

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный  
университет (СибАДИ)»

И.В. Лазута

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В MATLAB-SIMULINK

*Лабораторный практикум*



Омск  2024

УДК 519.876.5::(62-2+621.3)  
ББК 30.2-5-05  
Л17

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит

*Рецензенты:*

канд. техн. наук, доц. С.Д. Игнатов (СибАДИ, г. Омск);  
канд. техн. наук, доц. И.К. Потеряев (СибАДИ, г. Омск)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве лабораторного практикума.

**Лазута, Иван Васильевич.**

**Л17 Моделирование технических систем в MATLAB-Simulink** : лабораторный практикум / И.В. Лазута. – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2024. – URL: <https://bek.sibadi.org/MegaPro/Web>. – Режим доступа: для авторизованных пользователей. – Загл. с экрана.

Содержит краткие теоретические сведения, методику и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Пакеты прикладных программ».

Предназначено для лабораторных и практических занятий по моделированию в среде MATLAB-Simulink для обучающихся всех направлений подготовки и форм обучения.

Имеет интерактивное оглавление в виде закладок.

Подготовлен на кафедре «Автоматизация и энергетическое машиностроение».

Текстовое (символьное) издание (5,9 МБ)

Системные требования: Intel, 3,4 GHz; 150 МБ; Windows XP/Vista/7/10;  
1 ГБ свободного места на жестком диске; программа для чтения pdf-файлов:  
Adobe Acrobat Reader; Foxit Reader

Редактор О.А. Соболева

Техническая подготовка – А.А. Орловская

Издание первое. Дата подписания к использованию 19.01.2024

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ

644080, г. Омск, пр. Мира, 5

РИО ИПК СибАДИ

644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1



© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия являются одним из важнейших элементов учебного процесса высшего учебного заведения. При проведении компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Пакеты прикладных программ» решаются следующие основные задачи:

- 1) приобретение практических навыков работы со специализированным программным комплексом MATLAB и его пакетным расширением для моделирования Simulink;
- 2) приобретение навыков моделирования простых и сложных технических систем в программной среде MATLAB-Simulink;
- 3) приобретение навыков инженерных расчётов параметров технических систем и анализа получаемых результатов;
- 4) развитие инженерного и научно-исследовательского мышления у обучающихся.

Лабораторные занятия по дисциплине «Пакеты прикладных программ» представляют собой совокупность инженерных расчётов параметров технических систем и интерактивную работу с программой MATLAB, цель которой получить рабочую модель технической системы, настроить её параметры, получить и проанализировать требуемые параметры и характеристики системы.

**MATLAB** – это высокоуровневый технический вычислительный язык и интерактивная среда для разработки алгоритмов, визуализации данных, анализа данных и числовых вычислений. MATLAB используется в широком спектре инженерных задач, включая обработку сигналов и изображений, коммуникации, проектирование систем управления, тестирование и измерения, моделирование и анализ, аналитическую статистику, вычислительную биологию и т.д.

Пакет **Simulink** является ядром интерактивного программного комплекса MATLAB, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой S-моделью, или просто моделью. В данном пакете реализованы принципы визуально ориентированного программирования, что позволяет легко набирать нужные блоки и соединять их с целью составления модели системы или устройства. При этом сложнейшие уравнения состояния, описывающие работу моделей систем или

устройств, формируются автоматически без участия пользователя, что значительно облегчает и ускоряет его работу.

Группа библиотек **Simscape** расширяет среду Simulink инструментами для моделирования многодоменных физических систем, таких как системы с механическими, гидравлическими, пневматическими, тепловыми, электрическими и электромагнитными компонентами. В отличие от других блоков Simulink, которые представляют математические операции или оперируют сигналами, блоки Simscape представляют физические компоненты или взаимосвязи напрямую. С помощью блоков Simscape вы создаете модель системы точно так же, как собирали бы физическую систему.

Модели Simscape используют физический сетевой подход к построению моделей: компоненты (блоки), соответствующие физическим элементам, таким как насосы, двигатели и операционные усилители, соединяются линиями, соответствующими физическим соединениям, которые передают мощность. Этот подход позволяет вам описать физическую структуру системы, а не лежащую в ее основе математику. На основе модели, создаваемой в виде принципиальной схемы, технология Simscape автоматически строит уравнения, характеризующие систему. Эти уравнения интегрированы с остальной частью модели Simulink и вычислительной средой MATLAB.

Среда Simscape позволяет решать два вида задач динамики. Задачи первого вида заключаются в определении действующих на тело неизвестных сил по начальным координатам тела и закону его движения в любой момент времени (прямая задача динамики). Задачи второго вида (обратная задача динамики) заключаются в определении положения, скорости и ускорения тела в произвольный момент времени по вышеприведенным начальным условиям и силам, действующим на тело. Для решения обратной задачи динамики необходимо знать координаты и скорость тела в некоторый начальный момент времени и силу, действующую на тело в любой последующий момент времени. Причём в среде Simscape решаются одновременно обе задачи, что на практике трудно осуществимо для таких сложных технических систем без использования специального программного обеспечения.

В процессе выполнения лабораторных работ по дисциплине «Пакеты прикладных программ» студенты знакомятся с теоретическими аспектами изучаемой задачи; методами моделирования технических систем в среде MATLAB-Simulink; несложными инженерными расчётами и работе со стандартами ГОСТ; самостоятельно решают несложные вопросы исследовательского характера.

## Лабораторная работа № 1

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛОСКОГО МЕХАНИЗМА

**Цель работы** – моделирование и исследование динамики плоского многозвенного кривошипно-ползунного механизма.

#### Общие сведения о SimMechanics

**SimMechanics** – это отдельная библиотека пакета Simulink\ Simscape программного комплекса MATLAB. SimMechanics представляет собой среду для имитационного моделирования многотельных механических систем, таких как механизмы станков, роботы, подвески транспортных средств, строительное и подъемное оборудование и т.д. [1, 2].

Основное назначение SimMechanics – это моделирование пространственных движений твердотельных машин и механизмов на стадии инженерного проектирования. Пакет SimMechanics позволяет решать пространственные задачи статики, кинематики и динамики многозвенных механических объектов [1, 2].

При использовании библиотеки SimMechanics, интегрированной в Simulink, могут быть использованы все возможности системы MATLAB, в частности, добавление к модели механической системы компонентов из других библиотек Simulink и расширений системы.

К достоинствам реализации моделирования механических систем при помощи SimMechanics в Simulink могут быть отнесены простота создания моделей не слишком подготовленными пользователями и высокая скорость вычислений при моделировании движений многозвенных объектов с большим числом степеней свободы в больших перемещениях [1, 2].

Модель механической системы с использованием блоков из библиотеки SimMechanics представляется связанной блочной диаграммой (рис. 1.1), подобно другим моделям Simulink [1, 2]. Однако в отличие от обычной модели Simulink, представляющей математику движения механизма – алгебраические и дифференциальные уравнения, модель SimMechanics представляет собой физическую структуру механизма – массово-инерционные свойства, геометрические и кинематические взаимосвязи его составных частей. Программное обеспечение SimMechanics преобразует это структурное представление во внутреннюю эквивалентную математическую модель.

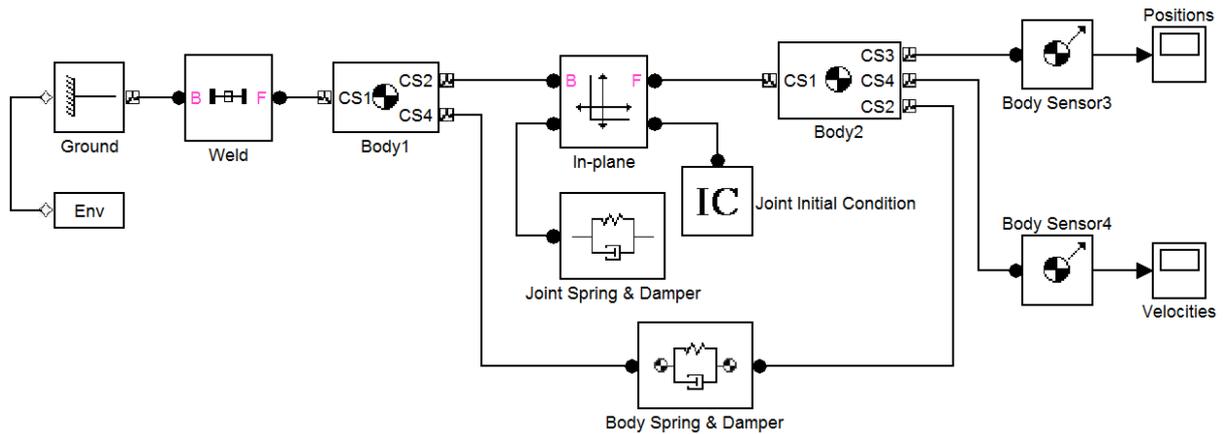


Рис. 1.1. Внешний вид модели SimMechanics

Создание модели SimMechanics происходит таким же способом, как создание любой другой модели Simulink. Сначала открывается окно модели Simulink. Затем мышью перетаскиваются образцы блоков SimMechanics и других блоков Simulink в окно пользовательской модели и рисуются линии, чтобы соединить блоки между собой.

Модель механической системы в SimMechanics может состоять из одной или нескольких машин, каждая из которых представляет собой набор соединенных блоков, имитирующих физические детали – звенья механизма. Звенья механизма связаны идеализированными шарнирными соединениями, имеющими поступательные и вращательные степени свободы. В качестве задаваемых параметров механических блоков выступают массово-инерционные свойства тел (звеньев механизмов), координаты характерных точек тел, таких как центры масс тел, точки приложения внешних и управляющих воздействий, точки шарнирных соединений [1, 2].

SimMechanics может моделировать механизмы со звеньями, организованными в иерархические структуры, как и в обычных моделях Simulink. Возможно наложение кинематических ограничений, сил и вращающих моментов, взаимных траекторий движения тел. На основе построенной принципиальной схемы механической системы из блоков SimMechanics формулирует и решает уравнения движения [1, 2].

Библиотека SimMechanics поддерживает средства анимации для демонстрации работы механизмов в динамике. Поддерживаются и средства OpenGL, в частности при рендеринге (функциональной окраске) трёхмерных объектов и поверхностей. Виртуальные измерительные средства, такие как осциллограф и графопостроитель, поддерживаются в моделях этого пакета [3].

## Основы моделирования механизмов и машин в SimMechanics

Несвободной называется система материальных точек, на движение которых (координаты, скорости и ускорения) наложены некоторые ограничения (связи). Всякий механизм является примером несвободной системы материальных точек [3].

**Связанные физические тела** – физические тела, налагающие ограничения на координаты, скорости и ускорения точек материальной системы [Му].

Связи делятся на **двухсторонние** и **односторонние** [3].

Связи называются **двухсторонними** (удерживающими), если они препятствуют перемещениям материальных точек в некоторых направлениях, а также в направлениях прямо противоположных [3].

Связи называются **односторонними** (неудерживающими), если они препятствуют перемещениям материальных точек в некоторых направлениях, но допускают перемещения в прямо противоположных направлениях [3].

**Число степеней свободы** системы материальных точек, подчиненной голономным связям, называется число независимых параметров, однозначно определяющих положения точек системы [3].

Системой с шестью степенями свободы является свободное твердое тело, так как его положение определяется шестью независимыми параметрами: тремя координатами центра тяжести  $X_c$ ,  $Y_c$ , и  $Z_c$  и тремя углами Эйлера  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $\theta$  [3].

Твердое тело, совершающее плоское движение, имеет три степени свободы, так как положение любого его сечения, проведенного параллельно неподвижной плоскости, определяется двумя координатами центра тяжести тела  $X_c$ ,  $Y_c$  и углом поворота  $\varphi$  [3].

Твердое тело, не совершающее поступательного движения и вращающееся вокруг неподвижной оси, имеет одну степень свободы, так как положение этого твердого тела вполне определяется углом поворота  $\varphi$  вокруг оси вращения [3].

**Механическое звено** – совокупность деталей (тел), соединенных таким образом, что их взаимное положение не меняется при движении.

**Кинематическая пара КП** – соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительное перемещение в пространстве с определенными степенями свободы [3].

**Степень подвижности СП** механизма называется число степеней свободы механизма относительно неподвижного звена [3].

Для плоского механизма СП по формуле Чебышева П. Л. [3]:

$$W = 3k - 2P_5 - P_4, \quad (1.1)$$

где  $k$  – общее число подвижных звеньев в механизме;  $P_5$  – количество КП пятого класса;  $P_4$  – количество КП четвёртого класса.

Звенья механической системы и их физические параметры моделируются в Simulink блоком **Body** раздела **Bodies** библиотеки SimMechanics (рис. 1.2). Параметрами блока являются масса, тензор инерции, декартовы координаты точек присоединения шарниров, точек приложения сил и моментов в различных системах координат [1].

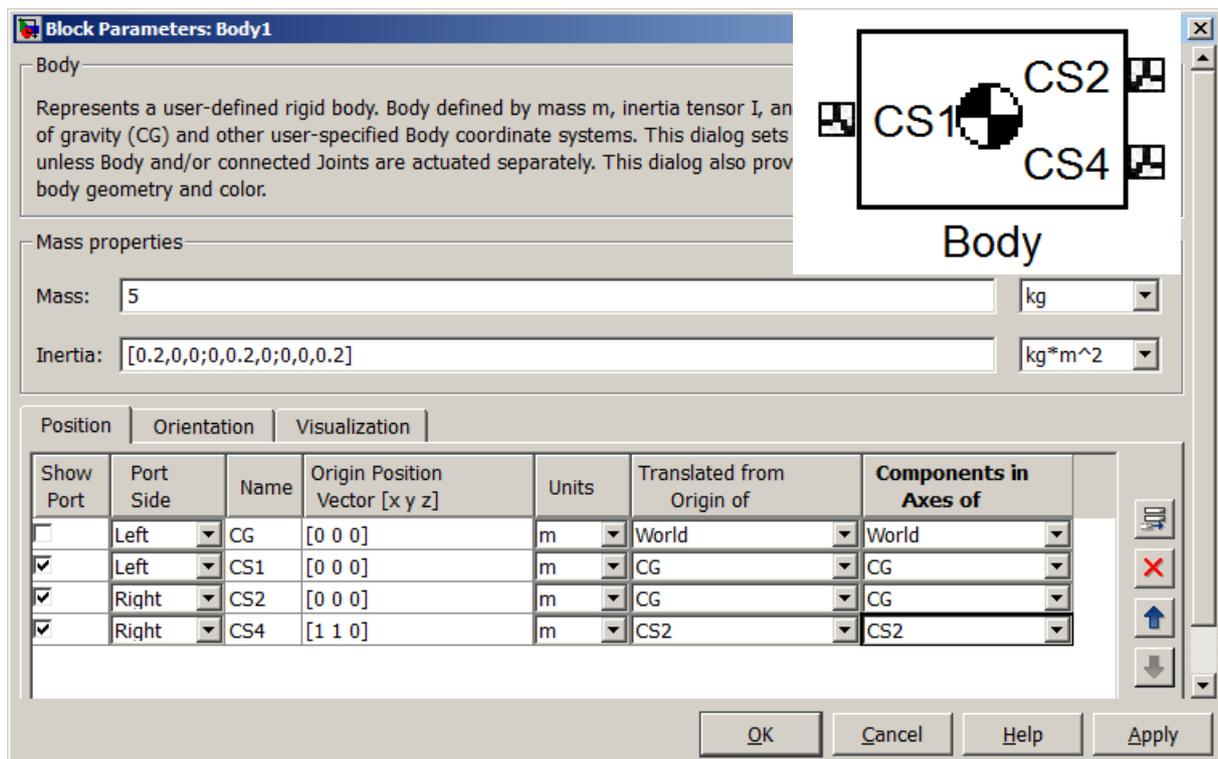


Рис. 1.2. Окно настроек модели звена (твёрдого тела) в SimMechanics

Масса тела (Mass) (см. рис. 1.2) может быть выражена в различных единицах (имеется выпадающий список, по умолчанию стоят килограммы) [1].

Тензор инерции тела  $I$  относительно его центра масс (Inertia), представляющий собой матрицу размером  $3 \times 3$  [1]:

$$I = \begin{bmatrix} J_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & J_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & J_{1z} \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

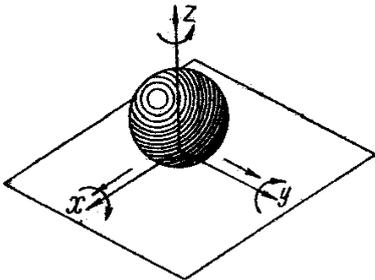
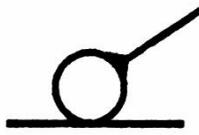
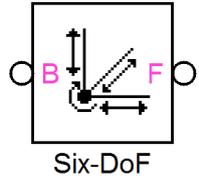
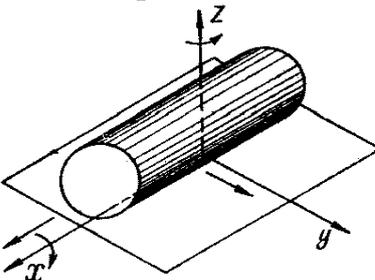
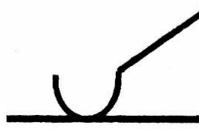
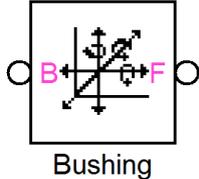
где  $J_{1x}$ ,  $J_{1y}$ ,  $J_{1z}$  – осевые моменты инерции тела относительно осей собственной локальной системы координат, связанной с его центром масс. Для тел симметричных относительно своего центра масс тензор инерции тела  $I$  содержит только диагональные члены. Для ряда наиболее распространенных симметричных тел простой геометрической формы существуют формулы для вычисления элементов тензора инерции [1].

Кинематические пары (шарнирные соединения) звеньев механической системы и их степени свободы моделируются с помощью блоков раздела **Joints** библиотеки SimMechanics. Раздел содержит блоки шарнирных соединений, которые соединяют между собой отдельные блоки Body (а также блок Ground с блоком Body), благодаря чему звенья механизма получают возможность относительного движения [1].

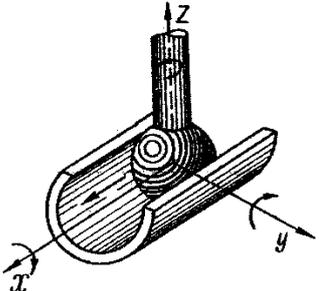
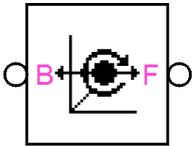
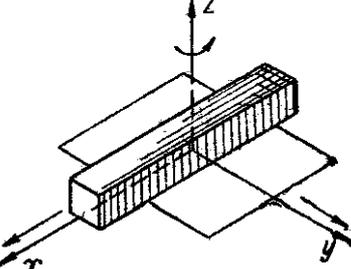
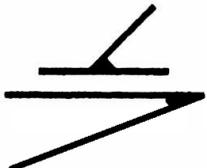
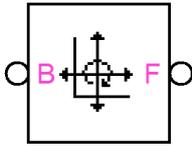
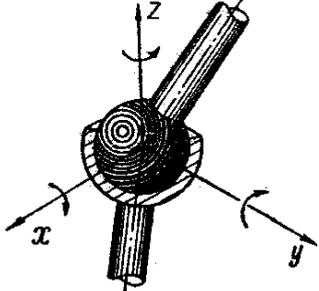
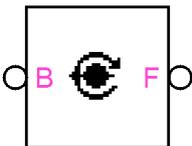
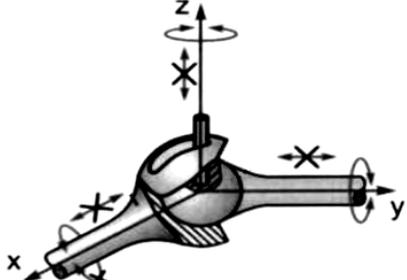
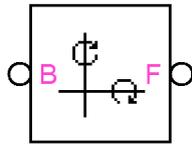
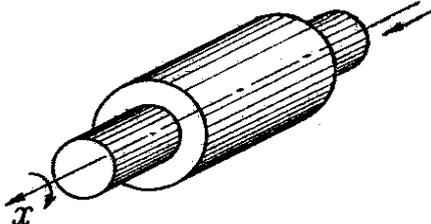
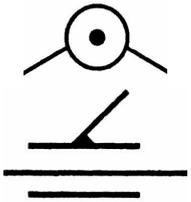
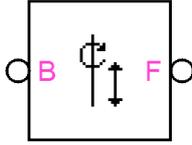
Раздел Joints библиотеки SimMechanics содержит 15 основных блоков, имитирующих всевозможные виды шарнирных соединений, образующих высшие и низшие кинематические пары (табл. 1.1). Пиктограммы на блоках раздела Joints дают наглядную информацию об их назначении даже без описания [1, 2].

Таблица 1.1

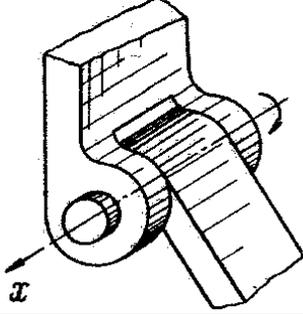
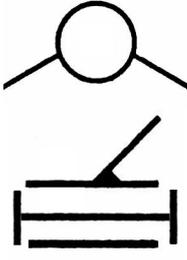
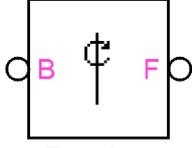
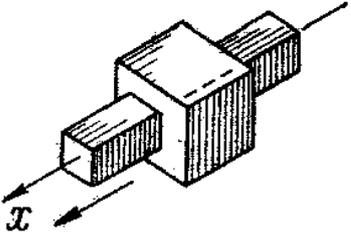
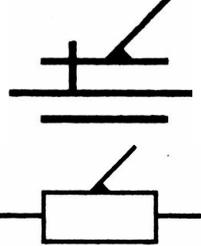
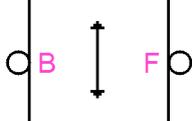
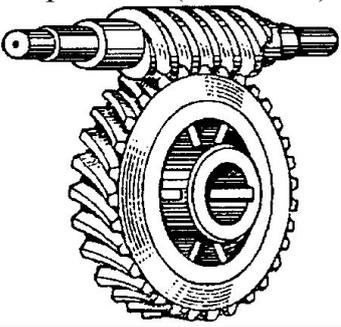
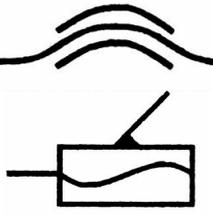
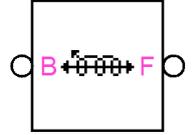
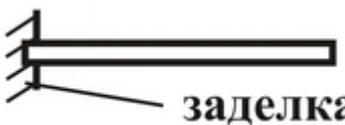
### Модели кинематических пар в SimMechanics

| Название/<br>Внешний вид пары   | Изображение<br>по ЕСКД  | Число<br>степеней<br>свободы | Класс<br>пары | Блок<br>SimMechanics   |
|---|---|------------------------------|---------------|--|
| 1   | 2   | 3                            | 4             | 5  |
| <p>Шар на плоскости</p>      |  | 5                            | 1             |  <p>Six-DoF</p> |
| <p>Цилиндр на плоскости</p>  |  | 4                            | 2             |  <p>Bushing</p> |

Продолжение табл. 1.1

| 1  | 2   | 3        | 4        | 5  |
|--|---|----------|----------|--|
| <p>Шар в цилиндре</p>           |    | <p>3</p> | <p>3</p> |  <p>Telescoping</p>   |
| <p>Плоскостная пара</p>         |    | <p>3</p> | <p>3</p> |  <p>Planar</p>        |
| <p>Сферическая</p>            |  | <p>3</p> | <p>3</p> |  <p>Spherical</p>   |
| <p>Сферическая с пальцем</p>  |  | <p>2</p> | <p>4</p> |  <p>Universal</p>   |
| <p>Цилиндрическая</p>         |  | <p>2</p> | <p>4</p> |  <p>Cylindrical</p> |

Окончание табл. 1.1

| 1   | 2   | 3 | 4 | 5  |
|---|---|---|---|--|
| Вращательная<br>             |    | 1 | 5 | <br>Revolute  |
| Поступательная<br>           |    | 1 | 5 | <br>Prismatic |
| Червячная (винтовая)<br>    |  | 1 | 5 | <br>Screw   |
| Неподвижное соединение<br> |  | 0 | — | <br>Weld    |

## Основы моделирования сил трения в SimMechanics

Следующим этапом моделирования машин и механизмов с помощью библиотеки SimMechanics является решение задач, осложнённых физическими и математическими законами, присутствием внешних воздействий, сил сопротивления, наличием высших кинематических пар. Спектр подобных задач крайне велик, и любая кинематическая задача может быть усложнена с учётом сил сопротивления и трения.

