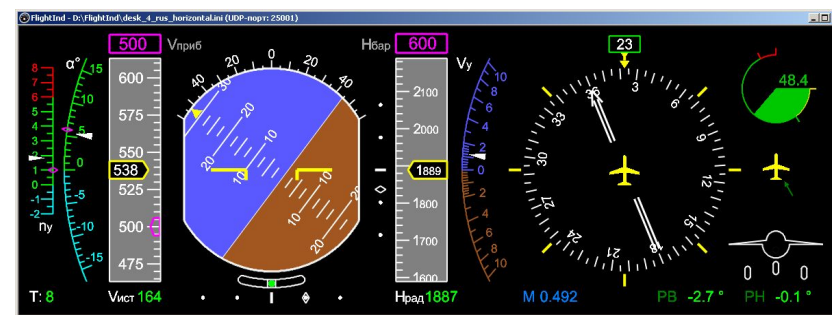
```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
D:\Temp\standalone>fly

RT: Simulation started:      18:36:41
RT: Simulation finished:    18:37:34
Synchronization summary:
Waiting loop failures:      53.70500000    1
Model simulation time:      53.74642002
Real time calculated:
Speed ratio calculated:     0.99922934

D:\Temp\standalone>
```



FlightGear



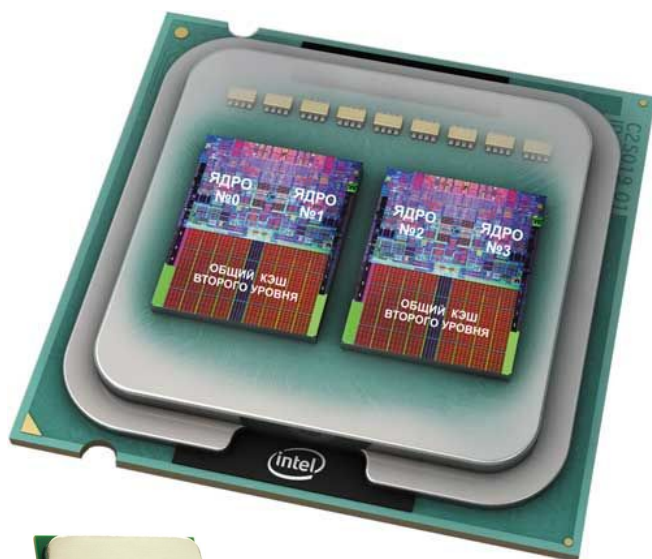
FlightInd

Распределение задач на многоядерном ПК

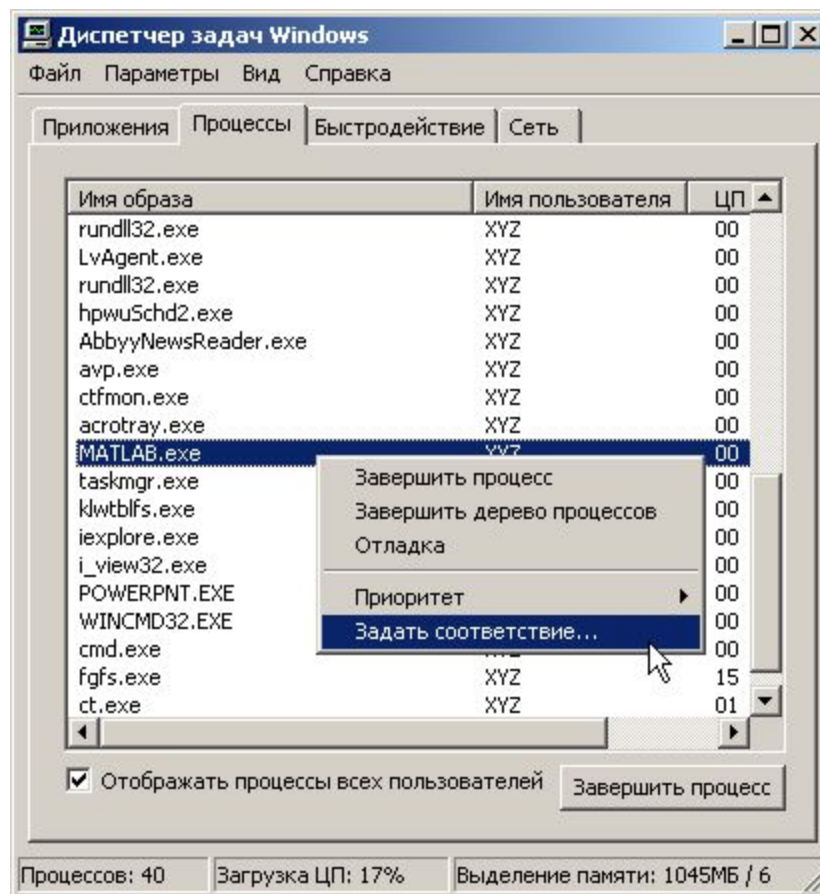
Пример распределения процессов:

CPU0: MATLAB **CPU2:** FlightGear (fgfs.exe)

CPU1: прочие **CPU3:** FlightIнд

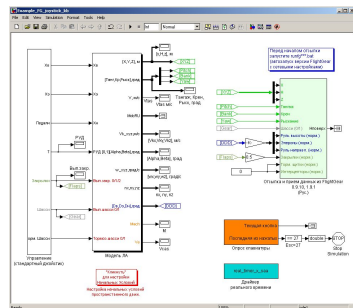


Установка распределения вручную:



Вспомогательное ПО для упрощения управления процессами: Ashampoo Core Tuner, CPU Control

Создание подключаемой библиотеки (DLL)



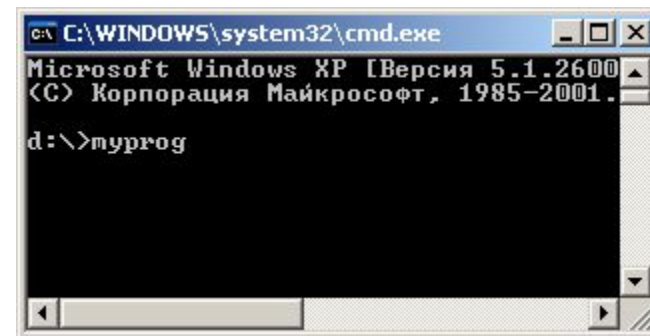
RTW EC
→

Динамическая
библиотека
(* .dll)

