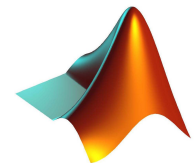


FlightSim

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

FS2010

1



MATLAB R2009a

Введение

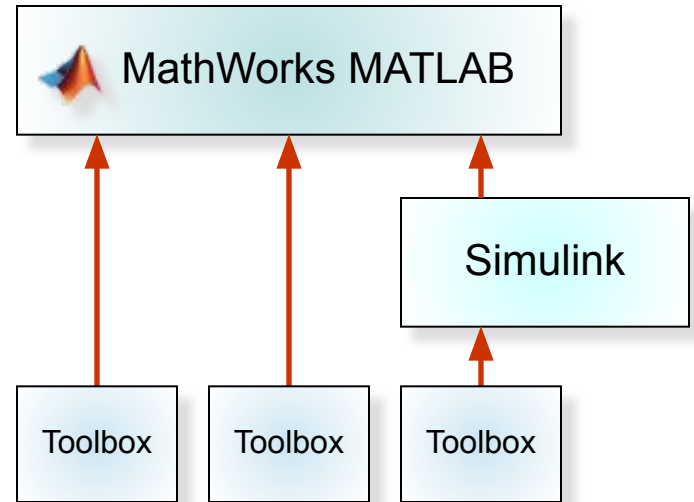
Что такое **MATLAB**, **Simulink**,
пакеты расширения (toolbox),
FlightSim



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

Запуск Simulink

Рабочая область Workspace

Рабочая папка

Командное ОКНО

MATLAB 7.3.0 (R2006b)

File Edit View Graphics Debug Desktop Window Help

C:\Program Files\MATLAB\R2006b\work

Shortcuts How to Add What's New

Name	Value
a	[2 -3 5]
angle	-56.895
b	[-3 7 -12]

```
>> a=[2 -3 5];  
>> b=[-3 7 -12];  
>> angle=(180/pi)*(a*b')/(sqrt(a*a')*sqrt(b*b'))  
  
angle =  
  
-56.8950  
  
>>
```

Current Directory - ...ork

All Files

- datatypes.mdl
- mod_lti.mdl

Command History Current Directory

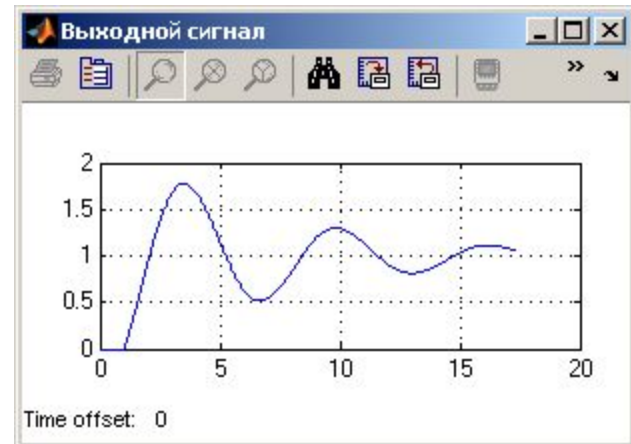
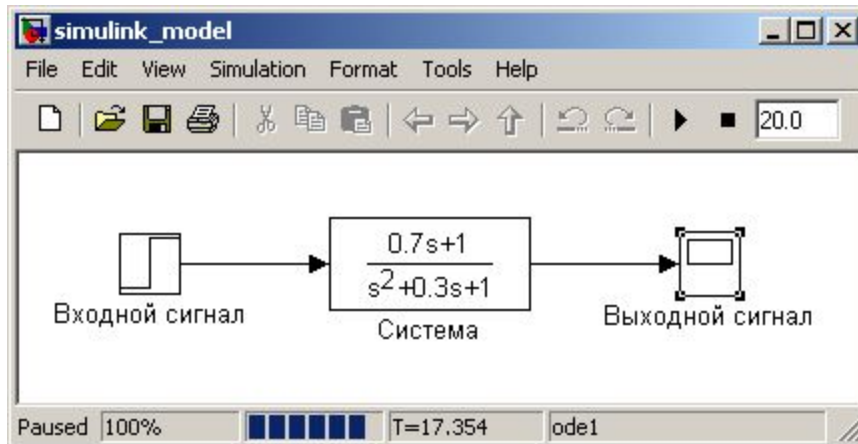
Start

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!

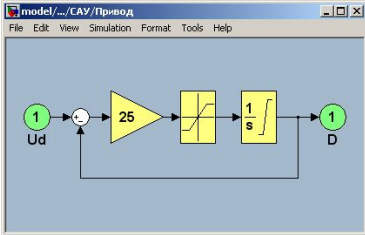
Что такое Simulink?

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

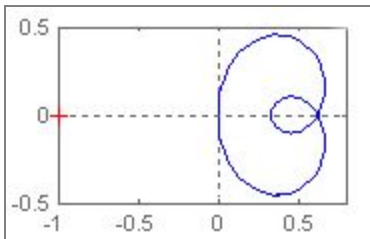
- ✓ обширная библиотека стандартных элементов (блоков) для сборки моделей
- ✓ возможность создания собственных стандартных элементов с диалогами настройки
- ✓ возможность использования блоков, написанных на языках MATLAB, C++, Fortran, ADA (S-функции для Simulink)
- ✓ легкость обмена блоками и моделями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



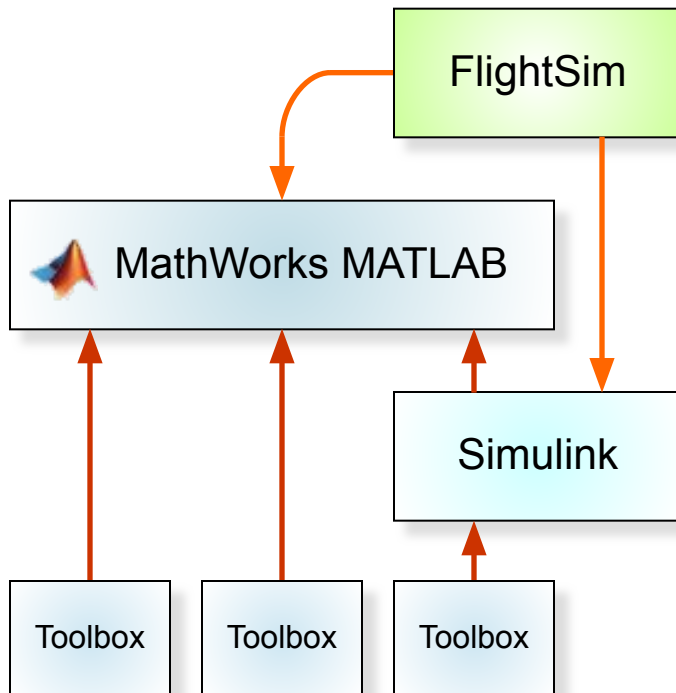
- ✓ Пакет трехмерной визуализации движения (для ПК)
Simulink 3D Animation

- ✓ 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).



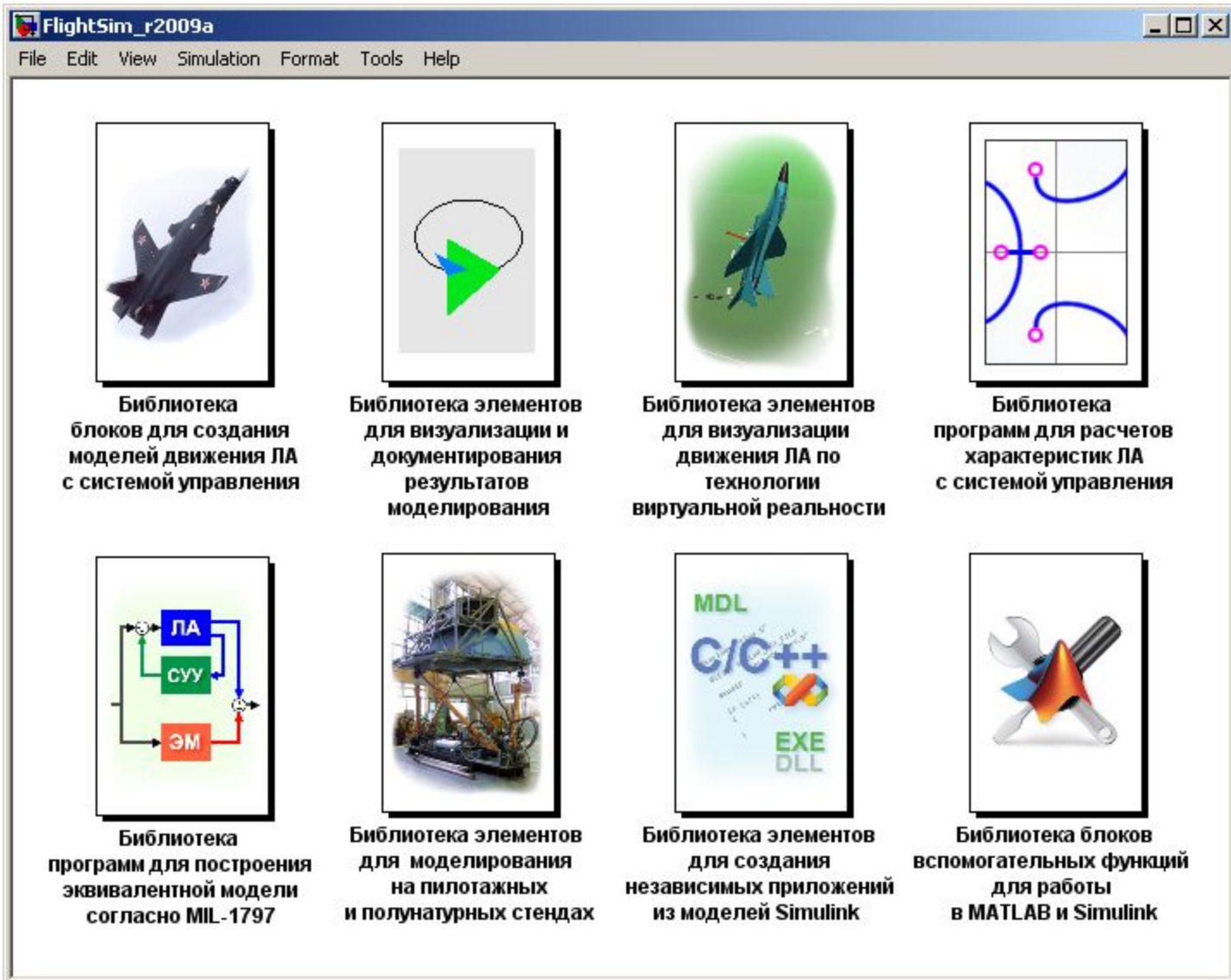
Особенности:

- ✓ 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



The screenshot shows the FlightSim_r2009a application window with a menu bar (File, Edit, View, Simulation, Format, Tools, Help) and a main workspace containing eight library icons, each with a corresponding Russian description:

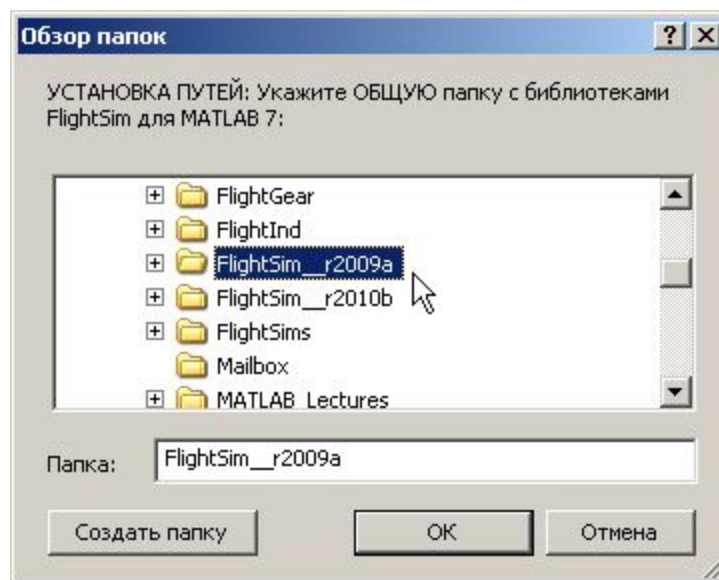
- Библиотека блоков для создания моделей движения ЛА с системой управления** (Library of blocks for creating aircraft motion models with a control system): An image of a fighter jet.
- Библиотека элементов для визуализации и документирования результатов моделирования** (Library of elements for visualization and documentation of modeling results): A green arrow pointing right inside a circle.
- Библиотека элементов для визуализации движения ЛА по технологии виртуальной реальности** (Library of elements for visualization of aircraft motion using VR technology): A 3D model of a fighter jet in a green environment.
- Библиотека программ для расчетов характеристик ЛА с системой управления** (Library of programs for calculating aircraft characteristics with a control system): A block diagram with blue and pink nodes and lines.
- Библиотека программ для построения эквивалентной модели согласно MIL-1797** (Library of programs for building an equivalent model according to MIL-1797): A block diagram with blocks labeled 'ЛА' (Aircraft), 'СУУ' (Control System), and 'ЭМ' (Equivalent Model).
- Библиотека элементов для моделирования на пилотажных и полунатурных стендах** (Library of elements for modeling on pilot and semi-natural test rigs): An image of a flight simulator rig.
- Библиотека элементов для создания независимых приложений из моделей Simulink** (Library of elements for creating independent applications from Simulink models): A graphic with 'MDL', 'C/C++', and 'EXE DLL' text.
- Библиотека блоков вспомогательных функций для работы в MATLAB и Simulink** (Library of blocks for auxiliary functions for work in MATLAB and Simulink): An image of a wrench and a screwdriver.

Программа автоматической установки

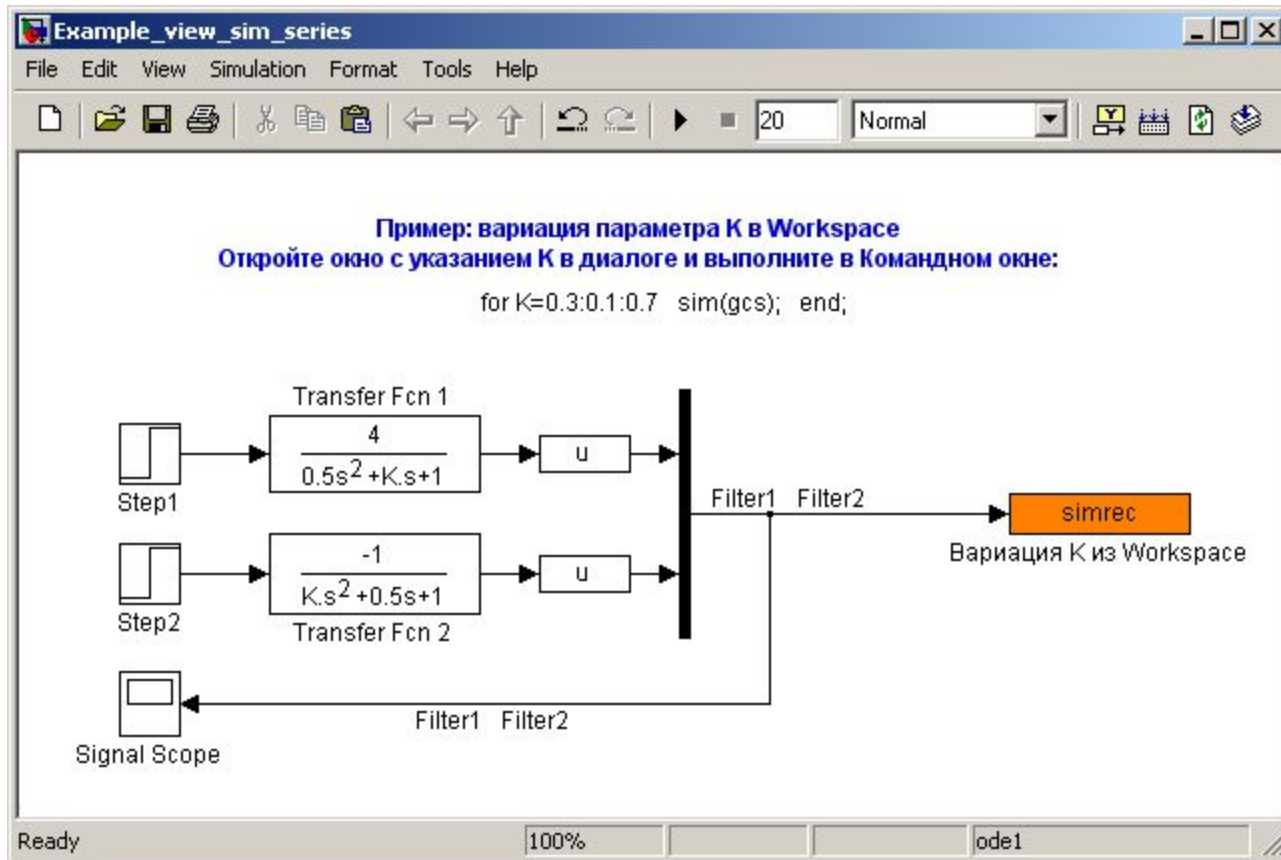
fs_install – автоматическая установка программного комплекса на ПК пользователя