**Трение** – процесс механического взаимодействия соприкасающихся тел при их относительном смещении в плоскости касания (внешнее трение) либо при относительном смещении параллельных слоёв жидкости, газа или деформируемого твёрдого тела (внутреннее трение, или вязкость) [3].

**Сила трения** – это сила, возникающая при соприкосновении двух тел и препятствующая их относительному движению. Причиной возникновения трения является шероховатость трущихся поверхностей и взаимодействие молекул этих поверхностей. Сила трения зависит от материала трущихся поверхностей и от того, насколько сильно эти поверхности прижаты друг к другу. В простейших моделях трения считается, что сила трения прямо пропорциональна силе нормальной реакции между трущимися поверхностями [3].

Величина, характеризующая сухие трущиеся поверхности, называется коэффициентом сухого трения  $K_{mp}$ .

В первом приближении величина силы сухого трения скольжения может быть рассчитана по формуле [3]:

$$F_{сух.тр} = -K_{mp} \cdot N, \quad (1.3)$$

где  $N$  – сила нормальной реакции опоры.

$$N = m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – угол наклона вектора нормальной реакции опоры к вертикали.

**Вязкость** (внутреннее трение) (*англ.* viscosity) – одно из явлений переноса, свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей – это описывается введением силы трения [3].

Это явление возникновения касательных сил, препятствующих перемещению частей жидкости или газа друг по отношению к другу. Смазка между двумя твердыми телами заменяет сухое трение скольжения трением скольжения слоев жидкости или газа по отношению друг к другу. Скорость частиц среды плавно меняется от скорости одного тела до скорости другого тела. Медленно движущийся слой жидкости «тормозит» соседний слой жидкости, движущийся быстрее, и наоборот, слой, движущийся с большей скоростью, увлекает (тянет) за собой слой, движущийся с меньшей скоростью [3].

Силы вязкого трения появляются вследствие наличие межмолекулярных связей между движущимися слоями. Если между соседними слоями жидкости выделить некоторую площадку  $S$ , то согласно гипотезе Ньютона [3]:

$$F_{\text{вяз.тр}} = \mu \cdot S \cdot \frac{dV}{dx}, \quad (1.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $S$  – площадь трения;  $dV/dx$  – градиент скорости трения поверхностей, характеризующий приращение относительной скорости смещений слоев жидкости  $V$  при изменении расстояния между этими слоями  $x$ .

Величину трения в Simulink удобно моделировать с помощью блока **Coulomb & Viscous Friction** из раздела **Discontinuities** (рис. 1.3). На вход подается скорость движения тела, на выходе получается значение силы трения, как суммы сил сухого трения скольжения и вязкого трения [3].

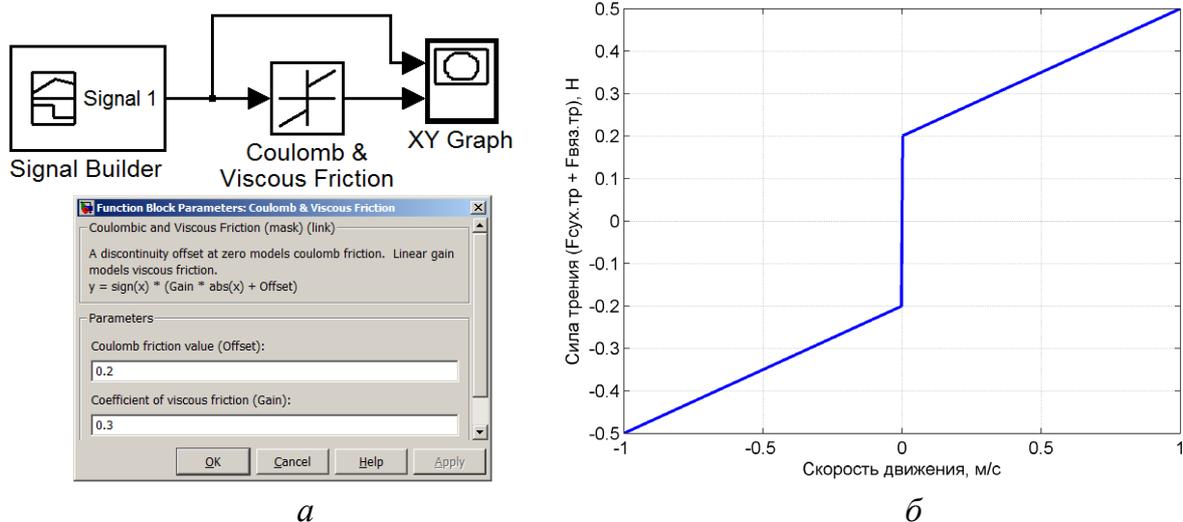


Рис. 1.3. Моделирование смешанного трения в Simulink:  
 а – схема моделирования; б – характеристика

Блок реализует нелинейную характеристику, соответствующую выражению

$$y = \text{sign}(x) \cdot (\text{Gain} \cdot |x| + \text{Offset}), \quad (1.6)$$

где  $x$  – скорость движения тела, м/с;  $y$  – общая сила трения, Н;  $\text{Gain}$  – коэффициент вязкого трения;  $\text{Offset}$  – сила сухого трения, Н.

## Постановка задачи

На рис. 1.4 представлена схема плоского многозвенного кривошипно-ползунного механизма, состоящего из трёх звеньев, имеющих шарнирные соединения.

Звено 1 (*кривошип*) – стержень длиной  $L_1$ , массой  $m_1$ ; звено 2 (*шатун*) – стержень длиной  $L_2$ , массой  $m_2$  и звено 3 (*ползун*) – цилиндр длиной  $h$ , радиусом  $R$ , массой  $m_3$ . Механизм имеет идеализированные вращательные КП – шарниры с одной степенью свободы (поворот вокруг оси  $Z$ ) и поступательную КП (движение вдоль оси  $X$ ).

В механической системе установлена глобальная система координат ГСК  $[X_0 Y_0 Z_0]$ , совпадающая с центром Шарнира 1, и местные локальные системы координат ЛСК $_i$   $[X_i Y_i Z_i]$ , начала которых совпадают с центрами масс звеньев системы.

Звено 1 (*кривошип*) и звено 2 (*шатун*) совершают сложные плоские движения относительно своих центров масс, звено 3 (*ползун*) совершает простое поступательное движение вдоль оси  $X_3$ .

В механической системе на звено 3 (*ползун*) действуют силы сухого и вязкого трения. Шарнирные соединения, образующие низшие кинематические пары, считаются идеальными с голономными связями.

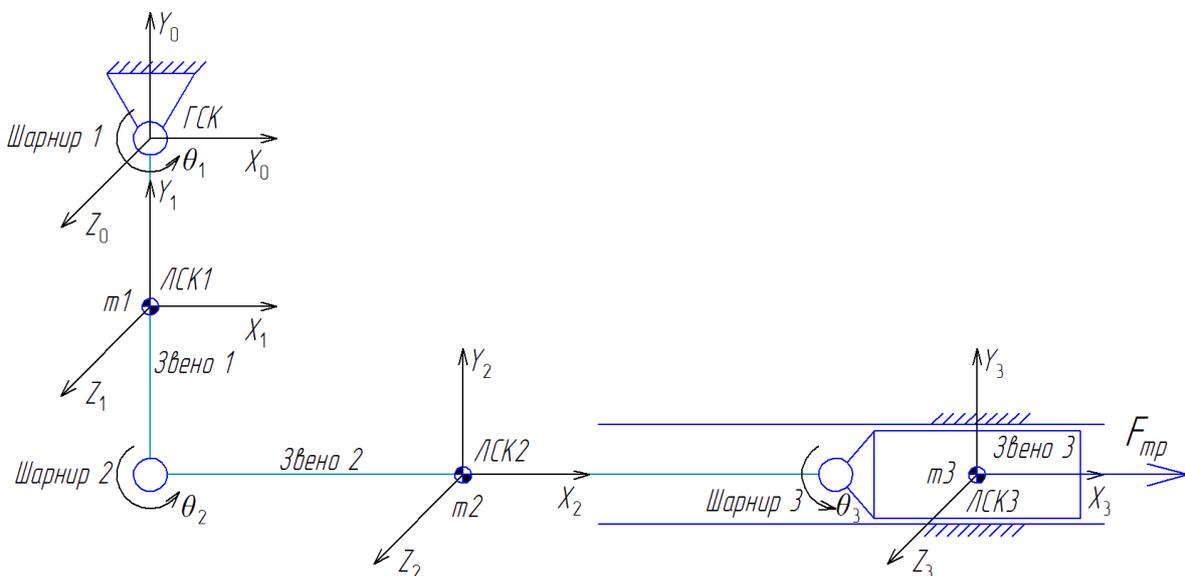


Рис. 1.4. Расчетная схема кривошипно-ползунного механизма

Требуется провести моделирование, визуализацию движений и исследование динамики многозвенного кривошипно-ползунного механизма с учётом сил трения в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью блоков библиотеки SimMechanics.

## Моделирование кривошипно-ползунного механизма

Модель кривошипно-ползунного механизма в среде Simulink\SimMechanics MATLAB 2010 представлена на рис. 1.5.

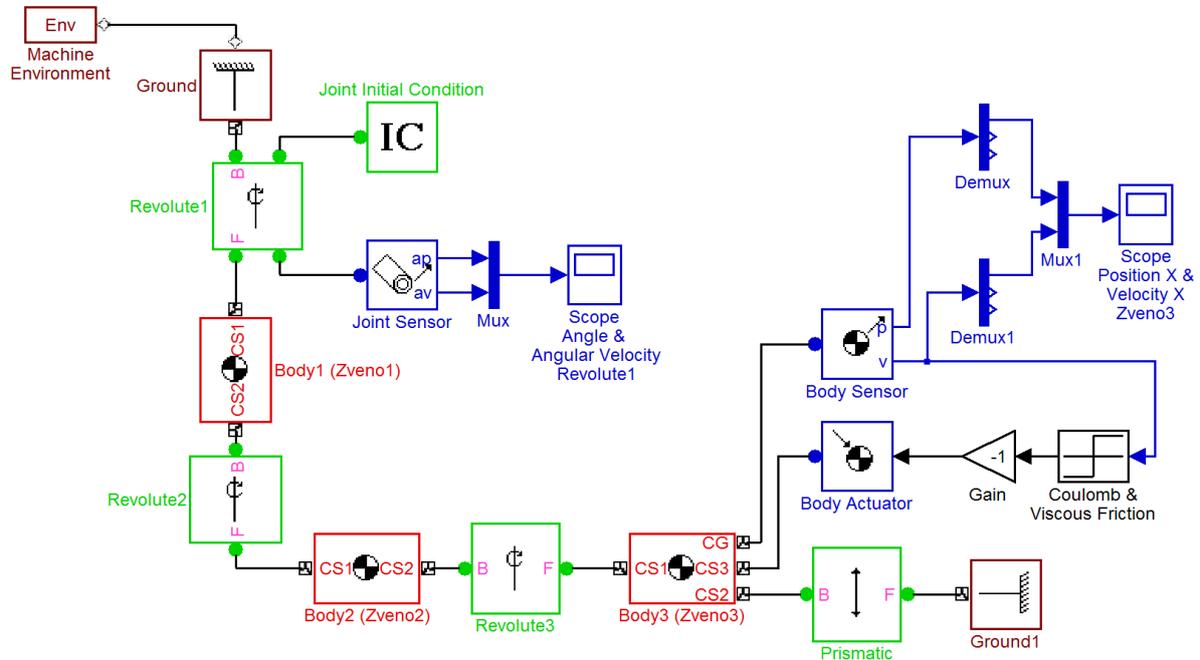


Рис. 1.5. Схема модели механизма в среде Simulink\SimMechanics

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Machine Environment** (Simscape\SimMechanics\Bodies) – блок параметров механической среды моделирования, служит для задания внешних факторов, действующих на систему.
- **Body** (Simscape\SimMechanics\Bodies) – блок, моделирующий твердые тела – звенья системы.
- **Ground** (...\Bodies) – блок, моделирующий неподвижную точку, заданную в выбранной системе координат. Задает неподвижные звенья системы.
- **Prismatic** (Simscape\SimMechanics\Joints) – блок, моделирующий поступательный шарнир, обеспечивает одну степень свободы.
- **Revolute** (...\Joints) – блок, моделирующий вращательный шарнир, имеющий одну степень свободы относительно заданной оси.
- **Joint Initial Condition** (Simscape\SimMechanics\Sensors & Actuators) – блок, задающий начальное относительное положение и начальную относительную скорость двух частей кинематической пары (шарнирного соединения).

- **Body Sensor** и **Joint Sensor** (... \Sensors & Actuators) – датчики состояния тела и шарнирного соединения. Выходными сигналами блока являются значения линейного или углового перемещения, скорость и/или ускорение определенной точки тела (шарнира).

- **Body Actuator** (... \Sensors & Actuators) – блок, моделирующий привод тела. Входным сигналом блока является вращающий момент или сосредоточенная сила, прикладываемая к характерной точке тела.

- **Mux/Demux** (Simulink \Signal Routing) – соединитель/разветвитель сигналов. Служит для выделения из трёхкомпонентного [X Y Z] сигнала перемещения или скорости отдельной составляющей, например, только по оси X.

- **Coulomb & Viscous Friction** (Simulink \Discontinuities) – блок, рассчитывающий величину трения.

- **Gain** (Simulink \Math Operations) – усилительный блок.

- **Scope** (Simulink \Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя и визуализации модели механизма производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode4 (Runge-Kutta) с фиксированным шагом 0,1 с (рис. 1.6).

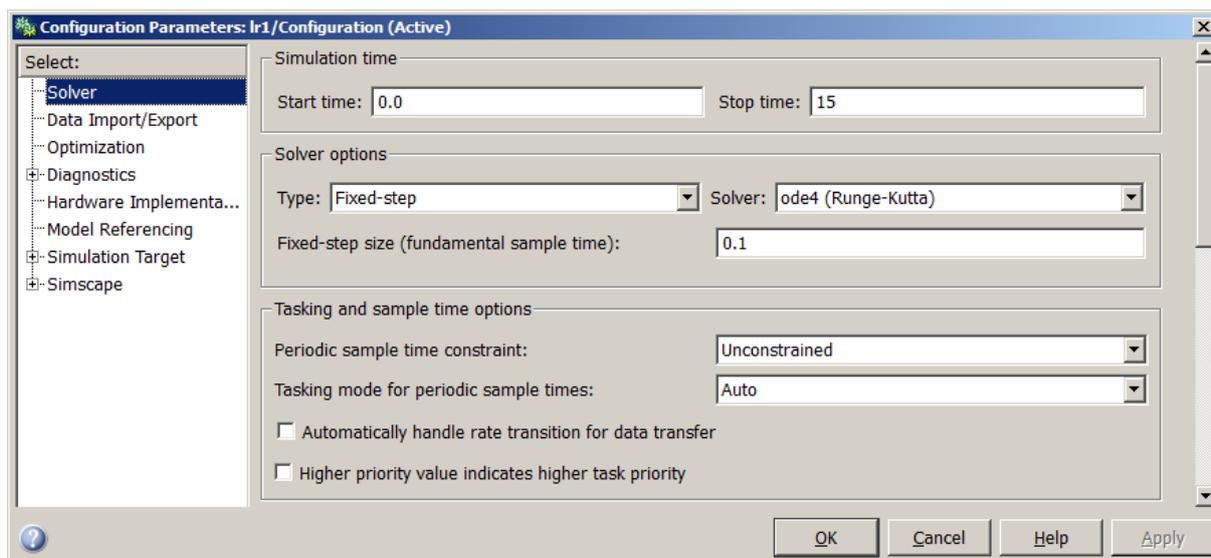


Рис. 1.6. Окно настройки решателя модели

Во вкладке **Simscape\SimMechanics** устанавливаем настройки визуализации модели (рис. 1.7).

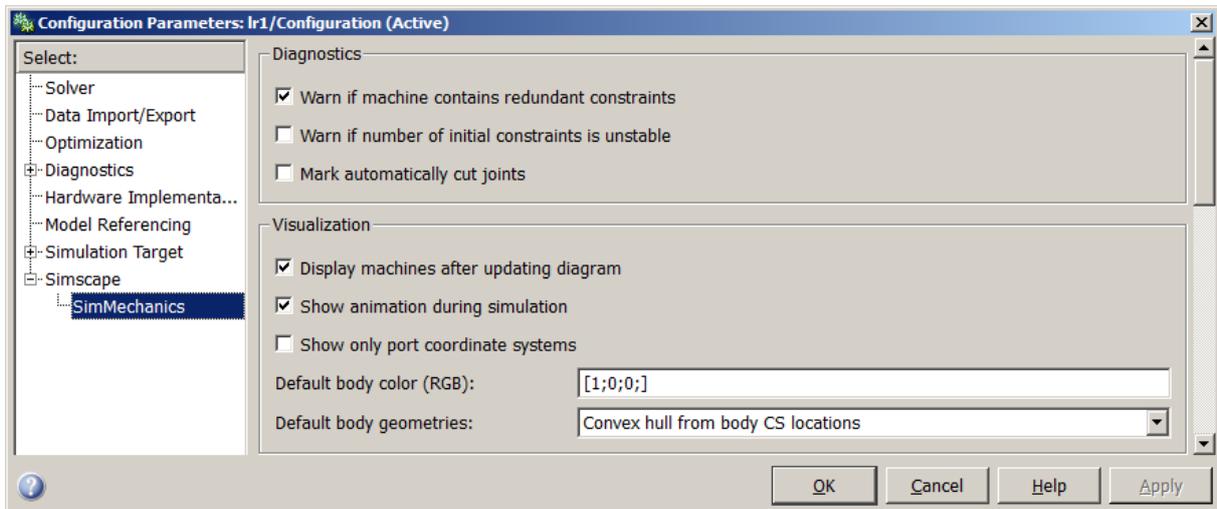


Рис. 1.7. Окно настройки визуализации модели

Блок параметров механической среды моделирования **Machine Environment**. Задаем вектор гравитации в глобальной системе координат  $[X_0 \ Y_0 \ Z_0]$ . Гравитационная ось направлена вниз по оси  $Y_0$ , т.е. вектор гравитации имеет вид  $[0 \ -9,81 \ 0]$  (рис. 1.8).

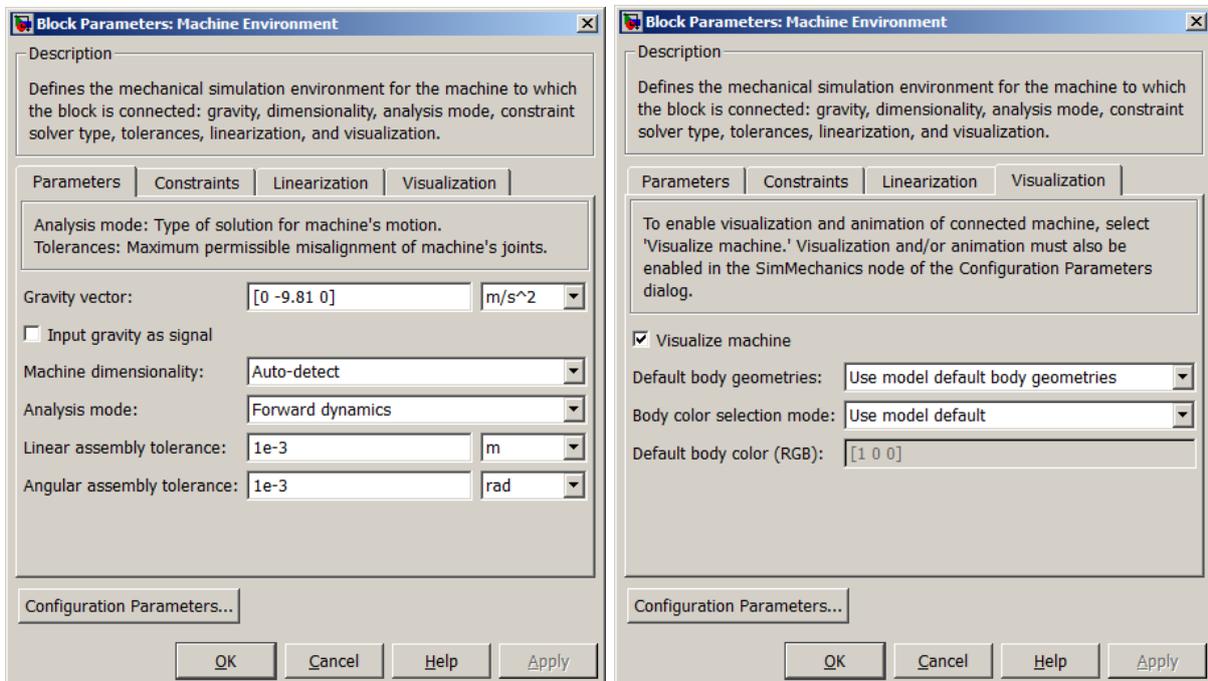


Рис. 1.8. Окно настройки блока Machine Environment

Блок неподвижной точки системы **Ground**. Точка располагается в центре глобальной системы координат  $[X_0 Y_0 Z_0]$  (рис. 1.9).

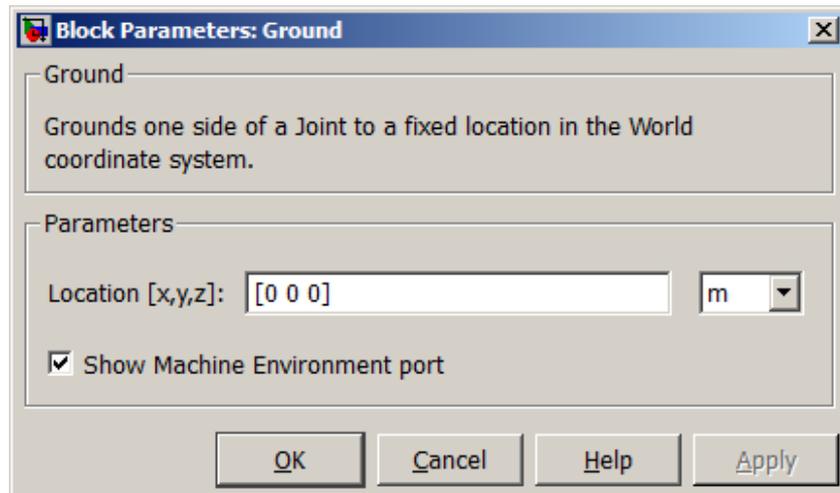


Рис. 1.9. Окно настройки блока Ground

Блок цилиндрического шарнира **Revolute1**. Задаем вектор направления вращения Шарнира 1  $[X Y Z]$  – вокруг оси Z  $[0 0 1]$ . В этом же окне задаем 2 дополнительных порта под датчик и привод тела **Number of sensor/actuator ports** (рис. 1.10).

