

Dr. Bob Davidov

Обеспечение адекватности математической модели ее физическому прототипу

Цель работы: Ознакомиться с возможностями пакета Simulink Design Optimization для решения задач адекватности математической модели.

Задача работы: Освоить на примере последовательность операций построения адекватной модели средствами Simulink Design Response.

Приборы и принадлежности: Персональный компьютер, интегрированная среда Матлаб с пакетом Simulink Design Optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Модуль МатЛАБ Parameter Estimation помогает повысить адекватность компьютерной модели ее физическому прототипу. В качестве входных данных модуль использует Simulink модель и экспериментальные данные входных воздействий и откликов физического прототипа модели. Помимо оценки параметров модуль позволяет выполнить предварительную обработку экспериментальных данных и провести валидацию модели.

В этой работе на примере уточнения параметров Simulink модели показаны возможности МатЛАБ для повышения адекватности модели.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Модуль МатЛАБ **Parameter Estimation** помогает повысить адекватность компьютерной модели ее физическому прототипу. Модуль входит в пакет **Simulink Design Optimization**, который также содержит модуль **Response Optimization** предназначенный для оптимизации моделей систем управления с целью повышения точности и быстродействия.

Модуль Parameter Estimation позволяет:

- импортировать экспериментальные данные и делать их предварительную обработку,
- выполнять поиск адекватных параметров модели,
- сравнивать и проверять получаемые результаты оценки.

Для оценки адекватности модели прототипу Parameter Estimation использует экспериментальные данные. Данные можно вводить из рабочего пространства (workspace), файлов с расширением MAT, из электронной таблицы Microsoft Excel, из ASCII и CSV файлов.

Предварительная обработка данных (Preprocessing)

Экспериментальные данные довольно часто содержат дрейфы и смещения, шумы, выбросы, пропущенные значения, искажения, вызванные ограничением полосы пропускания, и другие аномалии, которые могут привести к неточной оценке параметра.

Модуль **Data Preprocessing Tool** (Рис. 1) пакета **Simulink Design Optimization** позволяет устранить источники этих погрешностей.

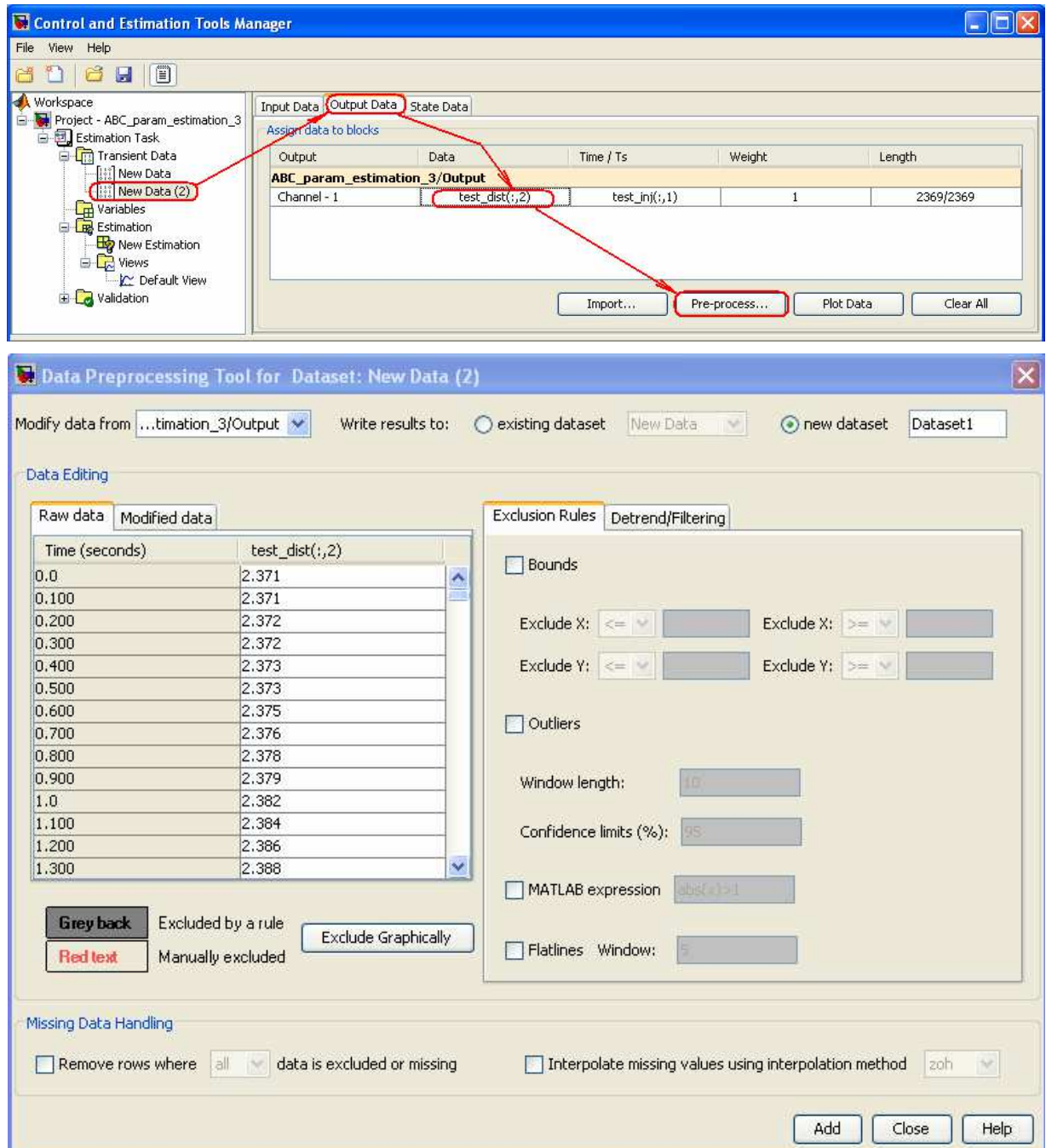
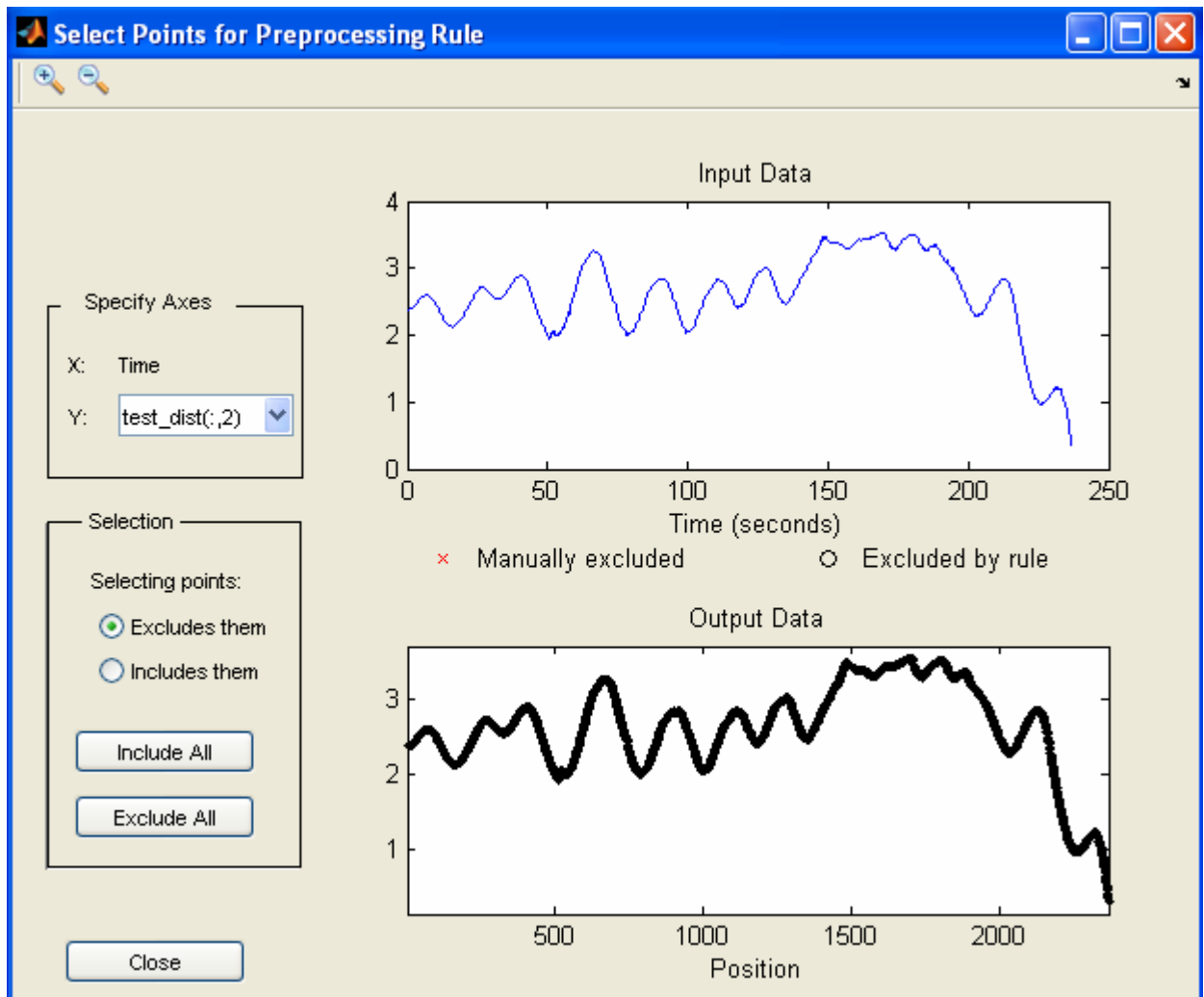
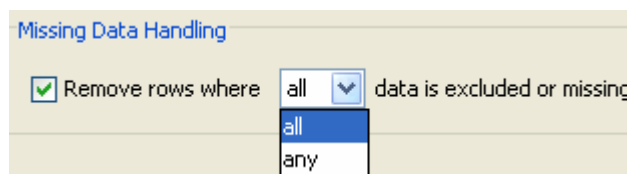