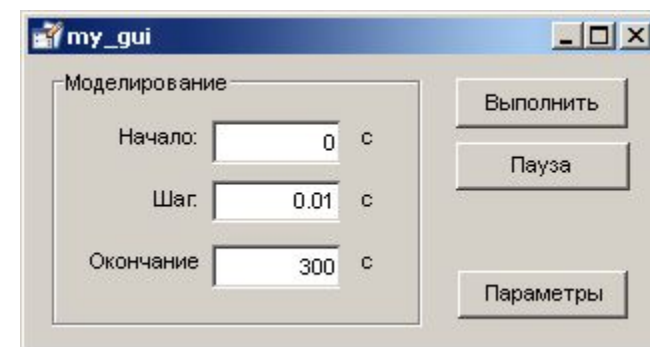


U →
← Y

Простые консольные
приложения



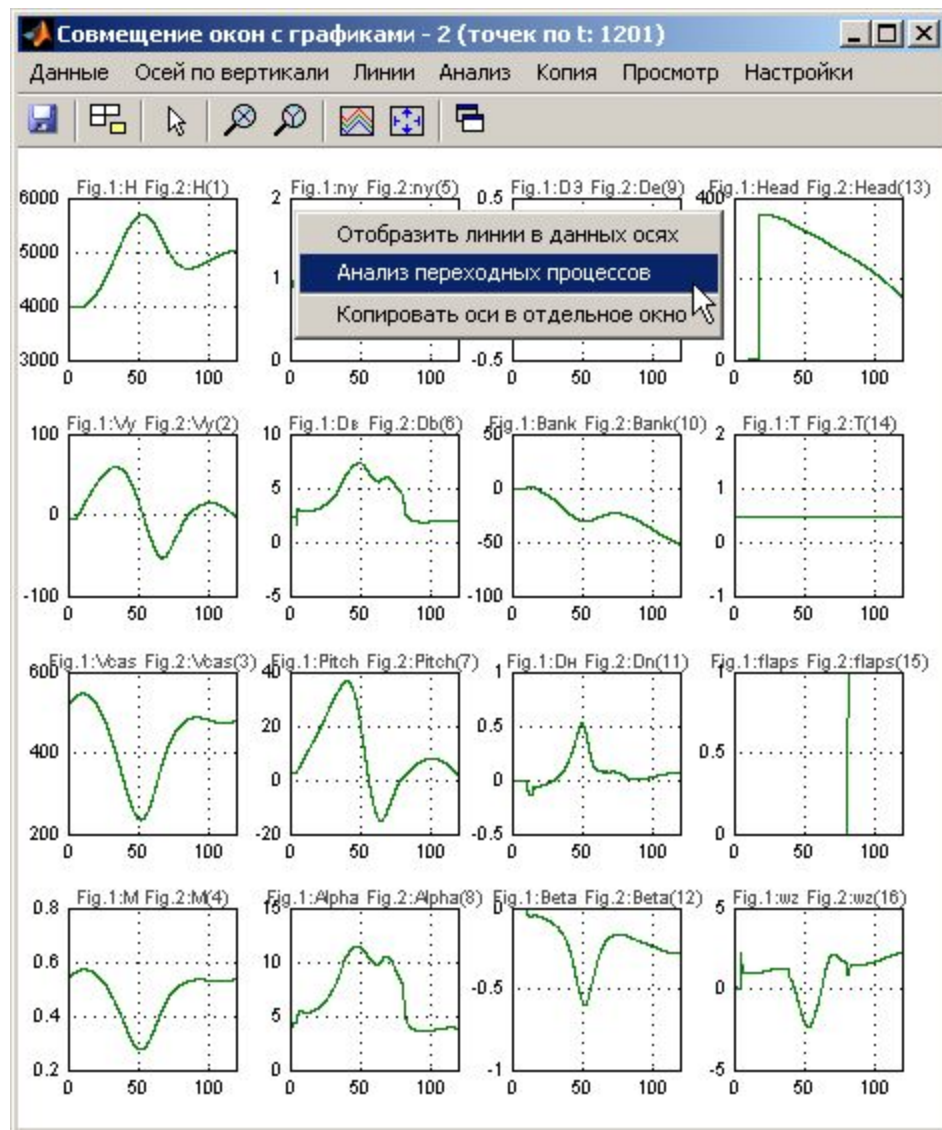
Графический интерфейс
пользователя



Модель в Simulink:
блоки арифметических
вычислений,
блоки с переменными
состояния (дискретные
и непрерывные)...

Real-Time Workshop
Embedded Coder
позволяет легко получить
DLL для моделирования
движения ЛА.

Сравнение с вычислениями в Simulink



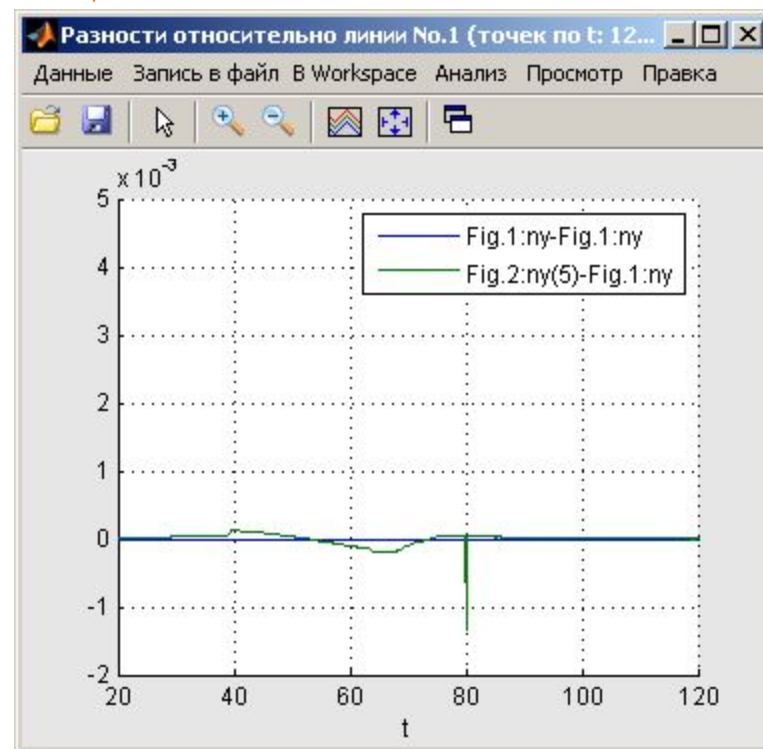
FS2010

Запись в текстовые или бинарные **mat-файлы** (RTW, RTW EC).