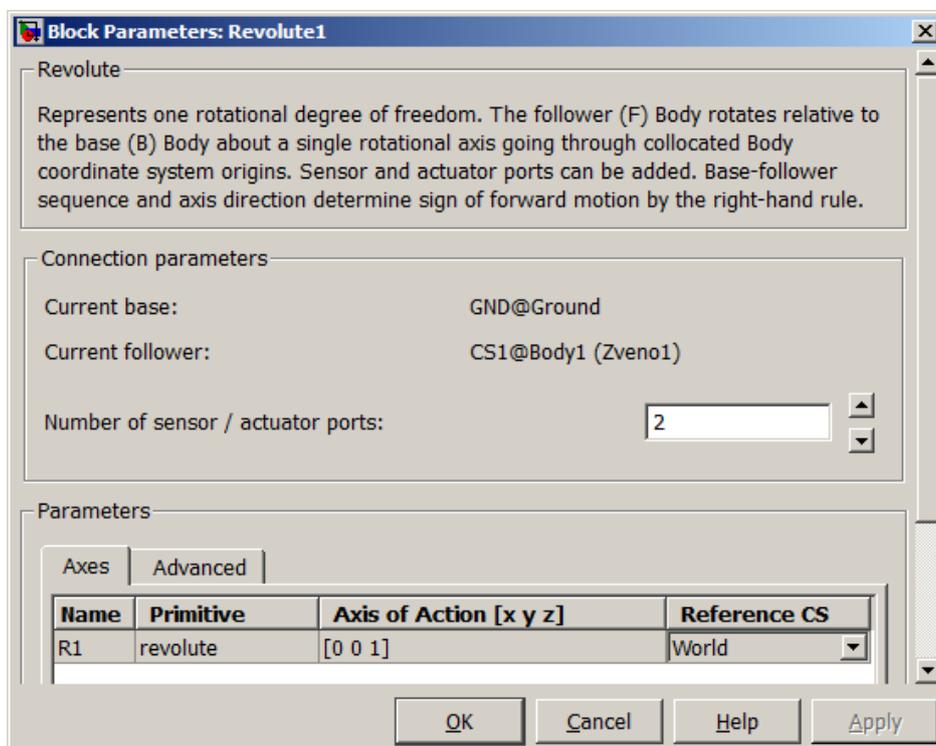


Рис. 1.10. Окно настройки блока Revolute1

Блок начального состояния шарнира **Joint Initial Condition**. Согласно исходным данным задаем начальное отклонение угла поворота Шарнира 1 (**Revolute1**) в ячейке **Position**  $\theta_{10}$ (tetta10) (рис. 1.11).

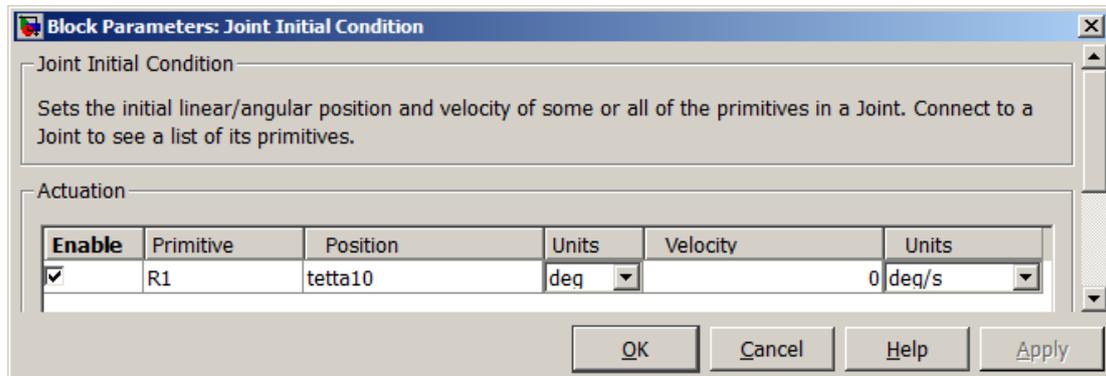


Рис. 1.11. Окно настройки блока Joint Initial Condition

Блок твердого тела **Body1 (Zveno1)**. В окне блока, согласно исходным данным, задаем численное значение массы Звена 1, тензор инерции тела и координаты центра масс CG и точек подключения Шарнира 1 (**Revolute1**) и Шарнира 2 (**Revolute2**), соответственно CS1 и CS2 в глобальной системе координат World на вкладке **Position** (рис. 1.12).

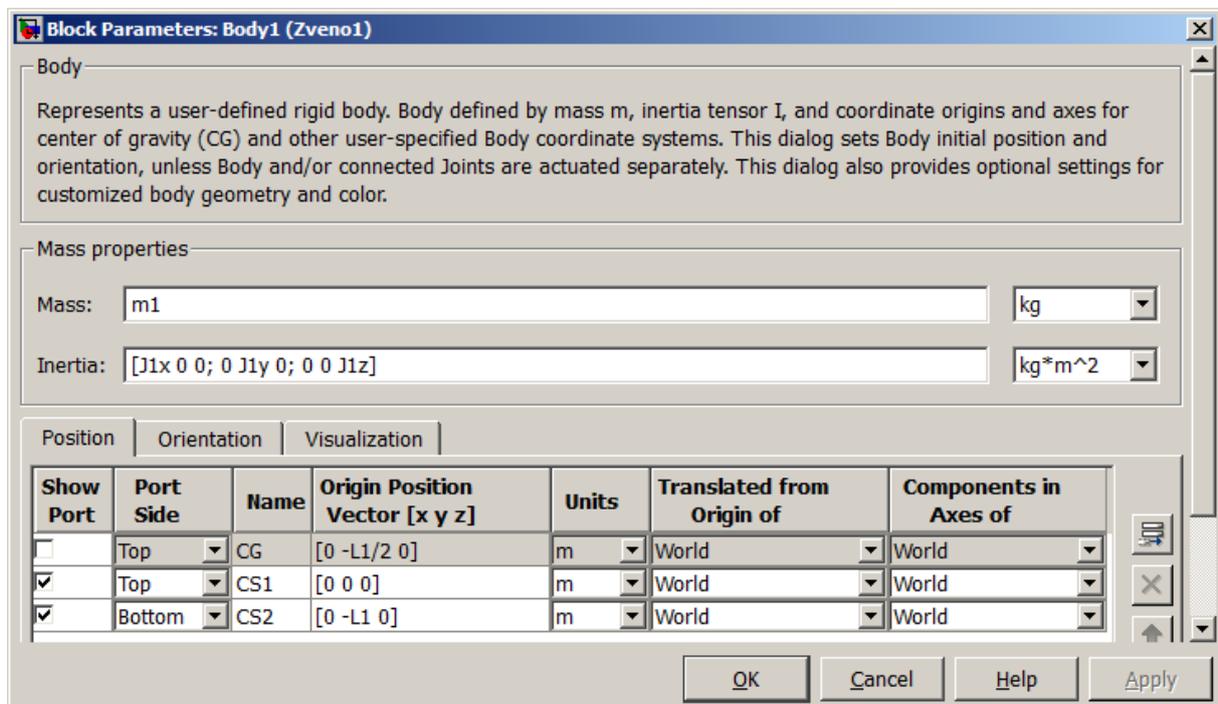


Рис. 1.12. Окно настройки блока Body1 (Zveno1)

Формулы для вычисления осевых моментов инерции звеньев модели кривошипно-ползунного механизма приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Элементы тензора инерции звеньев механизма

| Звено $i$ | Осевые моменты инерции звеньев |  |  |
|-----------|--------------------------------|--|--|
|           | $J_{ix}$                       | $J_{iy}$   | $J_{iz}$   |
| Звено 1   | $\frac{1}{12} m_1 L_1^2$       | 0  | $\frac{1}{12} m_1 L_1^2$                               |
| Звено 2   | 0                              | $\frac{1}{12} m_2 L_2^2$                               | $\frac{1}{12} m_2 L_2^2$                               |
| Звено 3   | $\frac{1}{2} m_3 R^2$          | $\frac{1}{4} m_3 \left( R^2 + \frac{1}{3} h^2 \right)$ | $\frac{1}{4} m_3 \left( R^2 + \frac{1}{3} h^2 \right)$ |

Блок твердого тела **Body2 (Zveno2)**. В окне блока, согласно исходным данным, задаем численное значение массы Звена 2, тензор инерции тела и координаты центра масс CG и точек подключения Шарнира 2 (Revolute2) и Шарнира 3 (Revolute3), соответственно CS1 и CS2 в глобальной системе координат World на вкладке **Position** (рис. 1.13).

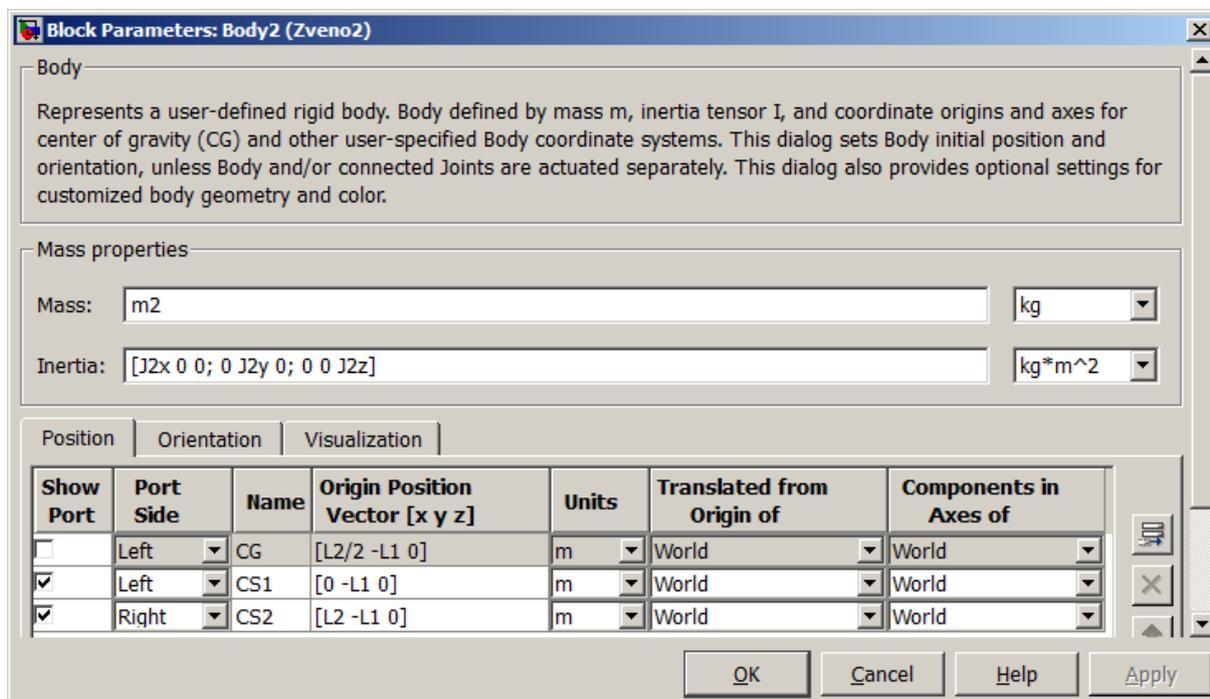


Рис. 1.13. Окно настройки блока Body2 (Zveno2)

Блок твердого тела **Body3 (Zveno3)**. В окне блока задаем численное значение массы Звена 3, тензор инерции тела  $I$ , координату центра масс CG в глобальной системе координат World. Координаты точки подключения Шарнира 3 (**Revolute3**) CS1 и точки привязки к поступательному шарниру **Prismatic** CS2 задаем в системе координат центра масс звена CG. Также создаем точку приложения силы трения CS3 в начале координат центра масс CG на вкладке **Position** (рис. 1.14).

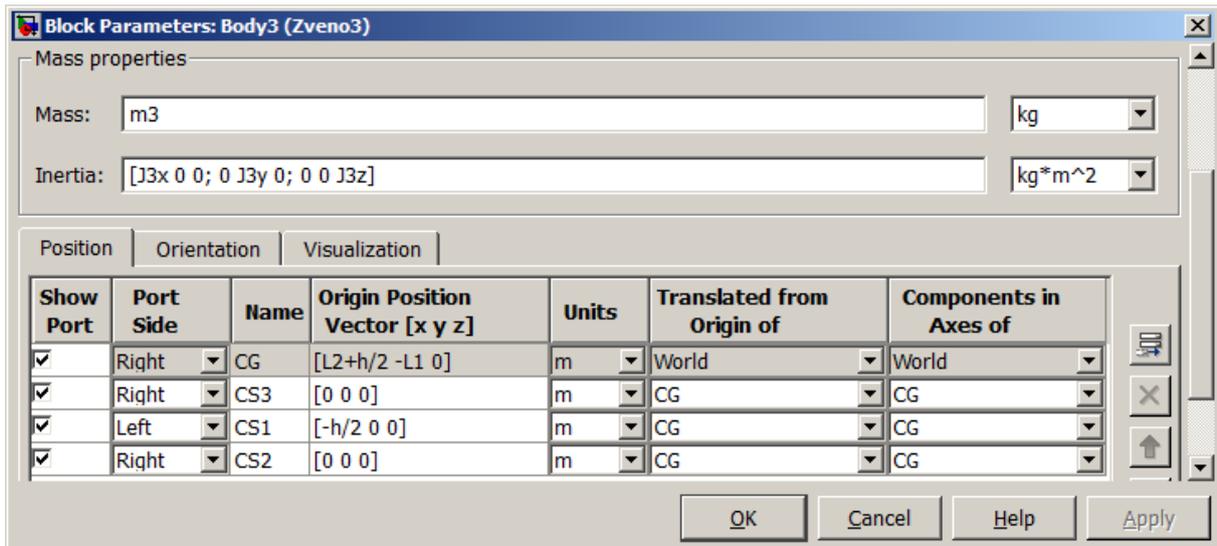


Рис. 1.14. Окно настройки блока Body3 (Zveno3)

Блоки цилиндрических шарниров **Revolute2** и **Revolute3**. В окне блока задаем вектор направления вращения  $[X \ Y \ Z]$  – вокруг оси  $Z$   $[0 \ 0 \ 1]$  (рис. 1.15).

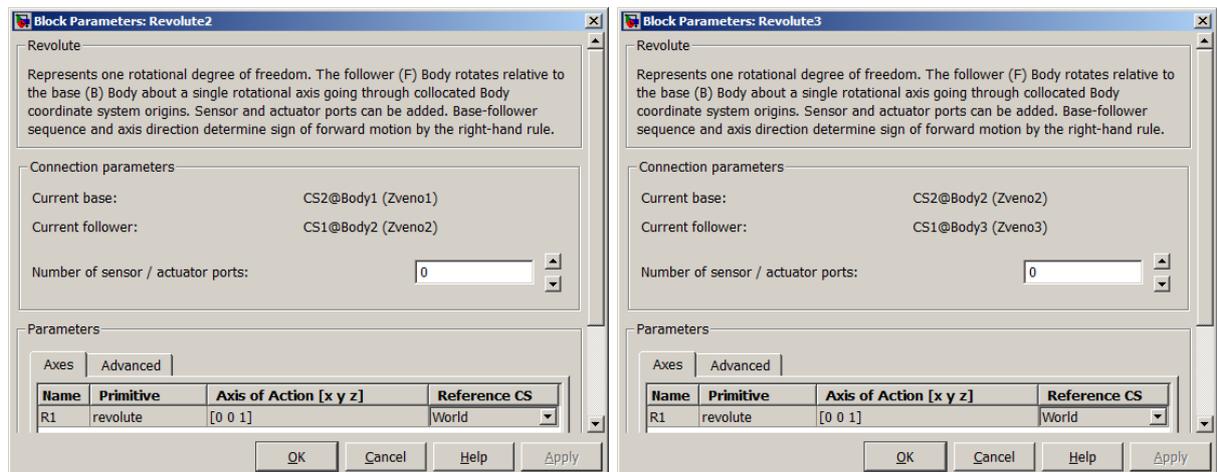


Рис. 1.15. Окна настройки блоков Revolute2 и Revolute3

Блок поступательного шарнира **Prismatic**. В окне блока задаем вектор направления поступательного движения  $[X \ Y \ Z]$  – вдоль оси X  $[1 \ 0 \ 0]$  (рис. 1.16).

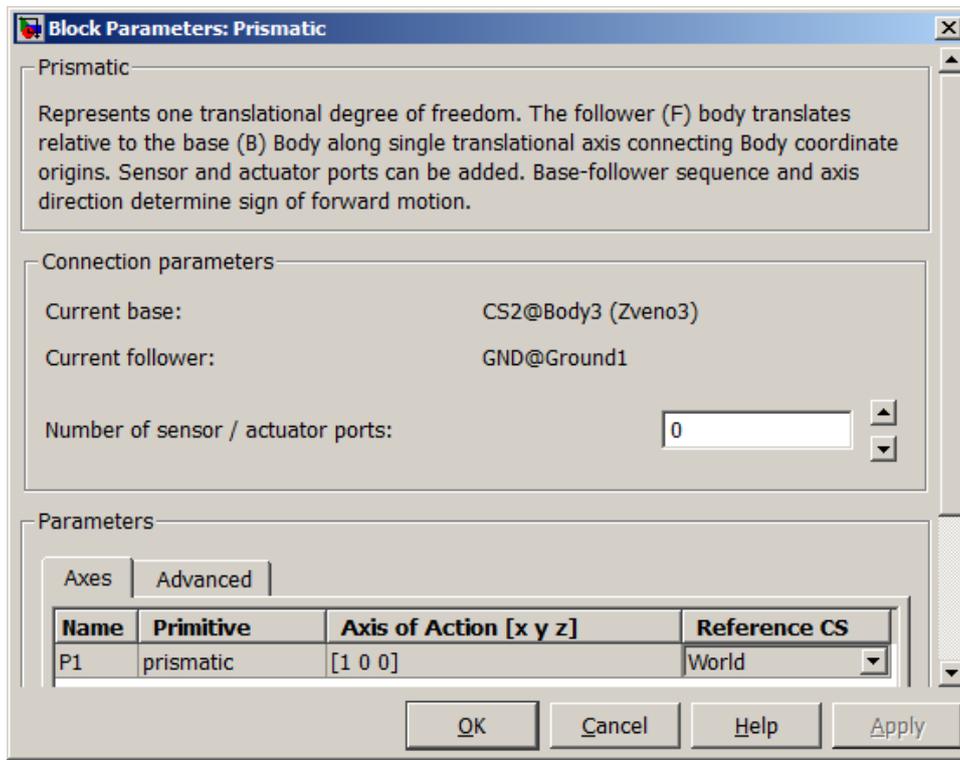


Рис. 1.16. Окна настройки блока Prismatic

Блок неподвижного основания **Ground1**. Подключаем блок к ограничителю движений **Prismatic**. В окне блока задаем координаты точки привязки CS2 твердого тела **Body3 (Zveno3)** в глобальной системе координат World (центр масс звена) (рис. 1.17).

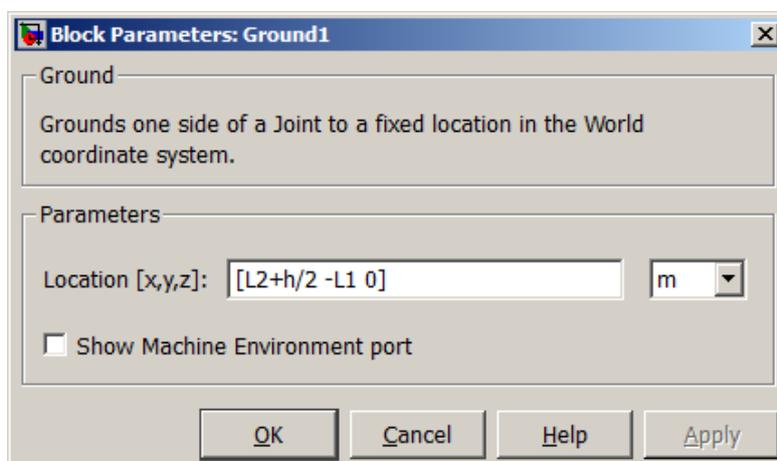


Рис. 1.17. Окна настройки блока Ground1

Блок измерений параметров шарнира **Joint Sensor**. В окне блока выбираем измерение углового перемещения и угловой скорости Шарнира 1 (**Revolute1**) (рис. 1.18).

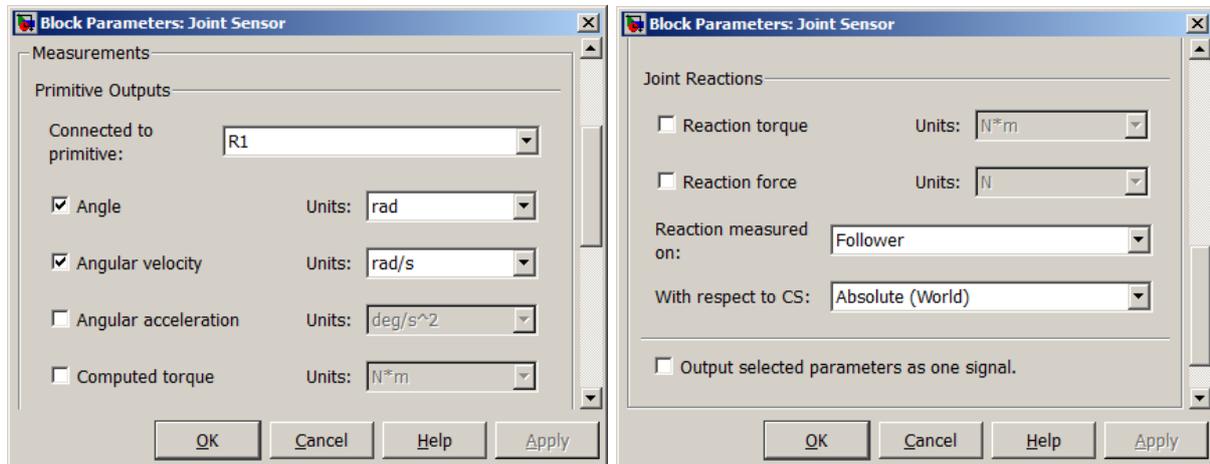


Рис. 1.18. Окна настройки блока Joint Sensor

Блок измерений параметров тела **Body Sensor**. В окне блока выбираем измерение линейного перемещения и линейной скорости центра масс твердого тела **Body3 (Zveno3)** (рис. 1.19).