Рис. 1. Окно модуля **Data Preprocessing Tool** для удаления сомнительных данных. Окно открывается при помощи **Control and Estimation Tools Manager** (путь: меню модели > **Tools** > **Parameter Estimation** далее, как показано на диаграмме этого рисунка выше). Нежелательные отклонения можно корректировать используя графические средства или с помощью правил исключения .

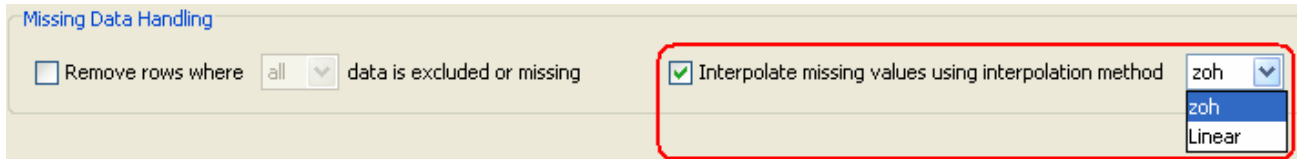
Наблюдать за результатами обработки экспериментальных данных можно по таблице входных / выходных данных Raw data Modified data или при помощи соответствующих графиков вызываемых по команде Exclude Graphically:



Строки с отсутствующими экспериментальными данными обозначаются как NaN. Для удаления отсутствующих данных сделайте следующие установки в поле **Missing Data Handling** интерфейса **Preprocessing**:



Для заполнения строк отсутствующих данных используйте интерполяцию:



Примечание. zoh (Zero-order hold) – это интерполяция нулевого порядка которая копирует в строки отсутствующих данных предшествующие данные.

Выбросы (**outliers**) – это данные, которые отличаются от среднего значения более чем на три стандартных отклонения. Для удаления выбросов, установите флажок ☒ **Outliers**. Можно задать количество данных, используемых для расчета выбросов **Window length:** любым положительным целым числом, и использовать доверительные интервалы **Confidence limits (%):** от 0 до 100 %.

Чтобы удалить среднее значение из экспериментальных данных выберите ☒ **Detrending** на закладке Detrend/Filtering.

Для фильтрации данных необходимо взвести флажок ☒ **Filtering** и выбрать тип фильтра. Для фильтра первого порядка **First order** можно задать постоянную времени **First order filter with time constant** . Для передаточной функции **Transfer function** необходимо ввести коэффициенты А и В. Для идеального фильтра **Ideal** (без спадов и пульсаций) следует выбрать полосу (**Pass/Stop**) и задать ее диапазон в Гц.

Обработку экспериментальных данных можно выполнять используя уравнения МатЛАБ ☒ **MATLAB expression** и заданием граничных значений ☒ **Bounds** данных массивов X и Y.

Массив предварительной обработки экспериментальных данных командой **Add** можно переписать в массив исходных данных обработки ☒ **existing dataset** или в новый массив ☒ **new dataset** .

Валидация (Validation)

Модуль **Estimation** включает также процедуру **Validation*** которая сравнивает выходные данных модели с независимым набором экспериментальных данных. Процедура необходима для определения, является ли модель адекватной и как точно модель отражает динамику системы.

Примечание*: Согласно стандарту валидация – это “Подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены”.

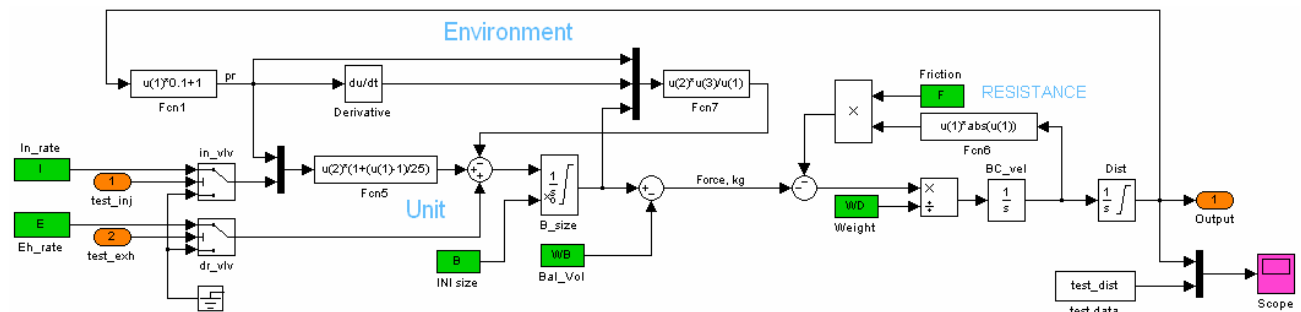
Simulink Design Optimization позволяет сравнить несколько выходов модели с независимыми наборами данных для отбора параметров модели наиболее полно соответствующих параметрам прототипа.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