Просмотр и сравнение
вспомогательными
средствами FlightSim:

view_lines_from_sim (_txt)

view_lines_from_matfile



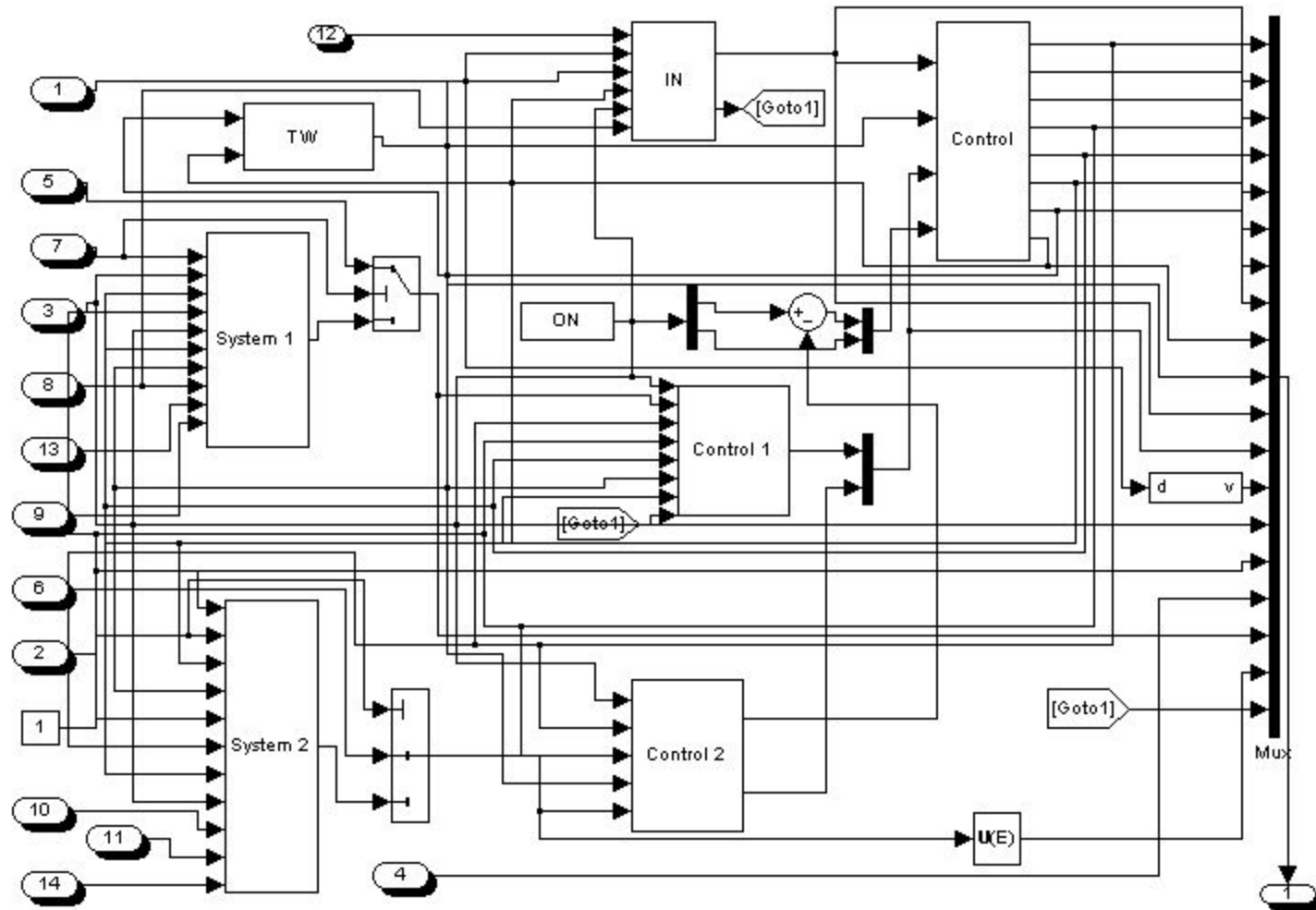
66

Часть 7

... и другие полезные мелочи



Пример неудачной сборки модели



Чрезвычайно трудно обнаружить ошибку сборки
(например, неправильное подсоединение линии)