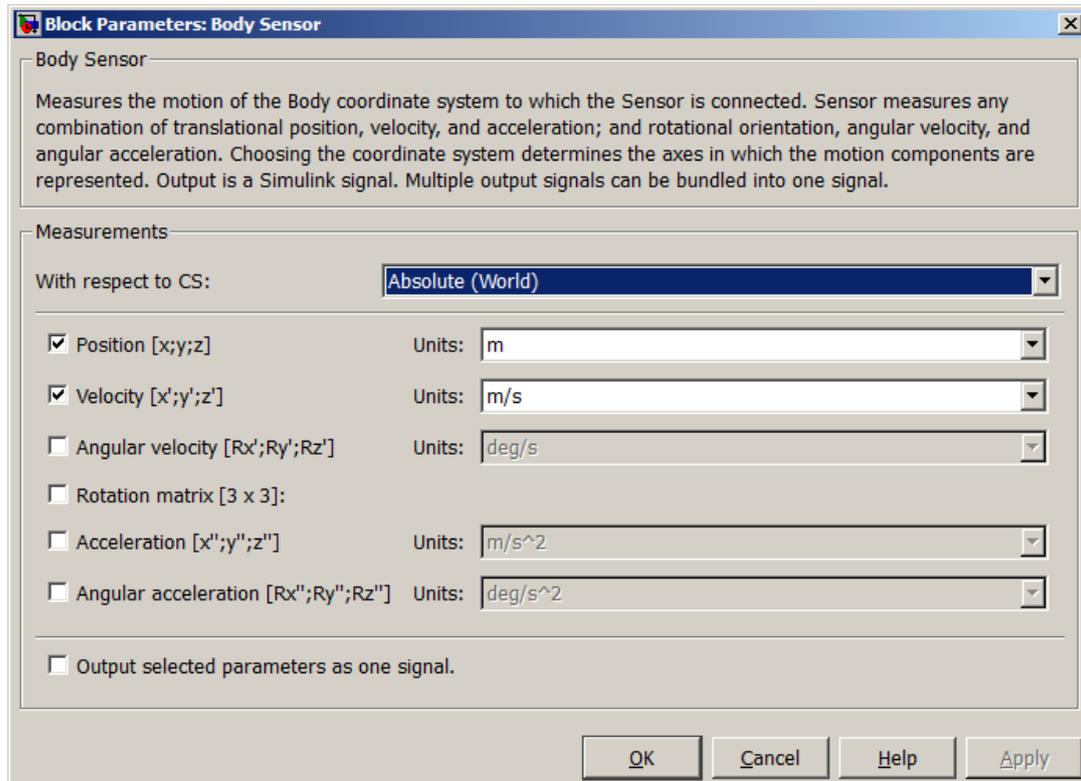


Рис. 1.19. Окна настройки блока Body Sensor

Блок **Body Actuator** для приложения силы трения к точке CS3 звена **Body3 (Zveno3)**. В окне блока выбираем прилагаемую силу в Ньютонах (рис. 1.20).

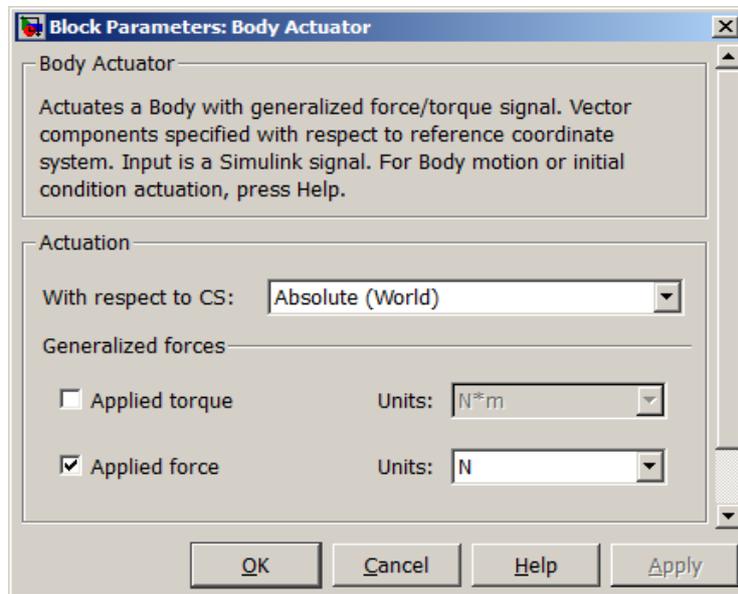


Рис. 1.20. Окна настройки блока Body Actuator

Блок для моделирования силы трения **Coulomb & Viscous Friction**. В окне блока, согласно исходным данным, задаем величину силы сухого трения скольжения (Offset) и коэффициент вязкого трения (Gain) согласно формулам (1.3) – (1.5) (рис. 1.21).

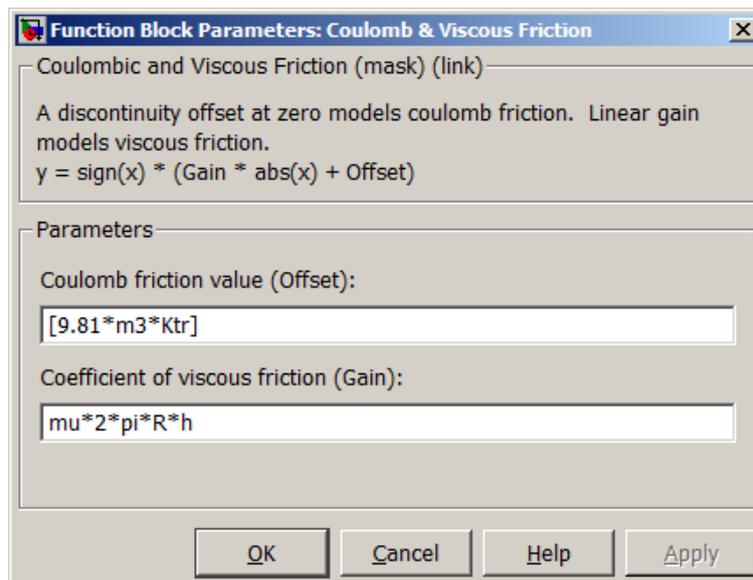


Рис. 1.21. Окна настройки блока Coulomb & Viscous Friction

После сборки модели и введения численных значений параметров модели необходимо произвести запуск модели, установив время моделирования, достаточное для затухания всех переходных процессов системы. Результатами моделирования являются анимационная модель движения механизма (рис. 1.22) и графики перемещения и скорости Шарнира 1 (**Revolute1**) (рис. 1.23) и центра масс ползуна **Body3 (Zveno3)** (рис. 1.24) во времени.

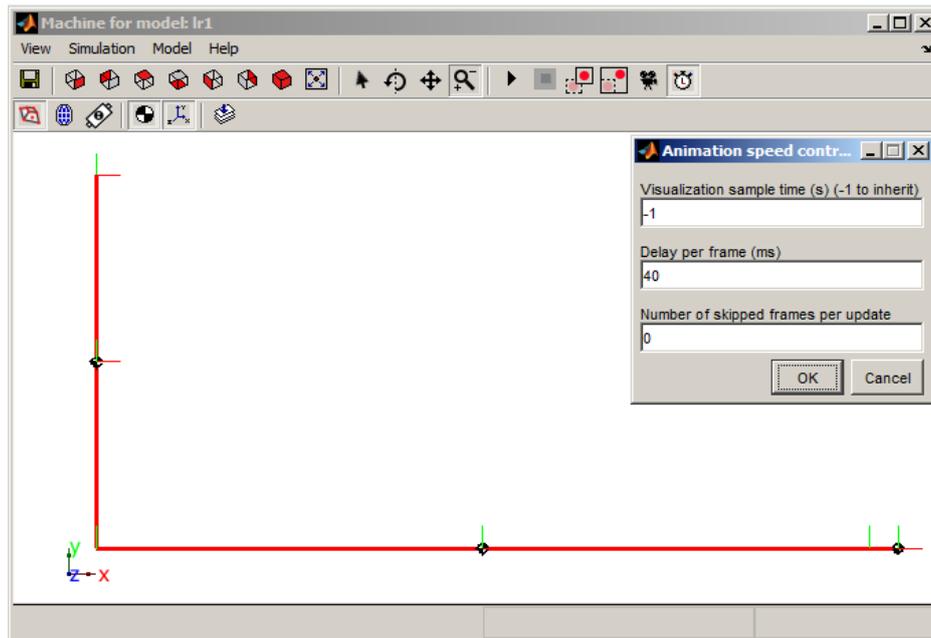


Рис. 1.22. Окна визуализации движений модели механизма

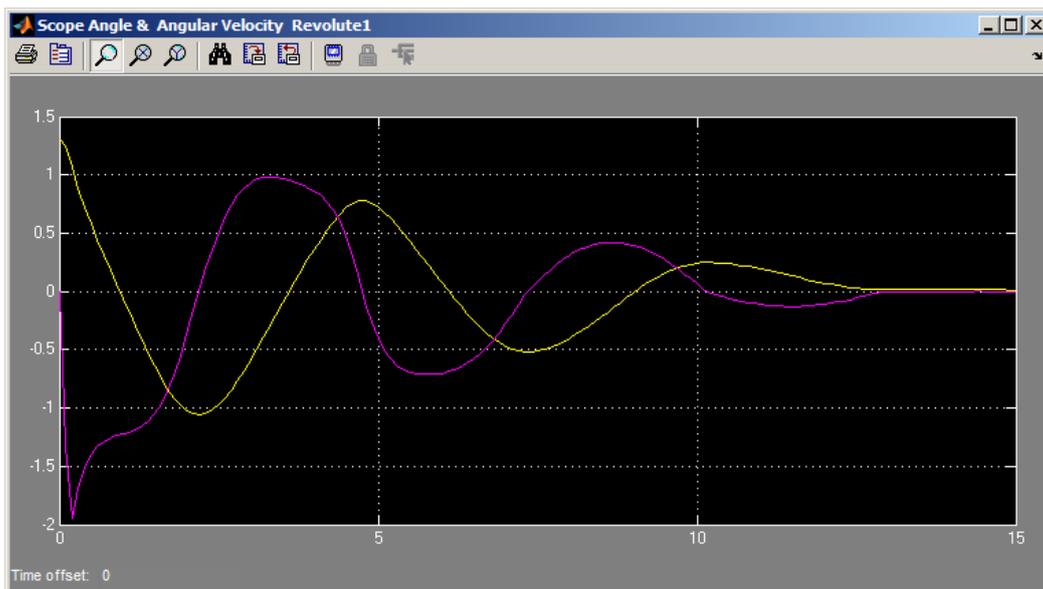


Рис. 1.23. Графики углового перемещения и угловой скорости Шарнира 1

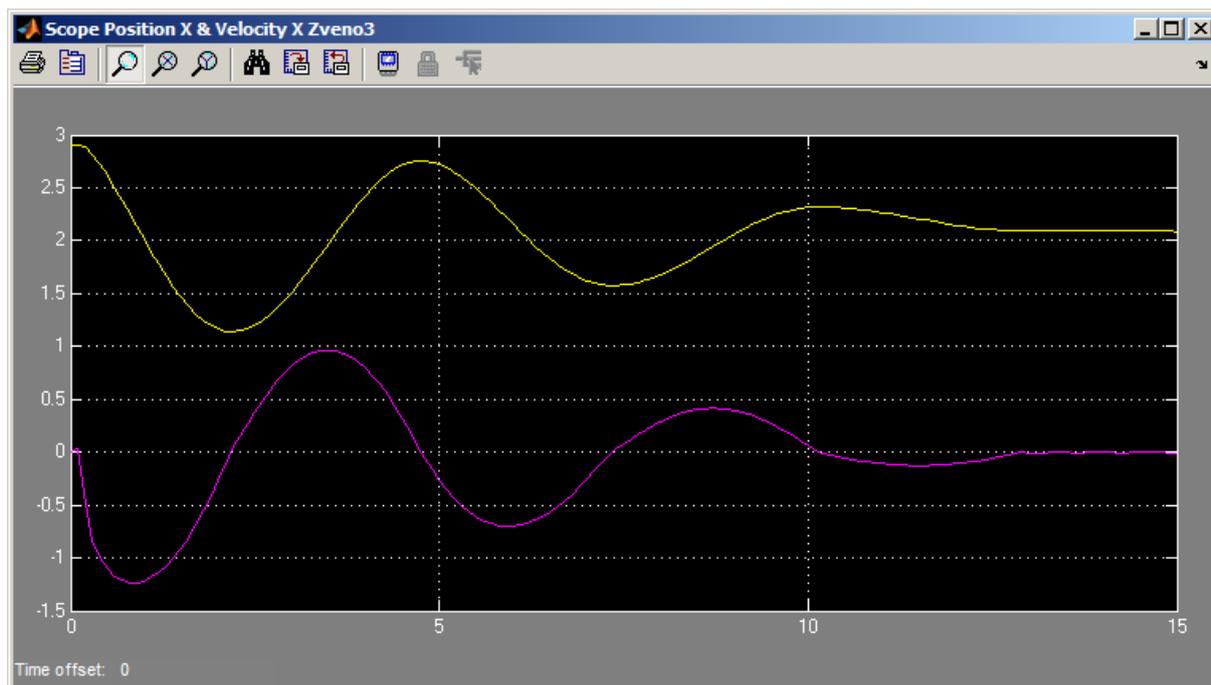


Рис. 1.24. Графики поступательного перемещения и поступательной скорости центра масс Звена 3 (ползуна)

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 1.5) собрать в среде Simulink\ SimMechanics модель кривошипно-ползунного механизма.
2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 1.3) задать значения параметров модели и настроить решатель модели.
3. Задать, согласно таблице 1.3, начальное отклонение угла Шарнира 1  $\theta_{10}$ .
4. Запустить модель. Получить картинку визуализации движения механизма (см. рис. 1.22).
5. Определить длительность затухания переходных процессов в механической системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в механической системе.
6. Получить графики углового перемещения и угловой скорости Шарнира 1 во времени и графики поступательного перемещения и поступательной скорости центра масс Звена 3 (ползуна) во времени.
7. Сделать вывод о характере движения механизма.
8. Оформить отчёт по работе.

## Исходные данные для выполнения работы

Расчетная схема моделируемого многосвязного механизма приведена на рис. 1.4, а схема его модели в среде Simulink представлена на рис. 1.5. Параметры звеньев механизма приведены в табл. 1.3.

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели, либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace.

Для всех вариантов исходных данных принимаем значения коэффициента сухого трения  $K_{тр} = 0,02$ , а коэффициента динамической вязкости  $\mu$  (мн) = 0,8 Па·с.

Таблица 1.3

**Параметры звеньев кривошипно-ползунного механизма**

| № вар. | $L_1$ , м | $m_1$ , кг | $L_2$ , м | $m_2$ , кг | $h$ , м | $R$ , м | $m_3$ , кг | $\theta_{10}$ , ° |
|--------|-----------|------------|-----------|------------|---------|---------|------------|-------------------|
| 1      | 1,0       | 1,5        | 1         | 1,5        | 0,15    | 0,060   | 10,0       | 60                |
| 2      | 1,2       | 1,8        | 1,5       | 2,2        | 0,12    | 0,060   | 8,0        | 75                |
| 3      | 1,5       | 2,2        | 2,0       | 3,0        | 0,15    | 0,050   | 9,0        | 65                |
| 4      | 1,0       | 1,5        | 2,0       | 4,0        | 0,16    | 0,045   | 8,5        | 60                |
| 5      | 1,0       | 1,5        | 2,5       | 3,5        | 0,20    | 0,050   | 9,5        | 80                |
| 6      | 2,0       | 2,5        | 2,0       | 3,0        | 0,20    | 0,040   | 9,0        | 70                |
| 7      | 1,5       | 2,0        | 2,5       | 3,5        | 0,25    | 0,080   | 12,0       | 60                |
| 8      | 1,2       | 1,8        | 1,8       | 2,8        | 0,18    | 0,050   | 8,0        | 75                |
| 9      | 1,5       | 2,2        | 2,0       | 3,0        | 0,15    | 0,050   | 9,0        | 65                |
| 10     | 1,6       | 2,0        | 2,6       | 4,5        | 0,20    | 0,050   | 10,5       | 60                |
| 11     | 2,5       | 3,5        | 2,5       | 3,5        | 0,20    | 0,050   | 12,5       | 80                |
| 12     | 2,5       | 3,5        | 3,0       | 4,5        | 0,25    | 0,040   | 10,0       | 70                |
| 13     | 1,5       | 2,5        | 1,5       | 2,5        | 0,22    | 0,090   | 15,0       | 60                |
| 14     | 1,8       | 2,7        | 2,5       | 3,3        | 0,18    | 0,090   | 12,0       | 75                |
| 15     | 2,2       | 3,3        | 3,0       | 4,5        | 0,22    | 0,075   | 13,5       | 65                |
| 16     | 1,5       | 2,2        | 3,0       | 6,0        | 0,24    | 0,065   | 12,5       | 60                |
| 17     | 1,5       | 2,2        | 3,7       | 5,5        | 0,30    | 0,075   | 14,5       | 80                |
| 18     | 3,0       | 3,5        | 3,0       | 4,5        | 0,30    | 0,060   | 13,5       | 70                |
| 19     | 2,5       | 3,0        | 3,7       | 5,2        | 0,35    | 0,120   | 18,0       | 60                |
| 20     | 1,8       | 2,7        | 2,7       | 4,2        | 0,27    | 0,075   | 12,0       | 75                |
| 21     | 2,5       | 3,3        | 3,0       | 4,5        | 0,25    | 0,075   | 13,5       | 65                |
| 22     | 2,4       | 3,0        | 3,9       | 6,7        | 0,30    | 0,075   | 15,5       | 60                |
| 23     | 3,5       | 5,5        | 3,5       | 5,2        | 0,40    | 0,075   | 18,5       | 80                |
| 24     | 3,5       | 5,2        | 4,5       | 6,7        | 0,45    | 0,060   | 15,0       | 70                |
| 25     | 1,5       | 2,5        | 1,5       | 2,2        | 0,25    | 0,090   | 15,0       | 60                |

## Содержание отчета

1. Номер и название работы.
2. Расчетная схема кривошипно-ползунного механизма.
3. Схема модели механизма в среде Simulink\SimMechanics.
4. Окна задания параметров модели.
5. Формулы расчетов осевых моментов инерции тел.
6. Графики углового перемещения и угловой скорости Шарнира 1 во времени и графики поступательного перемещения и поступательной скорости центра масс Звена 3 (ползуна) во времени.
7. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimMechanics?
2. Что такое кинематическая пара?
3. Сколько степеней свободы имеет твердое тело, совершающее плоское движение? Назовите их.
4. Как определяется степень подвижности механизма?
5. Что такое тензор инерции тела?
6. Опишите закон сухого трения.
7. Опишите закон Ньютона для вязкого трения.
8. Дайте структурный анализ многозвенного кривошипно-ползунного механизма.
9. Какие виды движений совершает каждое звено системы?
10. Опишите назначение блоков, образующих схему модели кривошипно-ползунного механизма в среде Simulink\SimMechanics.
11. Зачем в модели блок Gain с коэффициентом  $-1$ ?
12. Каковы параметры блоков Body?
13. В каких системах координат можно задавать координаты точек тел?
14. Как задаются оси вращения (перемещения) шарнирных соединений?
15. Каковы параметры блока, рассчитывающего величину трения?
16. Как определить время затухания переходных процессов механической системы?

## Лабораторная работа № 2

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МНОГОМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С УПРУГО-ВЯЗКИМИ СВЯЗЯМИ

**Цель работы** – моделирование, визуализация и исследование динамики многомассовой системы с упруго-вязкими связями.

#### Основы моделирования многомассовых систем в SimMechanics

Многомассовой называется система, число дискретных масс которой больше единицы. Математически анализ многомассовой механической системы осложняется необходимостью решения большого числа составляющих систему уравнений движения.

Уравнения движения Лагранжа дают единый и простой метод решения задач динамики. Важное преимущество этих уравнений состоит в том, что их вид и число не зависят ни от количества тел (или точек), входящих в рассматриваемую систему, ни от того, как эти тела движутся. Число уравнений Лагранжа определяется только числом степеней свободы системы [3]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = Q_1; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = Q_2; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i. \end{cases} \quad (2.1)$$

Основная задача динамики в обобщенных координатах состоит в том, чтобы, зная обобщенные силы  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i$  и начальные условия, найти закон движения системы, т. е. определить обобщенные координаты  $q_1, q_2, \dots, q_i$  как функции времени [3].

Уравнения Лагранжа представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения второго порядка относительно обобщенных координат. Так как кинетическая энергия  $T$  зависит от обобщенных скоростей  $\dot{q}_i$ , то при дифференцировании первых членов уравнений (2.1) по времени в левых частях этих уравнений появятся вторые производные по времени от искомым координат [3].

Уравнениями Лагранжа можно пользоваться для изучения движения любой механической системы с геометрическими или сводящимися к геометрическим (голономным) связями, независимо от того, сколько тел (или точек) входит в систему, как движутся эти тела, и какое движение (абсолютное или относительное) рассматривается [3].

При моделировании многомассовых систем в машиностроении, в частности в моделях строительных и дорожных машин, зачастую приходится учитывать упруго-вязкие связи тел механической системы. Такие элементы машин как гидроцилиндры, пневмоколесные движители, элементы подвески характеризуются тем, что в них одновременно присутствуют и упругие, и пластические, и вязкие свойства [2].

Упруго-вязкие свойства тел моделируются системами, состоящими из различных комбинаций двух простых механических элементов: упругого элемента Гука с коэффициентом упругости  $c$  – пружина (рис. 2.1, а) и вязкого элемента Ньютона с коэффициентом вязкого трения  $b$  (рис. 2.1, б). Эти элементы и простейшие «конструируемые» с их помощью модели показаны на рис. 2.1 [2].

Упруго-вязкое тело Кельвина – Фойгта (Фохта) представлено механической моделью, полученной при параллельном соединении упругого элемента Гука и вязкого элемента Ньютона (рис. 2.1, в). Под действием растягивающего усилия пружина удлиняется, а поршень будет двигаться в жидкости. Это движение поршня связано с вязким сопротивлением жидкости, ввиду чего полное растяжение пружины наступает не сразу. Когда нагрузка устранена, пружина сжимается до первоначальной длины, но это требует времени вследствие вязкого сопротивления жидкости. Модель тела Кельвина – Фойгта отражает явление упругого последействия, которое представляет собой изменение упругой деформации во времени, когда она или постоянно нарастает до некоторого предела после приложения нагрузки, или постепенно уменьшается после её снятия [2].

Механическая модель вязко-упругого релаксирующего тела Максвелла (рис. 2.1, г) представляет собой последовательное соединение элементов Гука и Ньютона. На оба элемента действует одинаковое напряжение. Тело Максвелла ведёт себя как упругое или вязкое в зависимости от отношения времени релаксации материала к длительности эксперимента. Итак, если под действием мгновенного усилия пружина растягивается, а затем сразу нагрузка снята, то поршень не успевает двигаться и система ведёт себя как упругое тело. Однако, с другой стороны, если поддерживать растяжение пружины постоянным, она постепенно релаксирует, перемещая поршень вверх, и система ведёт себя как ньютоновская жидкость [2].

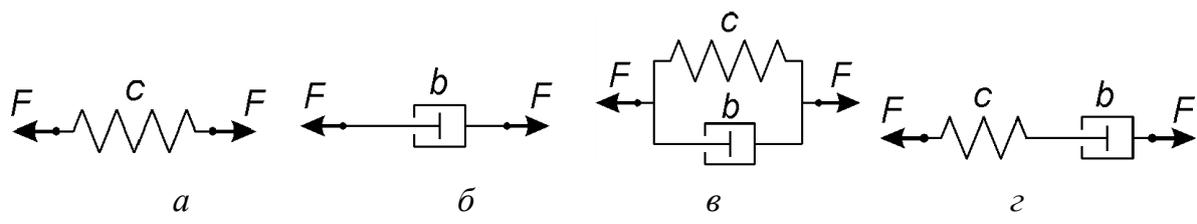


Рис. 2.1. Модели упруго-вязких свойств тел:  
*a* – элемент Гука; *б* – элемент Ньютона;  
*в* – модель Кельвина – Фойгта; *г* – модель Максвелла

В библиотеке SimMechanics имеется раздел упруго-вязких элементов **Force Elements**. Раздел содержит два блока: **Body Spring & Damper** и **Joint Spring & Damper**, реализующие реологическую модель Кельвина – Фойгта [2].

Блоки упруго-вязких элементов задают силовое воздействие на точки двух тел либо на части примитивов шарнира, имитирующее соединение двух заданных точек различных тел или двух частей примитива шарнира упруго-вязким элементом. К блокам данного раздела не могут быть подключены виртуальные датчики и приводы тел или шарнирных соединений **Sensors & Actuators** [2].