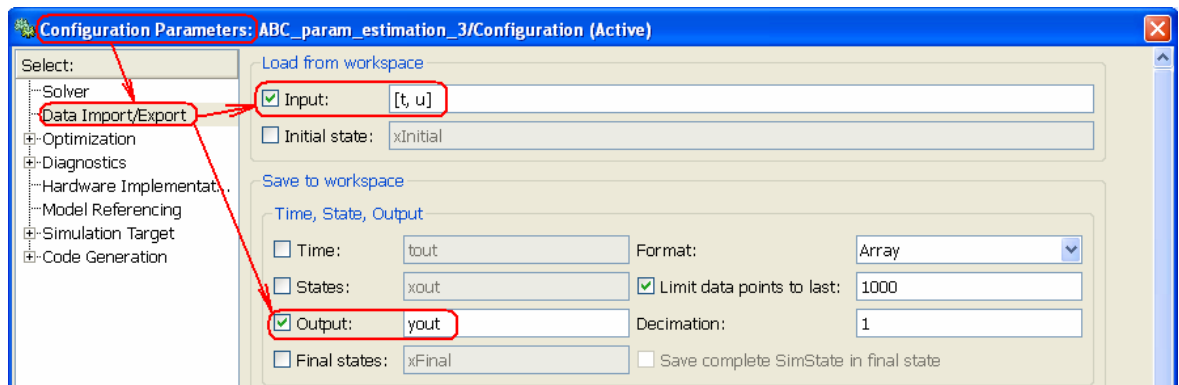
Для знакомства с механизмом обеспечения адекватности математической модели ее физическому прототипу необходима модель прототипа и экспериментальные данные реакции прототипа на входные воздействия. При отсутствии экспериментальных данных их можно заменить данными, смоделированными в Simulink при помощи модели прототипа.

Задание 1. Обеспечение адекватности модели.

1. В среде Simulink соберите пример модели объекта системы управления находящегося в среде которая влияет на состояние объекта.



2. Подключите массивы данных экспериментальных воздействия на объект к двум входным портам модели. Для этого
 - 2.1. В окне меню модели > Simulation > Configuration Parameters > Data Import/Export установите флажки параметров Input и Output. Это позволяет получению моделью данных workspace и возврат данных модели в workspace через входные и выходные порты верхнего уровня модели: 1 → ; 2 → ; → 1 .

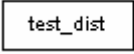


- 2.2. Для массив [t, u] данных двух входных портов модели имеет следующий формат

```
t = test_inj(:,1);  
u(:,1) = test_inj(:,2);  
u(:,2) = test_exh(:,2);
```

где t – вектор столбец времени экспериментальных данных, $u(:,1)$ и $u(:,2)$ – вектора экспериментальных воздействий для первого и второго порта модели.

3. Для контроля результатов настройки параметров модели подключите к осциллографу модели экспериментальные данные реакции физического прототипа на экспериментальные воздействия.

Данные  блока библиотеки [Simulink > Sources > From Workspace](#) могут иметь следующий формат.

Массив

```
test_dist = [t(:,1), dist(:,1)];
```

или структура

```
test_dist.time = [TimeValues];
```

```
test_dist.signal.values = [DataValues];
```

4. Присвойте выделенным параметрам модели числовые значения максимально приближенные значениям реальных параметров, например

```
E = -1.4;
```

```
F = 150;
```

```
I = 0.7;
```

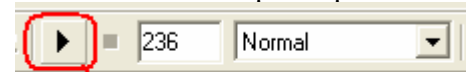
```
B = 7;
```

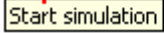
```
WB = 7;
```

```
WD = 78;
```

Примечание. После присвоения данные должны находится в рабочей области МатЛАБ ([Workspace](#)).

5. Проверьте работоспособность модели с назначенными параметрами и



экспериментальными данными. Запустите модель , найдите реакцию модели на экране осциллографа .

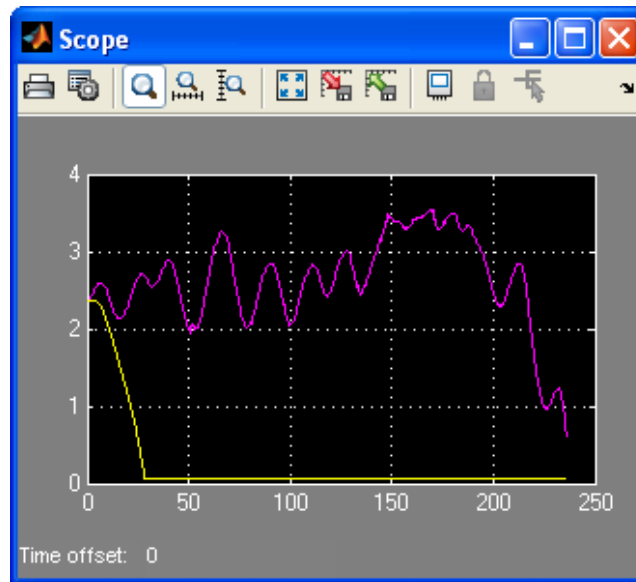
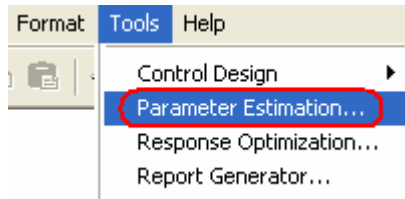


Рис. 2. Данные экспериментального отклика физического прототипа модели (розовый график) и реакция модели на экспериментальные воздействия (желтый график). Заметно существенное отличие в реакции модели и прототипа на одно и тоже воздействие.

Данные Рис. 2 показывают, что поведение модели не соответствует поведению ее физического прототипа. Для обеспечения лучшей адекватности модели ее прототипу выполните следующие шаги.

6. Откройте менеджер **Control and Estimation Tools** командой меню модели > Tools >



Parameter Estimation.