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

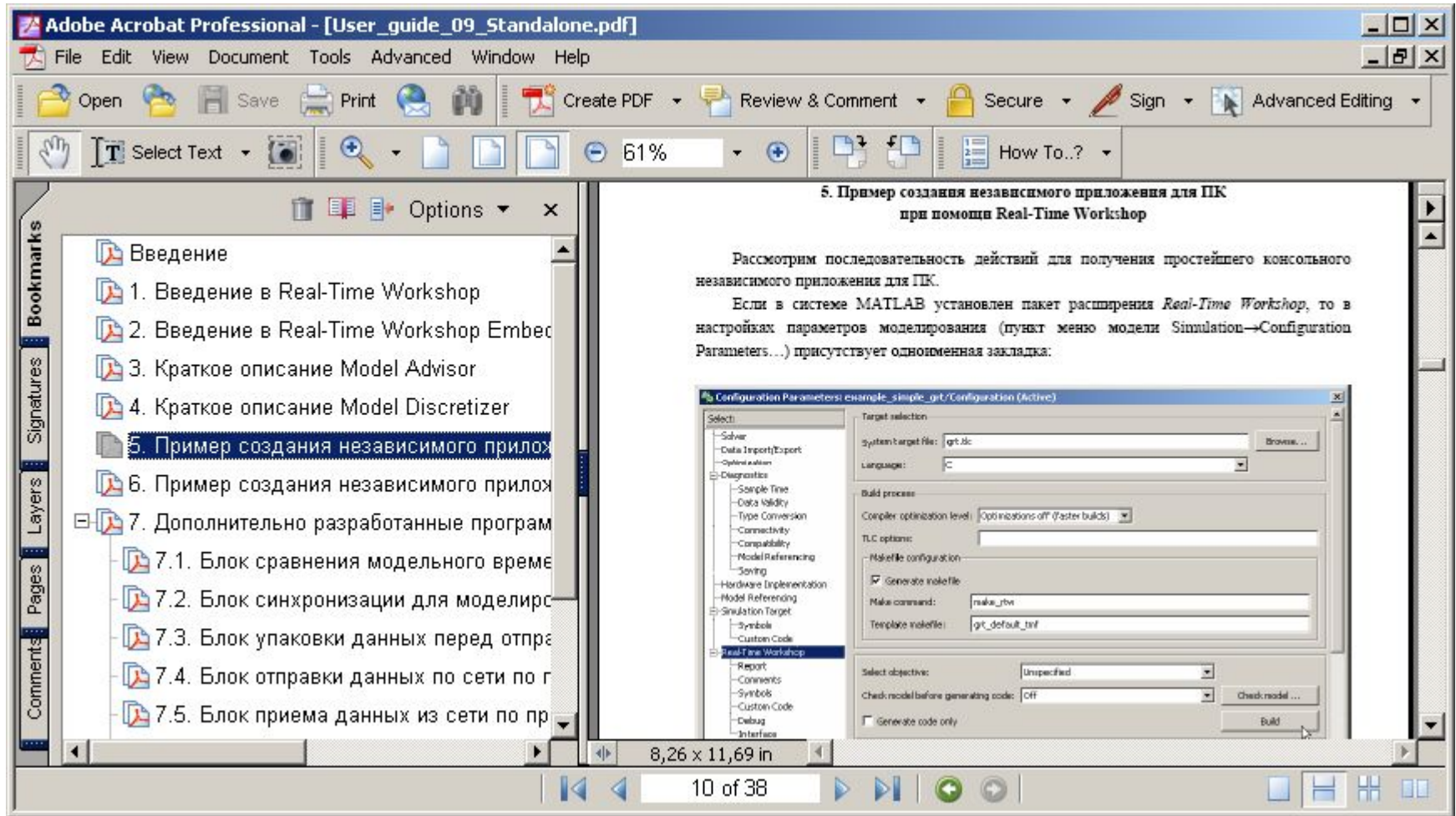


Примеры для каждой библиотеки



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

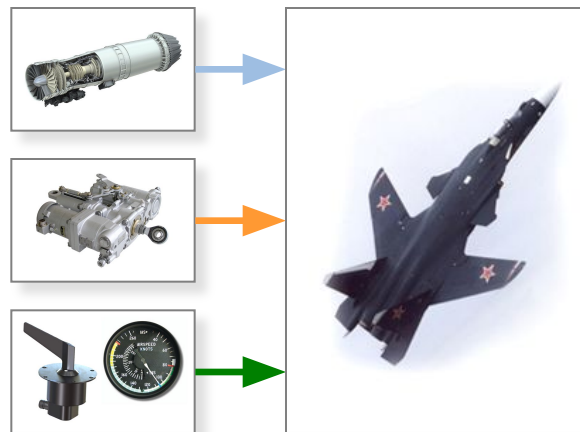
Руководство пользователя



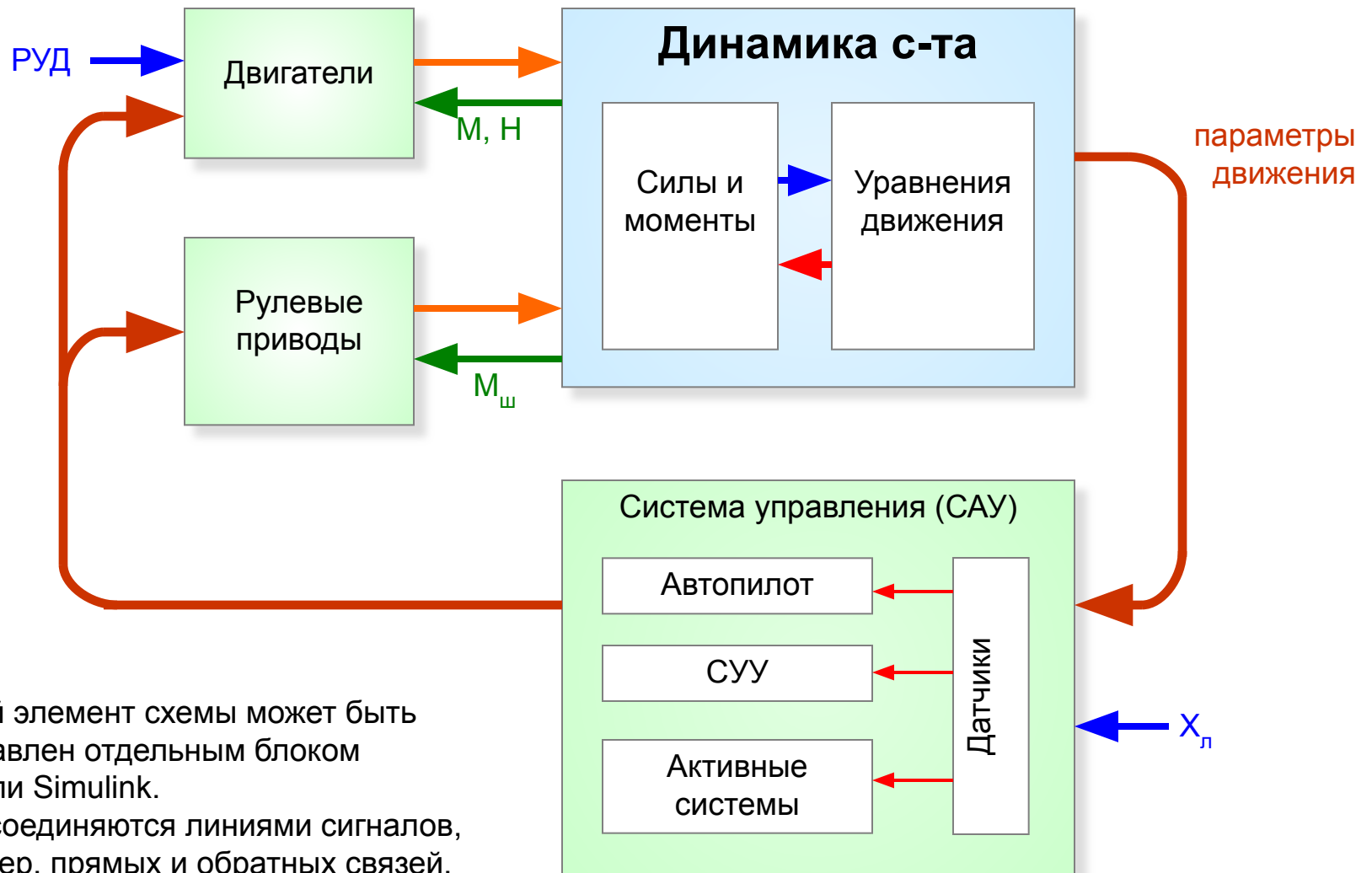
Подробная справка по каждой из библиотек в формате PDF

Часть 1

Создание модели ЛА в Simulink



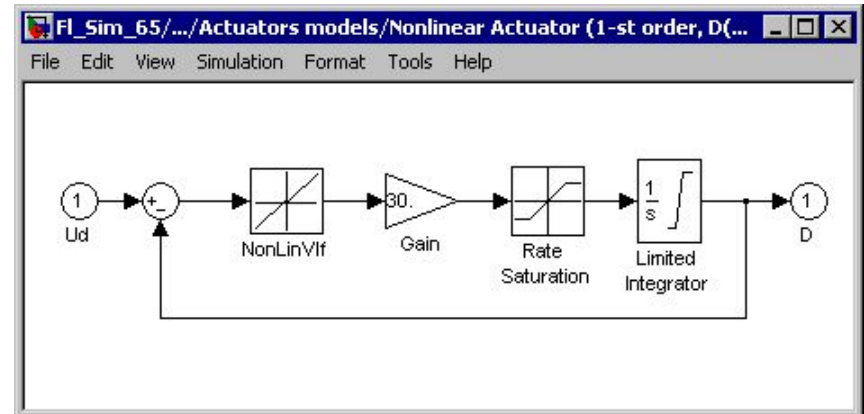
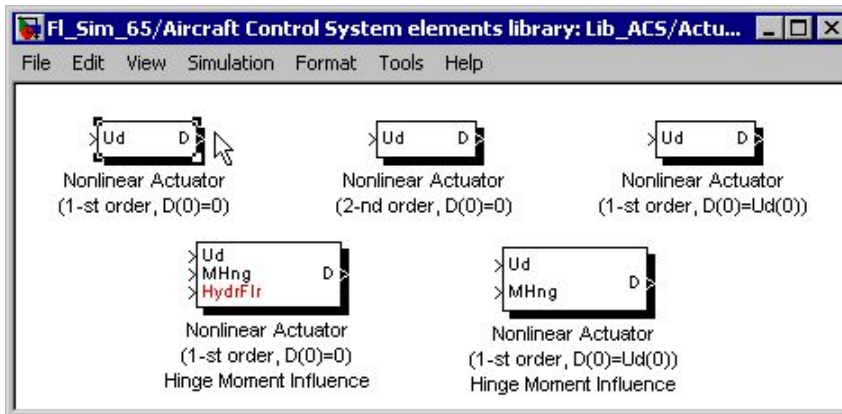
Типовая схема модели самолета



Каждый элемент схемы может быть представлен отдельным блоком в модели Simulink. Блоки соединяются линиями сигналов, например, прямыми 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

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

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

В направляющих косинусах

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

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

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

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

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

Фугоидное движение

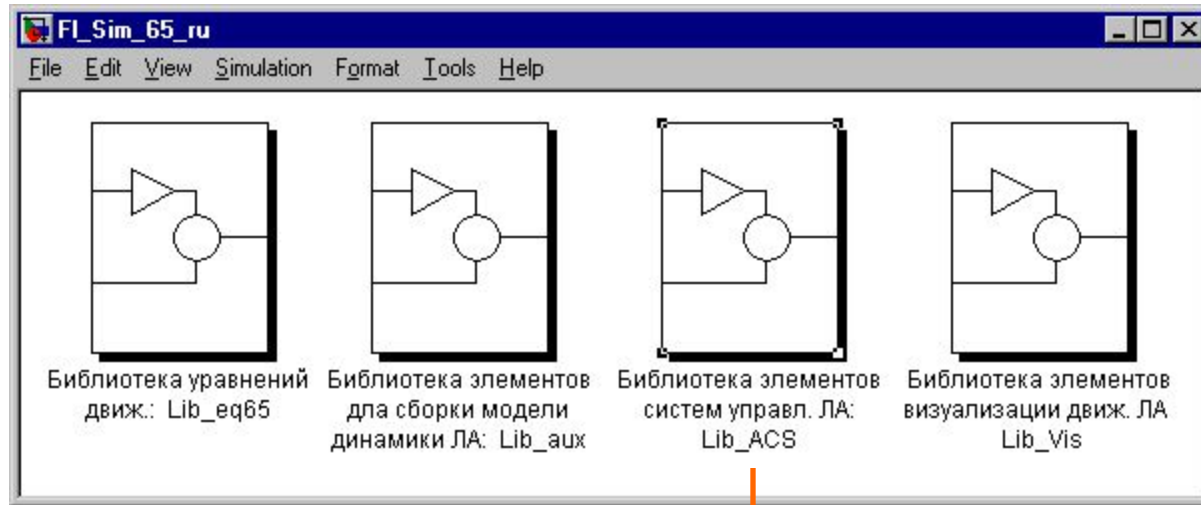
Включить параметр Swfg фугоидного движения

В установочный файл Загрузить в Workspace Закрыть диалог

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

The screenshot shows a library of S-function blocks with the following descriptions:

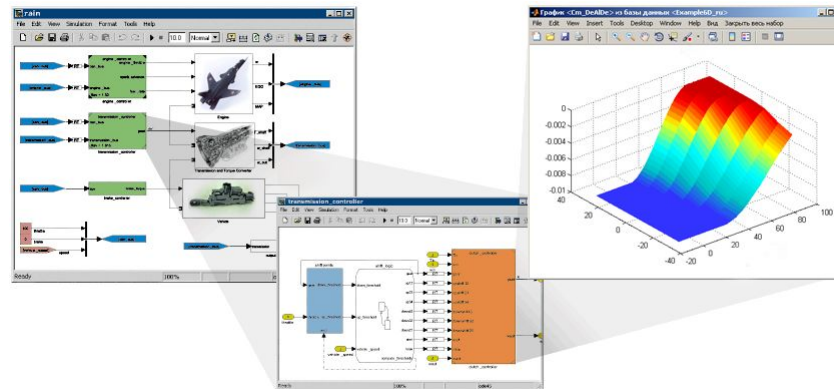
- reset signal_holder state**: Изменение состояния (по разовой команде)
- two_signals_counter state**: Увеличение или уменьшение текущего значения (по разовым командам)
- signal_fixator_2 output**: Фиксировать или освободить входной сигнал (по разовым командам)
- сортировка**: Сортировка векторного входного сигнала
- Текущее значение**: Изменение заданного сигнала с переменной скоростью в различных диапазонах
- signal_fixator output**: Фиксировать или освободить входной сигнал

Изменяемая скорость отклонения органов управления в зависимости от положения

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

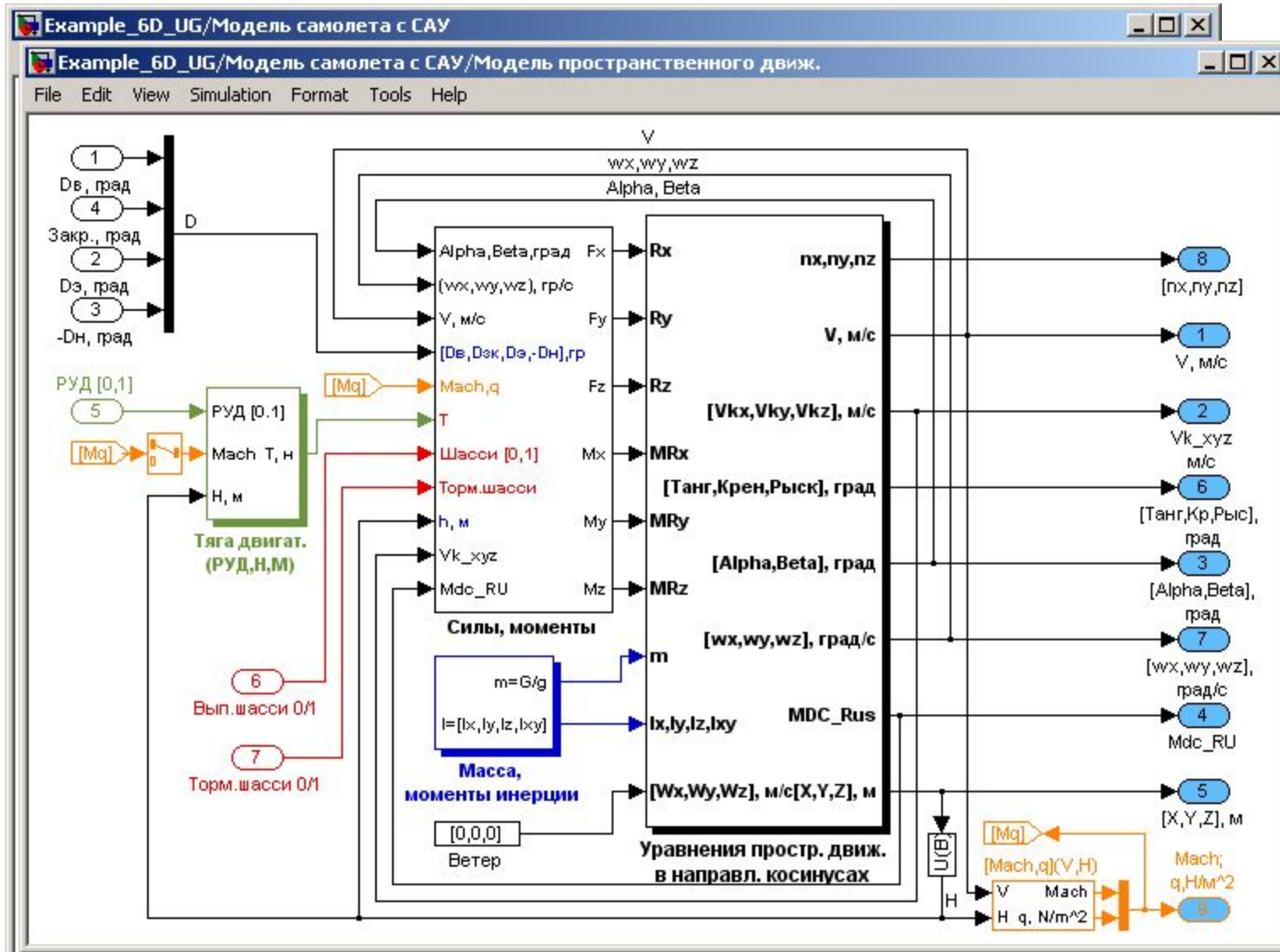
FlightSim содержит примеры моделей движения **гипотетического самолета**:

- ✓ 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.

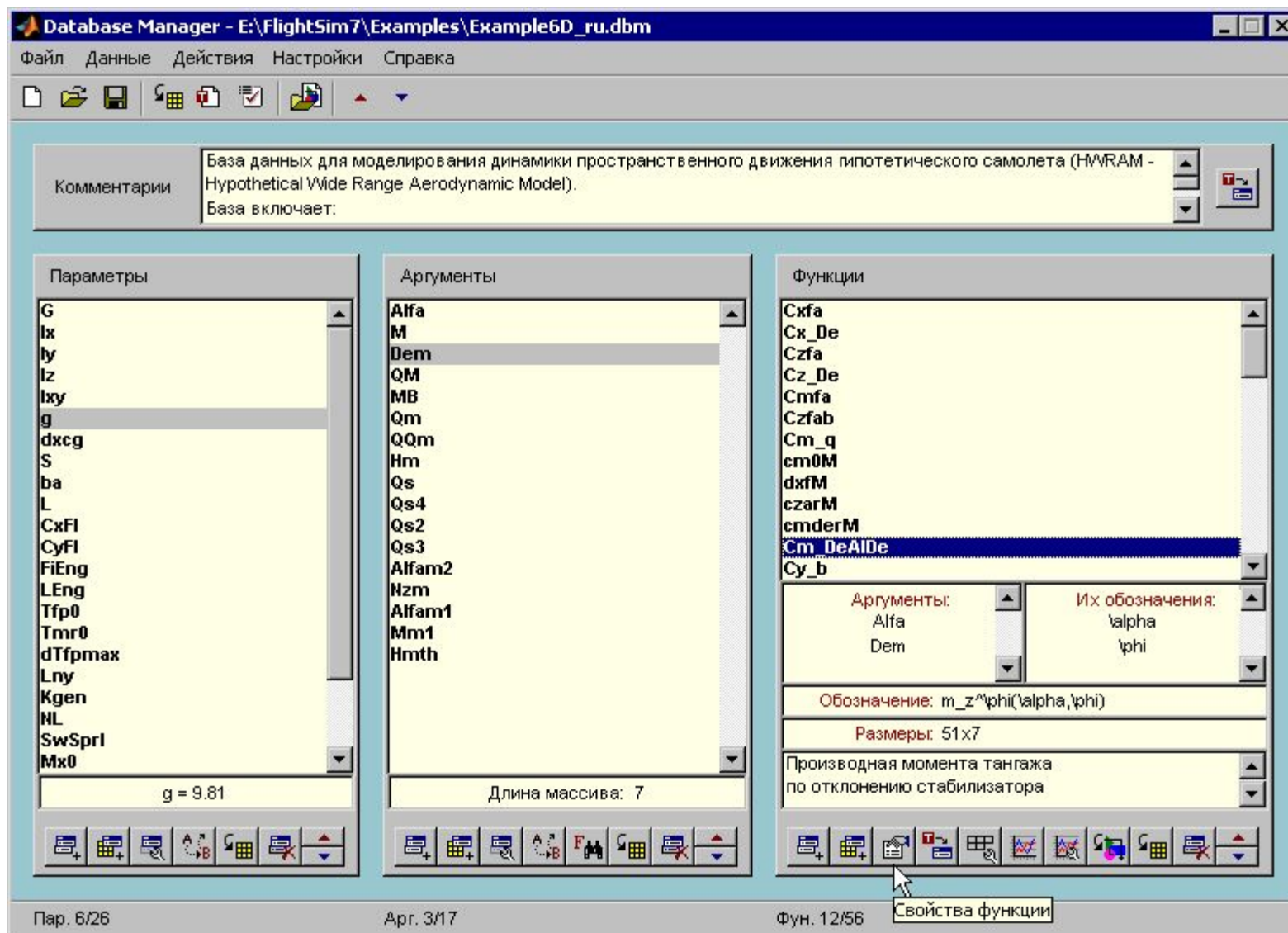
В процессе разработки самолета или при в его модификациях эти данные уточняются, изменяются, дополняются и т.п.

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

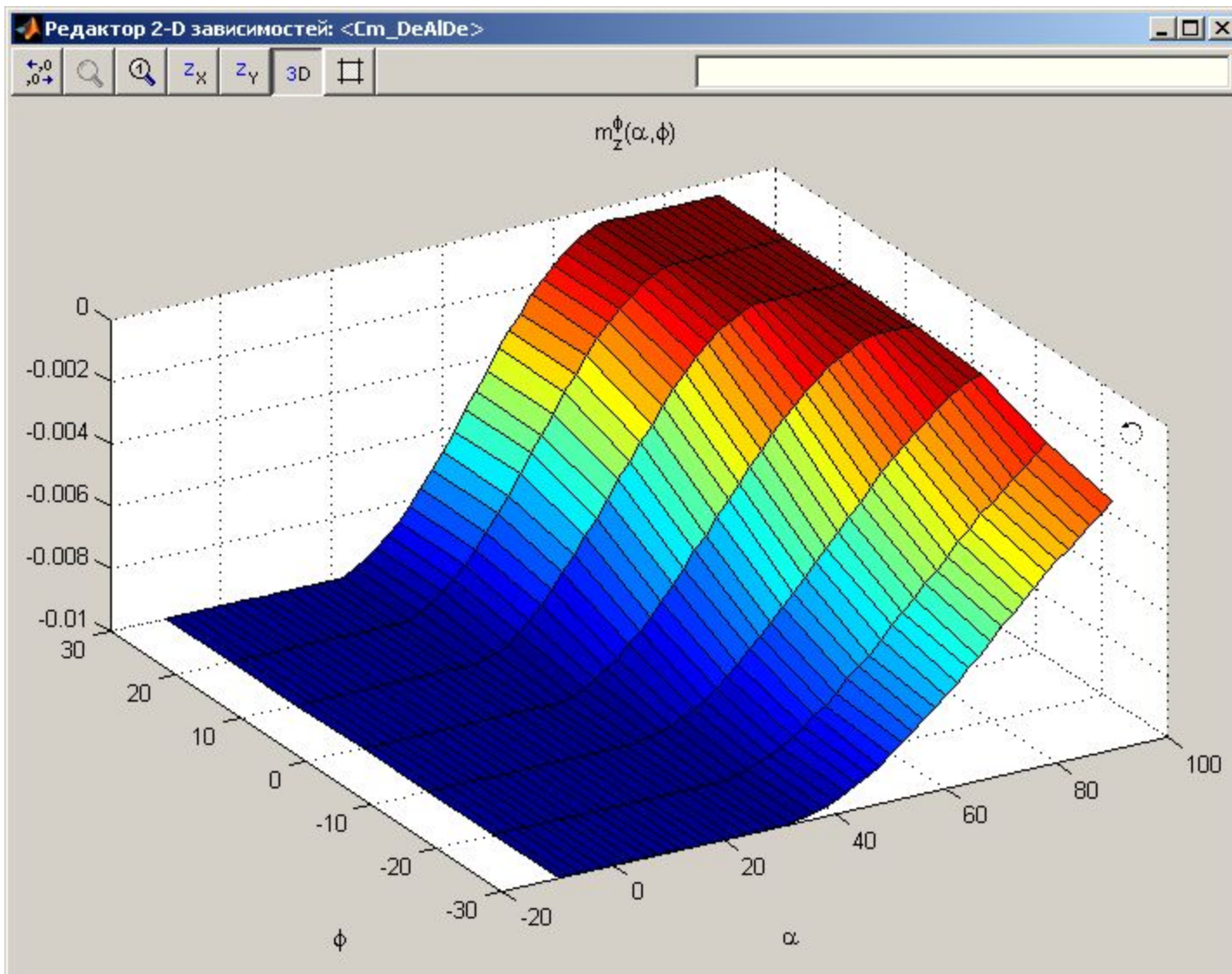
Возможности:

- ✓ 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.)