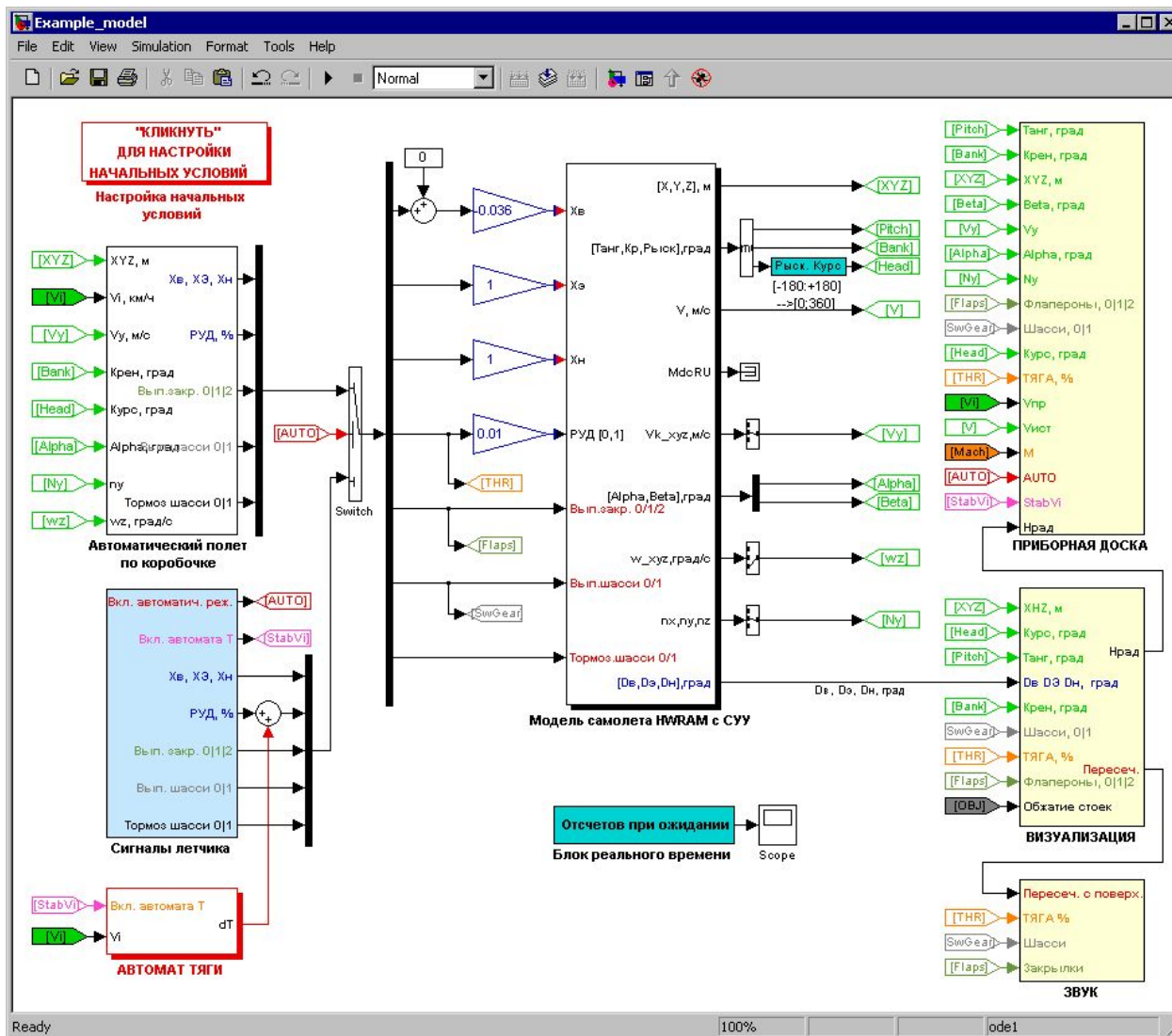
Общие требования к создаваемой модели

- ✓ Понятная структура модели, широкое использование подсистем, независимость модулей (подсистем).
- ✓ Композиция модели: экономия размеров подсистем и блоков, выравнивание блоков.
- ✓ Сокращение числа линий в модели:
 - а) векторизация: особые наборы вспомогательных блоков Mux, Demux, Selector...
 - б) блоки Goto, From ...
- ✓ Цветовое оформление блоков и линий, информативность цветов.
- ✓ Использование текстовых комментариев к формулам и т. д.
- ✓ Поиск и применение готовых элементов (библиотеки Simulink).
- ✓ Чистое Командное окно MATLAB.



Не следует экономить время на качественное оформление модели при её создании – последующие потери времени (свои и чужие) могут оказаться **намного более значительными!**