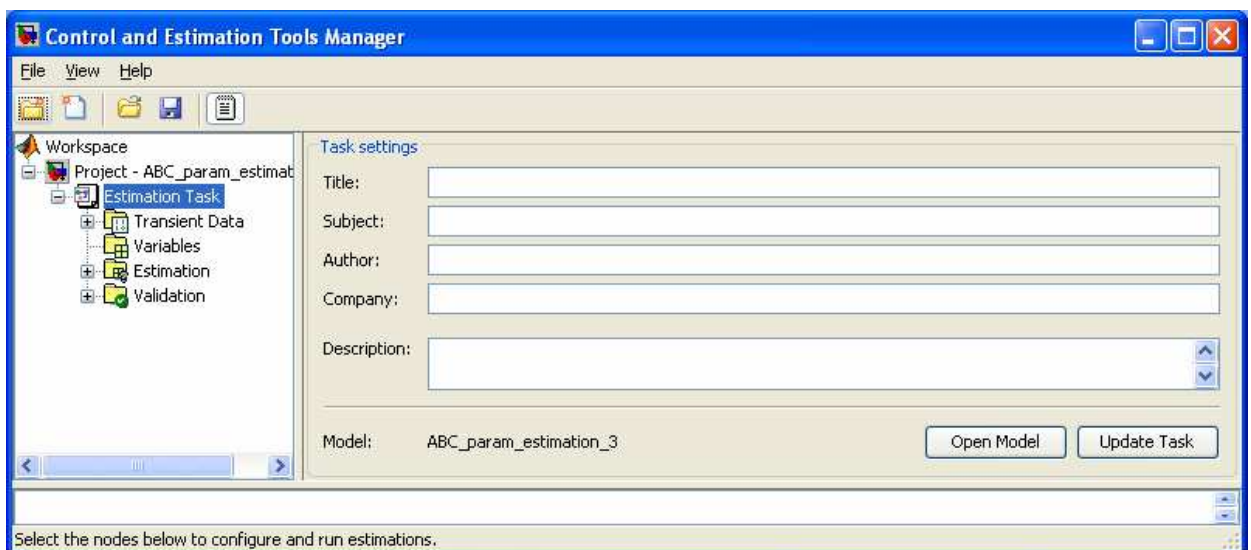
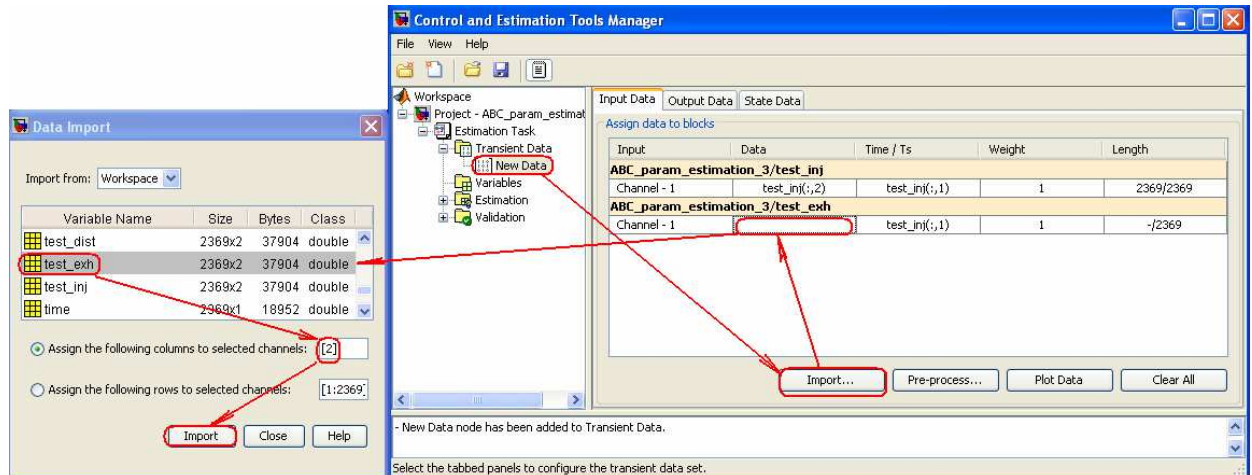
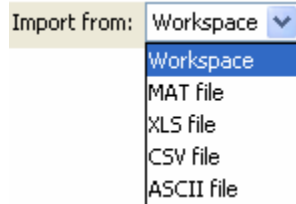


Рис. 3. Окно Control and Estimation Tools Manager.

- Создайте  новые  **Transient Data** данные. При необходимости измените имя раздела **New Data**.
- Выполняя следующие последовательности заполните колонки Data и Time таблицы соответствующими экспериментальными данными воздействия на прототип.