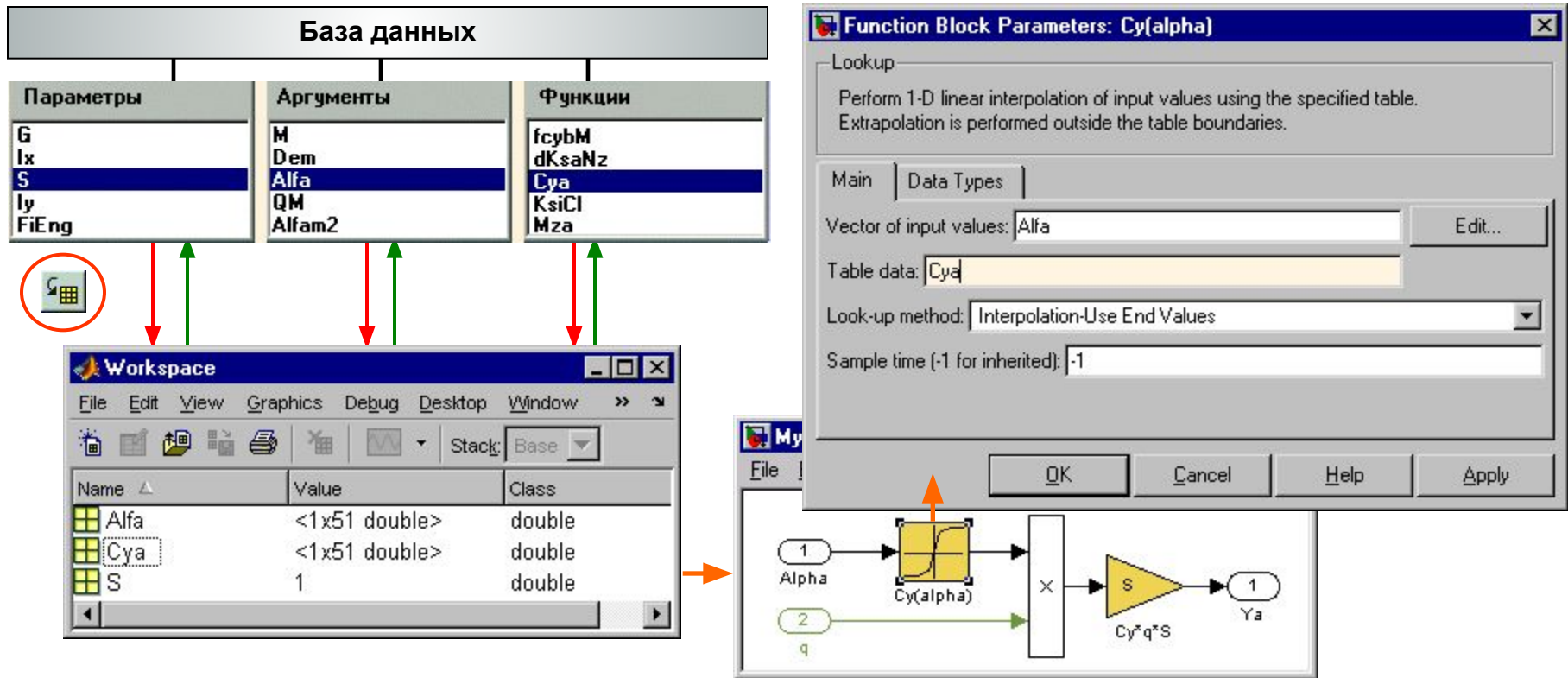
Главное окно программы для баз данных



Пример: графический редактор 2-D



Взаимодействие с моделями Simulink

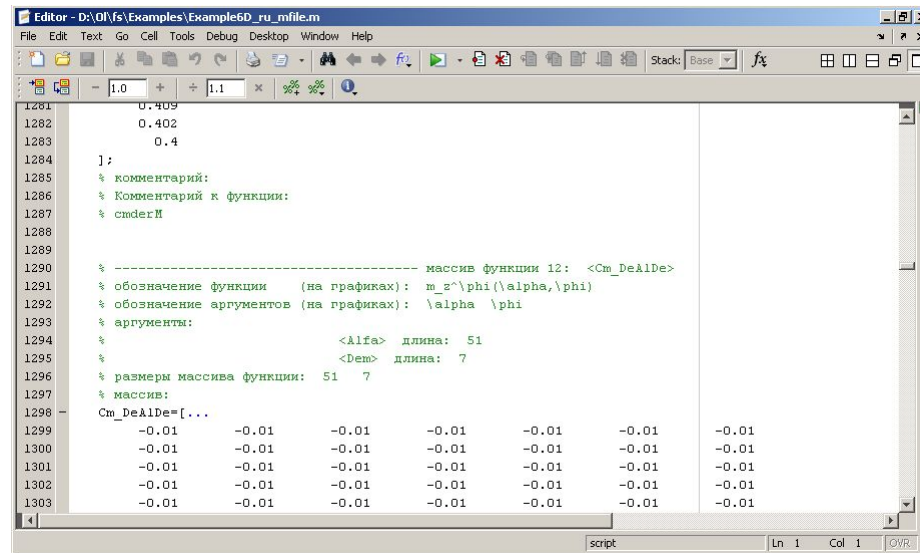


- ✓ возможность использования общей неизменяемой базы данных для нескольких моделей
- ✓ возможность использования для одной модели нескольких баз данных, в которых имена массивов одни и те же, а содержимое массивов различно
- ✓ быстрая загрузка и перезагрузка данных для моделирования

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.