Блок **Body Spring & Damper** моделирует соединение двух точек двух тел упруго-вязким элементом так, как это показано на рис. 2.2, *a*.

При изменении расстояния между заданными точками двух тел, к портам которых присоединен блок **Body Spring & Damper**, изменяется усилие, которое прикладывается к обоим телам в заданных точках, но с противоположным направлением. Направлено усилие вдоль линии, соединяющей заданные точки [2].

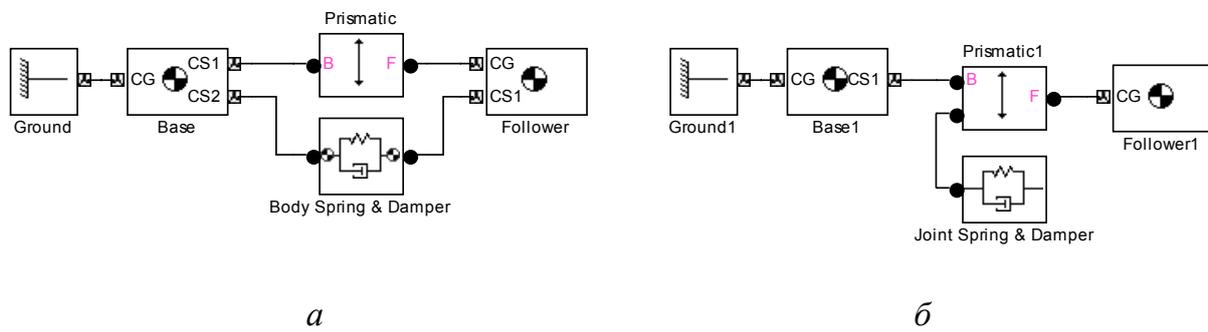


Рис. 2.2. Схемы модели механических систем с упруго-вязкими связями в среде Simulink\SimMechanics:  
*a* – с блоком **Body Spring & Damper**; *б* – с блоком **Joint Spring & Damper**

Значения коэффициента упругости *Spring constant*  $k$ , коэффициента вязкого трения *Damper constant*  $b$  и расстояния равновесия между точками *Spring natural length*  $r_0$ , при котором сила упругости равна нулю, должны быть заданы в окне настройки параметров блока (рис. 2.3).

Блок *Body Spring & Damper* рассчитывает силу  $F$ , противодействующую взаимному перемещению двух тел с упруго-вязкими связями в пространстве, соответствующую выражению

$$F = -k(r - r_0) - bV, \quad (2.2)$$

где  $V = (r - r_0)'$  – скорость относительного движения точек тела, м/с;  $r$  – текущее расстояние между точками тел, м.

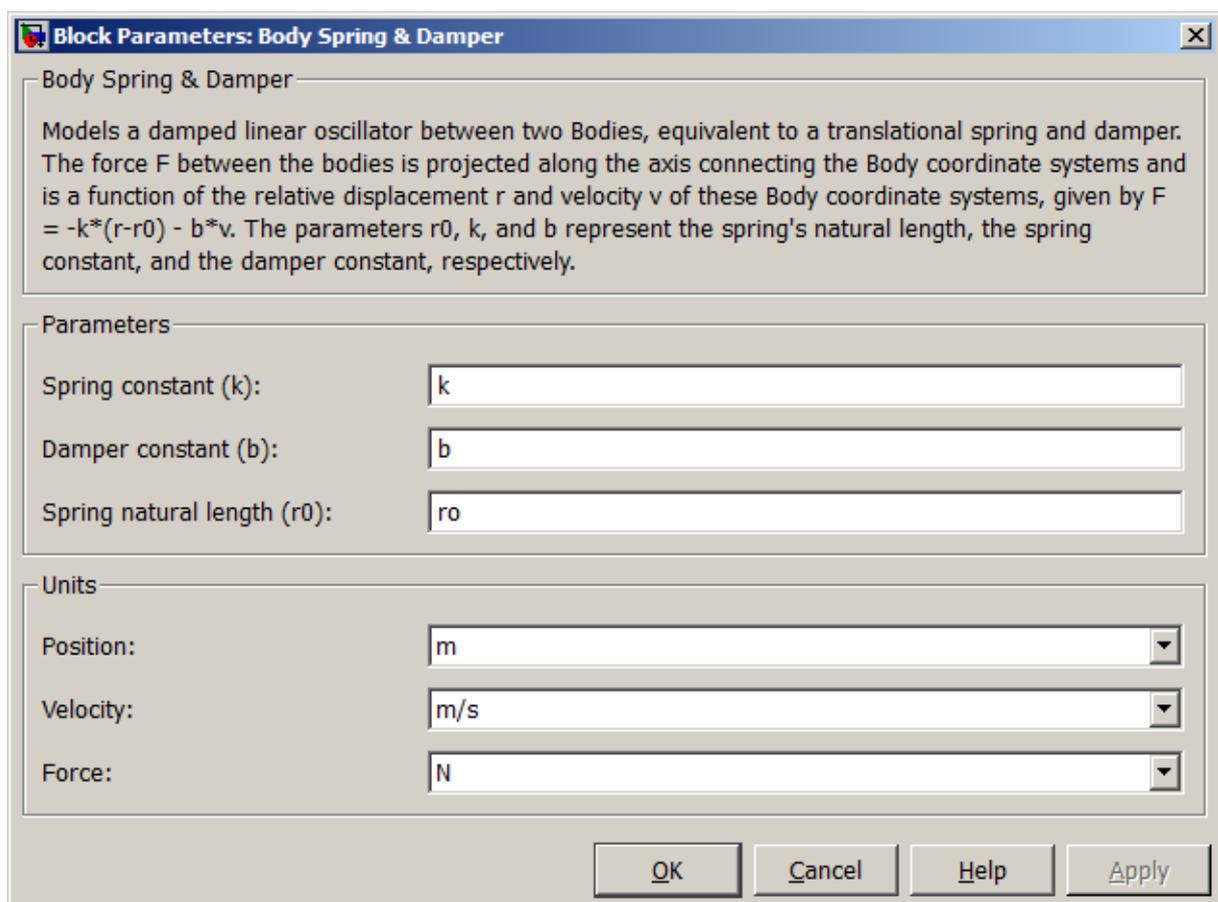


Рис. 2.3. Окна настройки блока *Body Spring & Damper*

Сам блок *Body Spring & Damper* не является шарнирным соединением и не устанавливает степени свободы тел, поэтому его подключение к двум блокам *Body* в окне модели должно выполняться параллельно с каким-либо шарниром типа *Joint*, например *Prismatic*, как показано на рис. 2.2, а [2].

Блок Joint Spring & Damper моделирует соединение двух частей примитивов шарнира, к которому он подключен. Этот блок имеет только один порт, поскольку он присоединяется к единственному блоку шарнира Joint (рис. 2.2, б) [2].

Действие блока Joint Spring & Damper аналогично действию упруго-вязкого элемента Body Spring & Damper с той лишь разницей, что Joint Spring & Damper прикладывает усилие/момент не к двум точкам тел, а к двум частям примитива (элементарного сочленения вращательного типа R или поступательного типа P) какого-либо шарнира. В зависимости от того, какой тип примитива выбран (P или R), прикладывается усилие или момент соответственно. Один блок Joint Spring & Damper может возбуждать сразу все примитивы шарнира, к дополнительному порту которого он присоединен, или только часть из них. Для выбора возбуждаемых примитивов служит простановка флажков в полях колонки Enable окна настройки (рис. 2.4) [2].

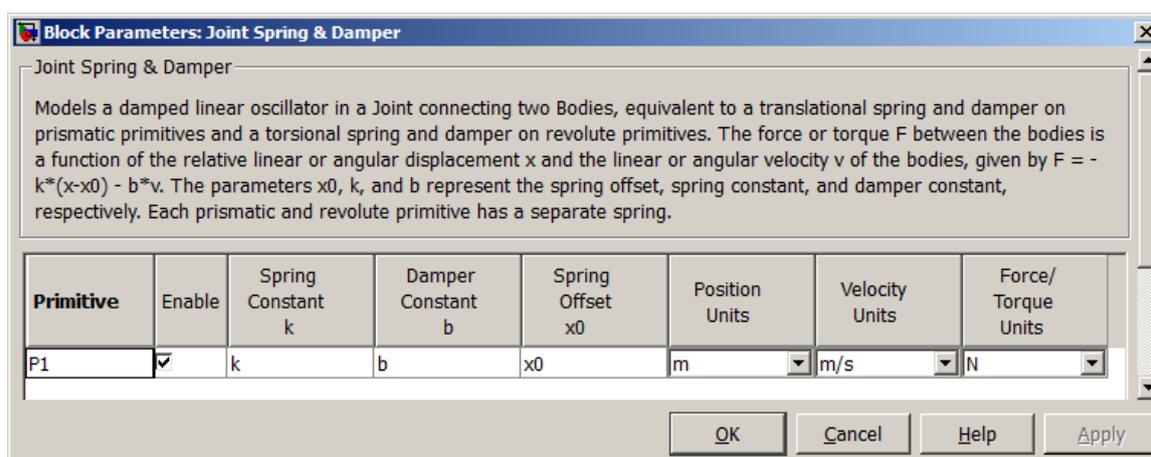


Рис. 2.4. Окна настройки блока Joint Spring & Damper

Также в окне настройки должны быть заданы значения коэффициента упругости Spring constant  $k$ , коэффициента вязкого трения Damper constant  $b$  и линейного/углового расстояния равновесия между частями примитива Spring Offset  $x_0$  [2].

Описанные блоки Body Spring & Damper и Joint Spring & Damper выполняют в модели механизма действия, сходные с действиями блоков-возбудителей Body Actuator и Joint Actuator соответственно, то есть возбуждают движение тел или шарниров. Однако они выделены в отдельный раздел, поскольку выполняют возбуждение неявно, по специальной зависимости, и имеют свою ограниченную область применения [2].

## Постановка задачи

На рис. 2.5 представлена схема многомассовой системы, состоящей из трёх звеньев, имеющих упруго-вязкие связи и совершающих простое поступательное движение вдоль оси  $Y$ . Массы звеньев  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ ; длины звеньев  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ . Связи звеньев системы характеризуются коэффициентами упругости  $c_i$  и вязкого трения  $b_i$ , а также расстояниями равновесия упругих элементов  $r_{01}$ ,  $r_{02}$  и  $r_{03}$ .

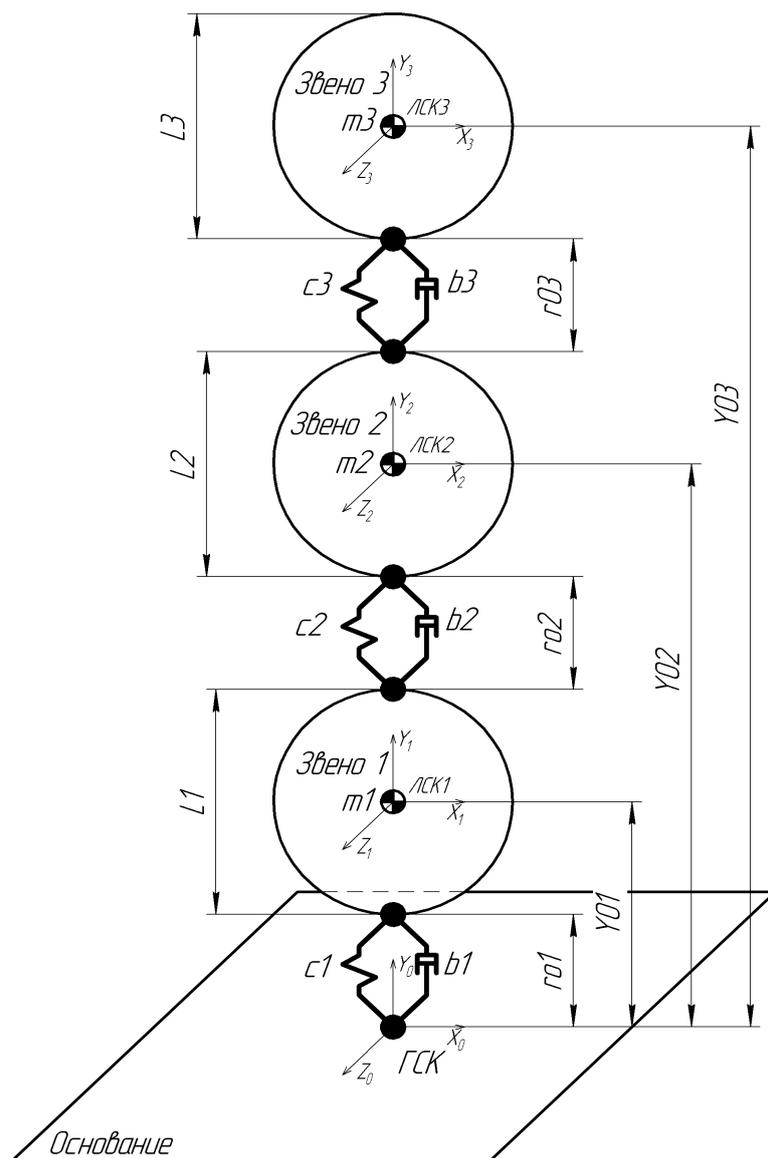


Рис. 2.5. Расчетная схема многомассовой системы

Требуется провести моделирование, визуализацию движений и исследование динамики системы в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimMechanics.

## Моделирование многомассовой системы

Модель многомассовой системы в среде Simulink\SimMechanics MATLAB 2010 представлена на рис. 2.6.

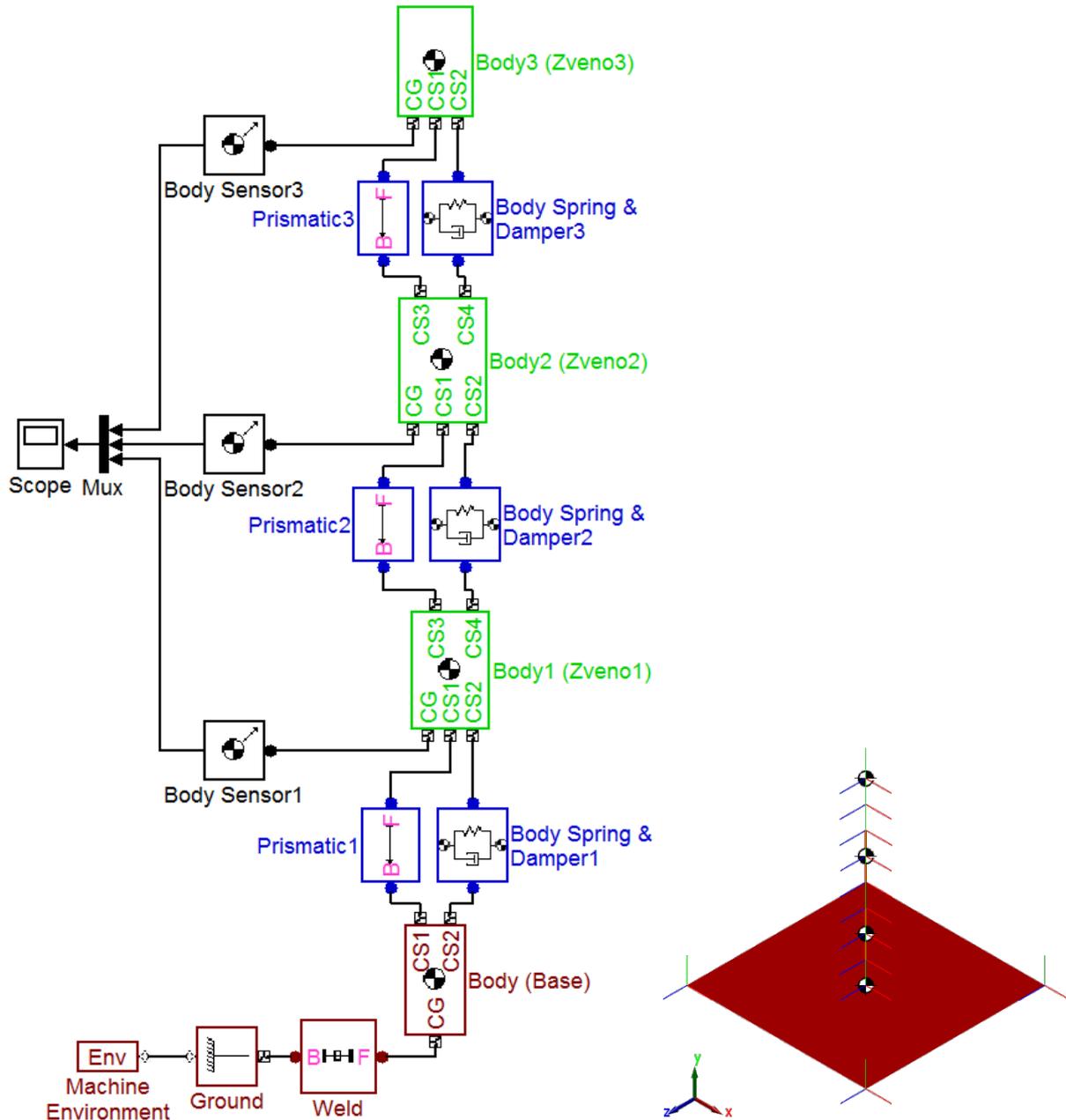


Рис. 2.6. Схема модели многомассовой системы в среде Simulink\SimMechanics

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Machine Environment** (Simscape\SimMechanics\Bodies) – блок параметров механической среды моделирования служит для задания внешних факторов, действующих на систему.

- **Ground** (Simscape\SimMechanics\Bodies) – блок, моделирующий неподвижную точку, заданную в выбранной системе координат. Задаёт неподвижные звенья системы.

- **Body** (Simscape\SimMechanics\Bodies) – блок, моделирующий твёрдые тела – звенья системы.

- **Body Spring & Damper** (Simscape\SimMechanics\Force Elements) – блок, моделирующий упруго-вязкую связь тел.

- **Prismatic** (Simscape\SimMechanics\Joints) – блок, моделирующий поступательный шарнир, обеспечивает одну степень свободы.

- **Weld** (Simscape\SimMechanics\Joints) – блок, моделирующий неподвижное соединение тел.

- **Body Sensor** (Simscape\SimMechanics\Sensors & Actuators) – датчик состояния тела. Выходными сигналами блока являются значения линейного перемещения, скорость и/или ускорение определенной точки тела в заданной системе координат.

- **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.

- **Mux** (Simulink\Signal Routing) – соединитель сигналов.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя и визуализации модели механизма производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с переменным шагом вычислений (рис. 2.7).

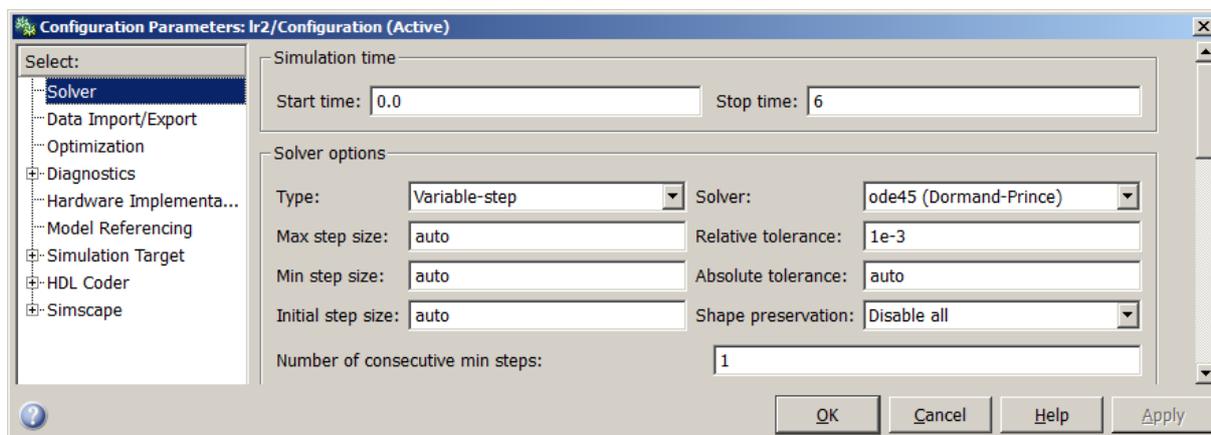


Рис. 2.7. Окно настройки решателя модели

Во вкладке **Simscape\SimMechanics** устанавливаем настройки визуализации модели (рис. 2.8).

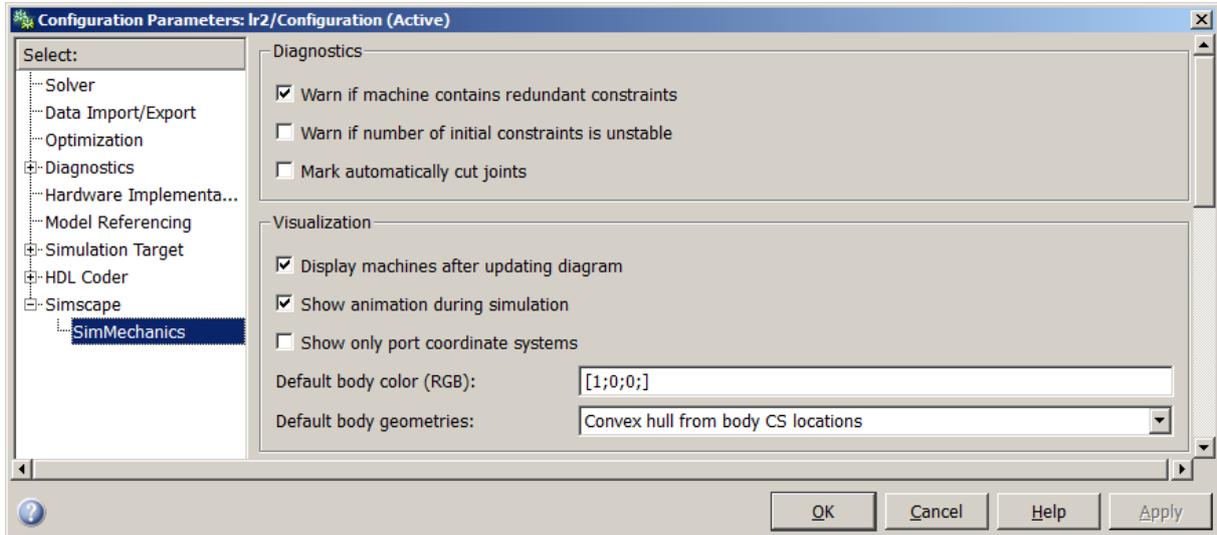


Рис. 2.8. Окно настройки визуализации модели

Блок параметров механической среды моделирования **Machine Environment**. Задаем вектор гравитации в глобальной системе координат  $[X_0 \ Y_0 \ Z_0]$ . Гравитационная ось направлена вниз по оси  $Y_0$ , т.е. вектор гравитации имеет вид  $[0 \ -9,81 \ 0]$  (рис. 2.9).