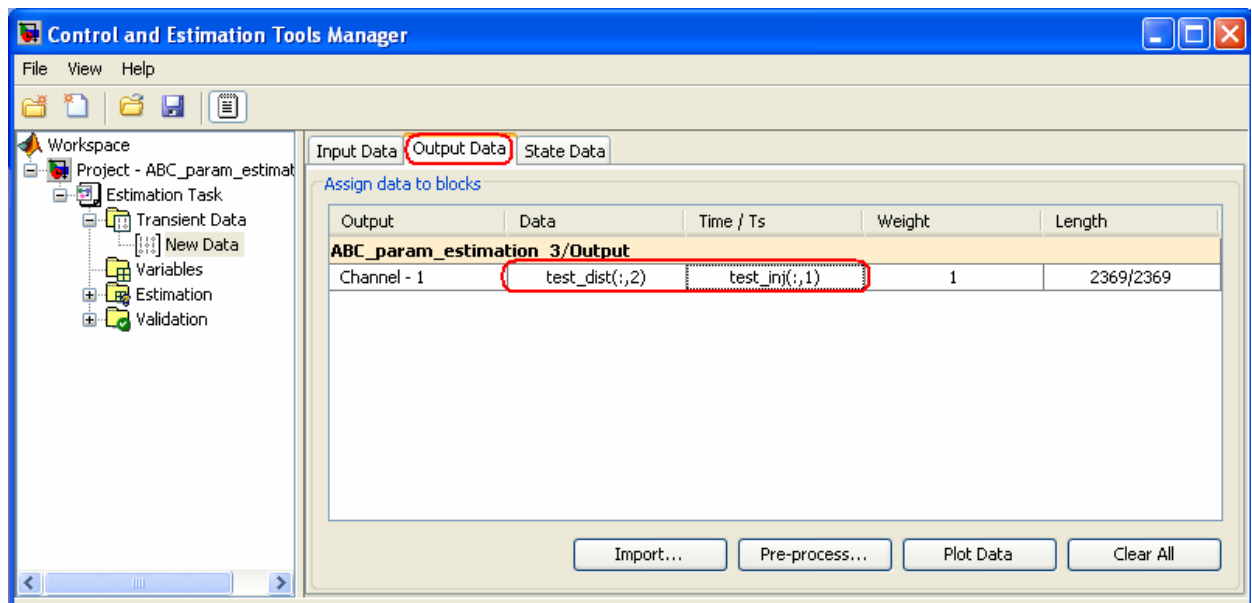


Примечание. Кроме рабочего пространства данные могут быть взяты из MAT, XLS, CSV

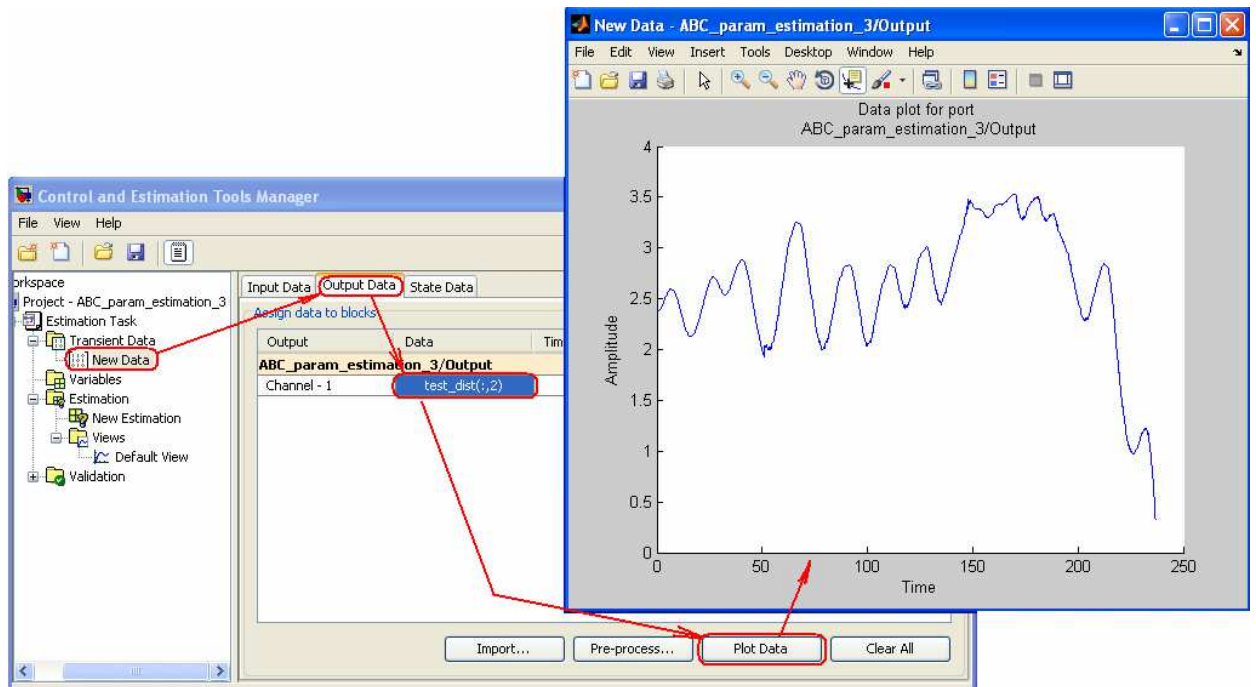


или ASCII файла

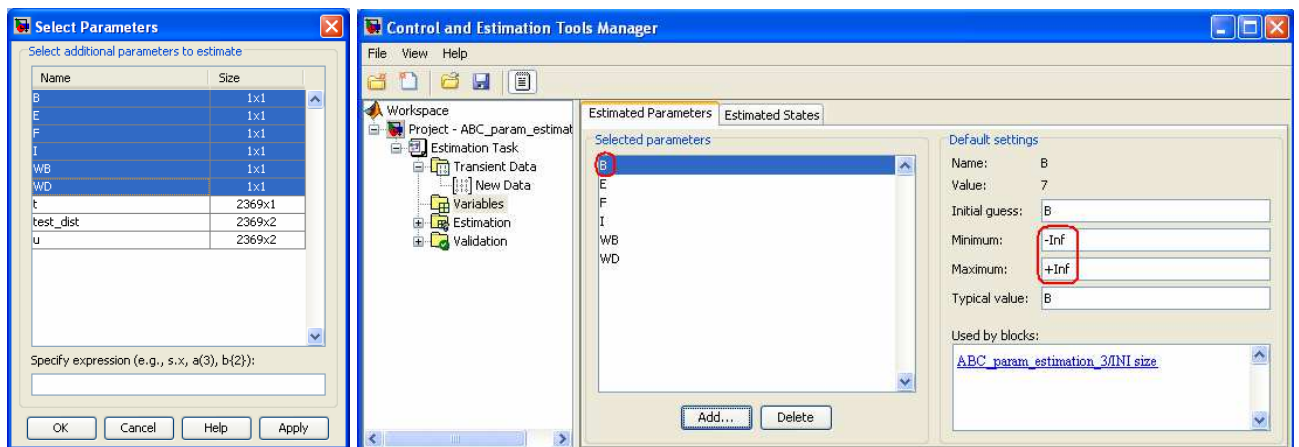
- Перейдите на закладку **Output Data** и проделайте то же самое с подключением экспериментальных данных реакции прототипа модели.



Построить график экспериментальных данных можно следующим образом.



10. Укажите на раздел Variables и нажмите кнопку . Выберите в появившемся окне **Select Parameters** параметры модели которые необходимо привести в соответствие параметрам прототипа. Нажмите кнопку .
11. Сократите диапазон $(-\text{Inf} \dots +\text{Inf})$ настройки каждого параметра до области существования параметра. Это облегчит поиск нахождения адекватного значения параметра. Однако, иногда, для изменения начальной точки алгоритма поиска глобального экстремума целесообразно расширить ограничения за пределы области существования параметров.

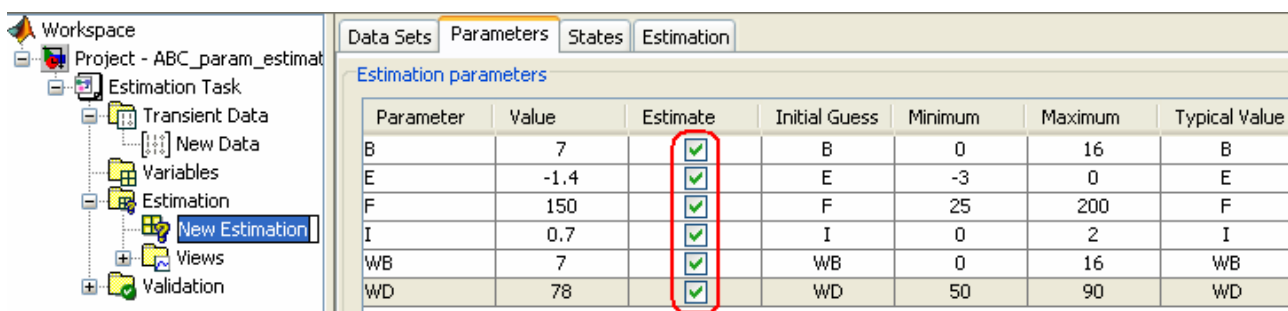


12. Перейдите в раздел Estimation, нажмите кнопку , выделите раздел New Estimation. При необходимости измените имя раздела **New Estimation**.

13. На закладке **Data Sets** поставьте галочку напротив

Data Set	Selected
New Data	☒

14. В закладке **Parameters** выберите параметры которые необходимо настроить.



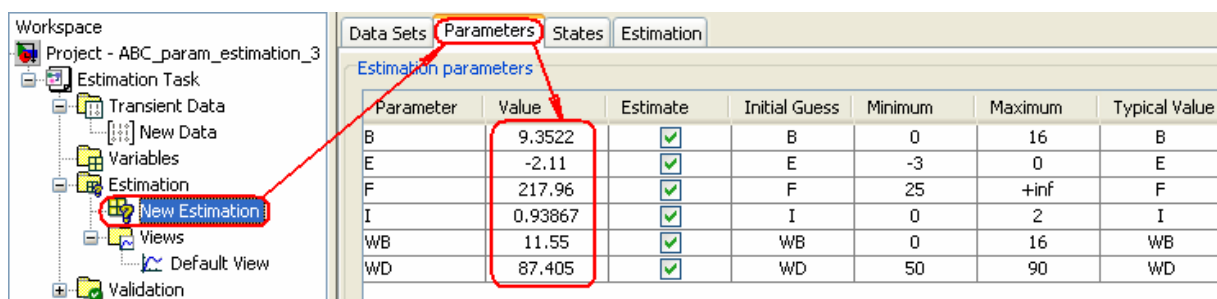
15. В закладке **Estimation** поставьте галочку ☒ **Show progress views** - показывать процесс настройки параметров.

16. При необходимости в закладках раздела **Estimation Options...** задайте время работы модели (Start time и Stop Time), метод и алгоритм настройки, допуски и число итераций и др. параметры.