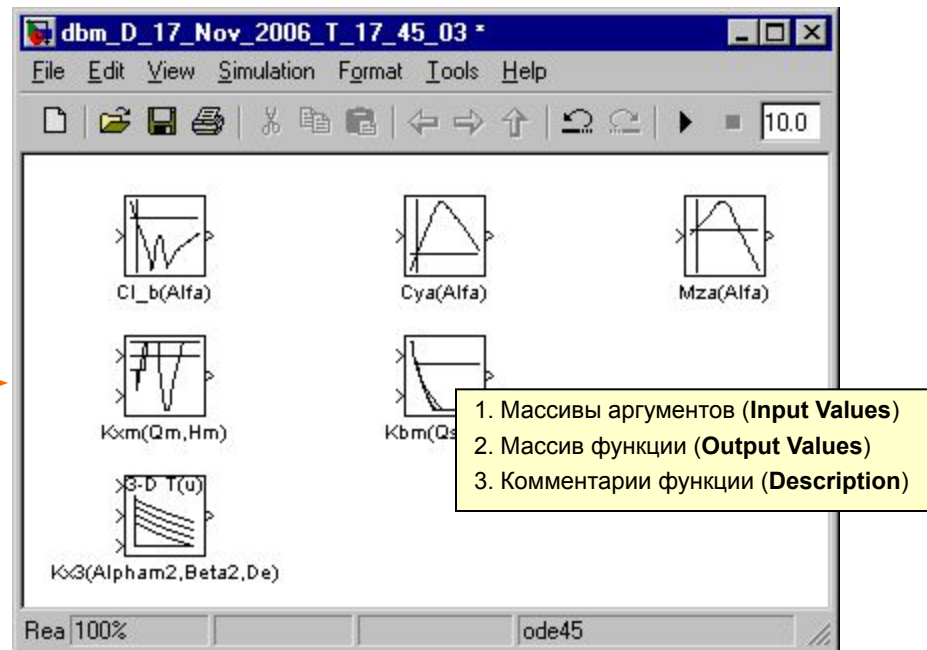


```
1281     0.409
1282     0.402
1283     0.4
1284 ];
1285 % комментарий:
1286 % Комментарий к функции:
1287 % cmderM
1288
1289 % ----- массив функции 12: <Cm_DeAlDe>
1290 % обозначение функции (на графиках): m_z`\phi(\alpha,\phi)
1291 % обозначение аргументов (на графиках): \alpha \phi
1292 % аргументы:
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

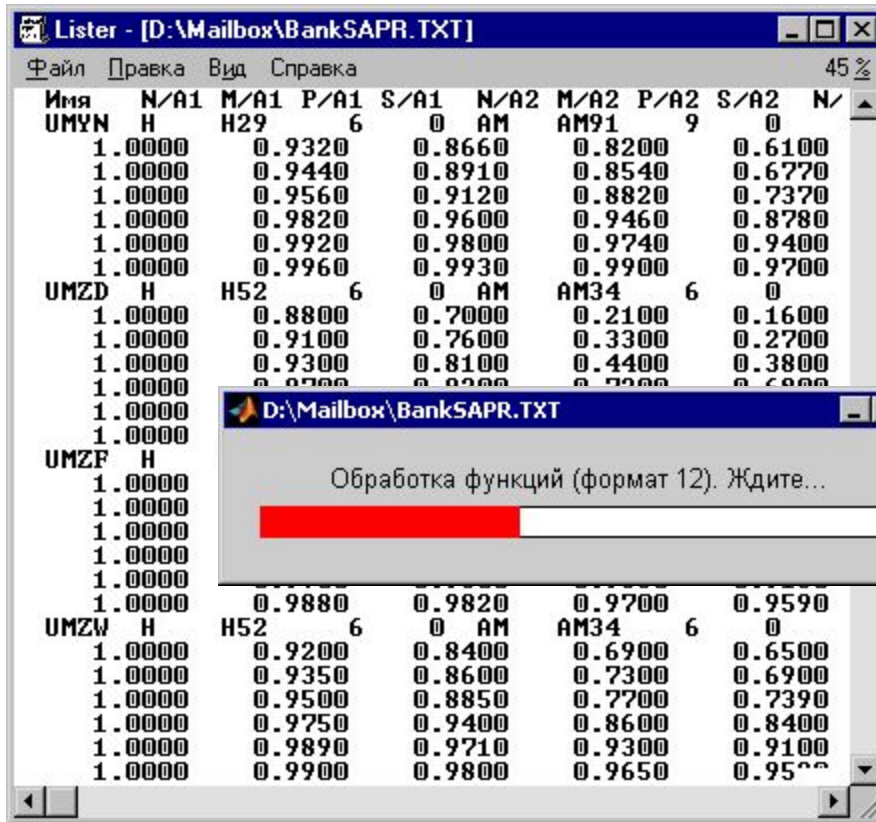
При автоматизированном создании набора блоков таблиц значительно сокращается время, затрачиваемое на сборку модели в Simulink



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.

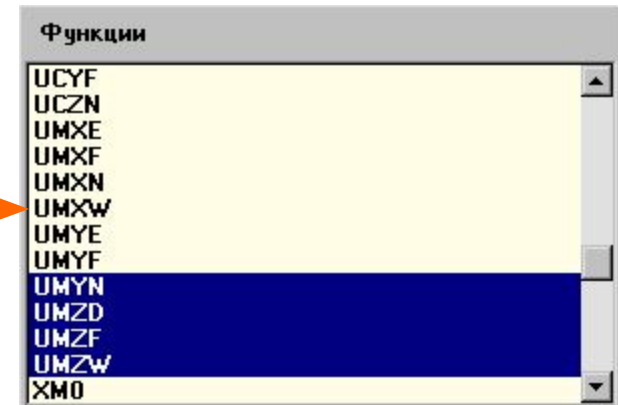
Выбор типа таблиц и их настройка – через диалог.

Перевод данных из САПР “Динамика”



Имя N/A1 M/A1 P/A1 S/A1 N/A2 M/A2 P/A2 S/A2 N/A2
UMYN H 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 H 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 0.7200 0.6800
1.0000
UMZF H
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
1.0000
0.9880 0.9820 0.9700 0.9590
UMZW H 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

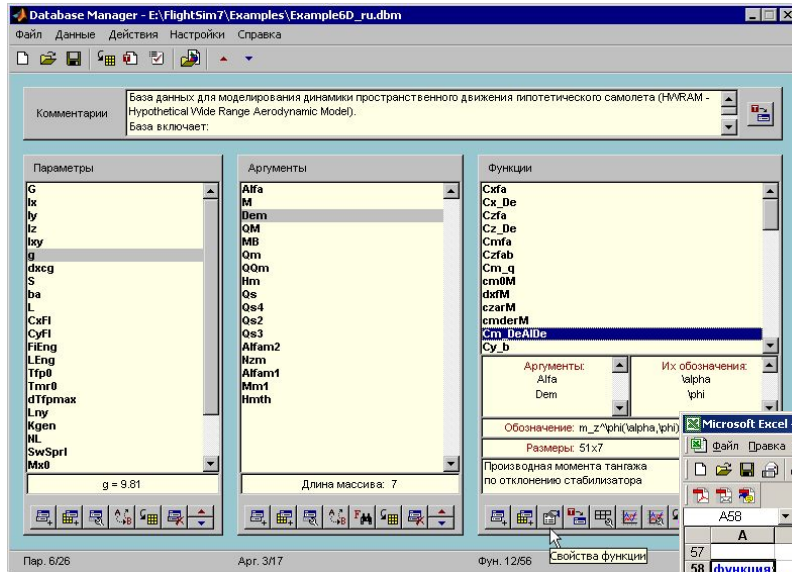
Распечатка банка данных САПР “Динамика” содержит массивы аргументов и функций



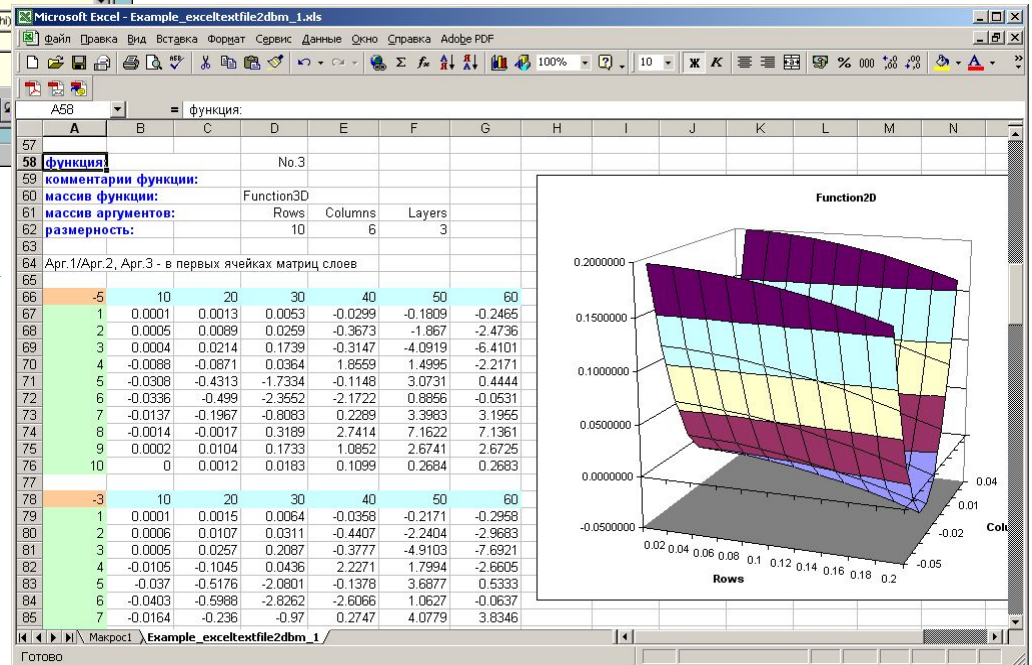
Функции
UICYF
UCZLN
UMXE
UMXF
UMXN
UMXW
UMYE
UMYF
UMYN
UMZD
UMZF
UMZW
XMO

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

Взаимодействие с Excel

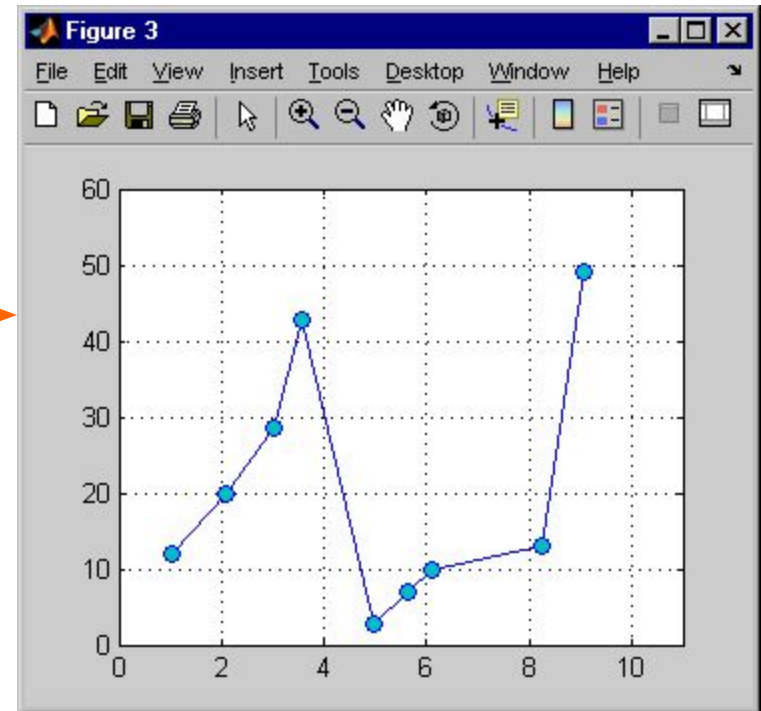
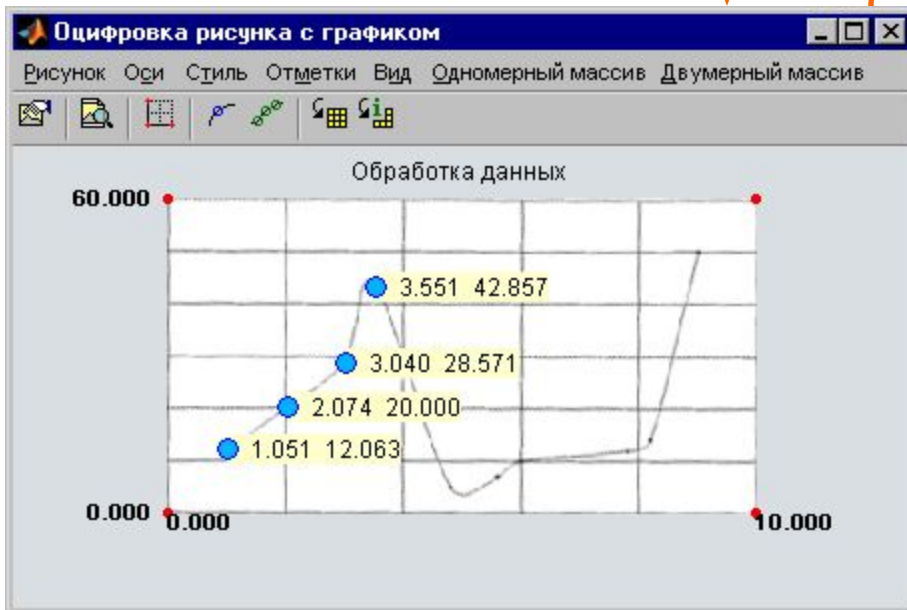
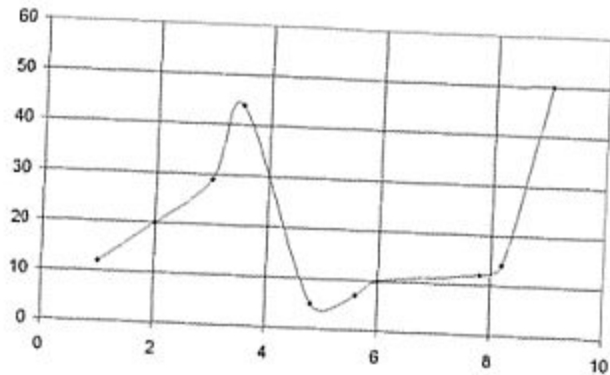


Автоматическое создание базы данных из файла Excel определенного формата (через текстовый файл):
вспомогательная программа **exceltextfile2dbm**



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**

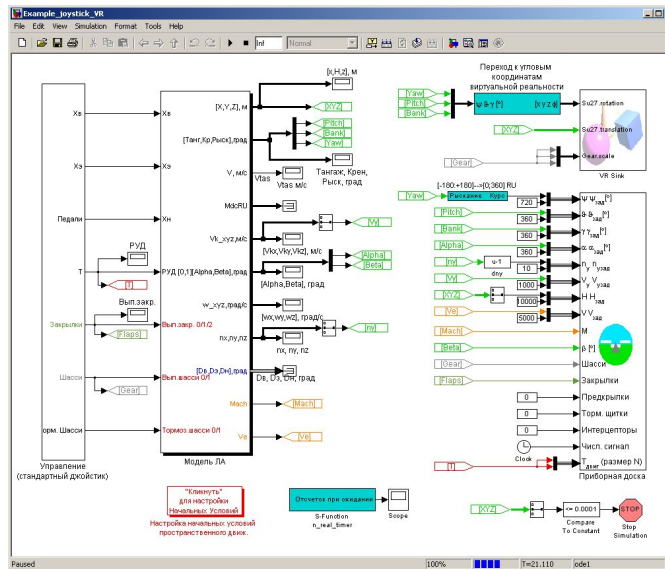
Моделирование движения ЛА на персональном компьютере



Моделирование на ПК

Задачи:

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



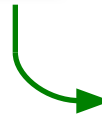
Средства FlightSim:

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

Перенос модели с ПК на пилотажный стенд



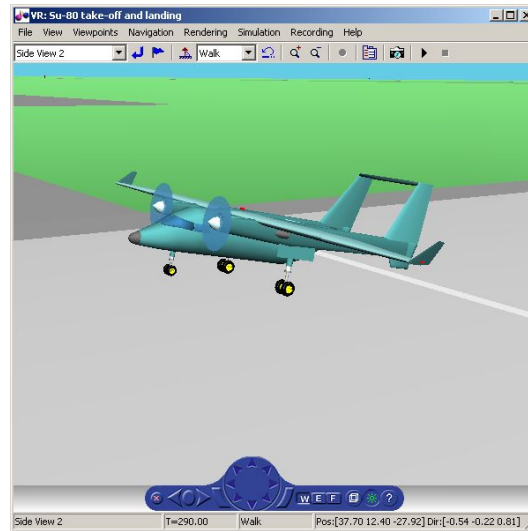
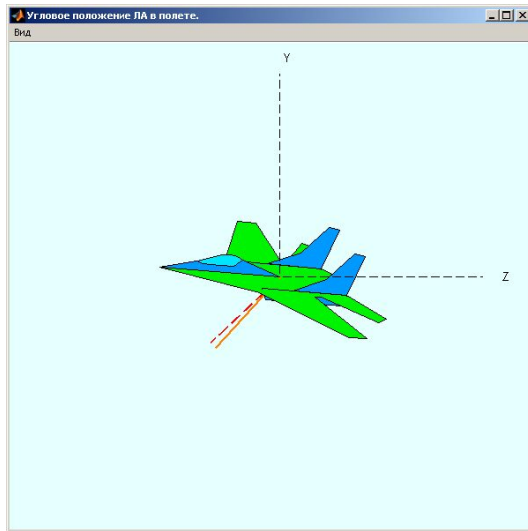
Мини-стенд на одном или нескольких ПК



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



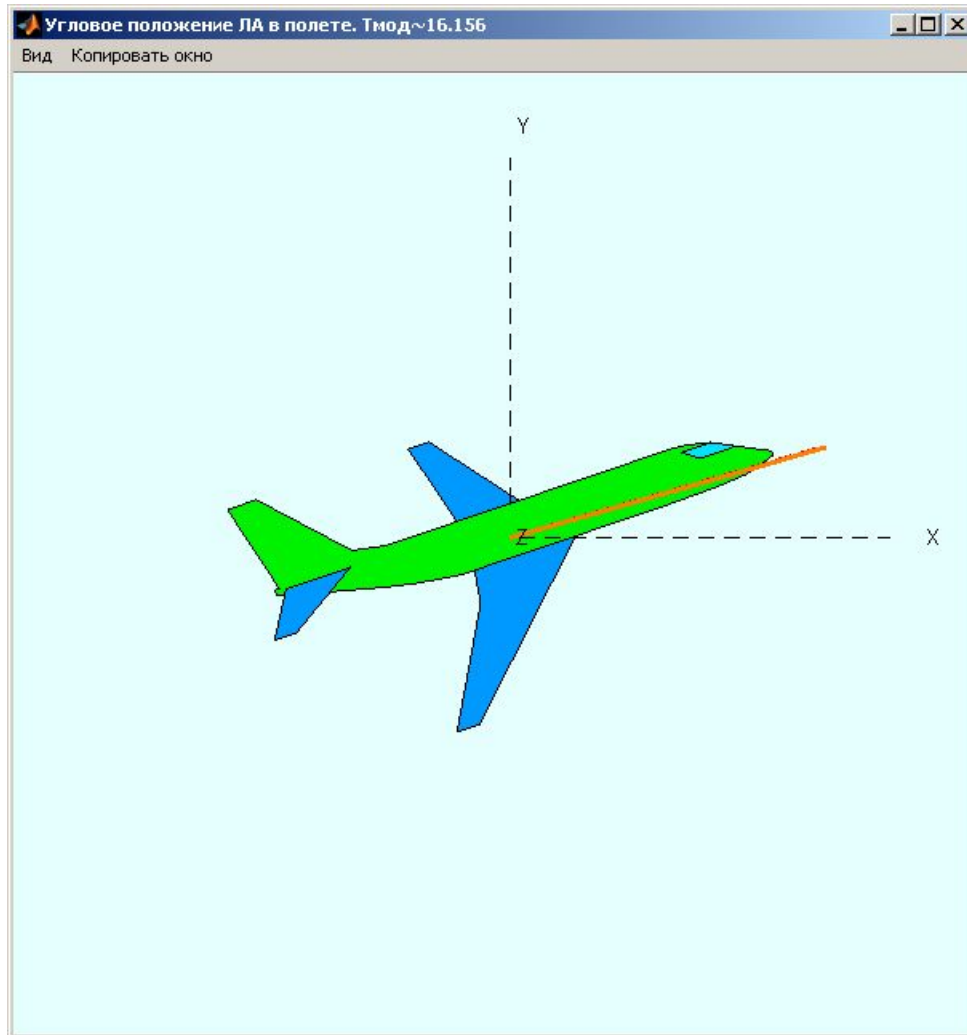
1. Встроенная графика MATLAB

2. Simulink 3D Animation

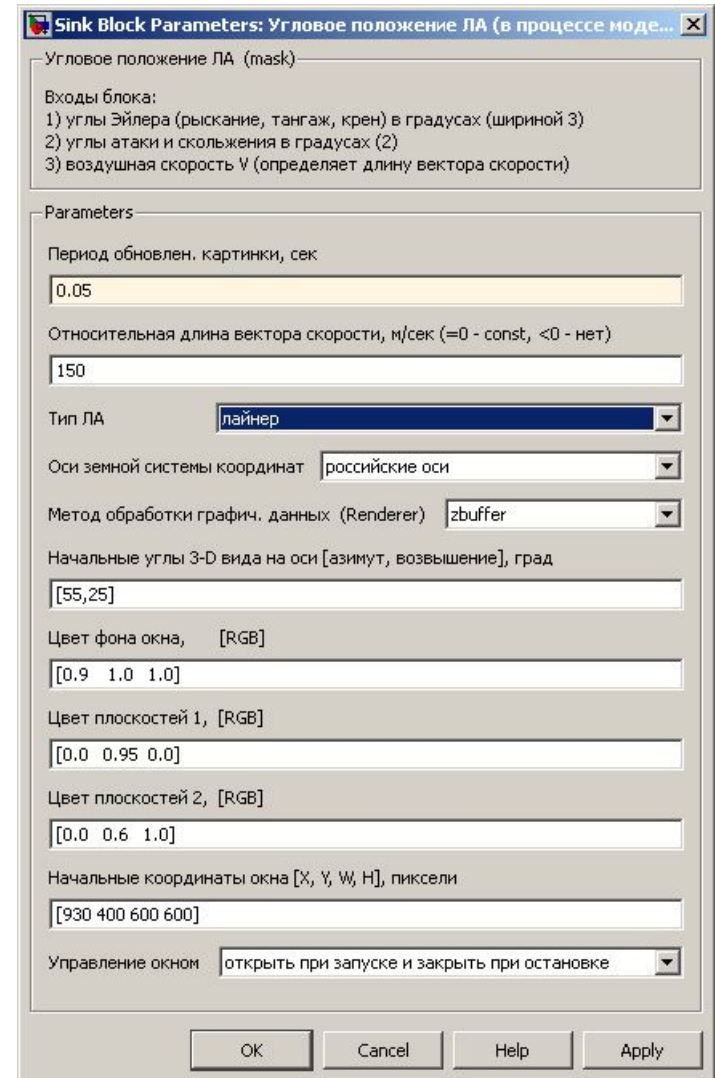
3. Независимые приложения

Визуализация в течение моделирования

vis_aircraft_angles, настройка параметров блока



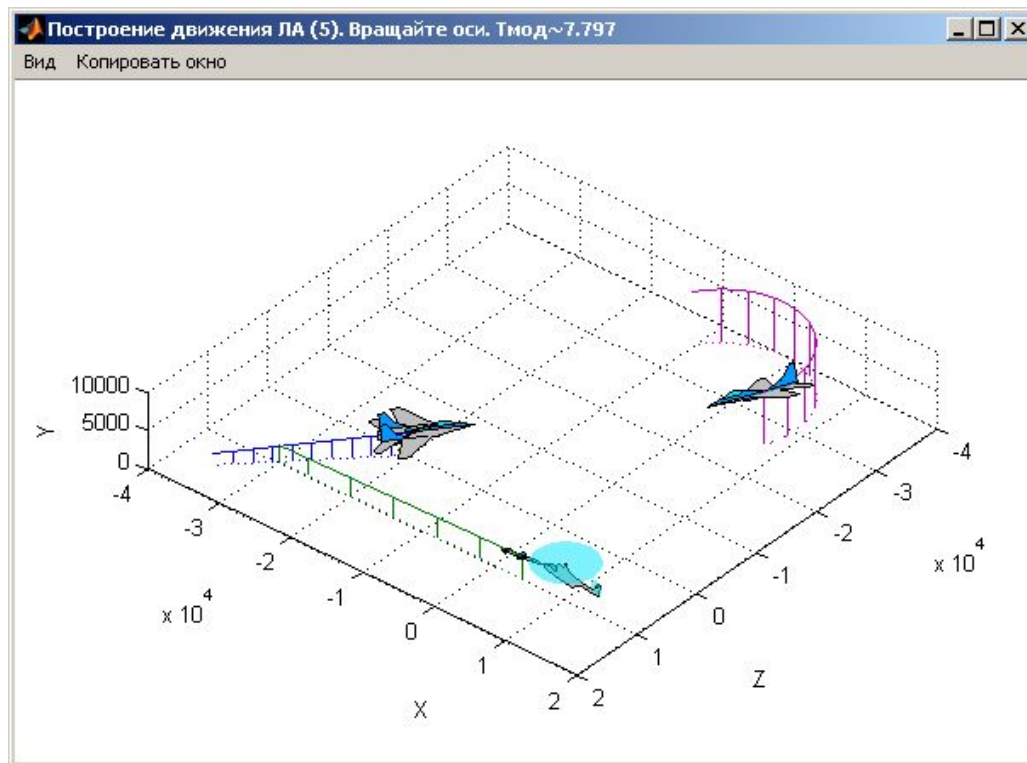
FS2010



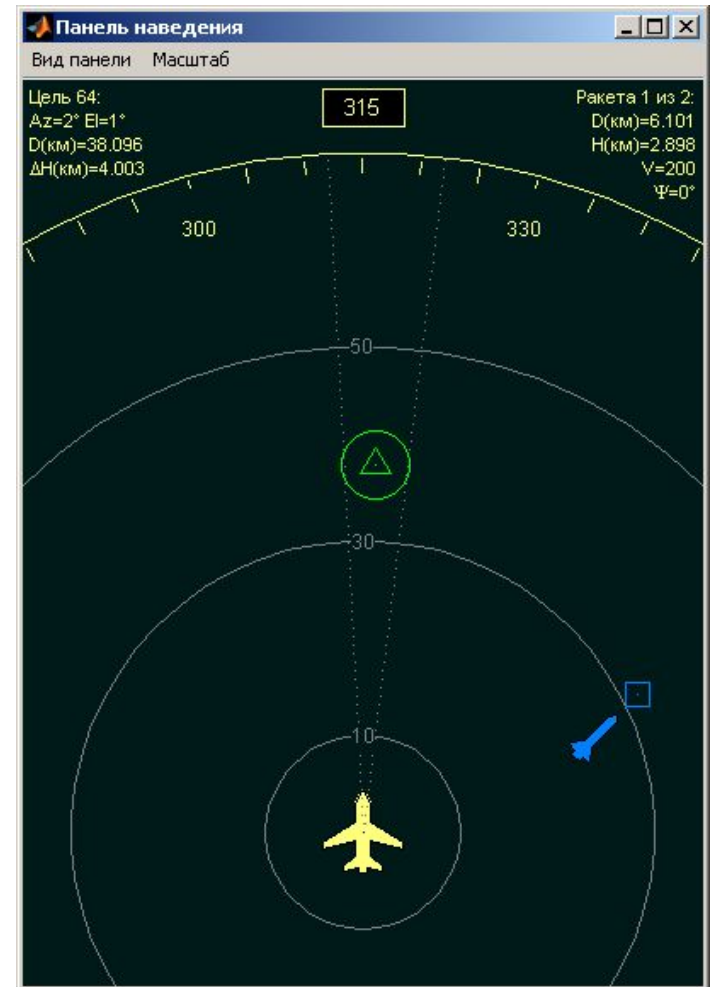
38

Пример визуализации при моделировании

Средства визуализации для отладки модели с расчетом движения нескольких ЛА



vis_aircrafts_motion

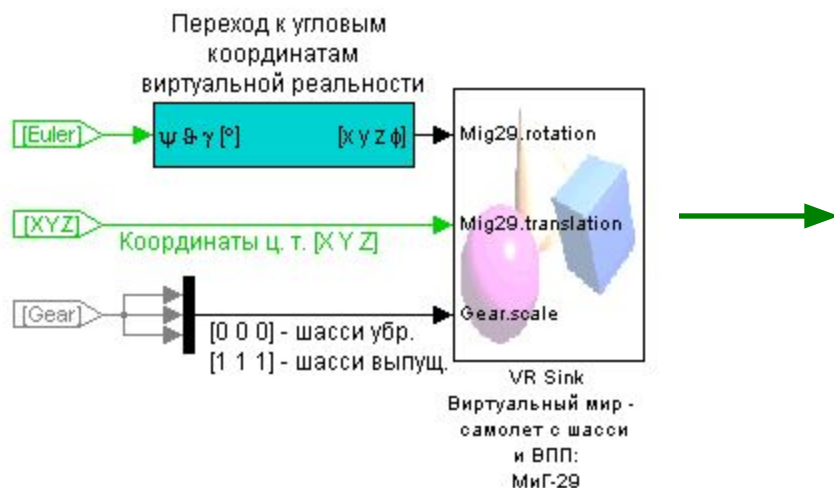


Визуализация в течение моделирования – 3D

Simulink 3D Animation:

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

Блок вычисления вращательных координат VRML:

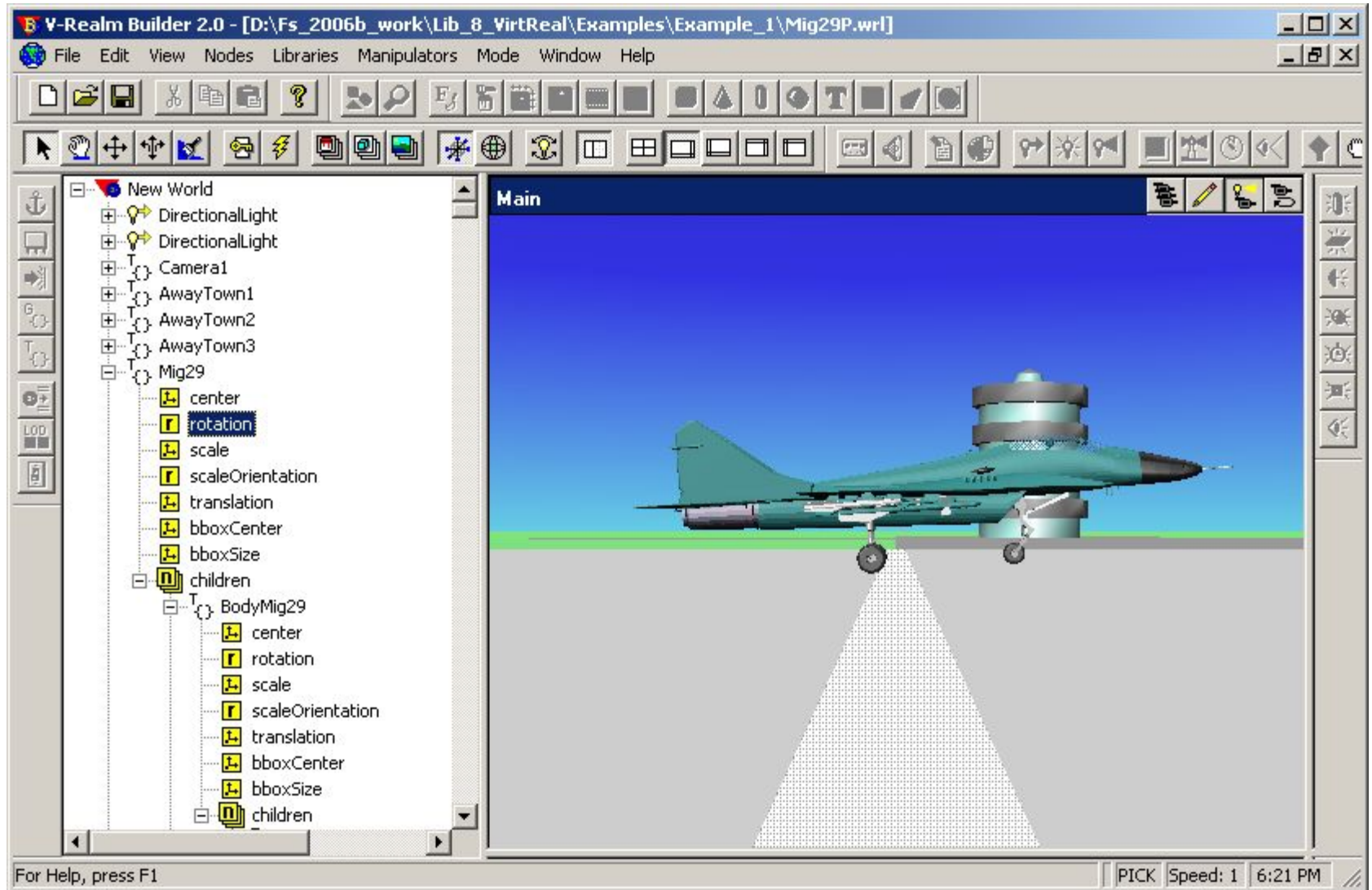


FS2010



40

Редактор файлов виртуальных миров



Визуализация в течение моделирования – FG

FlightGear – независимое приложение:

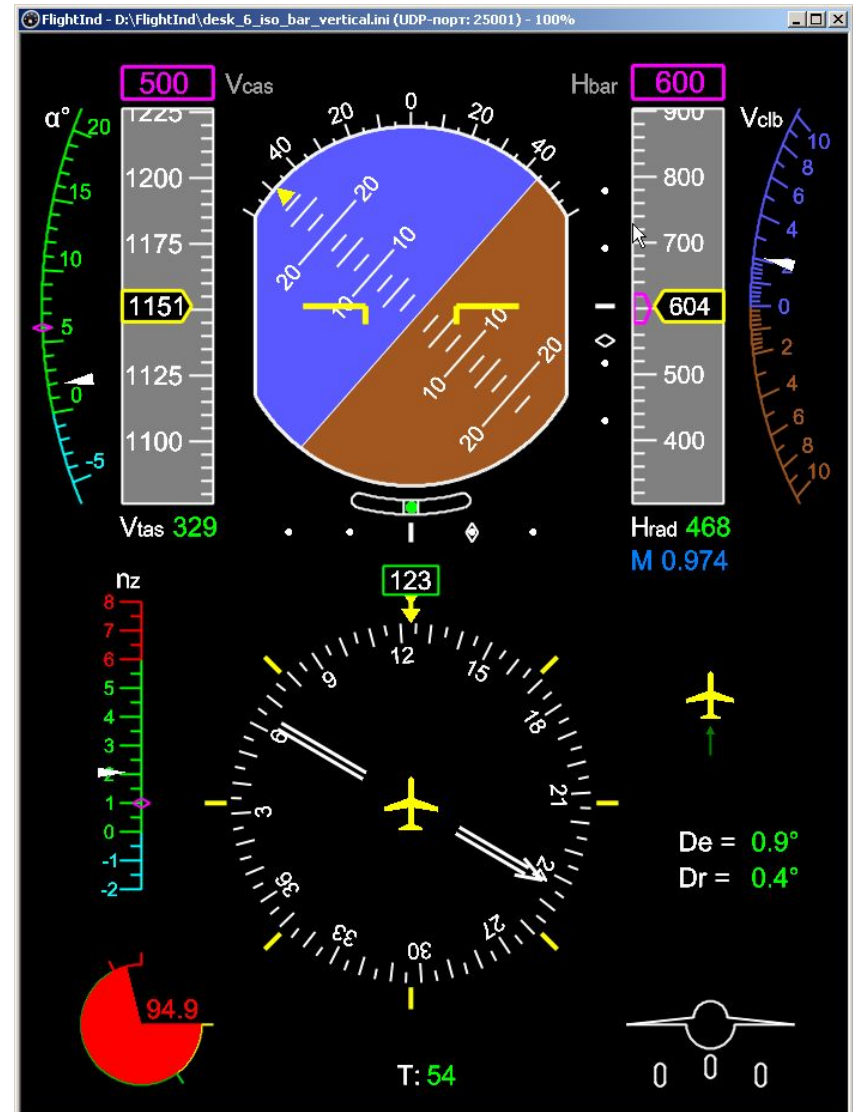
- ✓ Популярный мощный бесплатный авиасимулятор: www.flightgear.org
- ✓ Мощная графика, высокое быстродействие на обычном ПК.
- ✓ Подключение 3D-моделей разных ЛА.
- ✓ Обмен данных с MATLAB по UDP на одном или различных ПК.
- ✓ Образец подключения к MATLAB в Aerospace Blockset.
- ✓ FlightSim содержит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



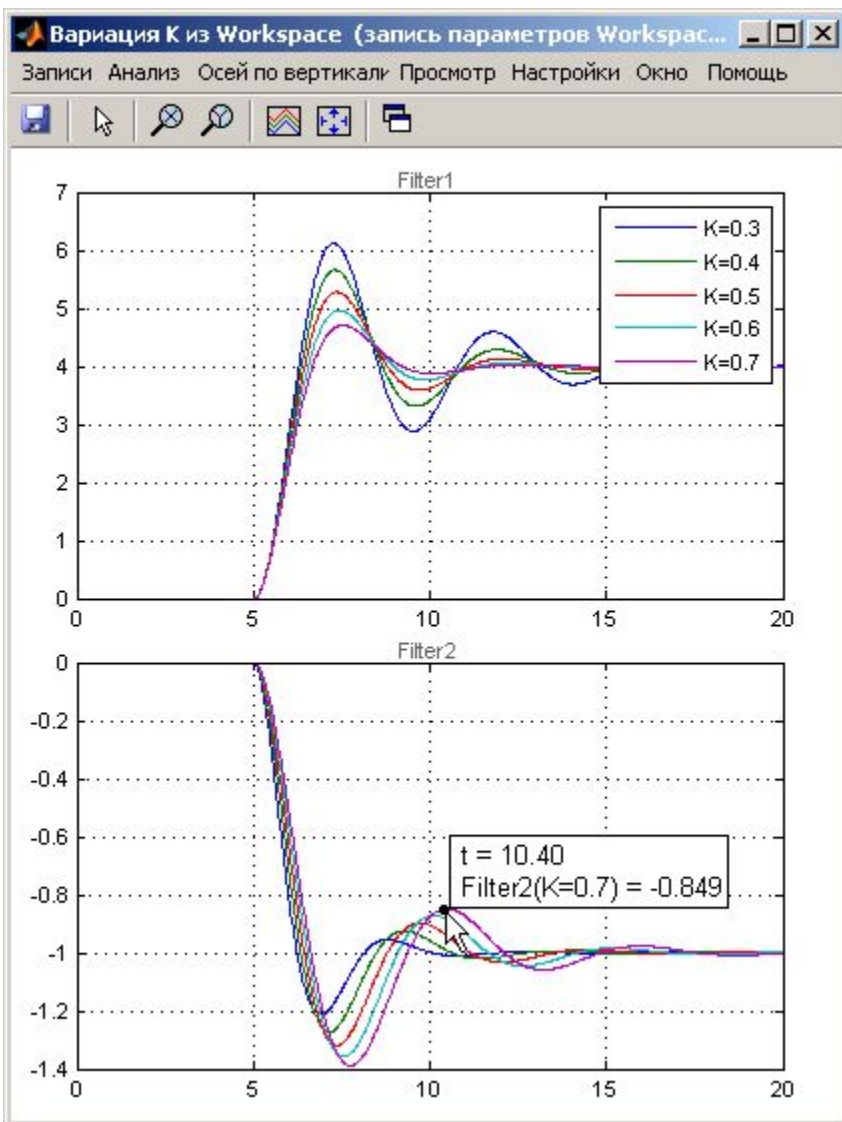
Визуализация в течение моделирования – FI

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.

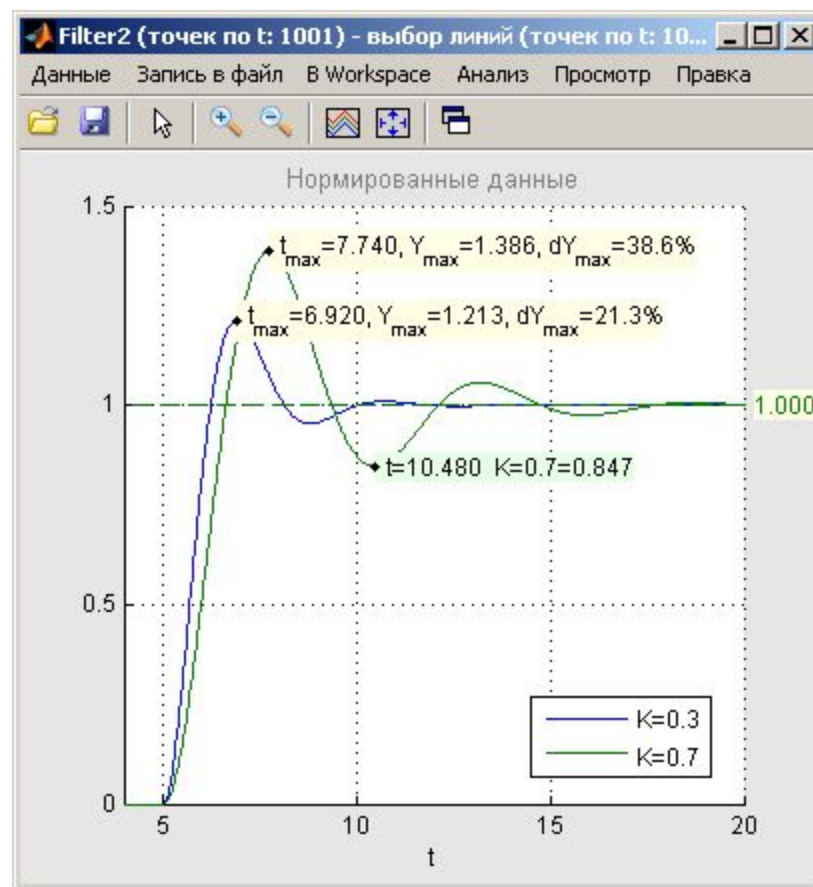


Запись в различных сеансах моделирования



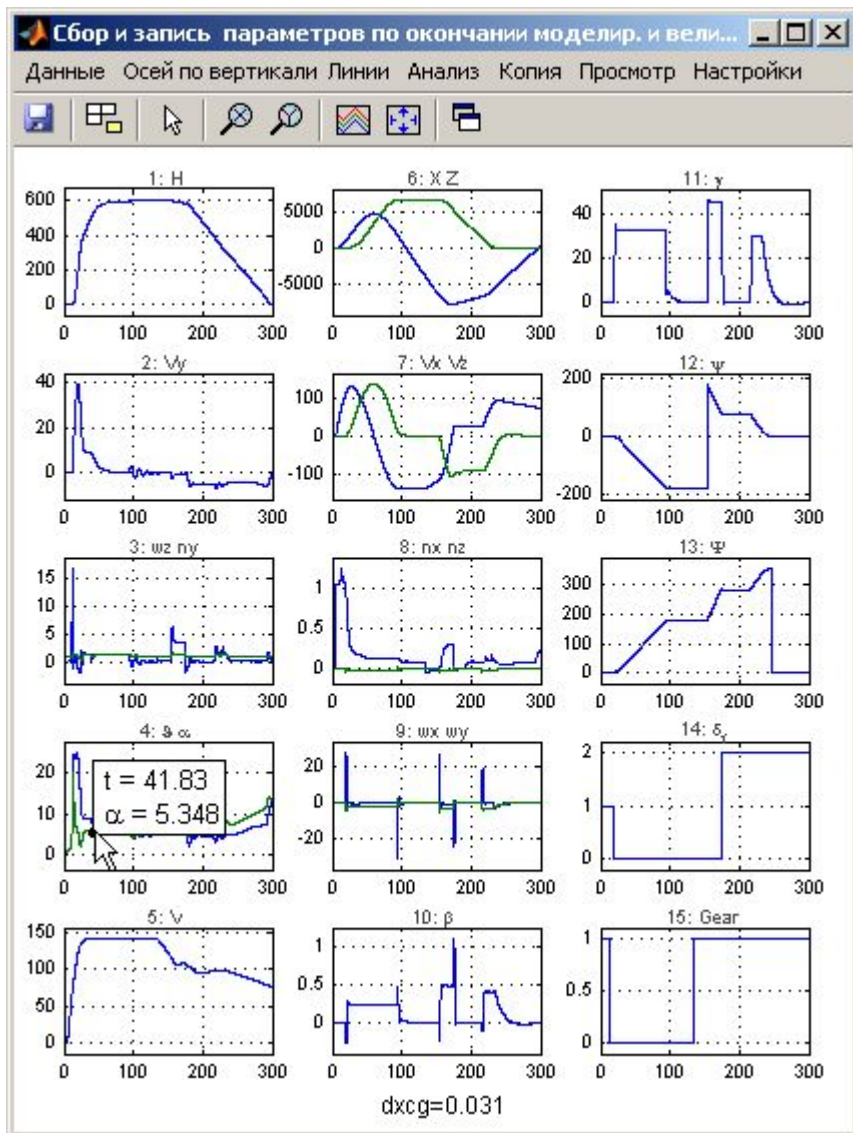
FS2010

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



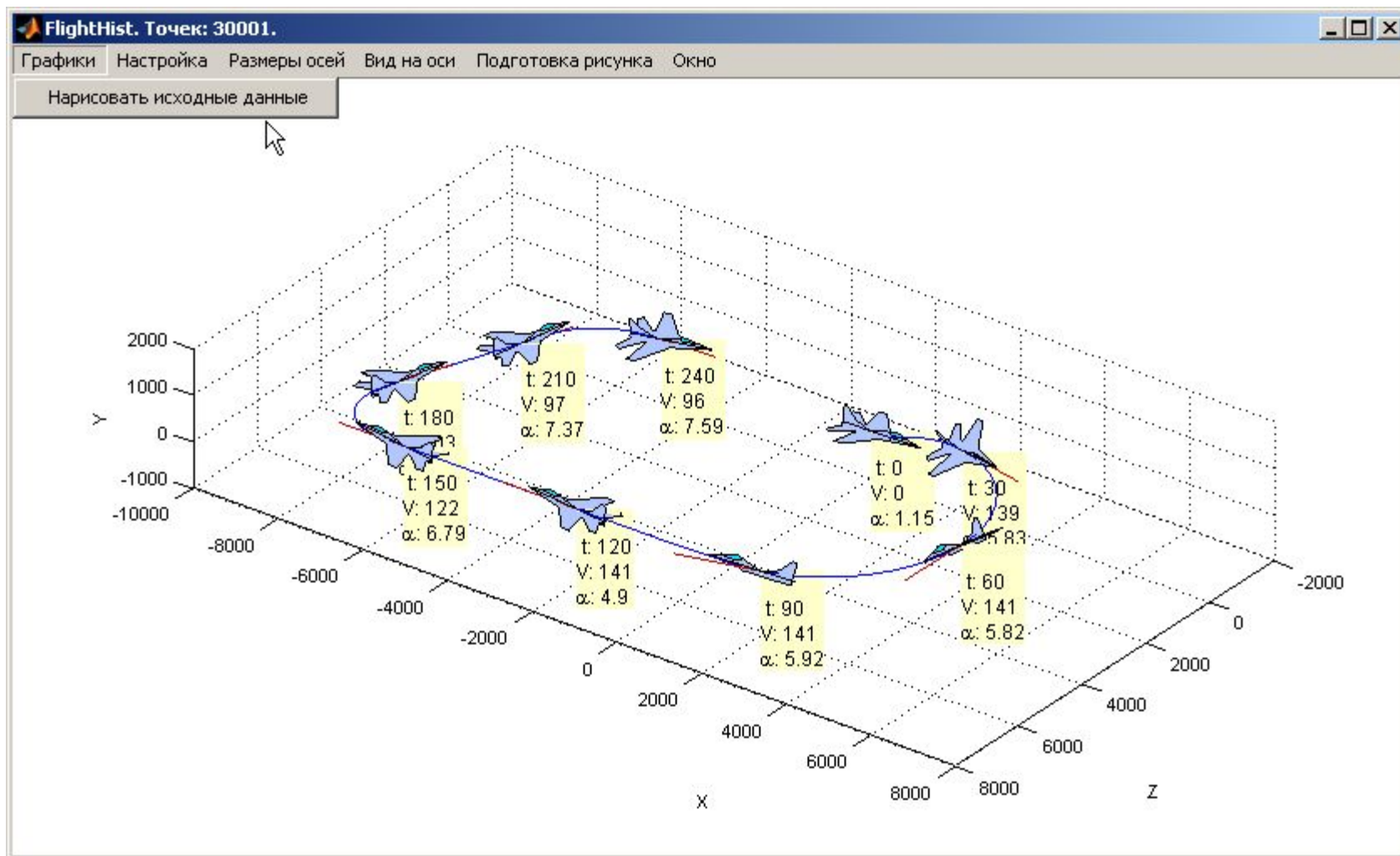
FS2010

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