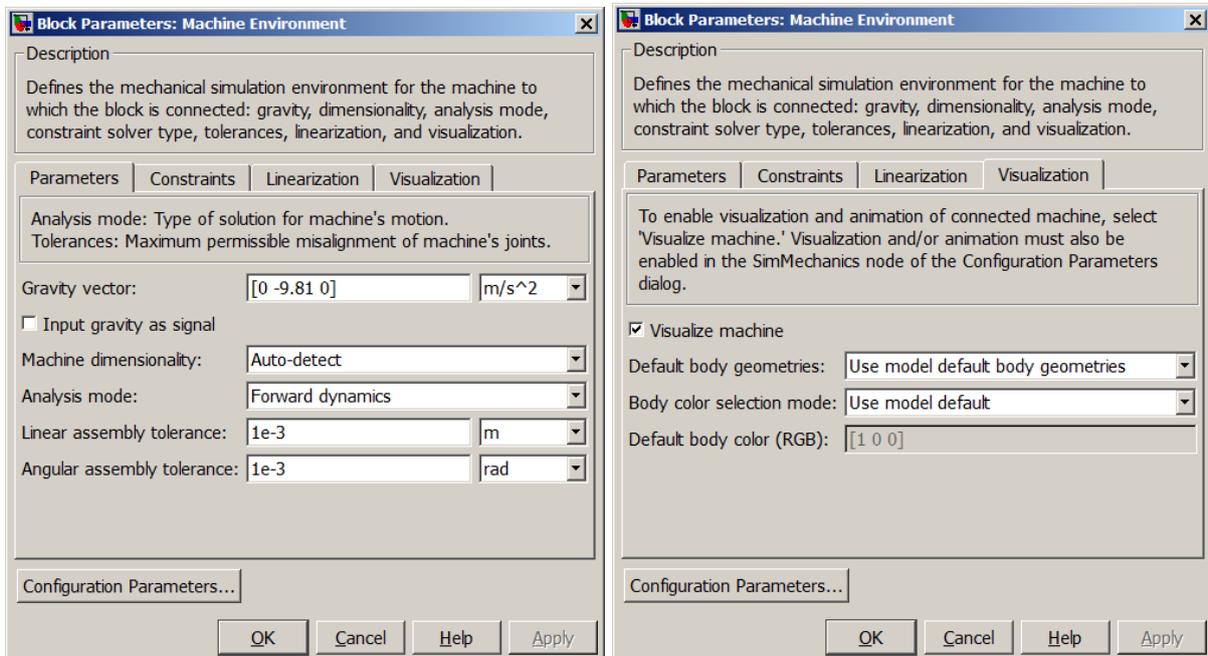


Рис. 2.9. Окно настройки блока Machine Environment

Блок неподвижной точки системы **Ground**. Точка располагается в центре глобальной системы координат  $[X_0 Y_0 Z_0]$  (рис. 2.10).

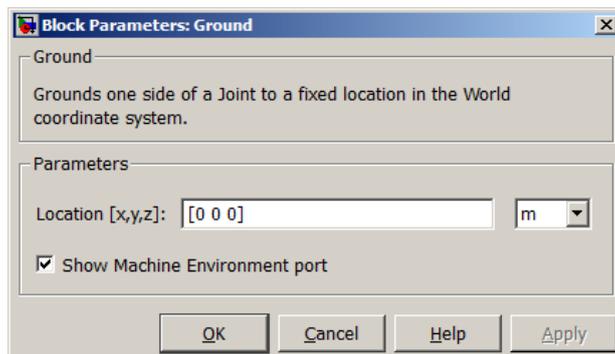


Рис. 2.10. Окно настройки блока Ground

Блок неподвижного соединения **Weld**. Блок не имеет степеней свободы и, соответственно, его настройки не меняются (рис. 2.11).

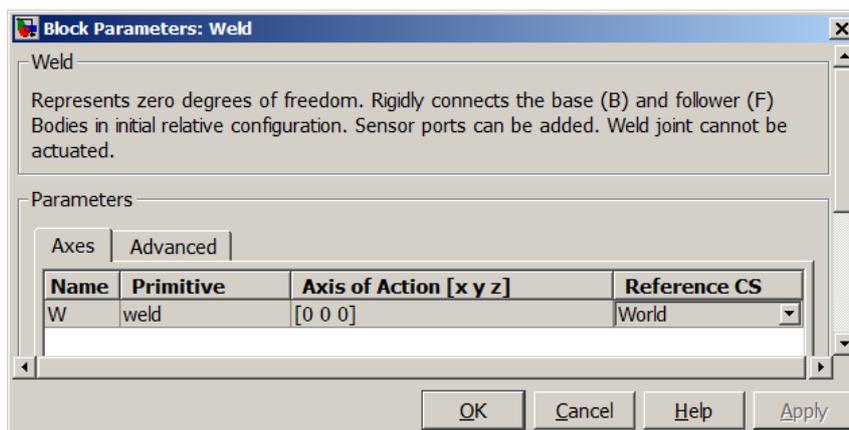


Рис. 2.11. Окно настройки блока Weld

Блок основания системы **Body (Base)**. В окне блока задаем численное значение массы основания, тензор инерции и координаты центра масс CG и точек подключения поступательного шарнира (**Prismatic1**) и тела Фойгта (**Body Spring & Damper1**), соответственно CS1 и CS2, в глобальной системе координат World на вкладке **Position**. Также создаем точки CS3 – CS6 без вывода порта для задания габаритов основания системы (рис. 2.12).

Поскольку тело основания как и другие тела в системе не совершают вращательного движения, используем стандартный симметричный тензор инерции  $e_{ue}$  (3) с единичными осевыми моментами инерции.

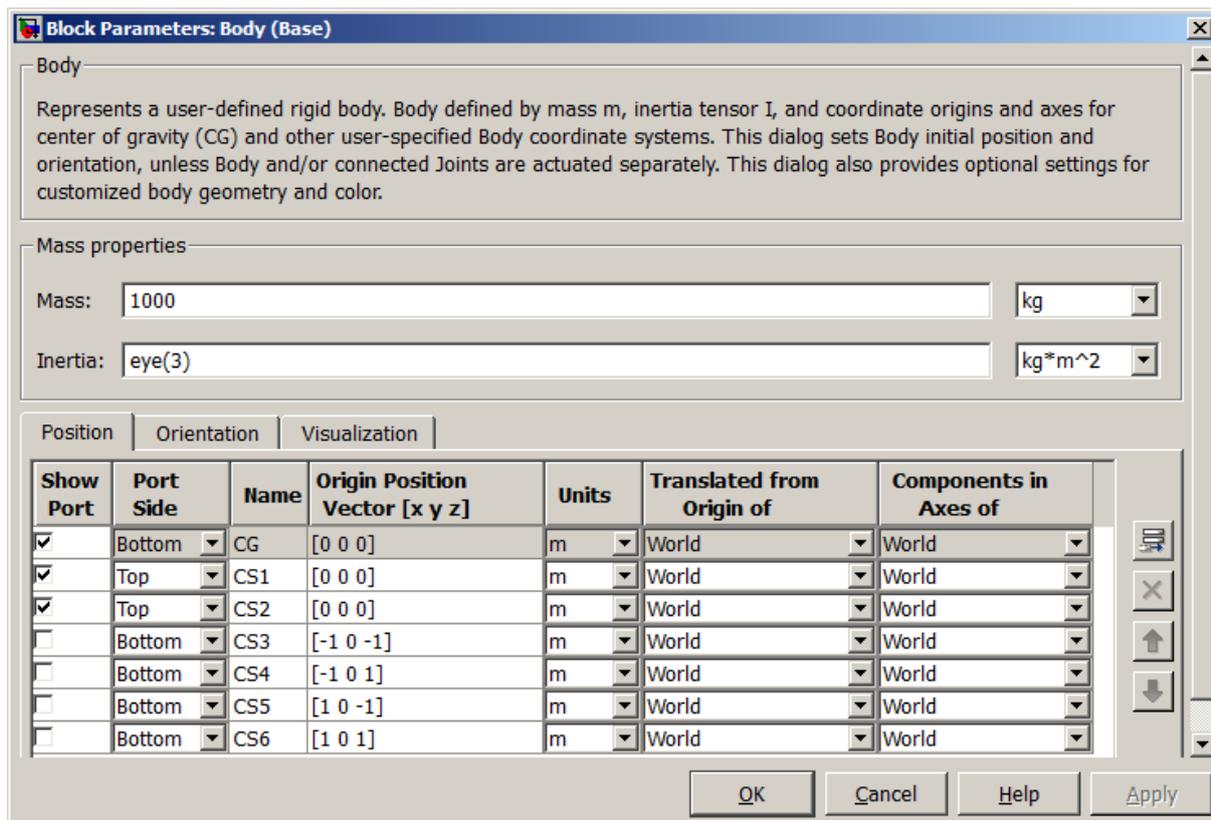


Рис. 2.12. Окно настройки блока Body (Base)

Блоки шарнирных соединений, обеспечивающих поступательное движение звеньев системы, **Prismatic1**, **Prismatic2**, **Prismatic3** имеют одну степень свободы – относительно оси Y (рис. 2.13).

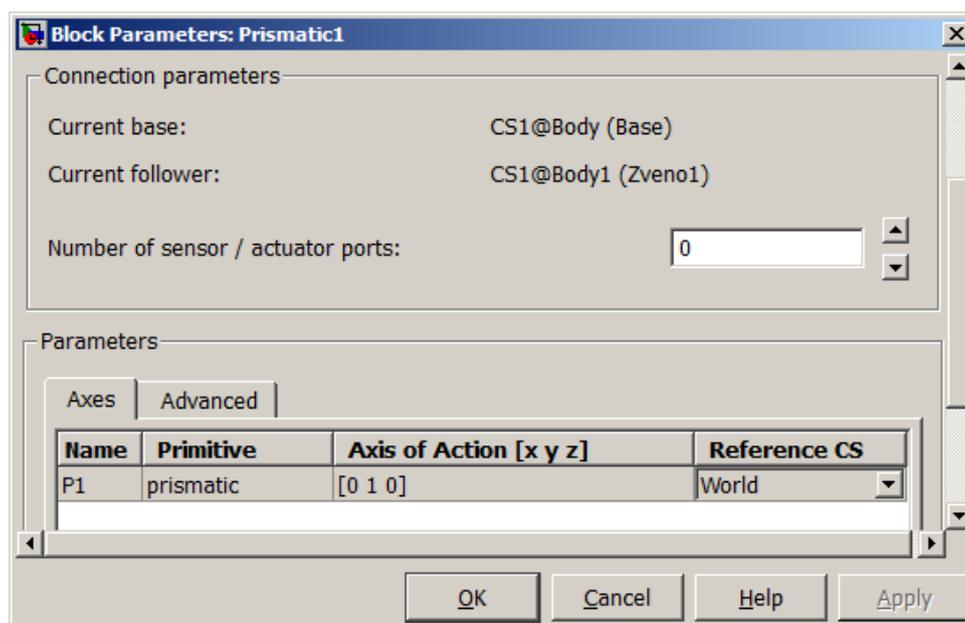


Рис. 2.13. Окно настройки блоков Prismatic

Блоки упруго-вязких связей **Body Spring & Damper1, 2, 3**. Для каждого блока, согласно исходным данным, задаем свои коэффициенты упругости  $c_i$  и вязкого трения  $b_i$  и расстояния равновесия между точками  $r_{0i}$  (рис. 2.14).

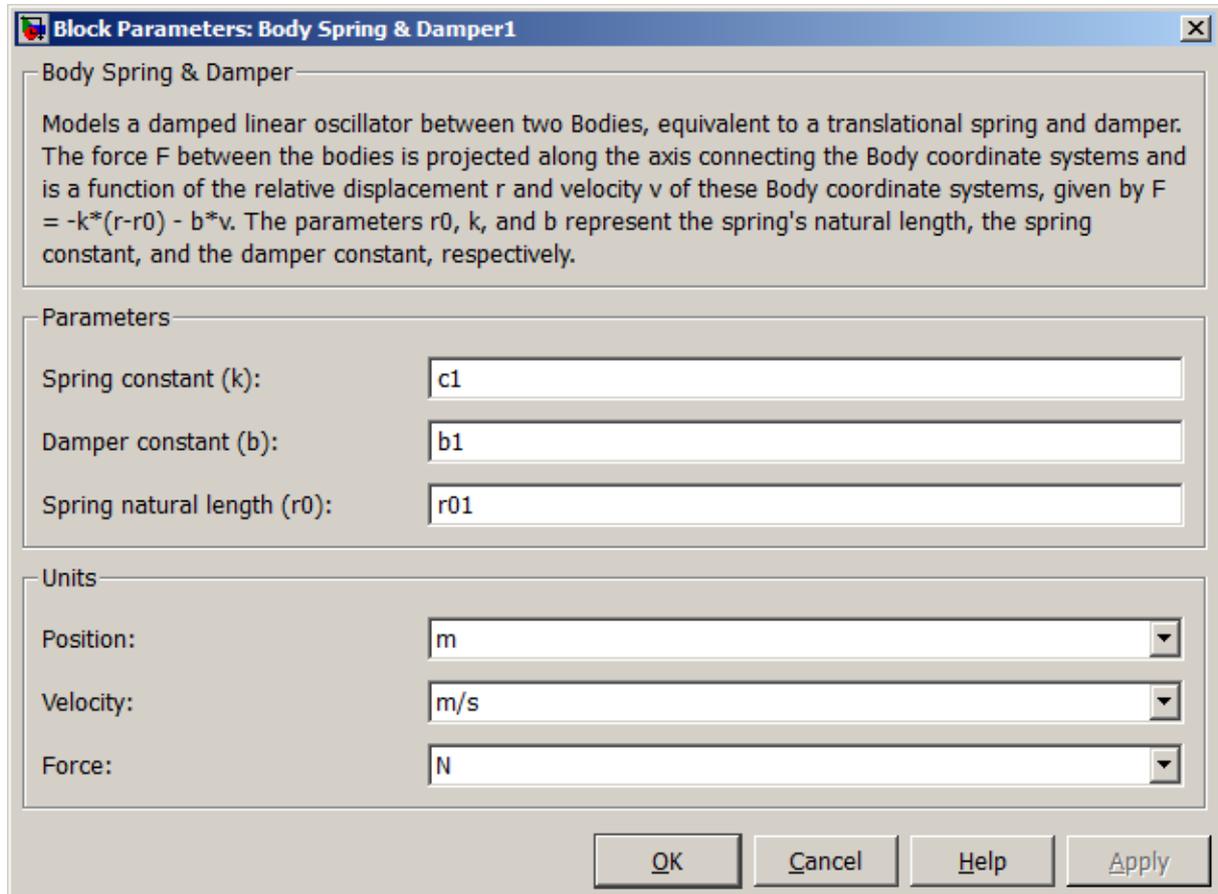


Рис. 2.14. Окно настройки блоков Body Spring & Damper

Блок звена системы **Body1 (Zveno1)**. В окне блока, согласно исходным данным, задаем массу звена  $m_1$ , стандартный симметричный тензор инерции  $e_{ye}$  (3) и координаты центра масс CG в глобальной системе координат World на вкладке **Position**. Координаты точек подключения поступательного шарнира (**Prismatic1**) и тела Фойгта (**Body Spring & Damper1**), соответственно CS1 и CS2, а также координаты точек подключения поступательного шарнира (**Prismatic2**) и тела Фойгта (**Body Spring & Damper2**), соответственно CS3 и CS4, задаем в локальной системе координат центра масс звена 1 (рис. 2.15).

В блоках звеньев системы **Body2 (Zveno2)** и **Body3 (Zveno3)**, согласно исходным данным, задаем аналогичные параметры и координаты (рис. 2.16 и 2.17).

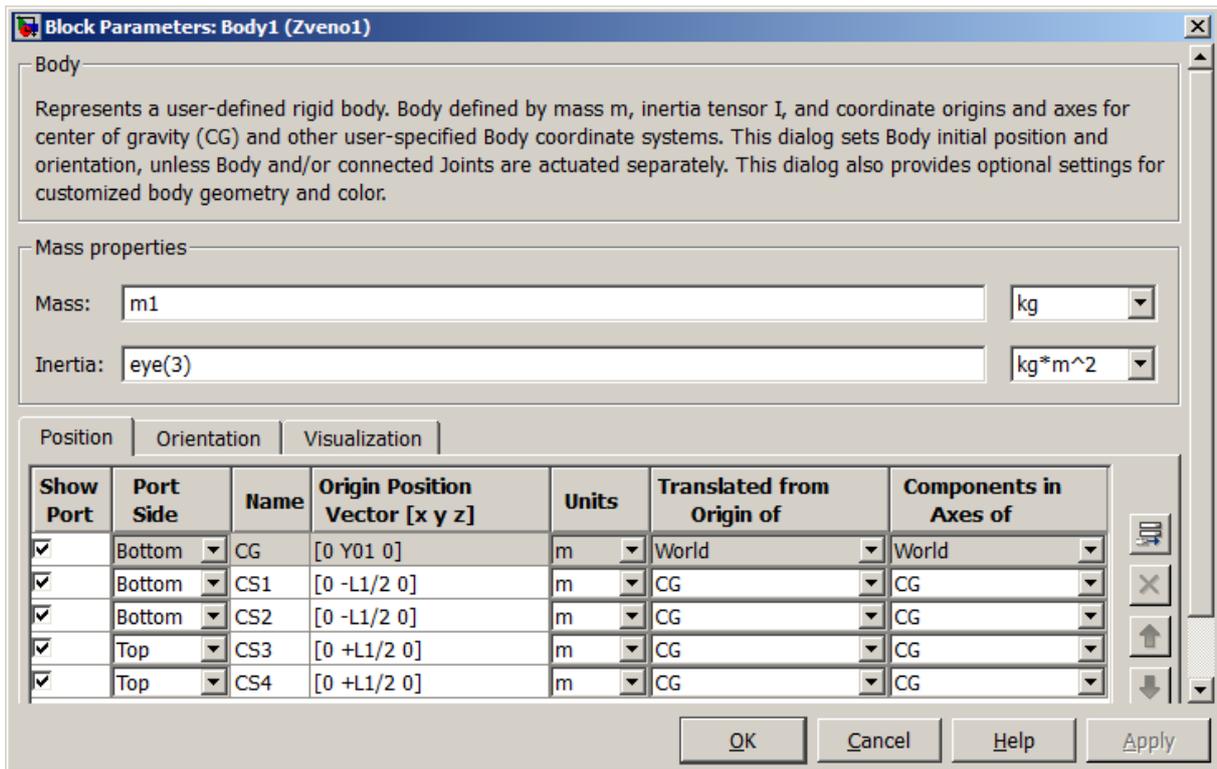


Рис. 2.15. Окно настройки блока Body1 (Zveno1)

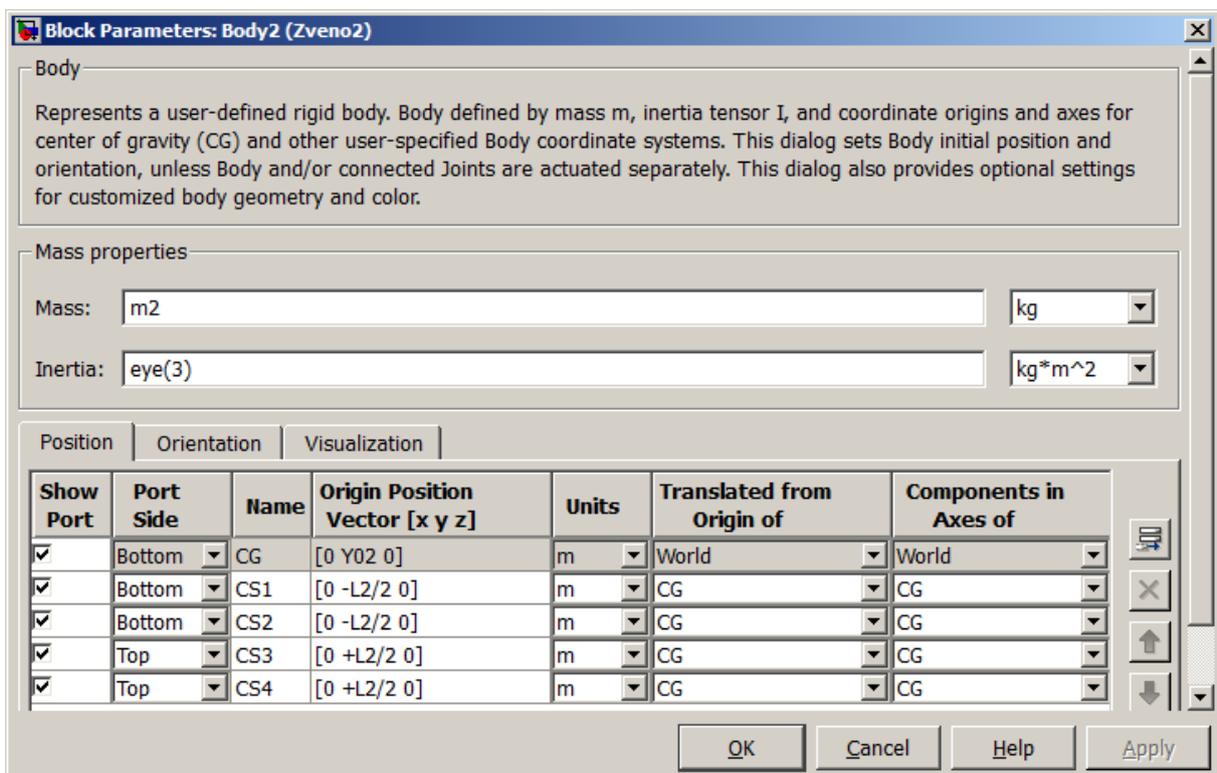


Рис. 2.16. Окно настройки блока Body2 (Zveno2)

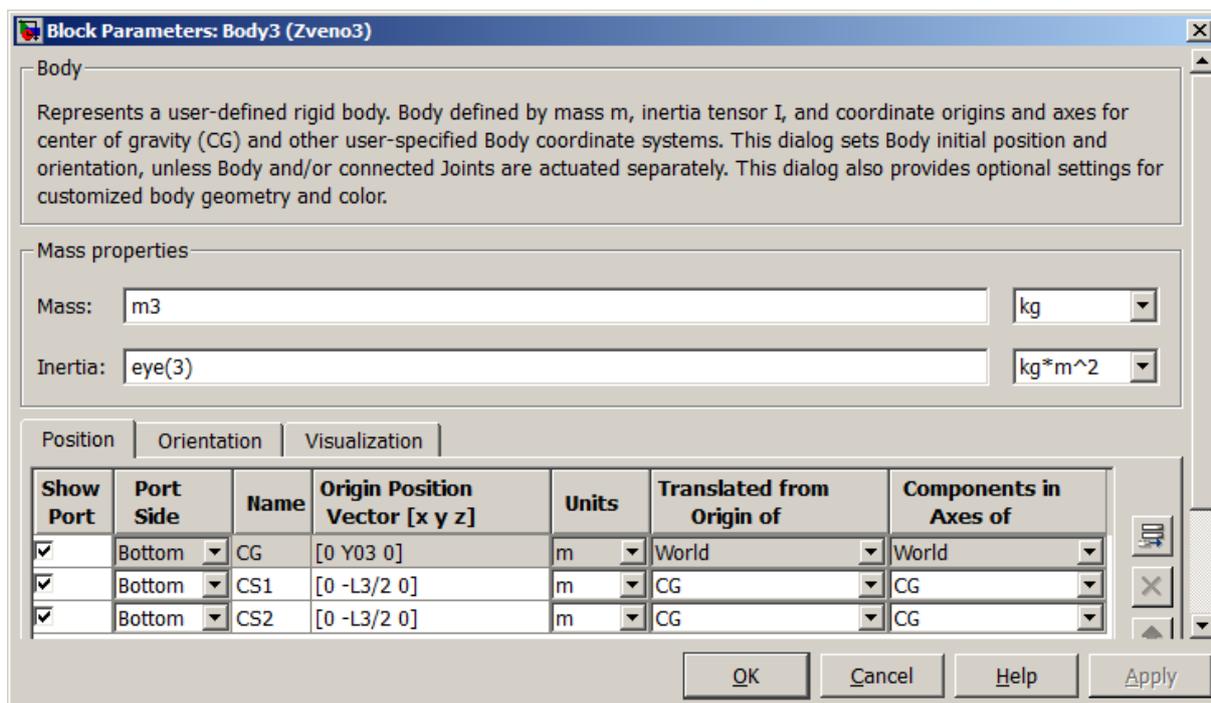


Рис. 2.17. Окно настройки блока Body3 (Zveno3)

Блоки измерений параметров тела **Body Sensor1, 2, 3**. В окнах блоков выбираем измерение линейного перемещения центра масс звеньев для всех трёх блоков (рис. 2.18).