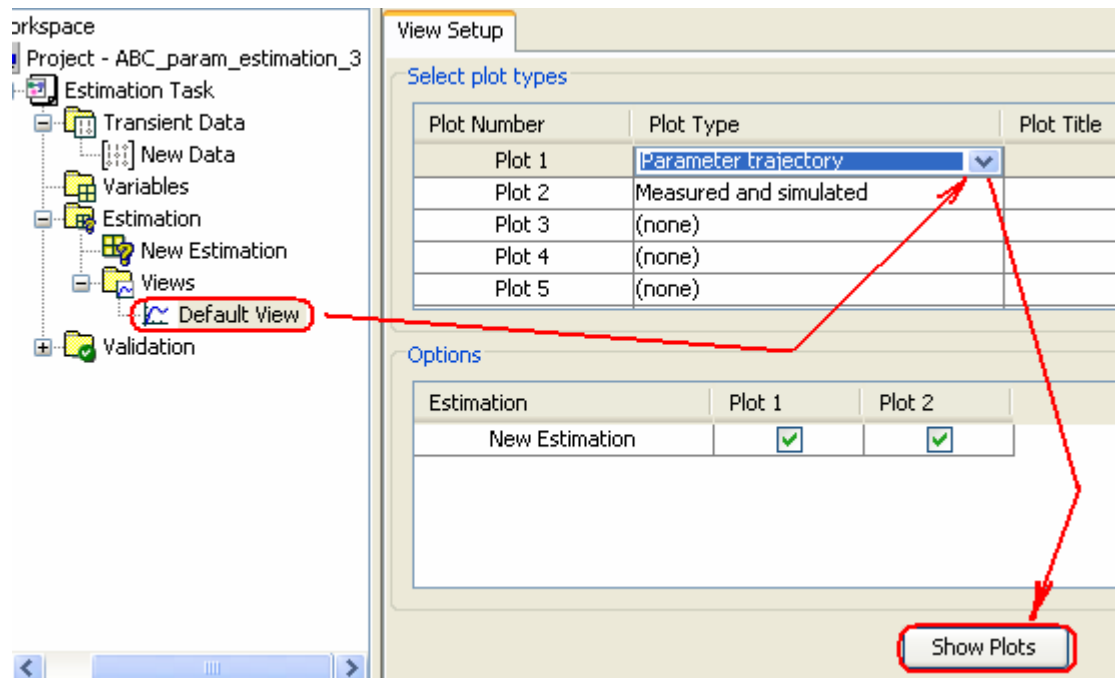
17. Запустите Estimation - настройку параметров модели нажатием на кнопку **Start**.

18. Во время настройки параметров текущие величины параметров модели и реакция модели отображаются на двух основных графиках. Данные настройки выводятся в табличном виде.

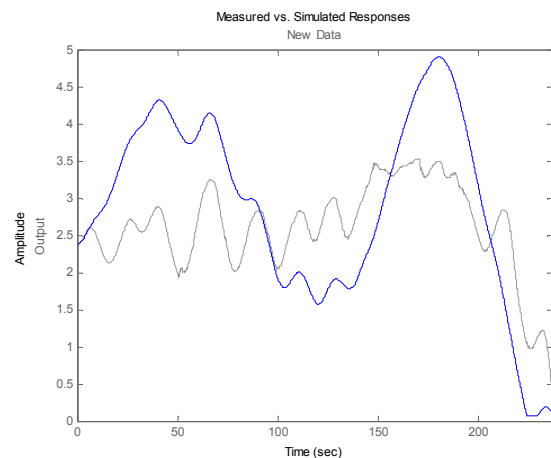
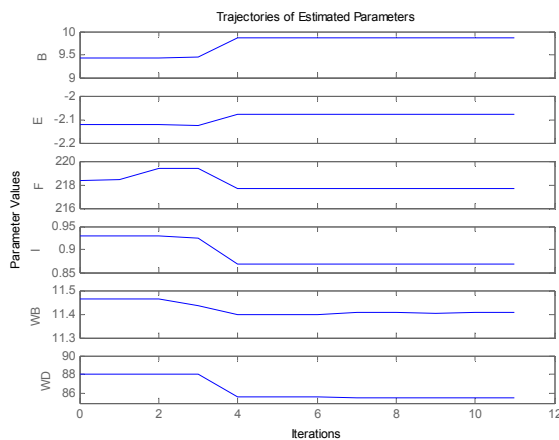
19. После окончания Estimation (процесса настройки параметров) откройте столбец с вычисленными значениями параметров.



Результаты в графическом виде можно запросить следующим образом.



20. При неудовлетворительных результатах настройки можно изменить исходные данные (список параметров, диапазон изменения параметров модели, параметры Estimation и др.) и повторить настройку. Конечное состояние предыдущей настройки используется как начальное состояние новой настройки параметров.



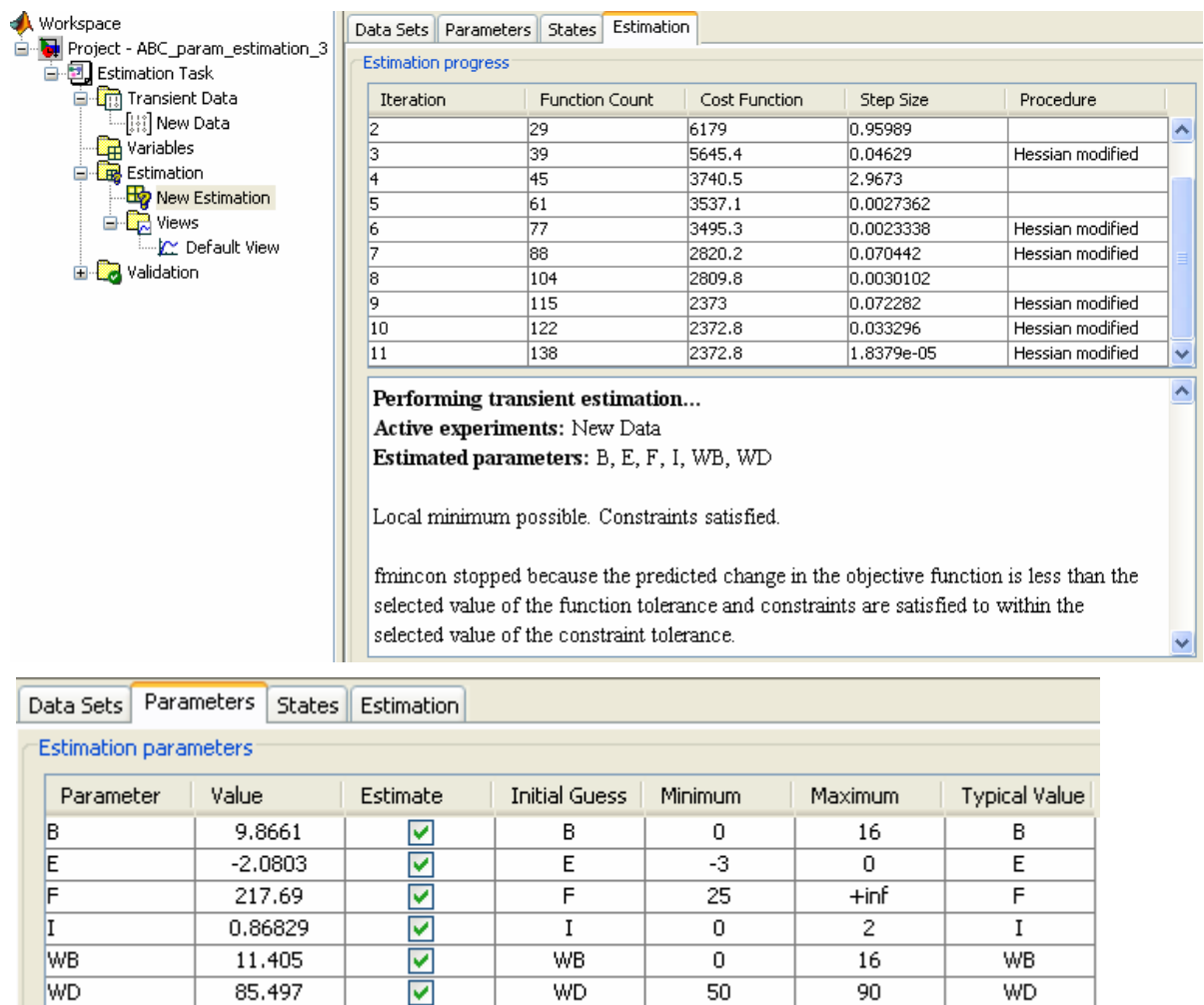


Рис. 4. Пример промежуточных результатов **Estimation** (настройки параметров).