```
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
```

45

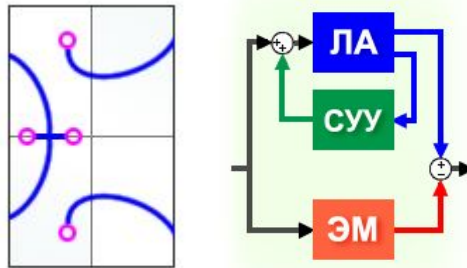
История полета



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.



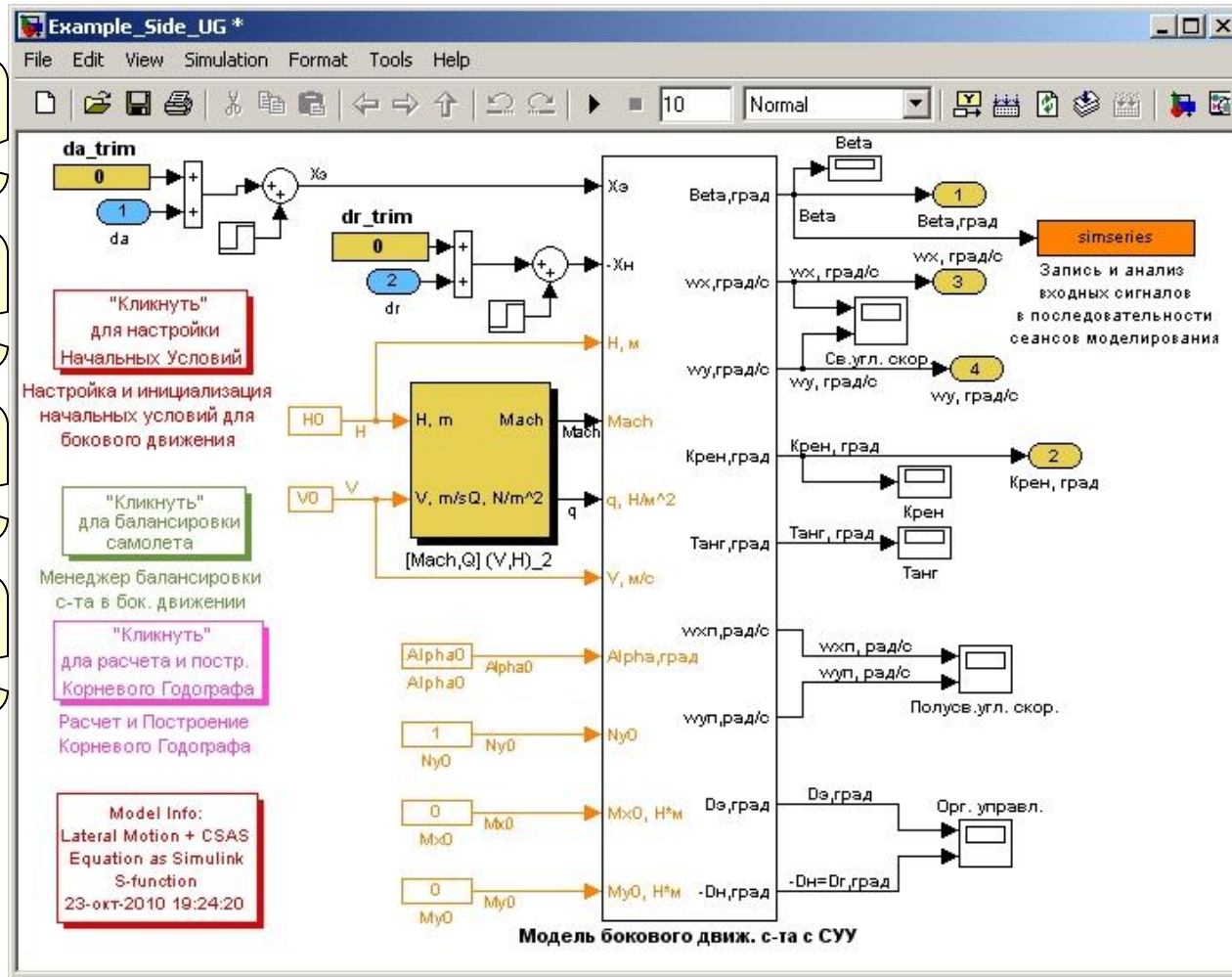
Программы FlightSim в моделях Simulink

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

Программы балансировки самолета

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

- ✓ поиск балансировки в установившемся режиме полета ($V_{зад}$, $H_{зад}$, $n_{y зад}$, $\theta_{зад}$...)
- ✓ поиск балансировки при компенсации постоянно действующих возмущающих сил и моментов
- ✓ расчет и построение балансировочных характеристик при варьировании $n_{y зад}$
- ✓ расчет и построение балансировочных 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

Управление балансировкой в продольном движении: Example3_Long_trm_UG

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/Zz	U1-управление тангажом <input checked="" type="checkbox"/>	0.0000	2.03467
-0.0000	<input checked="" type="checkbox"/> Касательная перегрузка nx	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

D_v , deg: 2.0347

РУД: 0.1868

$dN_{y_c_g}$: 0.0000

nx : -0.0000

teta, deg: 0.0000

wz, гр/с: 0.0000

Начать поиск Последов. поиск (остат) Последов. поиск (всё) Освободить модель Установить X0 **Балансировать модель** Выход

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

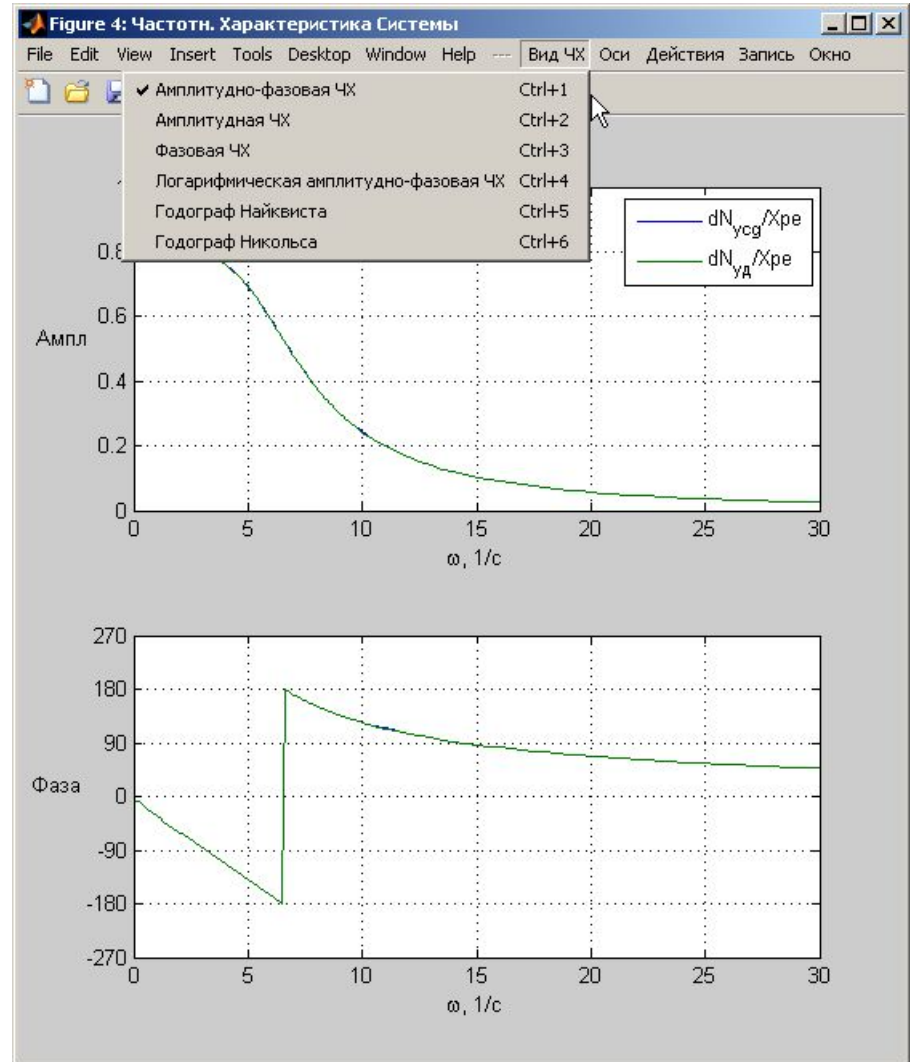
Расчет и построение частотных характеристик

Вход и выходы модели:

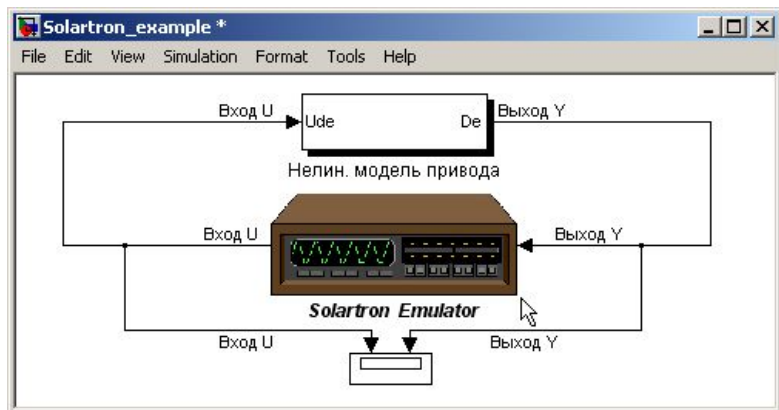


Формирование массива частот:

The dialog box is titled 'Параметры Настройки Диапазонов Частот ω , 1/с'. It contains three input fields for 'Начальная Частота' (0.1), 'Конечная Частота' (10), and 'Шаг по Частоте' (0.1). Below these are two buttons: 'Добавить Диапазон' and 'Исключить Диапазон'. At the bottom are four buttons: 'OK', 'OK/Save', 'Save', and '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

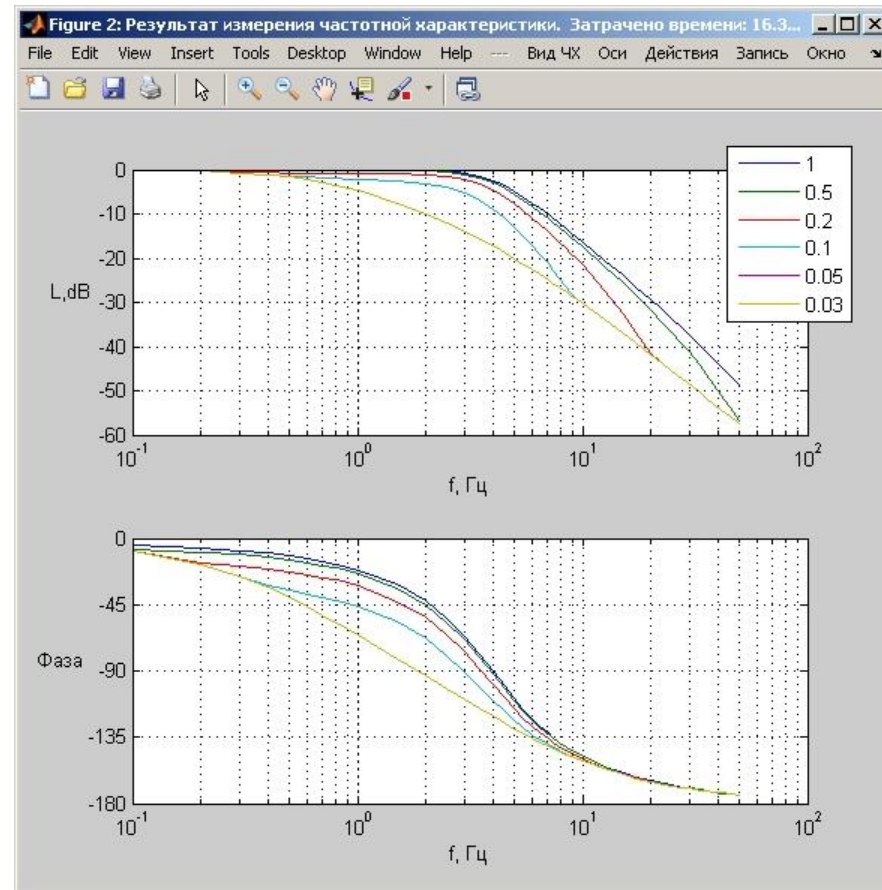
Текущая амплитуда: 0.1 Текущая частота: 0.3

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:

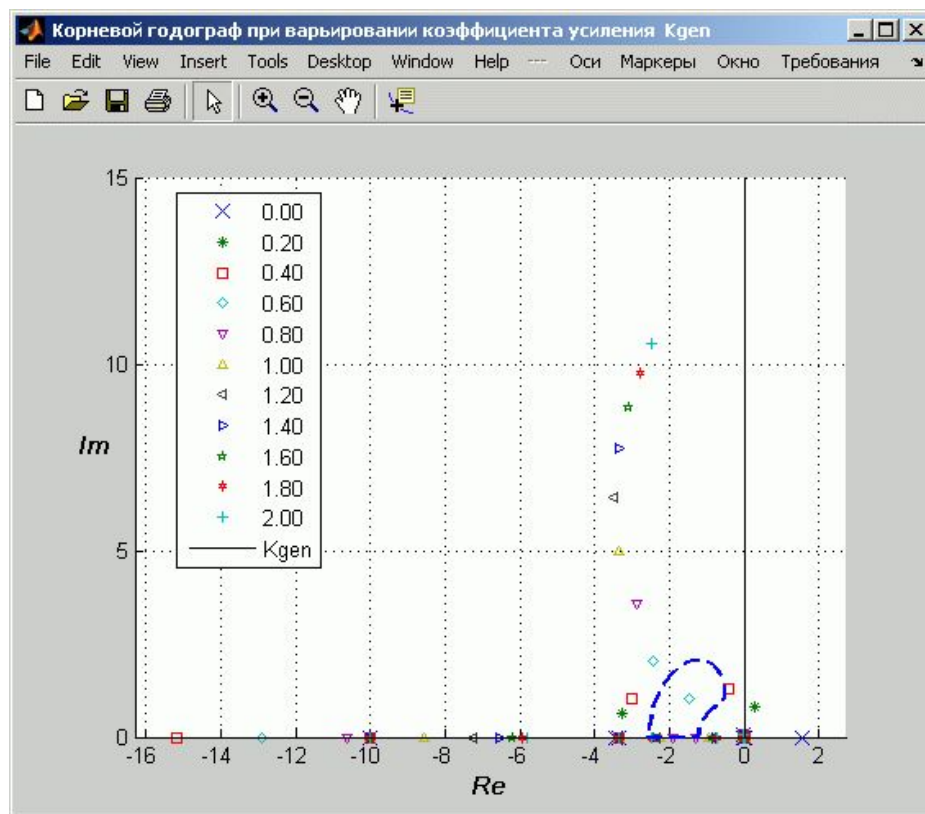
"Кликнуть"
для расчета и постр.
Корневого Годографа

Корневой годограф
при варьировании
параметра

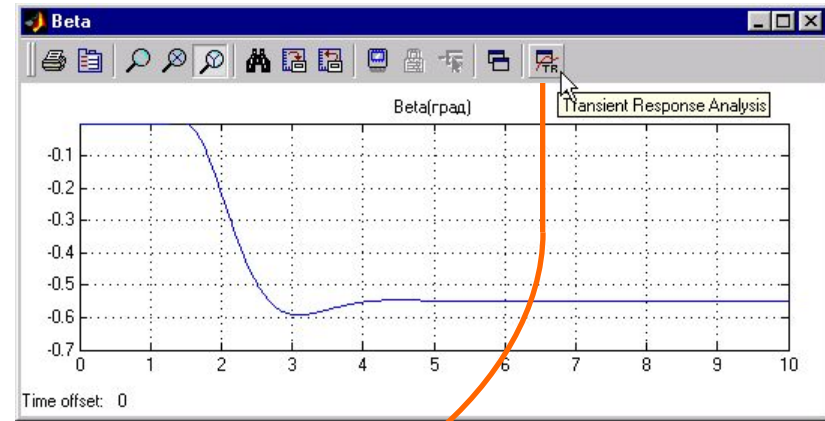
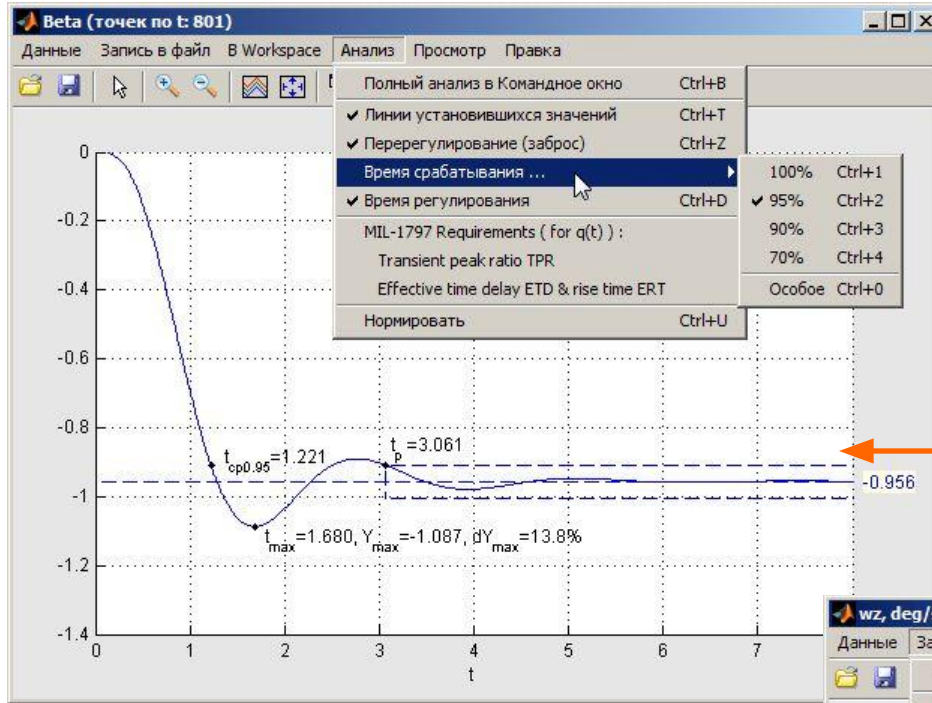
"Кликнуть"
для расчета и постр.
Корневого Годографа

Корневой годограф
при варьировании
коэффициента усилен.

Диалоговое окно "Диапазоны Вариации Параметра Kgen". Поля ввода: Начальный Kgen: 0, Конечный Kgen: 2, Шаг по Kgen: 0.1. Кнопки: 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



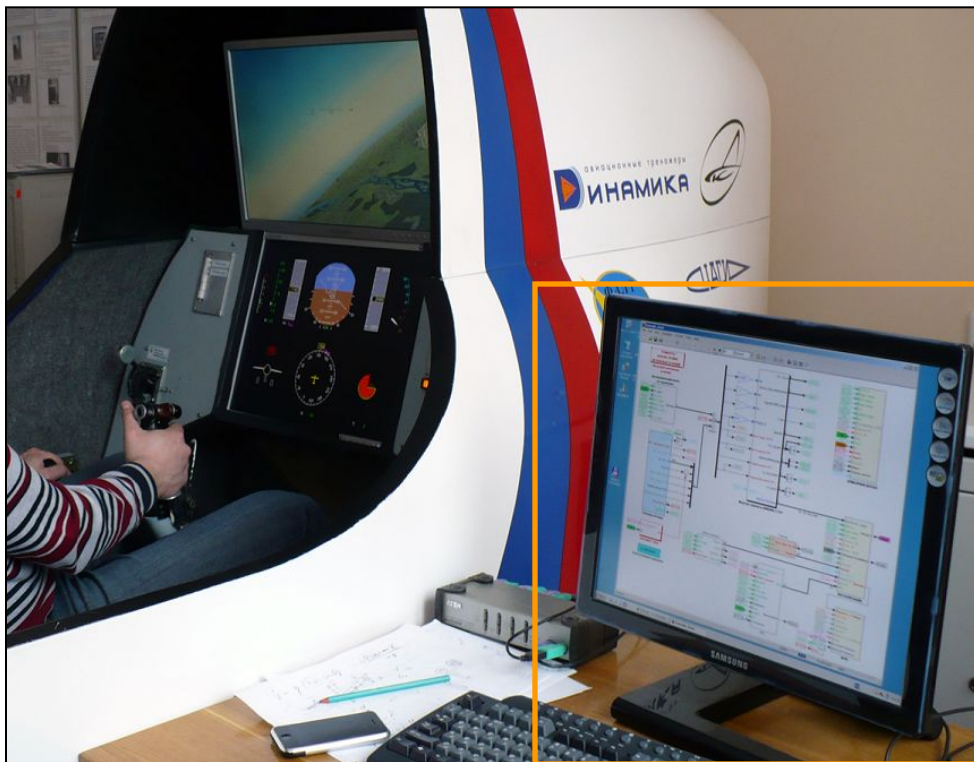
Часть 5

Применение FlightSim на пилотажных стендах и тренажерах



Примеры пилотажных стендов с FlightSim

Учебно-исследовательский пилотажный стенд



Стенд ПСПК-102



Вычислитель модели самолета
(MATLAB/Simulink, FlightSim)

Пилотажные стенды и тренажеры: структура

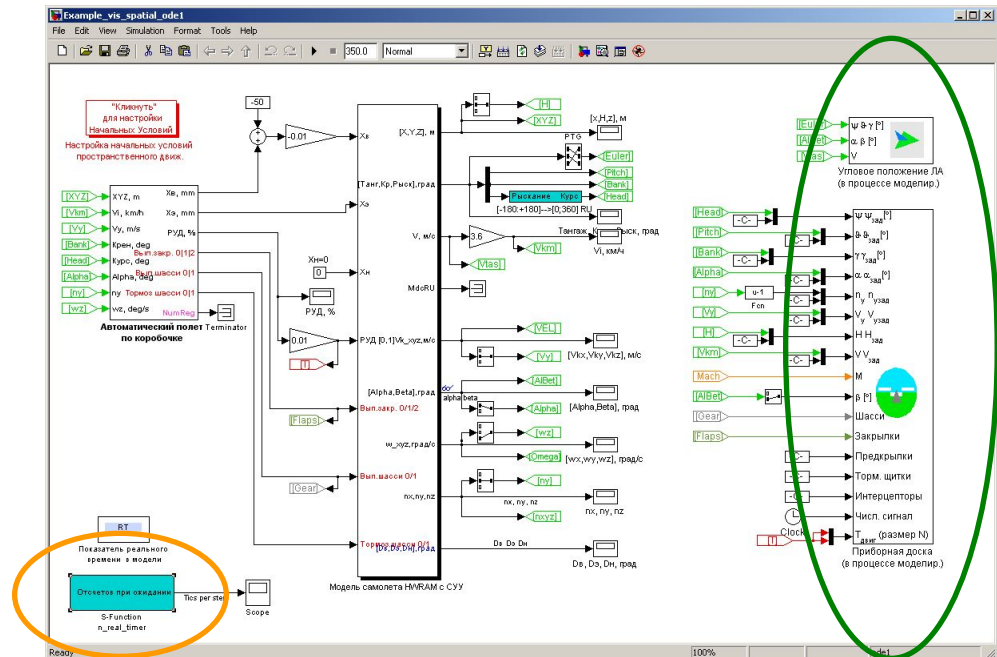


Блоки реального времени для Simulink

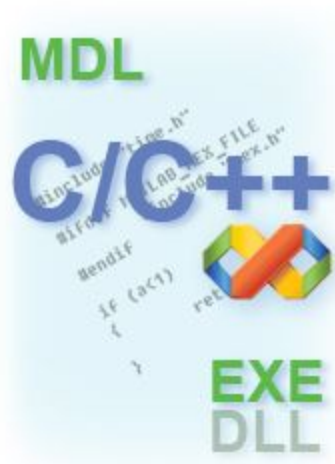
S-функции синхронизации с “реальным” временем Windows для моделей с фиксированным размером шага моделирования в Simulink:

- ✓ 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



Создание независимых приложений из моделей Simulink



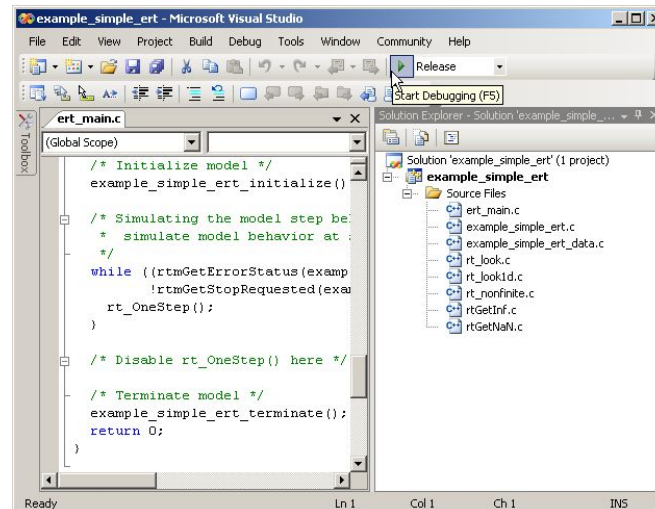
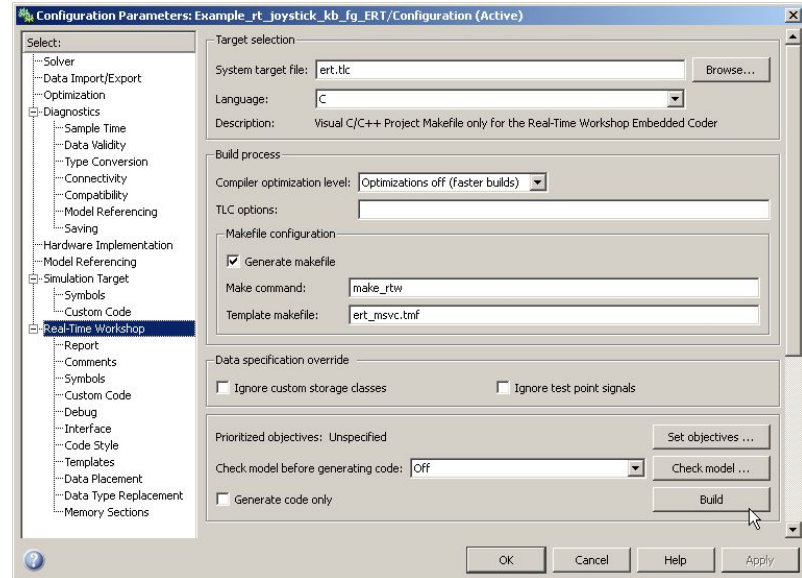
Пакеты расширения MATLAB

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.

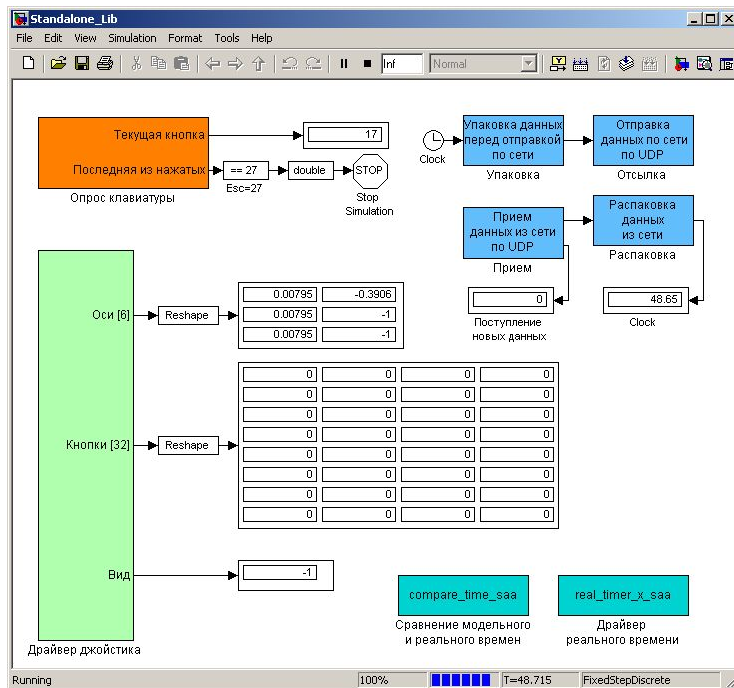


Библиотека блоков для создания НП

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)

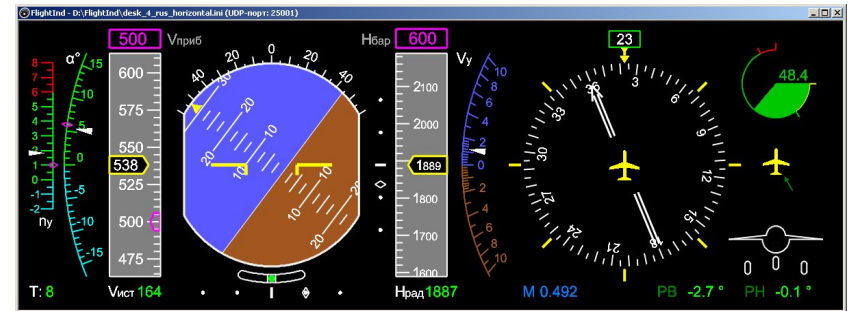


RTW, RTW EC:
ИСХОДНЫЕ КОДЫ +
НЕЗАВИСИМОЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ В
“РЕАЛЬНОМ” ВРЕМЕНИ
Windows