Пример модели, работающей на стенде



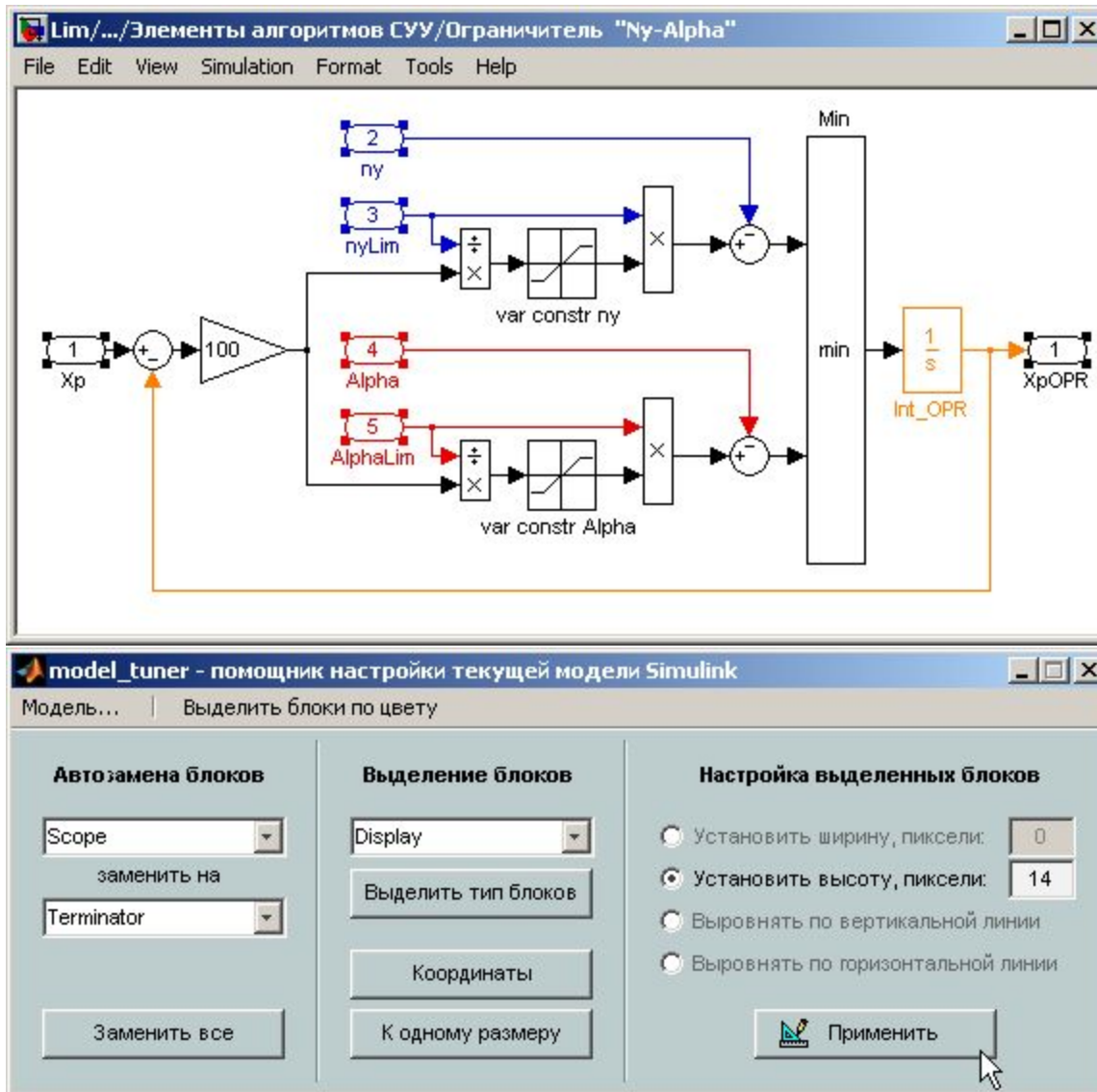
Понятная структура,
читаемый интерфейс

...

Отдельные
независимые
блоки:

- ✓ динамика самолета с системой управления
- ✓ реальное время
- ✓ сигналы летчика (прием)
- ✓ внекабинная виз. (отсылка, прием)
- ✓ приборная доска (отсылка)
- ✓ звук (отсылка)

Настройка блоков создаваемой модели

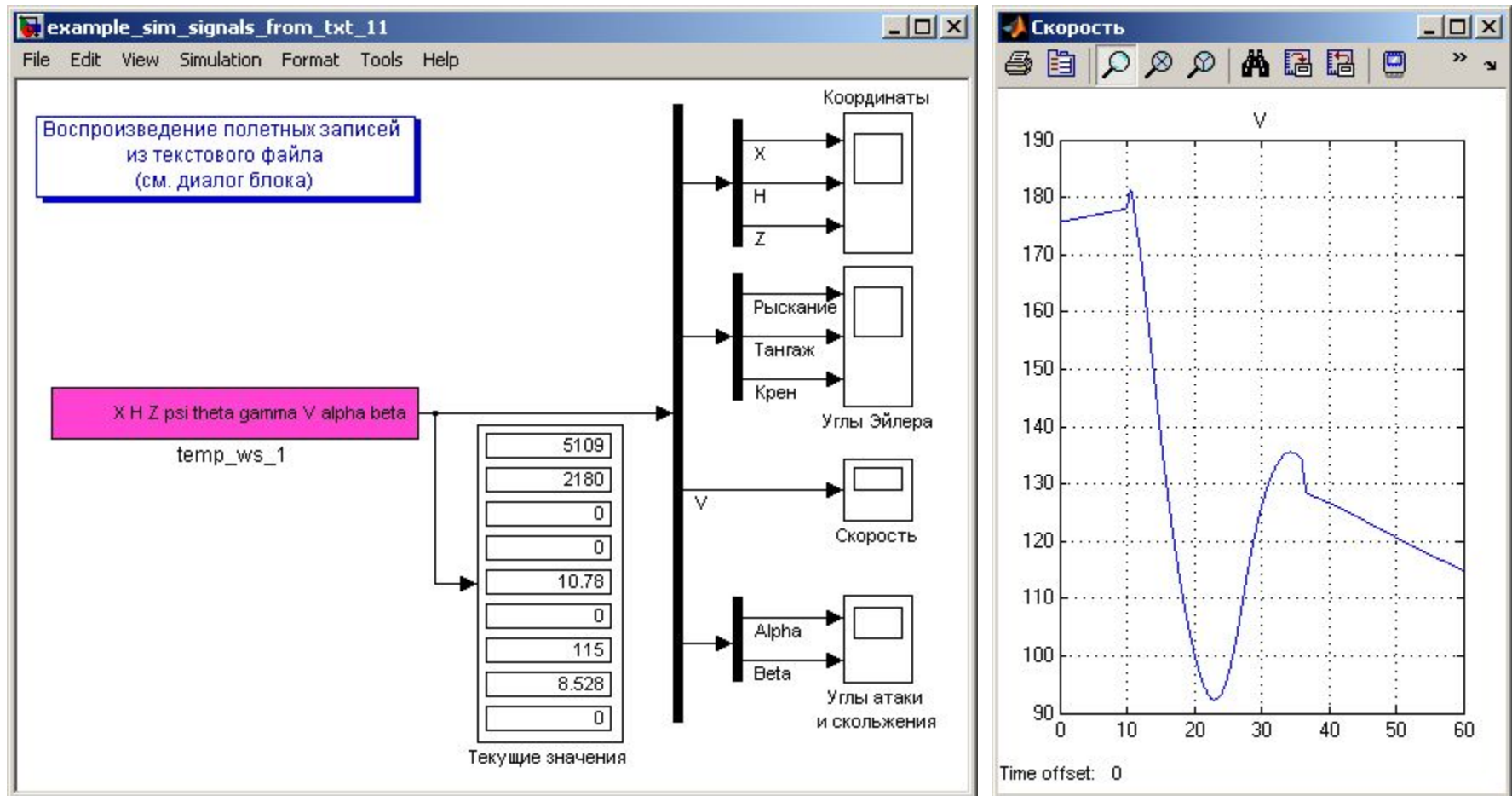


Взаимное расположение блоков, соединительных линий и т.д. на любом из вложенных уровней сложной модели Simulink **должно** быть таким, чтобы не требовалось больших усилий и времени на ее “расшифровку”.