Показанные графики отклика модели и прототипа совпадают лучше чем до процесса **Estimation** (см. Рис. 2) однако для лучшего совпадения стоит повторить **Estimation** с другими начальными условиями, например,

- измененным набором параметров;
- измененным диапазоном ограничения параметров;
- другими методами и алгоритмами настройки параметров;
- экспериментальными данными реакции на типовые (а не другие) воздействия;
- экспериментальными данными прошедшими предварительную обработки (Pre-process)
- измененным временем моделирования;
- доработанной структурой модели.

Задание 2. Предварительная обработка экспериментальных данных.

В разделе **Общие сведения** показаны возможности модуля **Preprocessing** позволяющего удалить из экспериментальных данных дрейфы, смещения, шумы, выбросы, пропущенные

значения, искажения, вызванные ограничением полосы пропускания, и другие аномалии, которые могут привести к неточной оценке параметра.

В экспериментальных данных отклика прототипа рассматриваемого примера имеются участки высокочастотных шумов (Рис. 5) которые затрудняют поиск глобального экстремума.

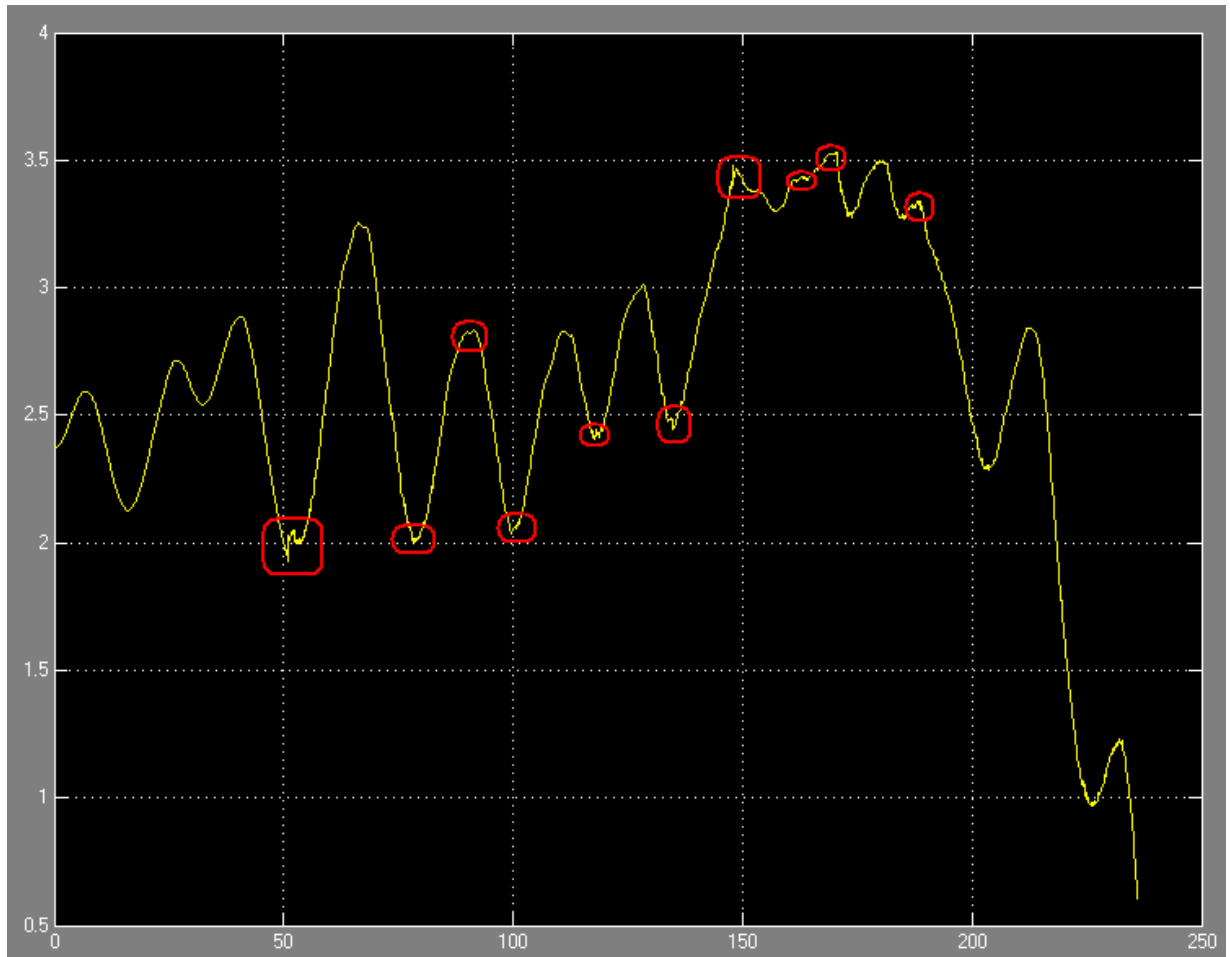
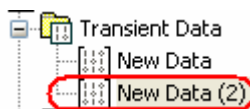


Рис. 5. График экспериментальных данных отклика прототипа. Шумы экспериментальных данных (выделены красным цветом), как правило, возникают при изменении направления движения.

Проведите предварительную обработку экспериментальных данных (**Preprocessing**) в следующем порядке.

1. Сделайте копию входных и выходных данных модели выполняя шаги 7, 8, и 9 предыдущего задания.



2. Выберите режим обработки экспериментальных данных **Pre-process**.