```
ex 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
Model simulation time:     53.74642002
Real time calculated:
Speed ratio calculated:    0.99922934
D:\Temp\standalone>
```



FlightGear



FlightInd

FS2010

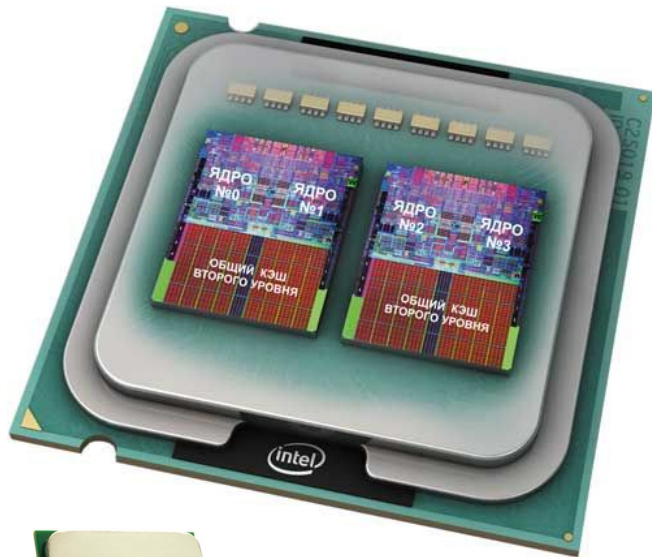
63

Распределение задач на многоядерном ПК

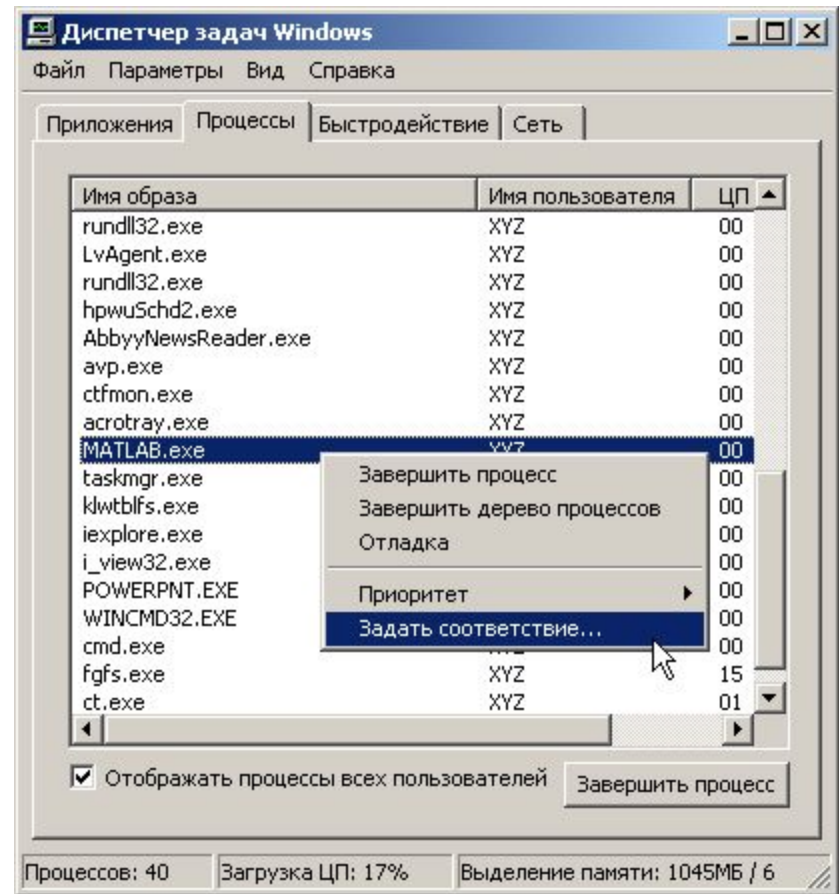
Пример распределения процессов:

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

CPU1: прочие **CPU3:** FlightInd

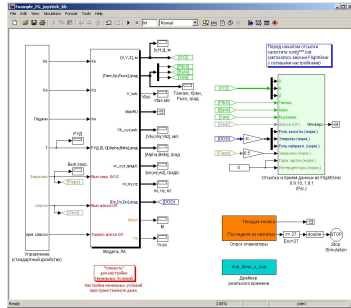


Установка распределения вручную:



Вспомогательное ПО для упрощения управления процессами: [Ashampoo Core Tuner](#), [CPU Control](#)

Создание подключаемой библиотеки (DLL)



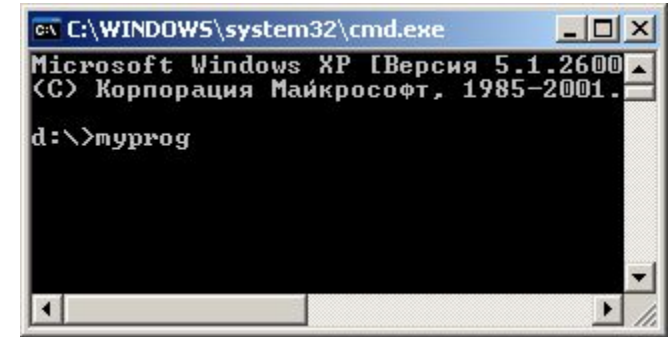
RTW EC
→

Динамическая библиотека (*.dll)



U →
← Y

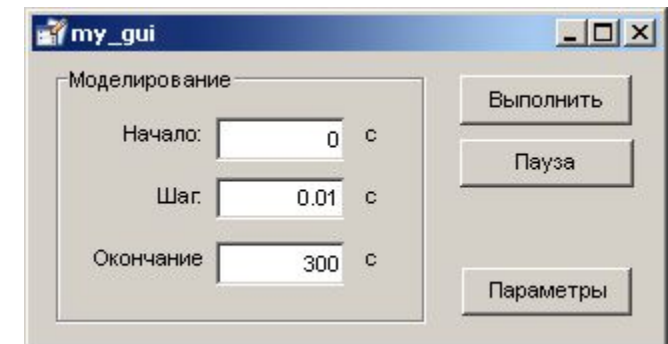
Простые консольные приложения



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

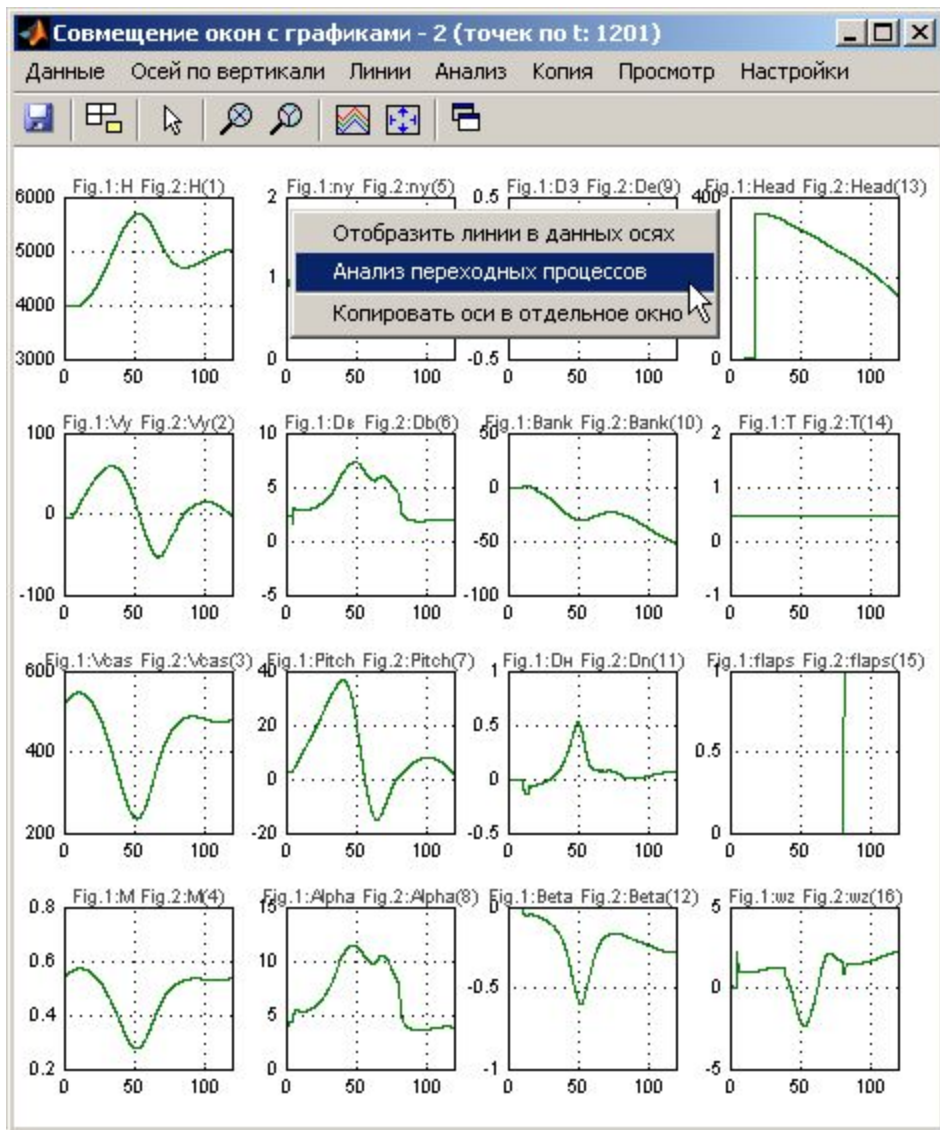
Real-Time Workshop Embedded Coder позволяет легко получить DLL для моделирования движения ЛА.

Графический интерфейс пользователя

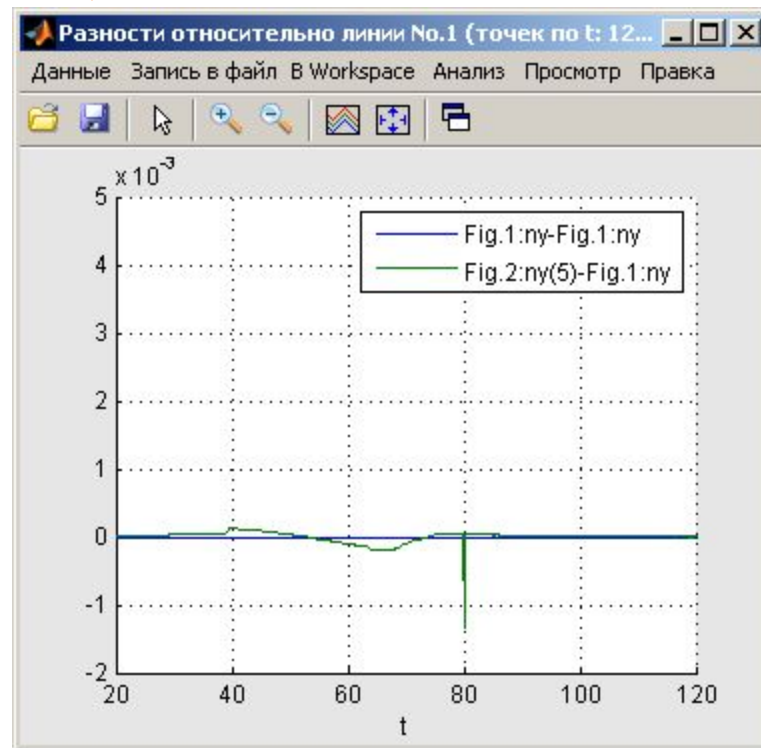


U →
← Y

Сравнение с вычислениями в Simulink



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

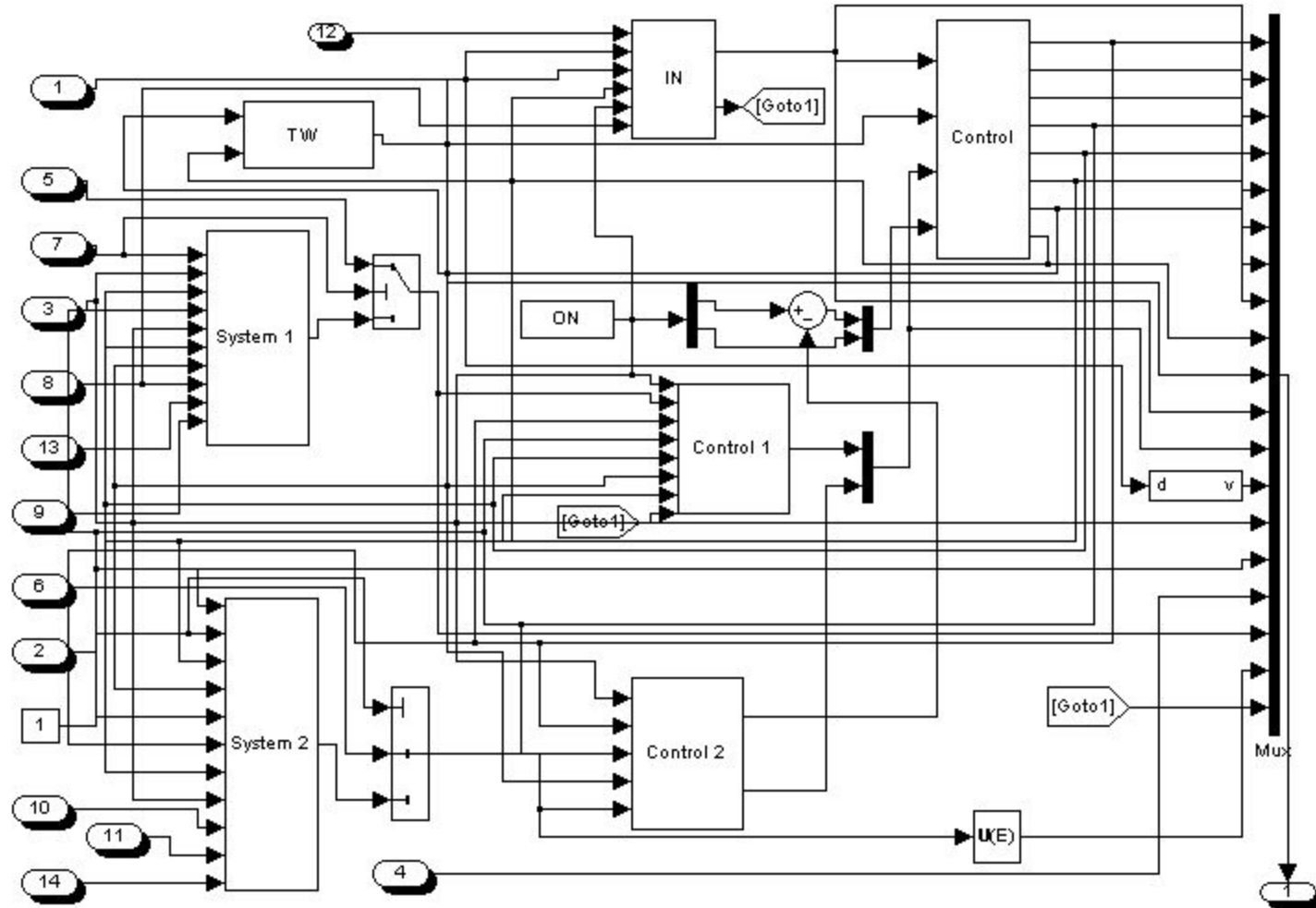


Часть 7

... и другие полезные мелочи



Пример неудачной сборки модели



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

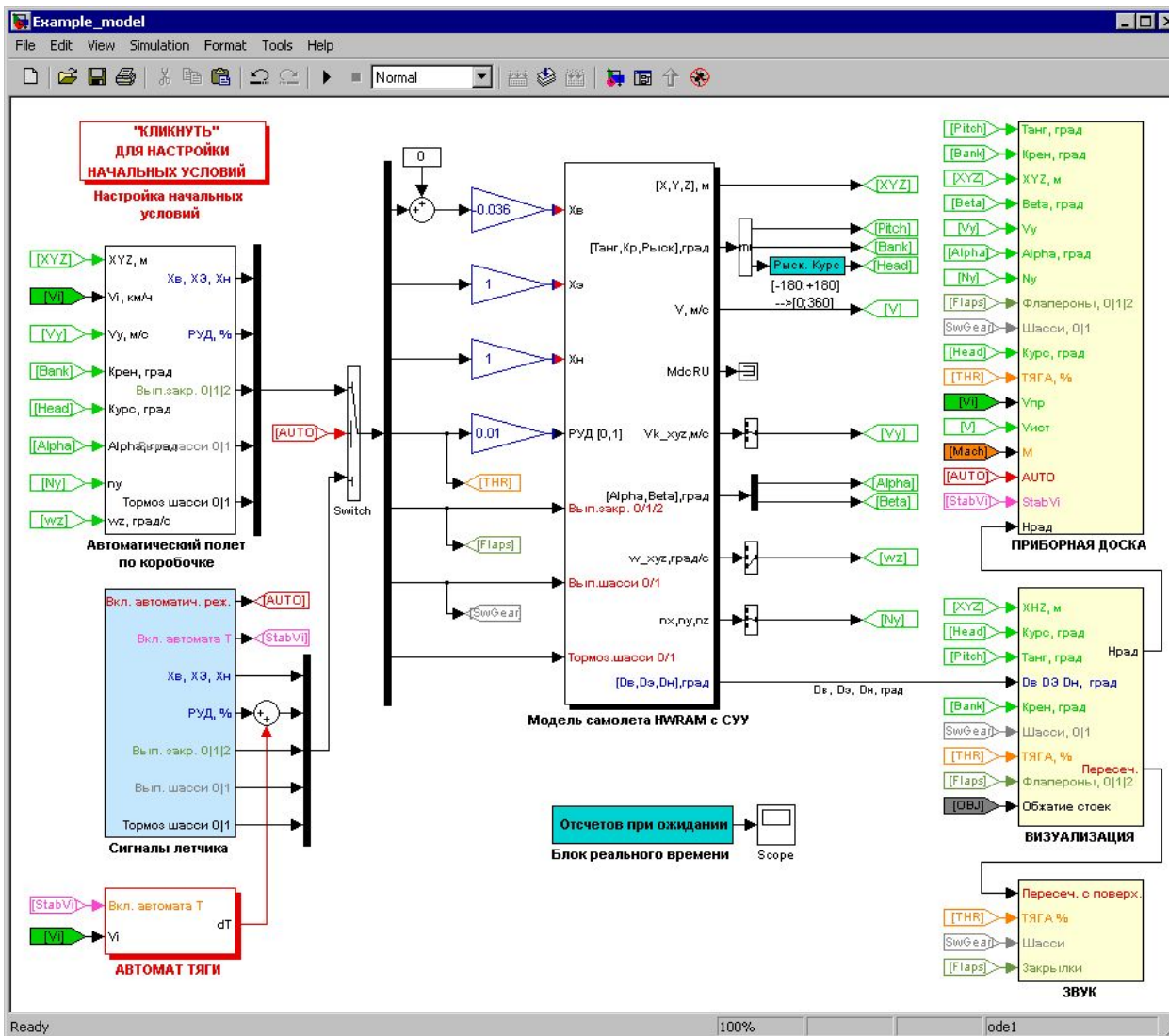
Общие требования к создаваемой модели

- ✓ 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



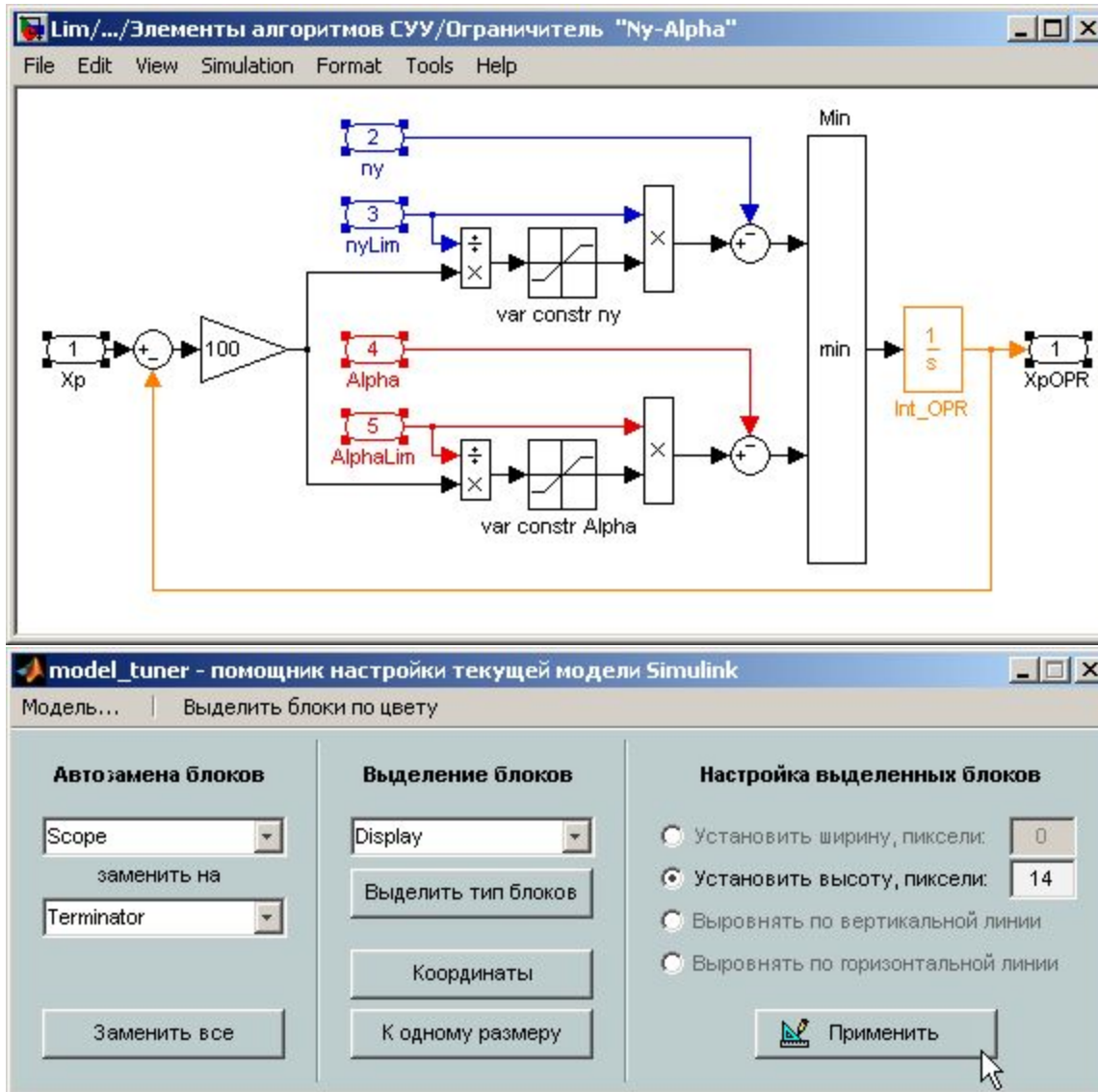
Понятная структура,
читаемый интерфейс

...

Отдельные независимые блоки:

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

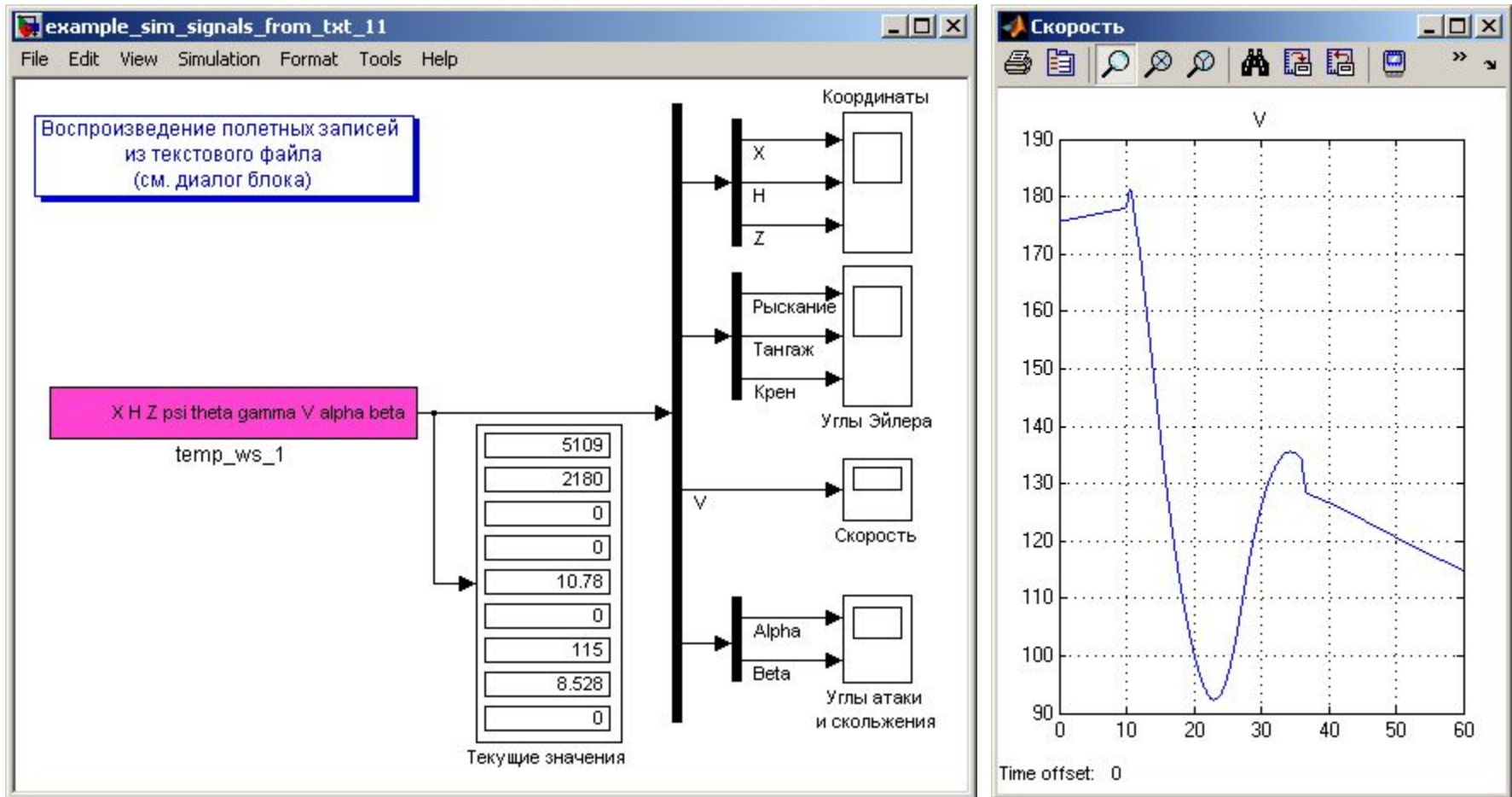
Настройка блоков создаваемой модели



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”.

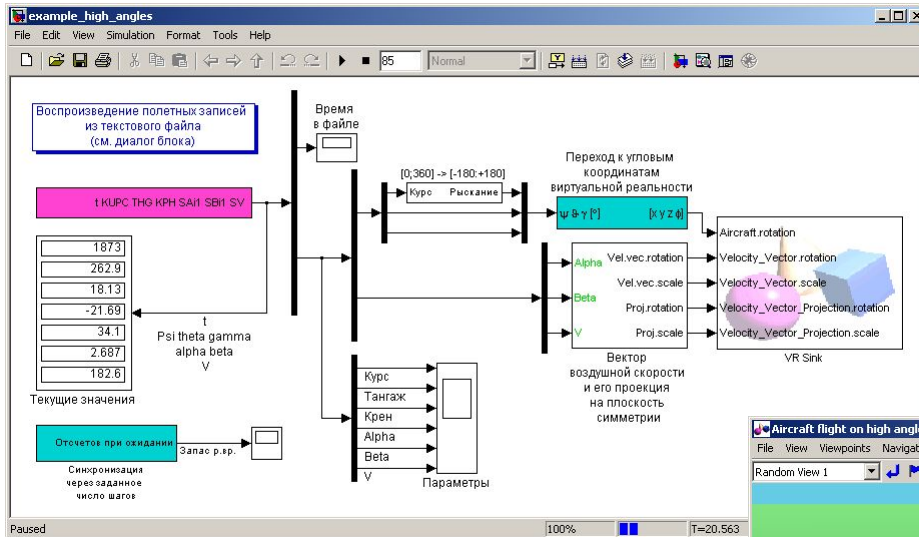
Приведение текущего окна модели к более читаемому виду. Быстрая и легкая настройка выделенных блоков по ширине и высоте, выравнивание, задание цвета: **model_tuner**

Воспроизведение полетных записей

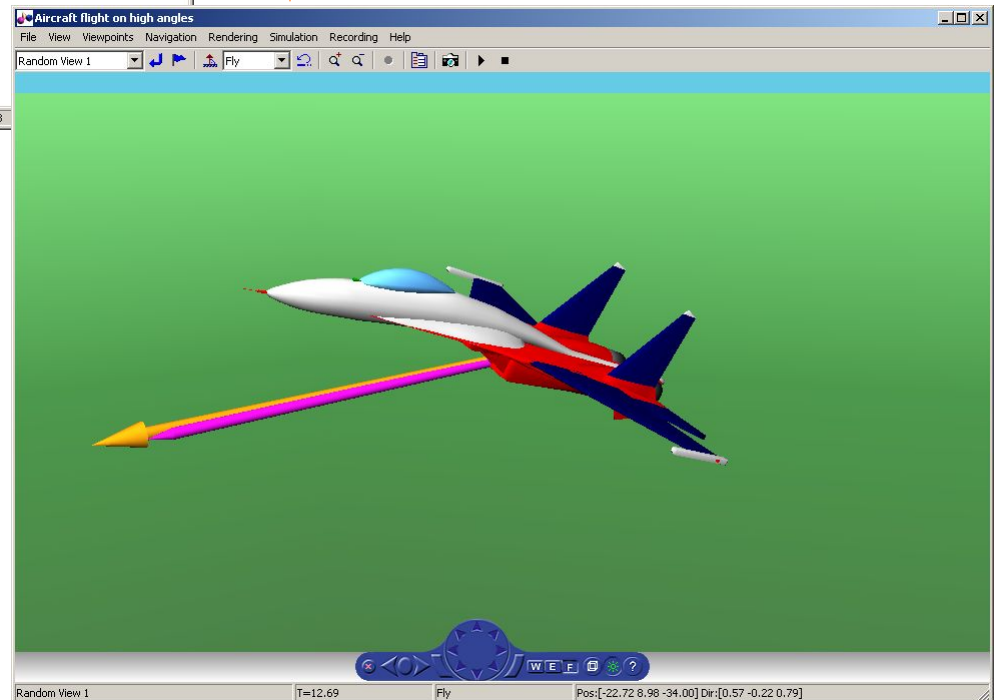


sim_signals_from_txt – воспроизведение в течение моделирования любого набора записанных параметров из текстового файла (столбцы данных по времени):
а) проверка созданной модели ЛА в Simulink по записям реальных полетов;
б) получение недостающих параметров движения.

Пример: визуализация движения по записям



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



sim_signals_from_txt:

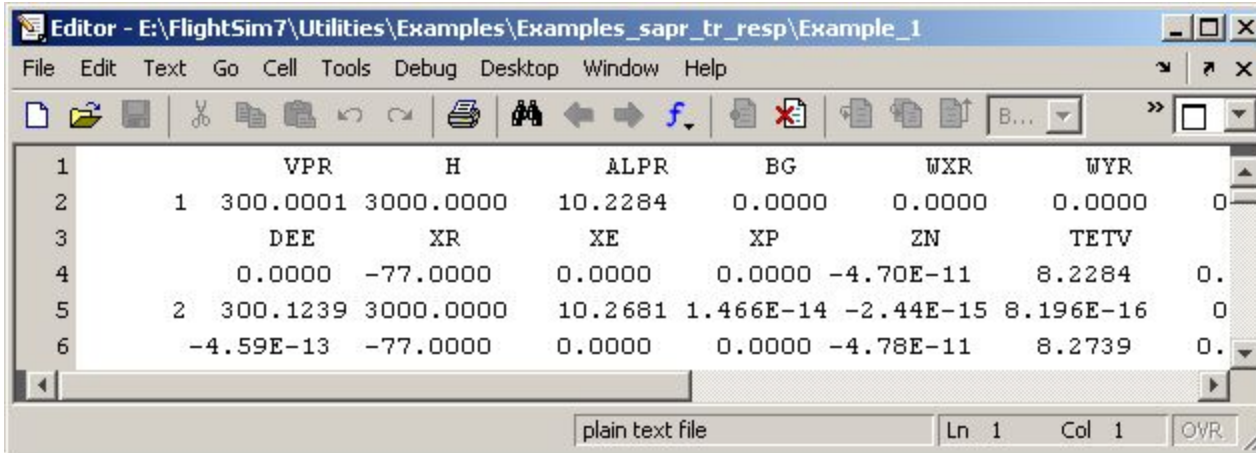
$$\psi(t), \vartheta(t), \gamma(t),$$

$$\alpha(t), \beta(t),$$

$$V(t)$$

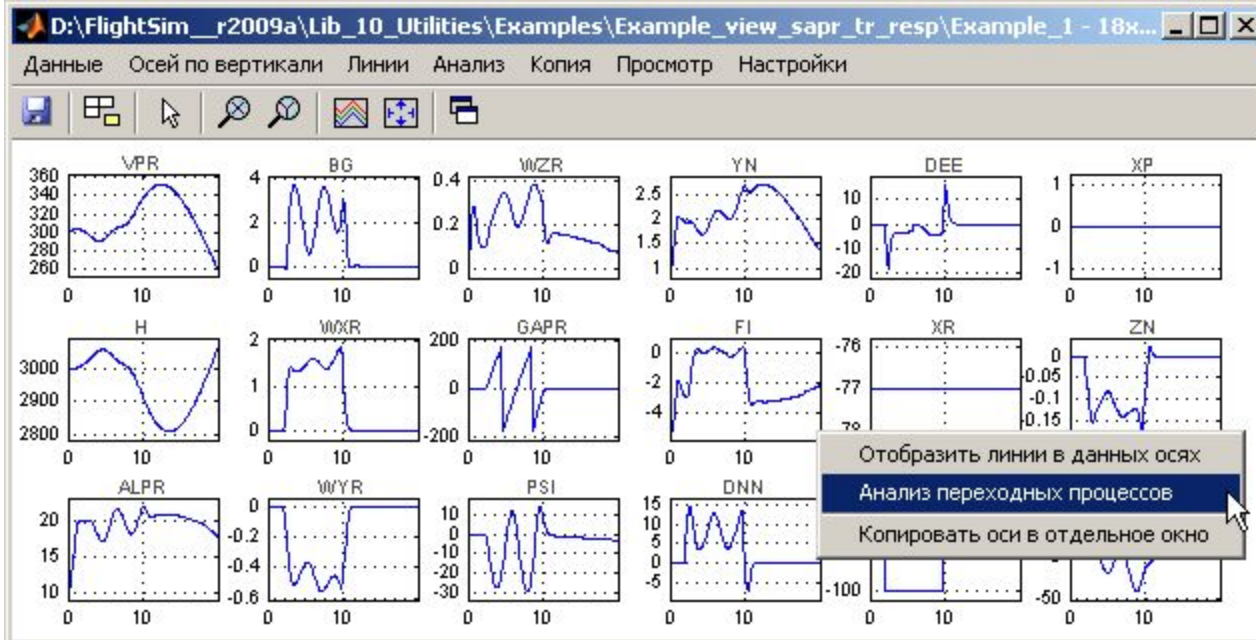
n_real_timer: моделирование с блоками визуализации в Simulink в “реальном” времени!

Сравнение с записями из САПР “Динамика”