Приведение текущего окна модели к более читаемому виду. Быстрая и легкая настройка выделенных блоков по ширине и высоте, выравнивание, задание цвета:

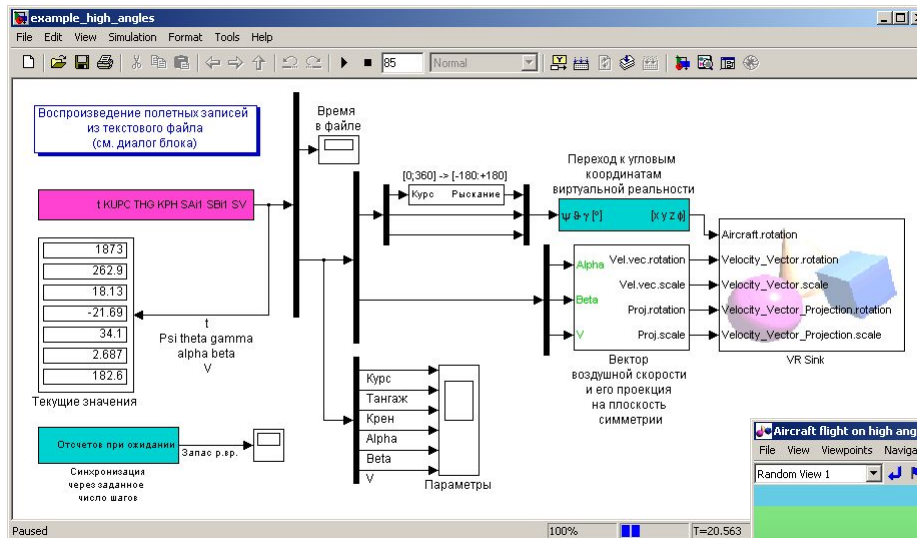
model_tuner

Воспроизведение полетных записей

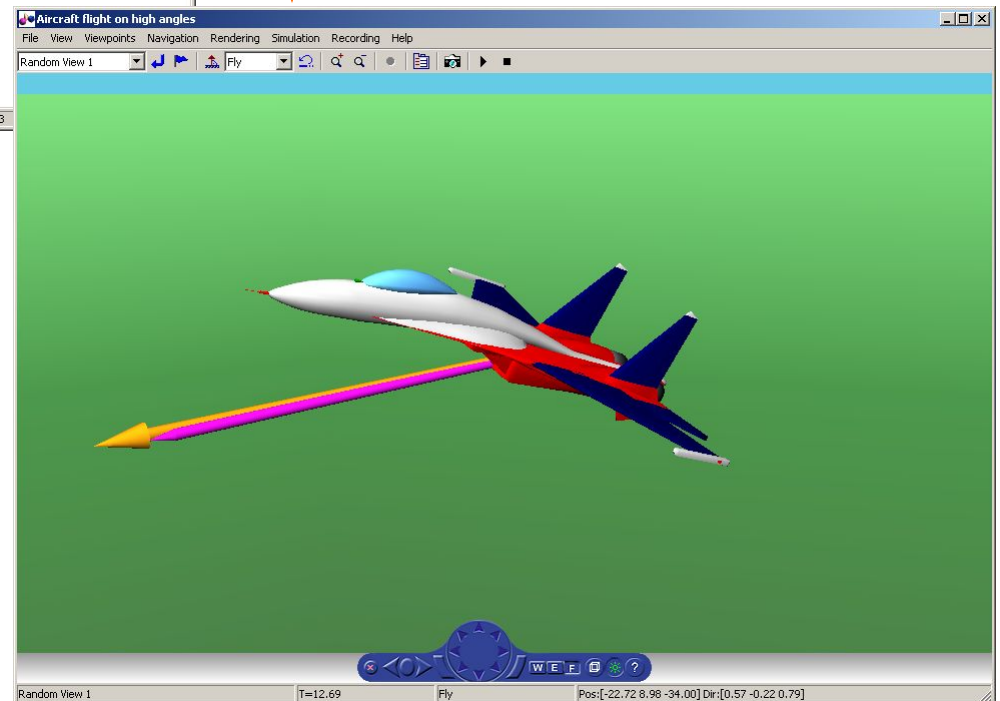


sim_signals_from_txt – воспроизведение в течение моделирования любого набора записанных параметров из текстового файла (столбцы данных по времени):
а) проверка созданной модели ЛА в Simulink по записям реальных полетов;
б) получение недостающих параметров движения.

Пример: визуализация движения по записям



Виртуальный мир:
самолет,
вектор скорости,
проекция на ось симметрии

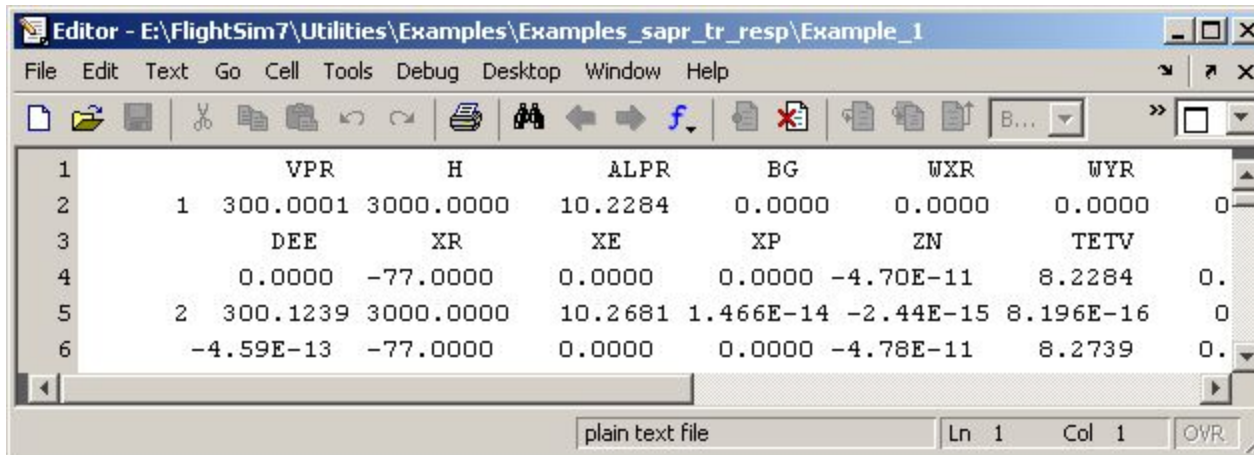


sim_signals_from_txt:

$\psi(t)$, $\theta(t)$, $\gamma(t)$,
 $\alpha(t)$, $\beta(t)$,
 $V(t)$

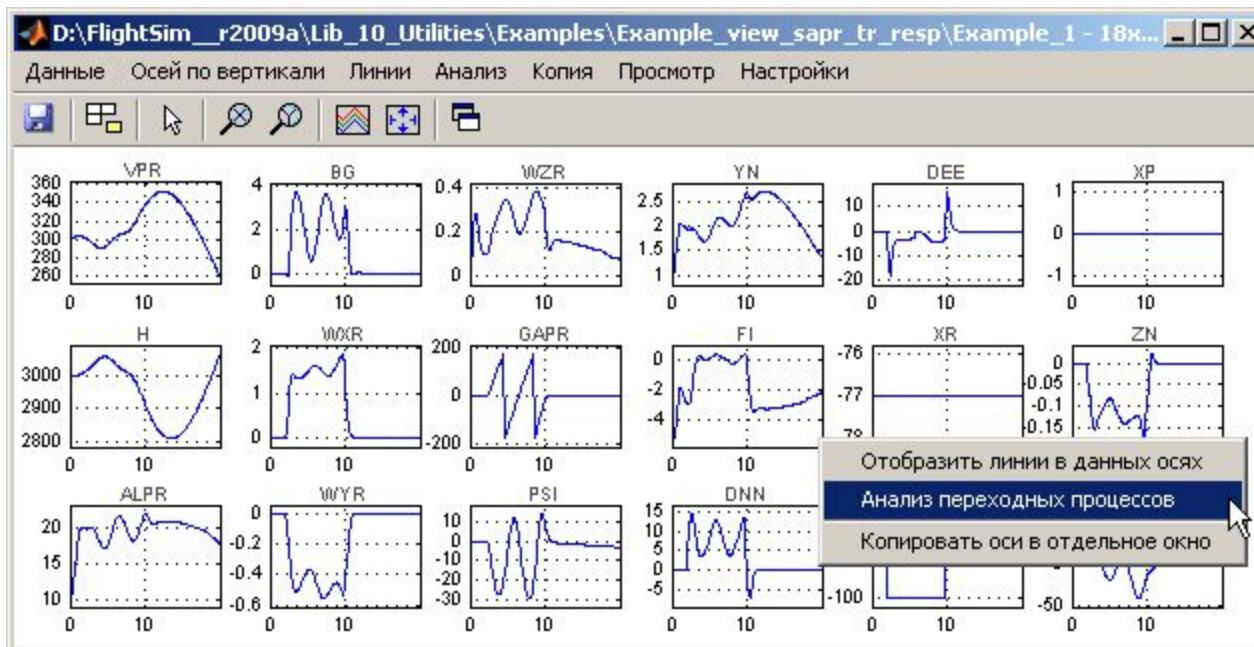
n_real_timer: моделирование
с блоками визуализации в Simulink
в “реальном” времени!

Сравнение с записями из САПР “Динамика”



Построение в MATLAB записей переходных процессов из САПР “Динамика” в виде текстового файла и графическое сравнение с записями из Simulink:

view_sapr_tr_resp

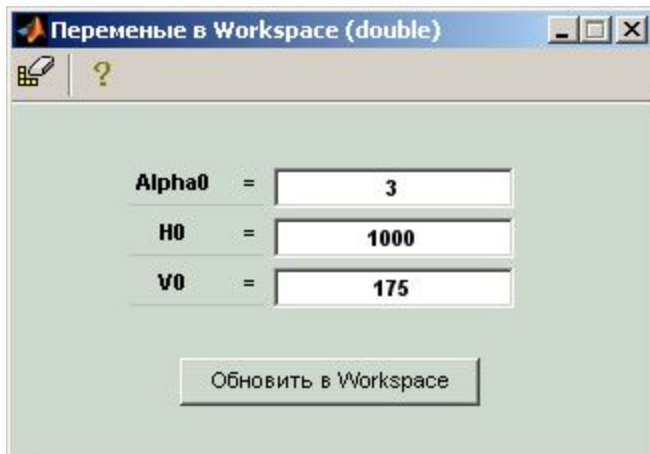


Для сравнения моделей
самолета в разных
системах моделирования.

Диалоги для работы с Workspace в Simulink

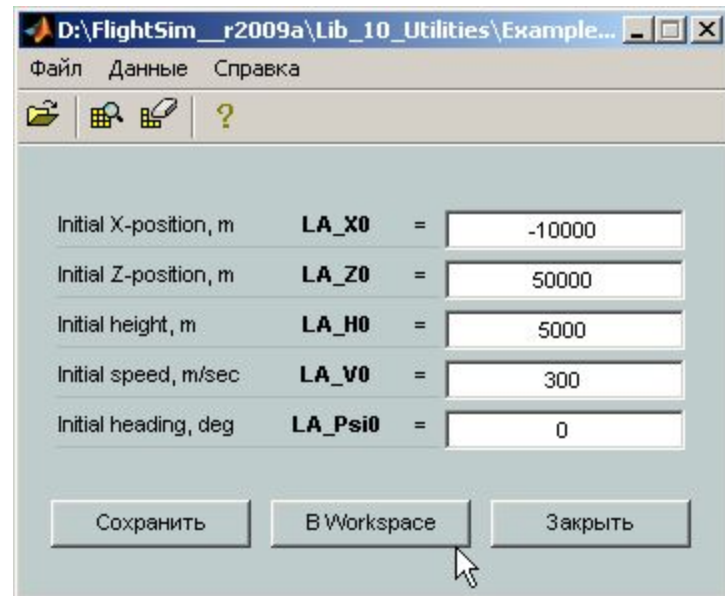
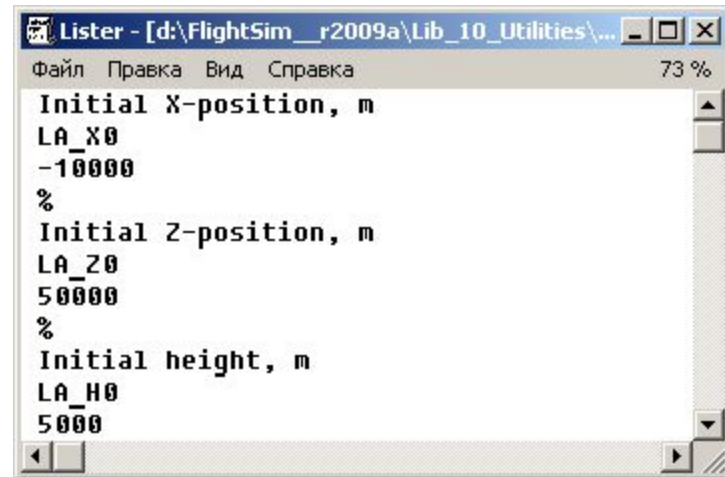
Связь вспомогательных диалоговых программ с блоками Simulink и запуск из модели:

Быстрое обновление
переменных в Workspace:
ws_var_fast_tuner



Создание и
сохранение в текстовых файлах
произвольных наборов переменных
для быстрой загрузки
в Workspace:
ws_var_from_file

FS2010

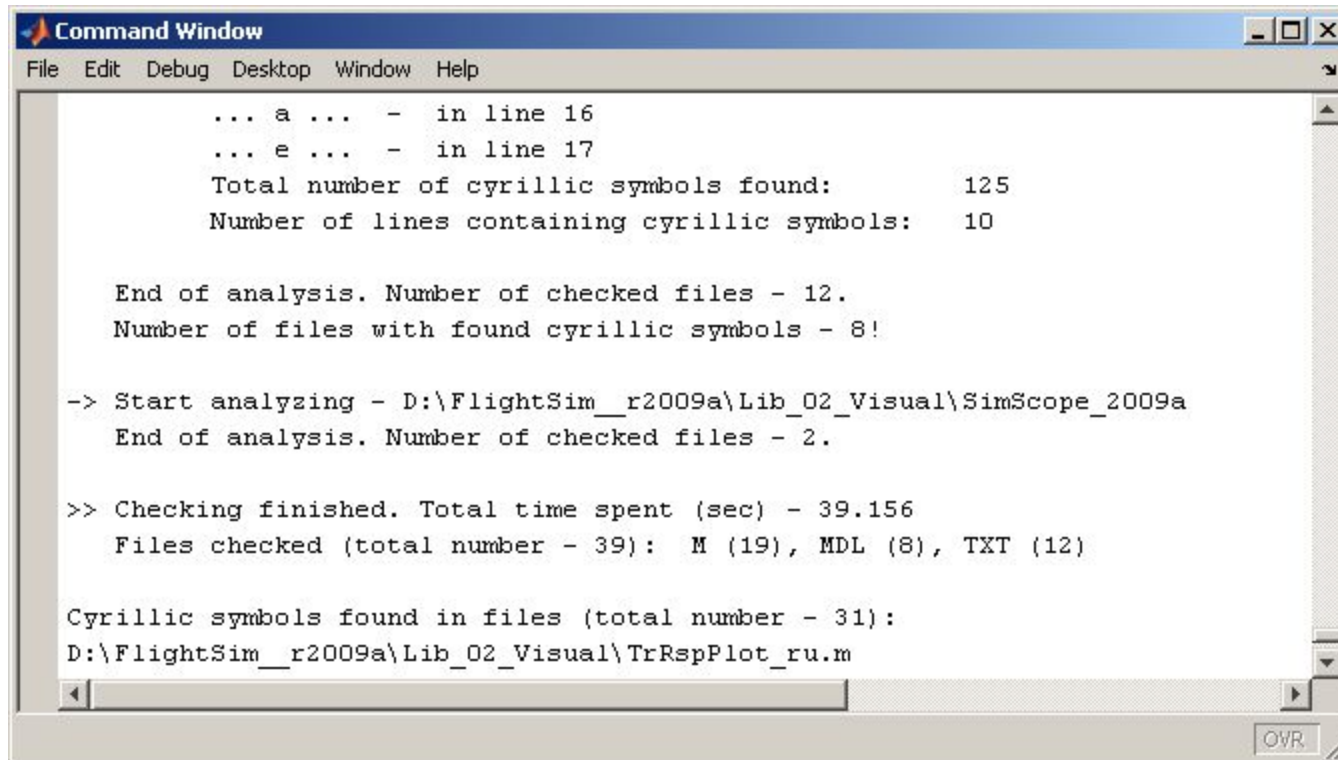


75

Проверка на наличие русских букв

folders4cyrillic – быстрая полная проверка любой папки с рабочими материалами пользователя на наличие символов русского алфавита:

- ✓ проверка файлов типа *.m, *.mdl, *.c, *.cpp, *.txt
- ✓ просмотр всех вложенных папок



```
Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help

... a ... - in line 16
... e ... - in line 17
Total number of cyrillic symbols found:      125
Number of lines containing cyrillic symbols:  10

End of analysis. Number of checked files - 12.
Number of files with found cyrillic symbols - 8!

-> Start analyzing - D:\FlightSim_r2009a\Lib_02_Visual\SimScope_2009a
End of analysis. Number of checked files - 2.

>> Checking finished. Total time spent (sec) - 39.156
Files checked (total number - 39):  M (19), MDL (8), TXT (12)

Cyrillic symbols found in files (total number - 31):
D:\FlightSim_r2009a\Lib_02_Visual\TrRspPlot_ru.m

OVR
```

Заключение

Программный комплекс FlightSim в настоящее время является основным программным средством при отработке характеристик устойчивости и управляемости перспективных самолетов и синтезе их систем управления в НИО-15 ЦАГИ.

Комплекс используется также в ряде ОКБ авиационной промышленности и авиационных вузов России и за рубежом.

Применение FlightSim позволяет существенно повысить эффективность исследований динамики и систем управления современных самолетов, сократить сроки и трудоемкость их проведения.

Проведенные с использованием данного комплекса исследования динамики и систем управления различных самолетов показали его высокую эффективность, надежность и удобство использования.

Модели, созданные с применением FlightSim



SSJ-100



MC-21



Ту-334



Ил-112



Ил-114



Ил-38



Ил-76



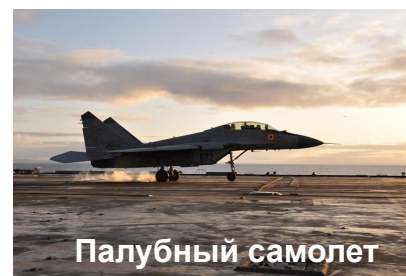
Ил-86



Ил-96



Бе-200



Палубный самолет

Спасибо за внимание!