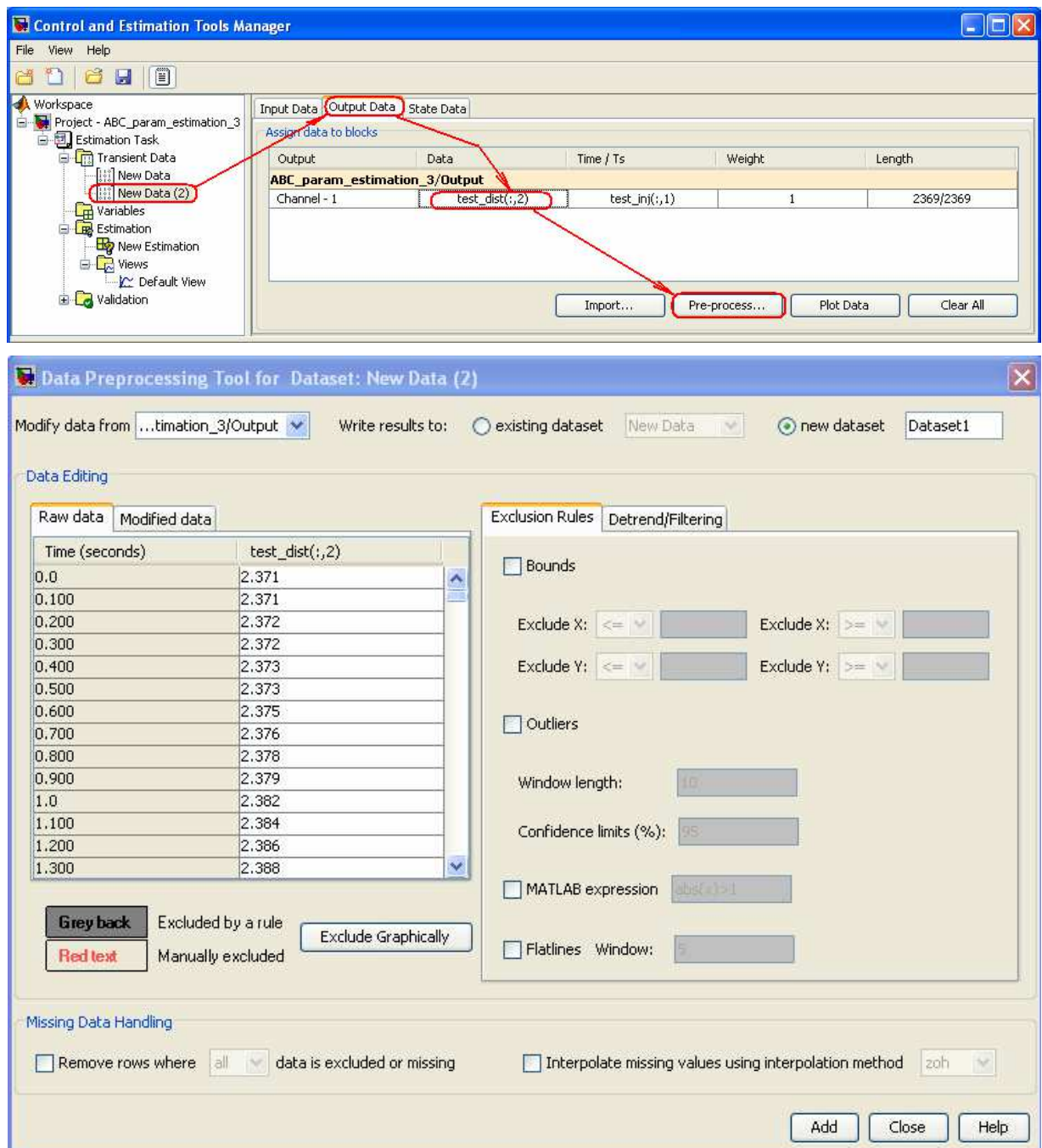


Рис. 6. Окно Data Preprocessing Tool.

3. Доведите экспериментальные данные отклика прототипа, например, до результата, показанного на Рис. 7.

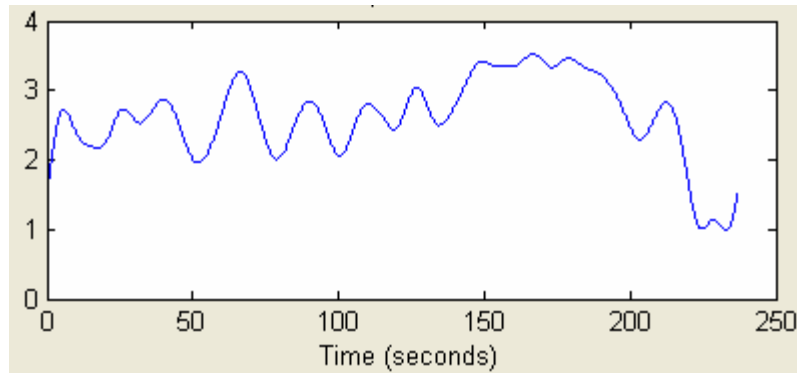


Рис. 7. Выходные данные процедуры Preprocessing. Данные не содержат высокочастотных шумов. Однако фильтрация привела к смещению данных во временной области. Перед процедурой Estimation необходимо сместить (во времени) данные экспериментального воздействия или отклик процедуры Preprocessing.

4. Сократите интервал моделирования на время задержки отклика в процедуре Preprocessing и запустите настройку параметров.

Задание 3. Подтверждение адекватности параметров модели.

Валидация (**Validation**) необходима для определения, является ли модель адекватной и как точно модель отражает динамику системы. Валидация выполняется после процедуры оценки параметров (**Estimation**) в той же последовательности как и **Estimation** только с независимым набором экспериментальных данных.

При наличии независимых экспериментальных данных воздействия и отклика прототипа выполните следующие шаги процедуры **Validation** (если независимые экспериментальные данные отсутствуют смоделируйте их)

1. После выполнения процедуры Estimation (задание 1) введите независимые экспериментальные данные как показано в п 7, 8, 9 задания 1. Присвойте блоку данные имя, например, Validation Data.
2. Выберите New Validation

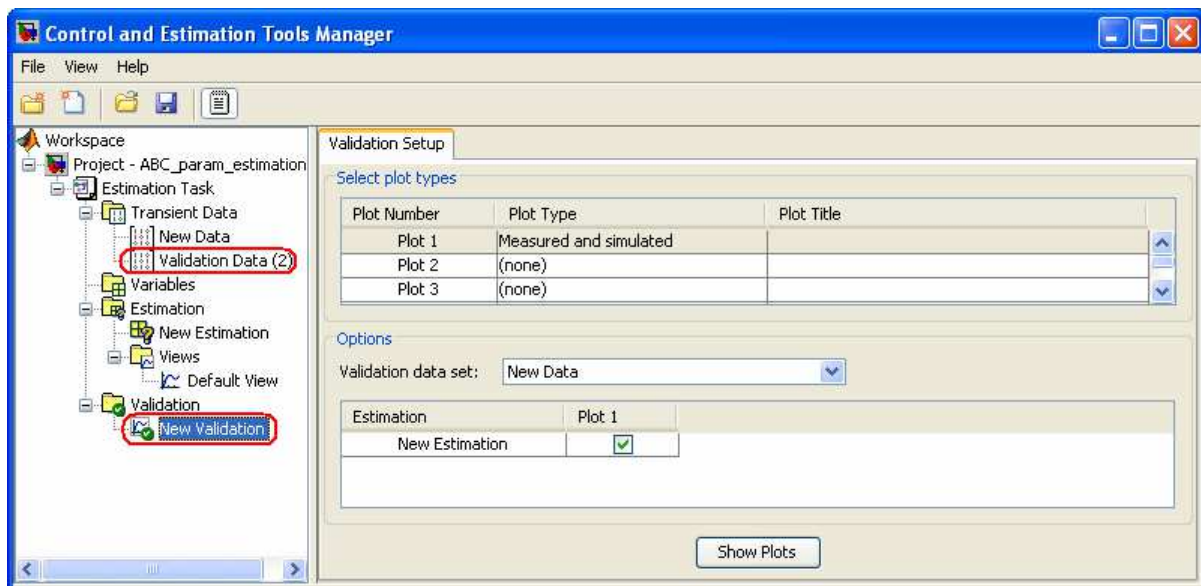
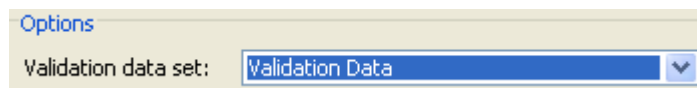
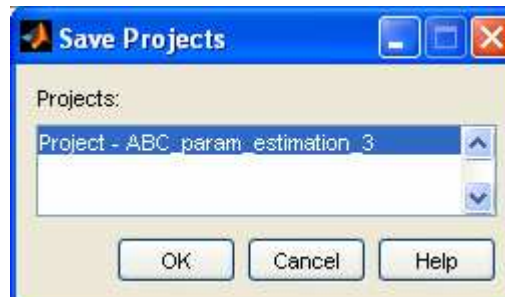


Рис. 8. Окно процедуры валидации.

3. Настройте Plot1 (Рис. 8) на отображение Measured and Simulated данных
4. В окне Option выберите набор данных для валидации



5. Нажмите Show Plots для графического отображения результатов валидации.
6. Сравните полученные графики. Определите насколько поведение модели соответствует прототипу.
7. Сохраните проект в файле данных с предлагаемым MAT расширением.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначена процедура Estimation пакета Simulink Design Optimization?
2. Для чего предназначена процедура Preprocessing?
3. Для чего предназначена процедура Validation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Help MatLAB.
2. Интернет.