```
Editor - E:\FlightSim7\Utilities\Examples\Examples_sapr_tr_resp\Example_1
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 VPR H ALPR BG WXR WYR
2 1 300.0001 3000.0000 10.2284 0.0000 0.0000 0.0000 0
3 DEE XR XE XP ZN TETV
4 0.0000 -77.0000 0.0000 0.0000 -4.70E-11 8.2284 0.
5 2 300.1239 3000.0000 10.2681 1.466E-14 -2.44E-15 8.196E-16 0
6 -4.59E-13 -77.0000 0.0000 0.0000 -4.78E-11 8.2739 0.
```

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

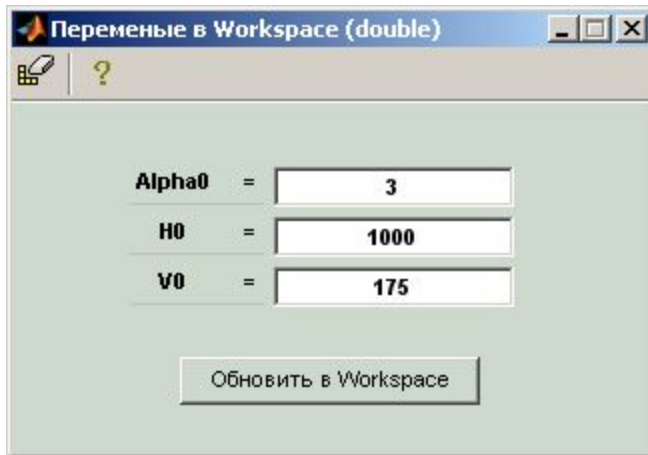


Для сравнения моделей самолета в разных системах моделирования.

Диалоги для работы с Workspace в Simulink

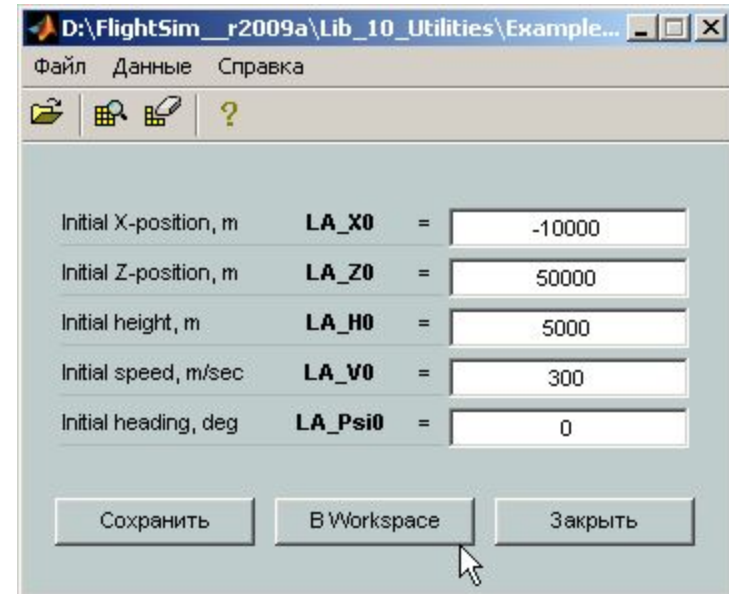
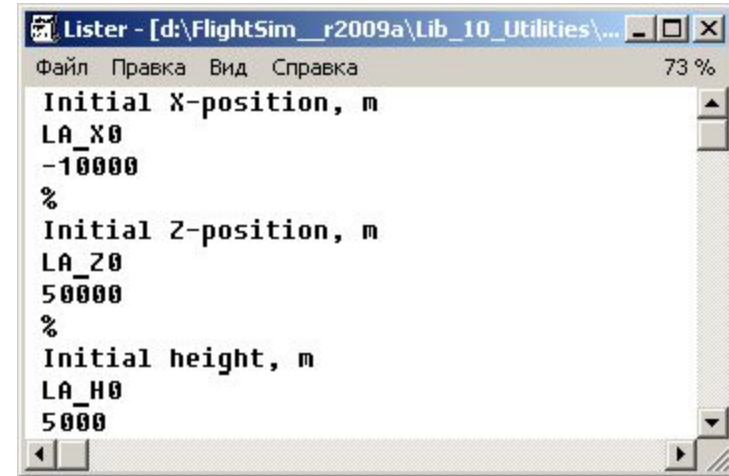
Связь вспомогательных диалоговых программ с блоками Simulink и запуск из модели:

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

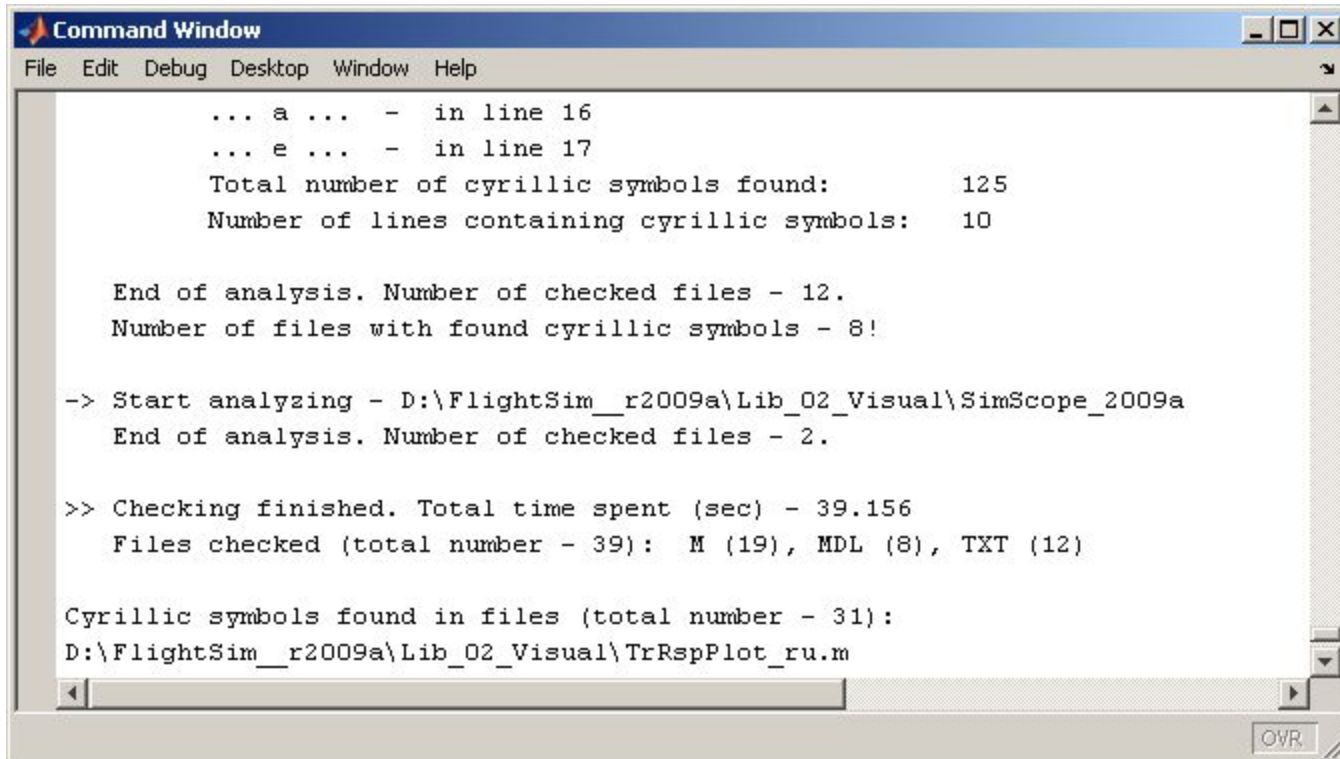


75

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
```

Заключение

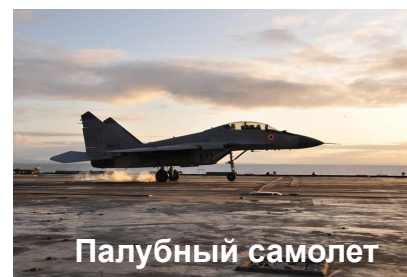
Программный комплекс FlightSim в настоящее время является основным программным средством при отработке характеристик устойчивости и управляемости перспективных самолетов и синтезе их систем управления в НИО-15 ЦАГИ.

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



Спасибо за внимание!