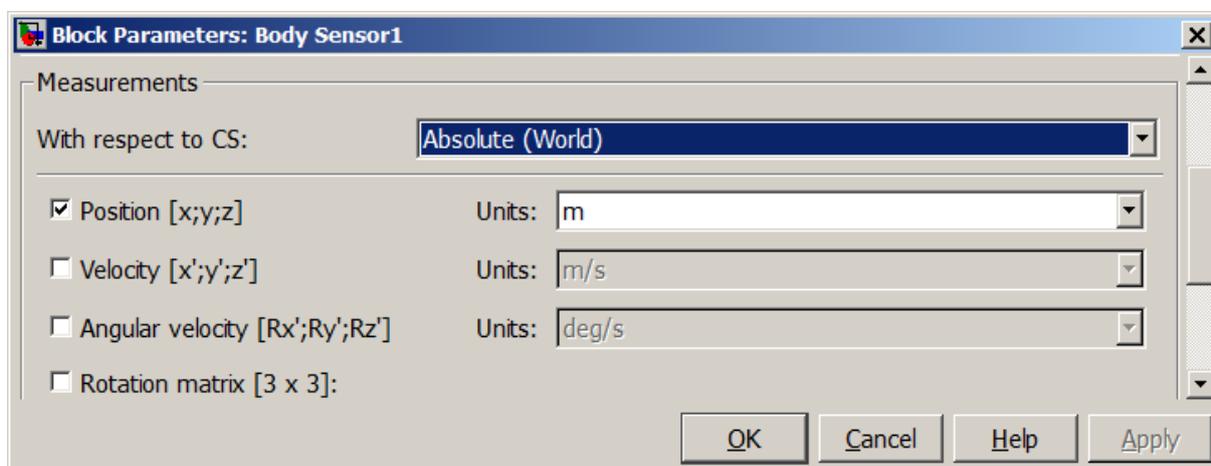


Рис. 2.18. Окна настройки блока Body Sensor

После сборки модели и введения численных значений параметров модели необходимо произвести запуск модели, установив время моделирования, достаточное для затухания всех переходных процессов системы. Результатами моделирования являются графики перемещения центров масс всех трёх звеньев системы во времени (рис. 2.19).

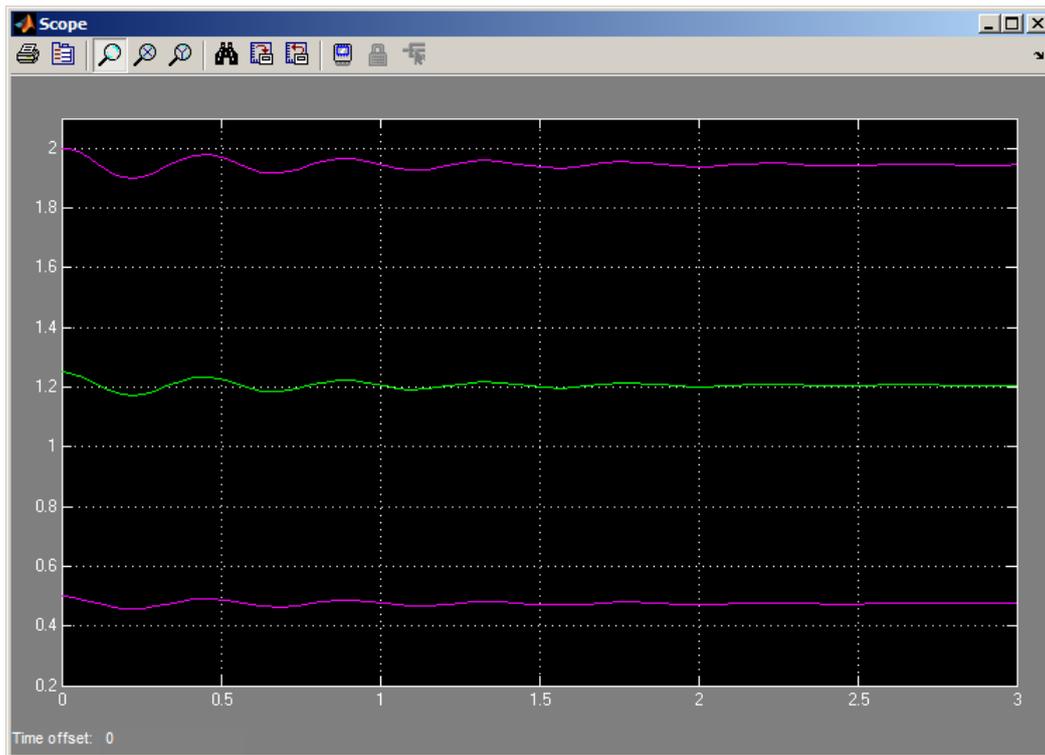


Рис. 2.19. Графики перемещения центров масс звеньев системы

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 2.6) собрать в среде Simulink\SimMechanics модель многомассовой системы.
2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 2.1) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.
3. Получить картинку визуализации движения системы.
4. Определить длительность затухания переходных процессов в механической системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в механической системе.
5. Получить графики перемещения центров масс звеньев системы во времени.
6. Сделать вывод о характере движения звеньев системы.
7. Оформить отчёт по работе.

### Исходные данные для выполнения работы

Расчетная схема многомассовой системы приведена на рис. 2.5, а схема её модели в среде Simulink представлена на рис. 2.6. Параметры многомассовой системы приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Параметры многомассовой системы**

| №<br>вар. | $m_1$ ,<br>кг | $L_1$ ,<br>м | $Y_{01}$ ,<br>м | $c_1$ ,<br>Н/м | $b_1$ ,<br>Н·с/м | $r_{01}$ ,<br>м | $m_2$ ,<br>кг | $L_2$ ,<br>м | $Y_{02}$ ,<br>м | $c_2$ ,<br>Н/м | $b_2$ ,<br>Н·с/м | $r_{02}$ ,<br>м | $m_3$ ,<br>кг | $c_3$ ,<br>Н/м | $b_3$ ,<br>Н·с/м | $r_{03}$ ,<br>м | $L_3$ ,<br>м | $Y_{03}$ ,<br>м |
|-----------|---------------|--------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 1         | 15            | 0,5          | 0,5             | 15000          | 150              | 0,25            | 25            | 0,5          | 1,25            | 15000          | 150              | 0,25            | 35            | 15000          | 150              | 0,25            | 0,5          | 2               |
| 2         | 18            | 0,5          | 0,6             | 15000          | 150              | 0,35            | 28            | 0,5          | 1,35            | 15000          | 150              | 0,25            | 38            | 15000          | 150              | 0,25            | 0,5          | 2,1             |
| 3         | 20            | 0,5          | 0,7             | 15000          | 150              | 0,45            | 30            | 0,5          | 1,45            | 15000          | 150              | 0,25            | 40            | 15000          | 150              | 0,25            | 0,5          | 2,2             |
| 4         | 30            | 0,5          | 0,8             | 15000          | 150              | 0,55            | 40            | 0,5          | 1,55            | 15000          | 150              | 0,25            | 45            | 15000          | 150              | 0,25            | 0,5          | 2,3             |
| 5         | 35            | 0,5          | 0,9             | 15000          | 150              | 0,65            | 45            | 0,5          | 1,65            | 15000          | 150              | 0,25            | 50            | 15000          | 150              | 0,25            | 0,5          | 2,4             |
| 6         | 16            | 0,5          | 0,6             | 30000          | 300              | 0,35            | 24            | 0,5          | 1,35            | 30000          | 300              | 0,25            | 32            | 30000          | 300              | 0,25            | 0,5          | 2,1             |
| 7         | 20            | 0,5          | 0,65            | 30000          | 300              | 0,4             | 28            | 0,5          | 1,4             | 30000          | 300              | 0,25            | 38            | 30000          | 300              | 0,25            | 0,5          | 2,15            |
| 8         | 24            | 0,5          | 0,7             | 30000          | 300              | 0,45            | 32            | 0,5          | 1,45            | 30000          | 300              | 0,25            | 44            | 30000          | 300              | 0,25            | 0,5          | 2,2             |
| 9         | 28            | 0,5          | 0,75            | 30000          | 300              | 0,5             | 40            | 0,5          | 1,5             | 30000          | 300              | 0,25            | 50            | 30000          | 300              | 0,25            | 0,5          | 2,25            |
| 10        | 32            | 0,5          | 0,8             | 30000          | 300              | 0,55            | 48            | 0,5          | 1,55            | 30000          | 300              | 0,25            | 56            | 30000          | 300              | 0,25            | 0,5          | 2,3             |
| 11        | 8             | 0,4          | 0,4             | 20000          | 100              | 0,2             | 16            | 0,4          | 1,15            | 20000          | 100              | 0,35            | 20            | 20000          | 100              | 0,45            | 0,4          | 2               |
| 12        | 12            | 0,4          | 0,4             | 20000          | 100              | 0,2             | 20            | 0,4          | 1,25            | 20000          | 100              | 0,45            | 24            | 20000          | 100              | 0,45            | 0,4          | 2,1             |
| 13        | 16            | 0,4          | 0,4             | 20000          | 100              | 0,2             | 24            | 0,4          | 1,35            | 20000          | 100              | 0,55            | 28            | 20000          | 100              | 0,45            | 0,4          | 2,2             |
| 14        | 20            | 0,4          | 0,4             | 20000          | 100              | 0,2             | 28            | 0,4          | 1,45            | 20000          | 100              | 0,65            | 32            | 20000          | 100              | 0,45            | 0,4          | 2,3             |
| 15        | 24            | 0,4          | 0,4             | 20000          | 100              | 0,2             | 32            | 0,4          | 1,55            | 20000          | 100              | 0,75            | 36            | 20000          | 100              | 0,45            | 0,4          | 2,4             |
| 16        | 10            | 0,4          | 0,5             | 40000          | 200              | 0,3             | 10            | 0,5          | 1,2             | 40000          | 200              | 0,25            | 10            | 40000          | 200              | 0,1             | 0,5          | 1,8             |
| 17        | 12            | 0,4          | 0,6             | 40000          | 200              | 0,4             | 12            | 0,5          | 1,3             | 40000          | 200              | 0,25            | 12            | 40000          | 200              | 0,2             | 0,5          | 2               |
| 18        | 14            | 0,4          | 0,7             | 40000          | 200              | 0,5             | 14            | 0,5          | 1,4             | 40000          | 200              | 0,25            | 14            | 40000          | 200              | 0,3             | 0,5          | 2,2             |
| 19        | 16            | 0,4          | 0,8             | 40000          | 200              | 0,6             | 16            | 0,5          | 1,5             | 40000          | 200              | 0,25            | 16            | 40000          | 200              | 0,4             | 0,5          | 2,4             |
| 20        | 20            | 0,4          | 0,9             | 40000          | 200              | 0,7             | 20            | 0,5          | 1,6             | 40000          | 200              | 0,25            | 20            | 40000          | 200              | 0,5             | 0,5          | 2,6             |
| 21        | 15            | 0,5          | 0,6             | 10000          | 500              | 0,35            | 25            | 0,5          | 1,5             | 10000          | 500              | 0,4             | 35            | 10000          | 500              | 0,55            | 0,4          | 2,5             |
| 22        | 18            | 0,5          | 0,6             | 10000          | 500              | 0,35            | 28            | 0,5          | 1,5             | 10000          | 500              | 0,4             | 38            | 10000          | 500              | 0,65            | 0,4          | 2,6             |
| 23        | 21            | 0,5          | 0,6             | 10000          | 500              | 0,35            | 31            | 0,5          | 1,5             | 10000          | 500              | 0,4             | 41            | 10000          | 500              | 0,75            | 0,4          | 2,7             |
| 24        | 24            | 0,5          | 0,6             | 10000          | 500              | 0,35            | 34            | 0,5          | 1,5             | 10000          | 500              | 0,4             | 44            | 10000          | 500              | 0,85            | 0,4          | 2,8             |
| 25        | 27            | 0,5          | 0,6             | 10000          | 500              | 0,35            | 37            | 0,5          | 1,5             | 10000          | 500              | 0,4             | 47            | 10000          | 500              | 0,95            | 0,4          | 2,9             |

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace.

### **Содержание отчета**

1. Номер и название работы.
2. Расчетная схема многомассовой системы.
3. Схема модели многомассовой системы в среде Simulink\SimMechanics.
4. Окна задания параметров модели.
5. Графики перемещения центров масс звеньев системы во времени.
6. Вывод по работе.

### **Вопросы и задания для защиты лабораторной работы**

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimMechanics?
2. Что такое кинематическая пара?
3. Сколько степеней свободы имеет твердое тело, совершающее плоское движение? Назовите их.
4. Какие виды движений совершает каждое звено многомассовой системы?
5. Уравнения движения Лагранжа для динамической системы.
6. Опишите модели упруго-вязких связей. Какими параметрами они характеризуются?
7. Как упруго-вязкие связи моделируются в среде Simulink\SimMechanics?
8. Опишите назначение блоков, образующих схему модели многомассовой системы в среде Simulink\SimMechanics.
9. Каковы параметры блоков Body?
10. Какую характеристику реализует блок Блок Body Spring & Damper?
11. В каких системах координат можно задавать координаты точек тел?
12. Как определить время затухания переходных процессов механической системы?

## Лабораторная работа № 3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ГРУЗОПОДЪЁМНОЙ МАШИНЫ

**Цель работы** – моделирование и исследование динамики механического привода грузоподъемной машины с двухступенчатым механическим редуктором.

#### Общие сведения о SimDriveline

**SimDriveline** – специализированная библиотека пакета визуально-блочного моделирования Simulink\Simscape для проектирования и моделирования механических трансмиссий или системы механических трансмиссий. SimDriveline включает готовые блоки для моделирования зубчатых передач, валов, коробок скоростей, трансмиссий, муфт и блоков сцепления. Библиотека содержит обширную библиотеку базовых моделей различных компонентов транспортных средств (дизельный и бензиновый двигатели и т.п.) [1].

SimDriveline помогает разрабатывать системы приводов ходового оборудования и рабочих органов всевозможных технологических машин и оборудования. С помощью языка Simscape, основанного на MATLAB, создаются пользовательские текстовые компоненты, домены и библиотеки физического моделирования. Модели могут быть параметризованы, используя переменные и выражения MATLAB, а также интегрированы с моделями систем управления Simulink для симуляции динамики [1].

#### Общие сведения о моделировании механических передач в SimDriveline

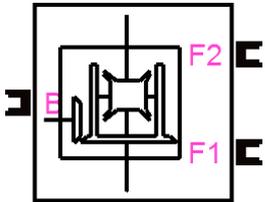
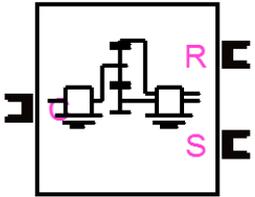
Обычно двигатель приводит в действие производственный механизм через систему передач, отдельные элементы которой движутся с различными скоростями. Это связано с тем, что значительная часть производственных машин требует сравнительно невысоких скоростей (например, 10–300 об/мин), в то время как электродвигатели по соображениям экономичности конструируются на значительные частоты вращения от 750 до 3000 об/мин.

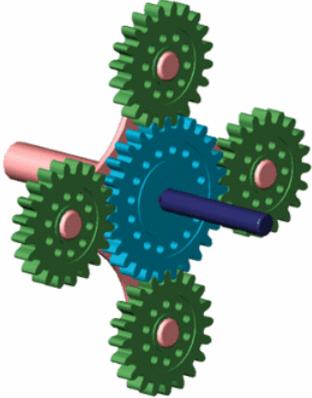
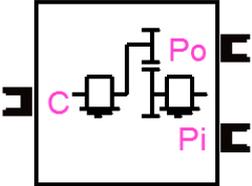
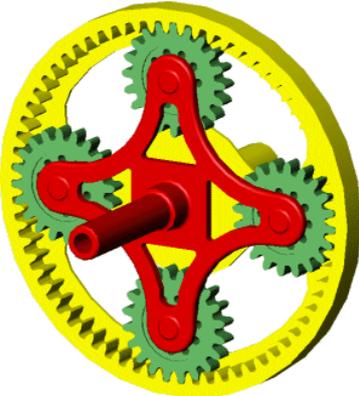
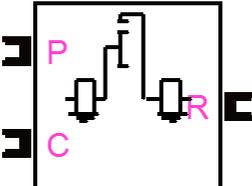
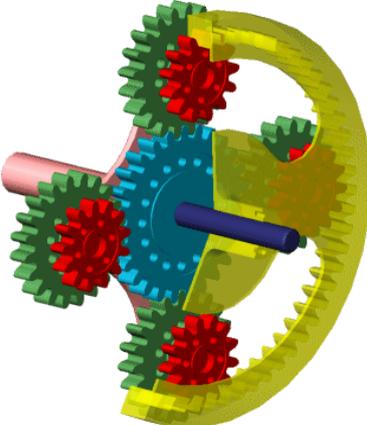
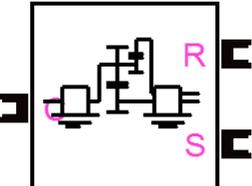
Механические передачи моделируются в Simulink с помощью блоков раздела **Gears** библиотеки SimDriveline. Раздел Gears содержит 8 блоков, имитирующих типовые механические передачи и их составные

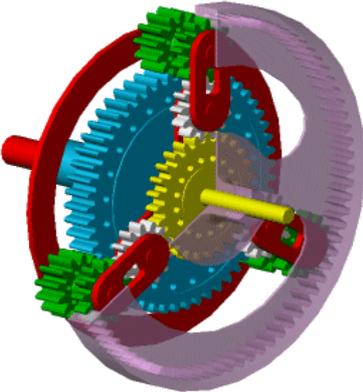
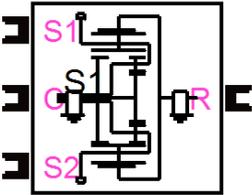
части, которые соединяют между собой модели привода и рабочей машины (табл. 3.1). Пиктограммы на блоках раздела Gears дают наглядную информацию о типе передачи [1, 3].

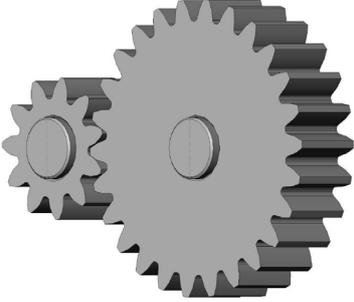
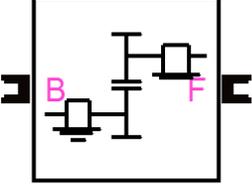
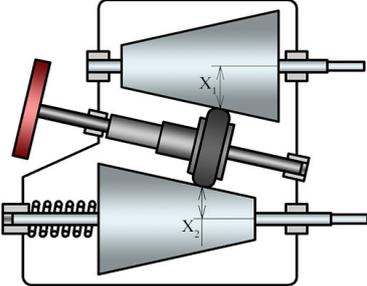
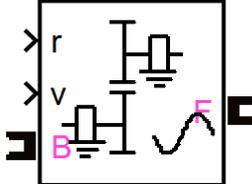
Таблица 3.1

### Модели механических передач в SimDriveline

| Название/<br>Внешний вид передачи   | Блок SimDriveline   | Описание  |
|---|---|---|
| 1   | 2   | 3   |
| <p>Дифференциальная передача</p>  |  <p>Differential</p>    | <p>Дифференциал преобразует вращательное движение относительно продольной оси вращения <b>В</b> в движение вокруг двух боковых осей <b>F1</b> и <b>F2</b>. Основное назначение дифференциала в технике – трансмиссии транспортных машин, в которых дифференциал разветвляет поток мощности от двигателя на два между колёсами, осями, гусеницами, воздушными и водными винтами</p>                                      |
| <p>Планетарная передача</p>      |  <p>Planetary Gear</p> | <p>Это механическая передача вращательного движения, за счёт своей конструкции способная в пределах одной геометрической оси вращения изменять, складывать и раскладывать подводимые угловые скорости и/или крутящий момент. Обычно является элементом трансмиссии различных технологических и транспортных машин. Состоит из солнечной шестерни <b>S</b>, водила <b>C</b>, сателлитов и коронной шестерни <b>R</b></p> |

| 1   | 2  | 3  |
|---|--|--|
| <p>Планетарно-планетарный блок</p>                           |  <p>Planet-Planet</p> | <p>Блок представляет собой набор водила <math>C</math>, внутренних планетарных <math>P_i</math> и внешних планетарных <math>P_o</math> шестерней. Внешние сателлиты соединены с водилом и вращаются относительно него. Солнечная шестерня вращается независимо. Планетарно-планетарный блок является, наряду с планетарно-кольцевым блоком, основным элементом сложного планетарного редуктора</p>   |
| <p>Планетарно-кольцевой блок</p>                            |  <p>Ring-Planet</p> | <p>Блок представляет собой набор водила <math>C</math>, сателлитов (планетарных шестерней) <math>P</math> и коронной шестерни <math>R</math>. Сателлиты и корона вращаются с заданным фиксированным передаточным числом и в одном направлении относительно водила. Планетарно-кольцевой блок является, наряду с планетарно-планетарным блоком, основным элементом сложного планетарного редуктора</p>  |
| <p>Планетарный блок с двойным передаточным отношением</p>  |  <p>Dual-Ratio</p>  | <p>Планетарный блок с двойным передаточным отношением представляет собой набор водила <math>C</math>, солнечной шестерни <math>S</math>, сателлитов и коронной шестерни <math>R</math>. Сателлит представляет собой единое зубчатое колесо с двумя разными радиусами, входящее в зацепление с коронной и солнцем соответственно. Корона и сателлиты вращаются с одним фиксированным передаточным числом, а сателлиты и солнце совместно – с другим</p> |

| 1  | 2   | 3  |
|--|---|--|
| <p data-bbox="268 891 528 922">Редуктор Равиньо</p>  |  <p data-bbox="668 1211 850 1243">Ravigneaux</p> | <p data-bbox="922 282 1390 517">Редуктор Равиньо представляет собой двойную планетарную передачу, изобретенную Полем Равиньо, который подал заявку на патент 28 июля 1949 года в Нейи-сюр-Сен, Франция.</p> <p data-bbox="922 524 1390 759">Этот планетарный редуктор, обычно используемый в автоматических коробках передач, состоит из двух зубчатых пар: кольцо–планета и планета–планета.</p> <p data-bbox="922 766 1390 1001">Комплект Ravigneaux состоит из двух солнечных шестерен, большого солнца и малого солнца, и одного водила, удерживающего два набора сателлитов – внутренних и внешних.</p> <p data-bbox="922 1008 1390 1243">Два комплекта сателлитов вращаются независимо от водила, но совместно вращаются с фиксированным передаточным числом по отношению друг к другу.</p> <p data-bbox="922 1249 1390 1892">Внутренние сателлиты соединены с малой солнечной шестерней и совместно вращаются с фиксированным передаточным отношением относительно неё. Внешние сателлиты соединены с большой солнечной шестерней и совместно вращаются с фиксированным передаточным отношением относительно неё. Наконец, коронная шестерня также соединяется с внешними планетами и вращается совместно с ними с фиксированным передаточным отношением по отношению к ним</p> |

| 1  | 2  | 3  |
|--|--|--|
| <p data-bbox="228 434 568 470">Простой блок передачи</p>                                  |  <p data-bbox="660 712 861 748">Simple Gear</p>             | <p data-bbox="922 315 1390 589">Простой блок передачи представляет собой коробку передач, которая содержит два соединенных привода, базовый <b>B</b> и ведомый <b>F</b>, для вращения с заданным фиксированным передаточным отношением.</p> <p data-bbox="922 595 1390 947">Можно выбрать, будет ли ось повторителя вращаться в том же или противоположном направлении, что и базовая ось. Если они вращаются в одном направлении, то <math>\omega_F</math> и <math>\omega_B</math> имеют одинаковый знак, а если в противоположных направлениях, то противоположный</p>   |
| <p data-bbox="217 1234 579 1346">Блок передач с переменным передаточным отношением</p>  |  <p data-bbox="676 1534 845 1608">Variable Ratio Gear</p> | <p data-bbox="922 1039 1390 1391">Блок передач с переменным передаточным отношением представляет собой коробку передач, которая приводит в соответствие две соединенные оси трансмиссии, базовую <b>B</b> и ведомую <b>F</b>, с переменным передаточным отношением, которым вы можете управлять.</p> <p data-bbox="922 1397 1390 1749">В блоке задается изменяемое передаточное число в зависимости от времени с помощью входного сигнала Simulink <b>r</b>. Вы задаете первую производную переменного передаточного числа как функцию времени с помощью входного сигнала Simulink <b>v</b>.</p> <p data-bbox="922 1756 1390 1910">Можно выбрать, будет ли ось повторителя вращаться в том же или противоположном направлении, что и базовая ось</p> |

## Постановка задачи

На рис. 3.1 представлена расчётная схема привода грузоподъёмной машины, состоящая из источника вращающего момента  $M_\delta$  – электродвигателя ЭД, двухступенчатого механического редуктора  $P$  и лебёдки  $L$  с барабаном радиусом  $r_\delta$ , поднимающей груз массой  $m_g$ .

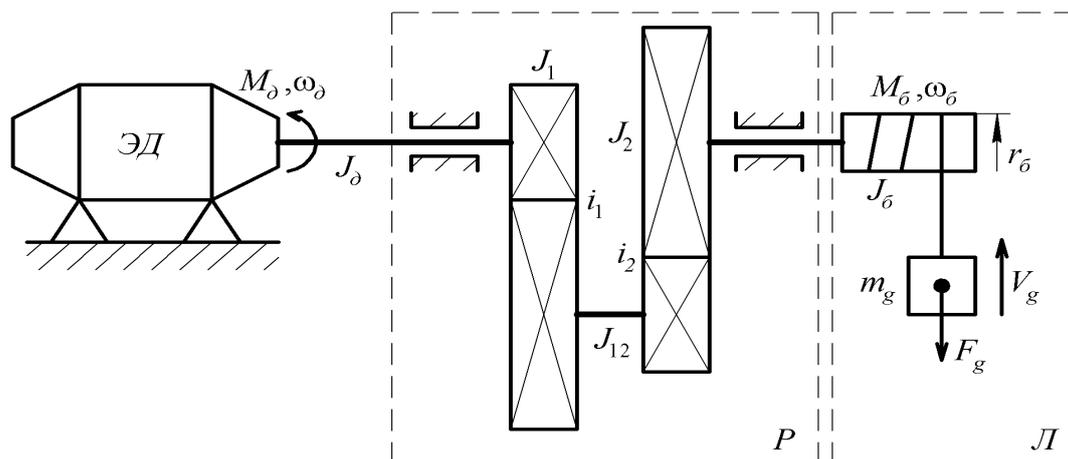


Рис. 3.1. Расчётная схема привода грузоподъёмной машины

Уравнение механической характеристики приводного электродвигателя ЭД можно записать как

$$M_\delta = M_0 - \omega_\delta h, \quad (3.1)$$

где  $M_\delta$  – активный момент вала двигателя, Нм;  $M_0$  – начальный момент двигателя, развиваемый в момент начала движения привода, Нм;  $h$  – жёсткость механической характеристики ЭД, определяющая величину изменения момента при изменении частоты вращения  $dM_\delta/d\omega$ .

Уравнение движения привода грузоподъёмной машины:

$$M_\delta i = M_\delta + M_{дин} = M_\delta + J_{прив} \frac{d\omega_\delta}{dt}; \quad (3.2)$$

$$M_\delta = F_g r_\delta = 9,81 m_g r_\delta; \quad (3.3)$$

$$V_g = \omega_\delta r_\delta, \quad (3.4)$$

где  $M_\delta$  – статический момент силы груза на барабане лебёдки, Нм;  $M_{дин}$  – динамический момент системы, Нм;  $F_g$  – вес груза на лебёдке, Н;  $i$  – общее передаточное отношение редуктора;  $\omega_\delta$  и  $\omega_\delta$  – угловые скорости соответственно двигателя и барабана лебёдки, рад/с;  $V_g$  – скорость поступательного движения груза, м/с;  $J_{прив}$  – приведенный к валу лебёдки момент инерции системы, кг·м<sup>2</sup>.

В общем случае для подъёма груза через механический редуктор необходимое условие передаточного отношения исходит из преобладания вращающего момента (входного для передачи) над статическим моментом сопротивления на выходе редуктора

$$i \geq \frac{M_{\sigma}}{M_{\delta}}, \quad (3.5)$$

где для двух ступеней  $i = i_1 i_2$ . (3.6)

Однако при повторно-кратковременном режиме работы электропривода выбор скорости ЭД и передаточного числа редуктора является сложной задачей. В динамике время разгона (пуска), т.е. время переходного процесса системы, и установившаяся скорость привода будет зависеть от  $i$ . При увеличении  $i$  время разгона будет уменьшаться, как и установившаяся скорость подъёма груза  $V_g$ , а при снижении  $i$  – все наоборот. Экономическая эффективность электропривода в таком режиме определяется не столько капитальными затратами, сколько производительностью рабочей машины, прямо зависящей от быстродействия пусковых и тормозных режимов работы двигателя.

Поэтому для наилучшего быстродействия и установившейся скорости необходимо выбирать оптимальное передаточное отношение редуктора с учётом динамической составляющей системы:

$$i_{opt} = i_1 \cdot i_2 = \frac{M_{\sigma}}{M_0} + \sqrt{\left(\frac{M_{\sigma}}{M_0}\right)^2 + \left(\frac{J_2 + J_{\sigma} + m_g r_{\sigma}^2}{J_{\delta} + J_1}\right)}, \quad (3.7)$$

где  $J_1, J_2, J_{\delta}, J_{\sigma}, m_g \cdot r_{\sigma}^2$  – моменты инерции системы, кг·м<sup>2</sup> (см. рис. 3.1).

После расчёта оптимального значения  $i$  выбираются передаточные отношения каждой ступени  $i_1$  и  $i_2$  согласно ГОСТ 2185–66 «Передачи зубчатые цилиндрические» с учётом выражения (3.6) [4].

Основные параметры из следующих рядов:

1-й ряд: 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5.

2-й ряд: 1,12; 1,4; 1,8; 2,24; 2,8; 3,55; 4,5; 5,6; 7,1; 9,0; 11,2.

1-й ряд следует предпочитать 2-му.

После чего требуется провести моделирование и исследование динамики привода грузоподъёмной машины в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimDriveline.

## Моделирование привода грузоподъёмной машины

Модель привода грузоподъёмной машины в среде Simulink\SimDriveline MATLAB 2010 представлена на рис. 3.2.

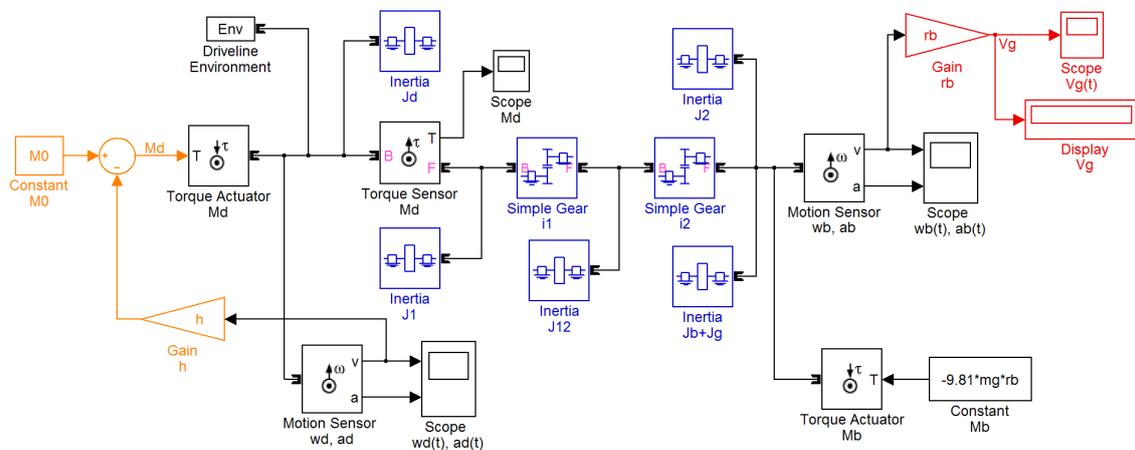


Рис. 3.2. Схема модели привода грузоподъёмной машины в среде Simulink\SimDriveline

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Driveline Environment** (Simscape\SimDriveline\Solver & Inertias) – блок механической среды моделирования, определяющий глобальную информацию об окружающей среде.
- **Simple Gear** (Simscape\SimDriveline\Gears) – простой блок передачи, который содержит две оси, ведущую  $B$  и ведомую  $F$ .
- **Inertia** (Simscape\SimDriveline\Solver & Inertias) – блок, задающий момент инерции относительно оси трансмиссии в  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .
- **Torque Actuator** (Simscape\SimDriveline\Sensors & Actuators) – блок, подающий на ось трансмиссии крутящий момент. Входной сигнал задается в виде сигнала Simulink в Н·м.
- **Torque Sensor** (... \Sensors & Actuators) – датчик крутящего момента, измеряющий крутящий момент вдоль оси трансмиссии.
- **Motion Sensor** (... \Sensors & Actuators) – датчик движения. Выводит информацию о движении оси в виде трёх сигналов (на выбор): угол поворота оси  $p$ , угловая скорость  $v$  и угловое ускорение  $a$ .
- **Gain** (Simulink\Math Operations) – усилительный блок.
- **Constant** (Simulink\Sources) – блок ввода константы.
- **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.
- **Display** (Simulink\Sinks) – виртуальный цифровой индикатор.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели привода производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с переменным шагом вычислений (рис. 3.3).

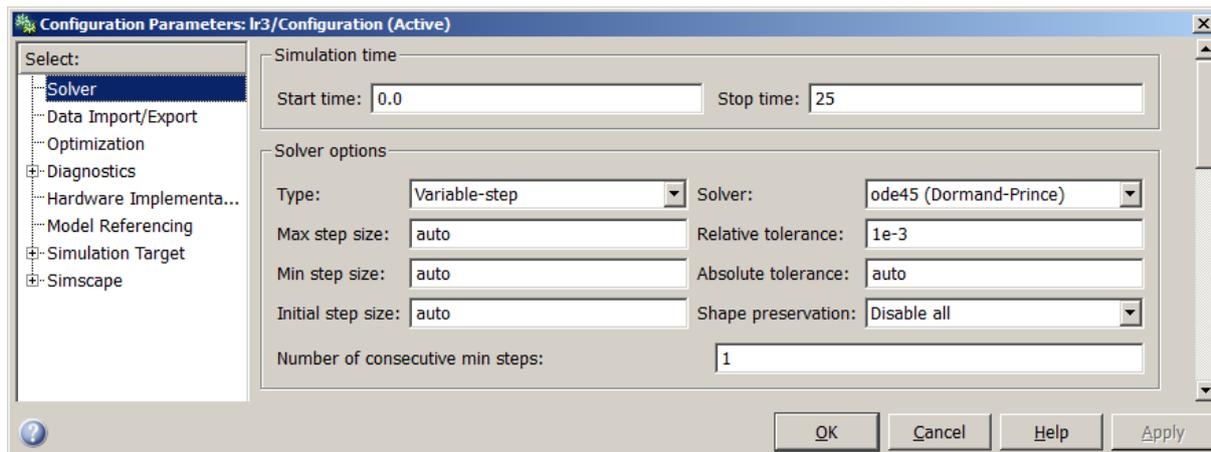


Рис. 3.3. Окно настройки решателя модели

Блок параметров механической среды моделирования **Driveline Environment** (рис. 3.4).

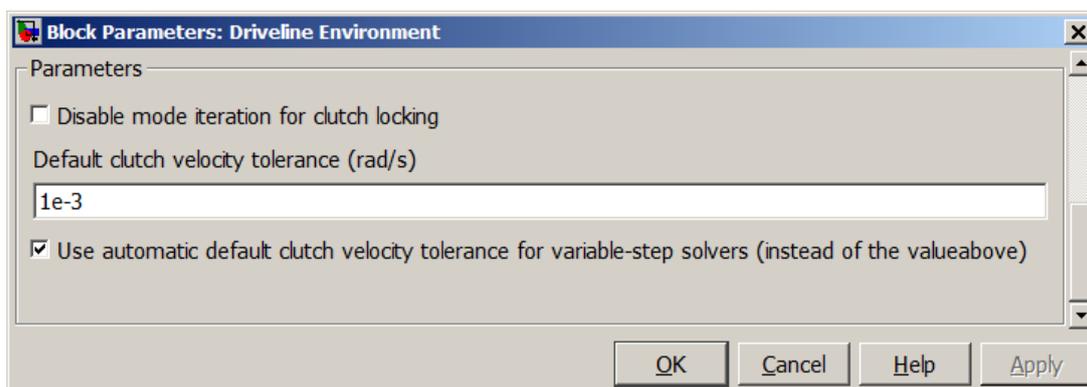


Рис. 3.4. Окно настройки решателя модели

Блоки простых передаточных механизмов **Simple Gear**. В окнах блоков задаются выбранные по ГОСТ значения передаточных отношений ступеней редуктора  $i_1$  и  $i_2$  (рис. 3.5).

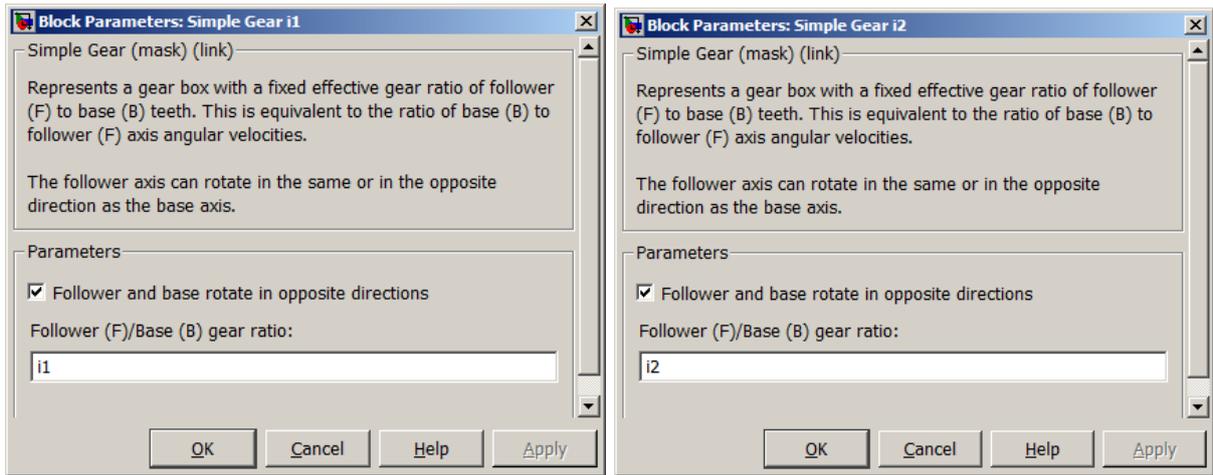


Рис. 3.5. Окна настройки блоков Simple Gear

Блоки инерций **Inertia**. Задаются величины моментов инерции звеньев системы (рис. 3.6).

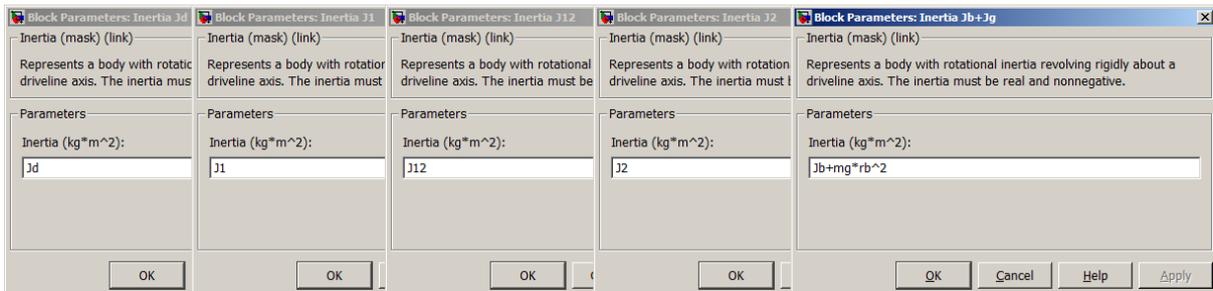


Рис. 3.6. Окна настройки блоков Inertia

Настройка датчиков движения **Motion Sensor** (рис. 3.7).

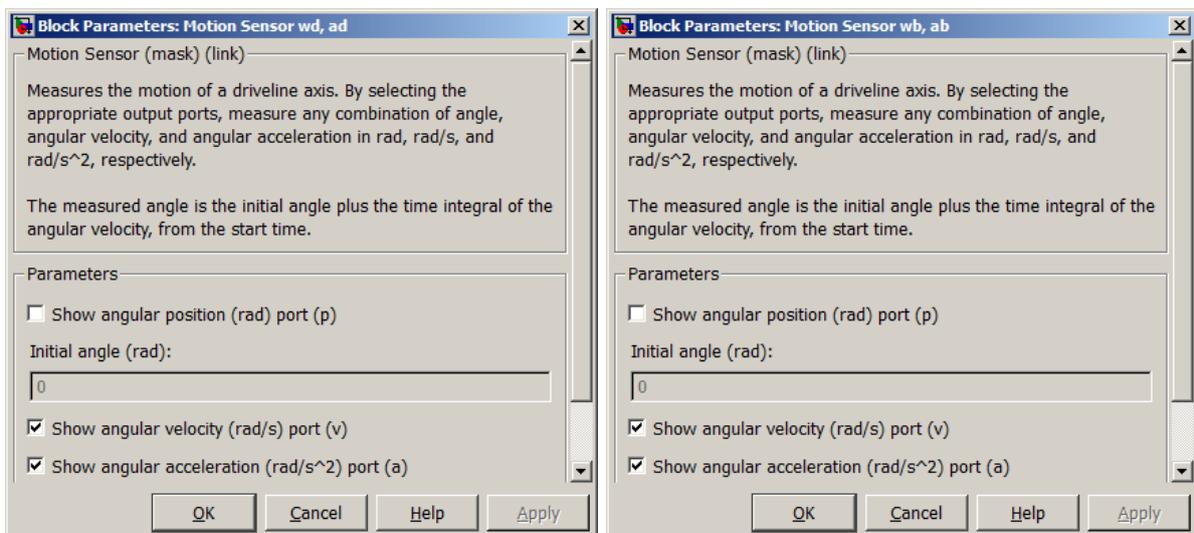


Рис. 3.7. Окна настройки блоков Motion Sensor

В блоках **Constant** и **Gain** задаются постоянные коэффициенты модели:  $M_0$ ,  $h$ ,  $mg$ ,  $rb$  (см. рис. 3.2).

Блоки **Torque Actuator** и **Torque Sensor** не имеют настроек.

Для отображения в блоке **Scope** одновременно двух независимых осей в настройках осциллографа (Parameters) нужно выбрать количество осей (Number of axes) – 2 (рис. 3.8).

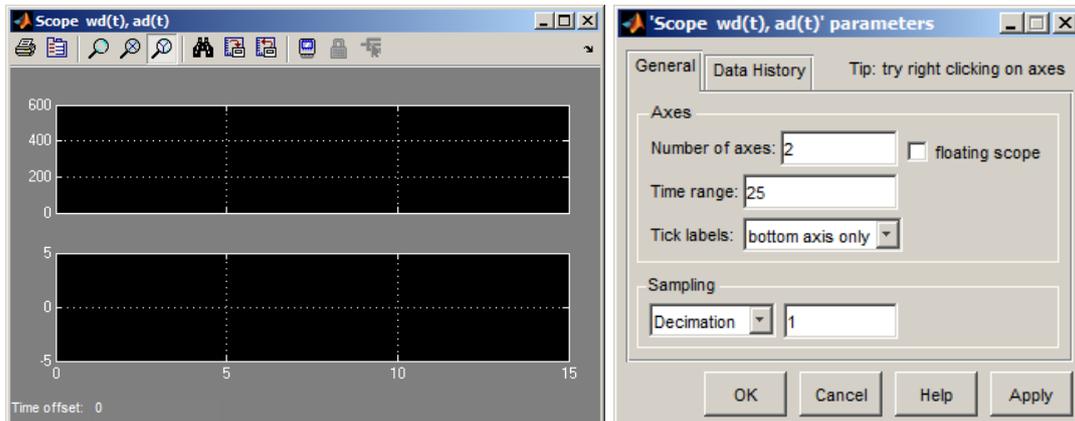


Рис. 3.8. Окно настройки блока Scope

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск, установив время моделирования, достаточное для затухания переходных процессов системы. Результатами моделирования являются графики переходных процессов для момента, скоростей и ускорений входного и выходного валов редуктора и поступательной скорости поднимаемого груза (рис. 3.9 и 3.10).

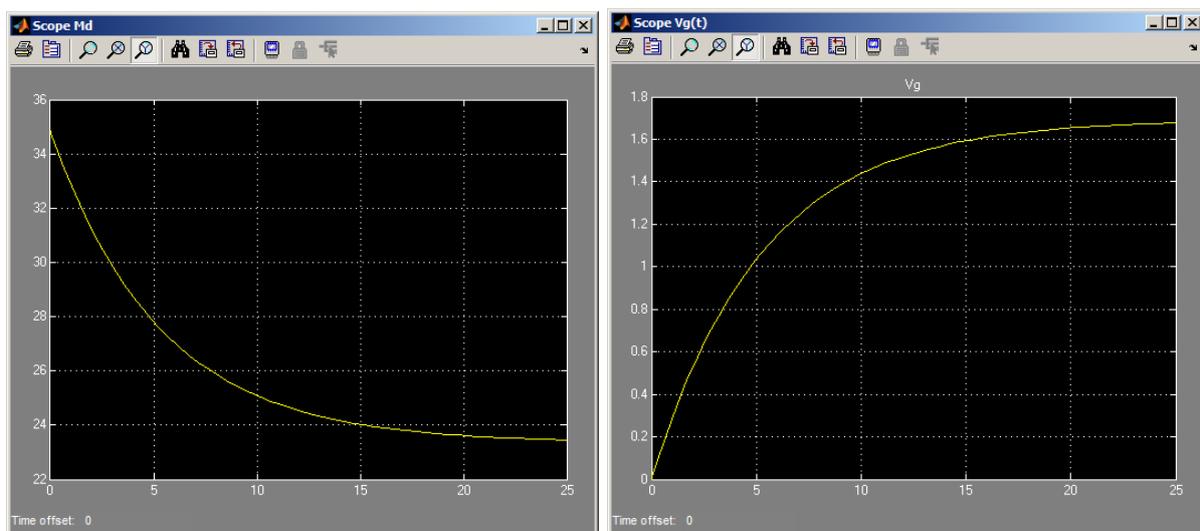


Рис. 3.9. График изменения во времени момента двигателя  $M_d$  и скорости подъёма груза  $V_g$

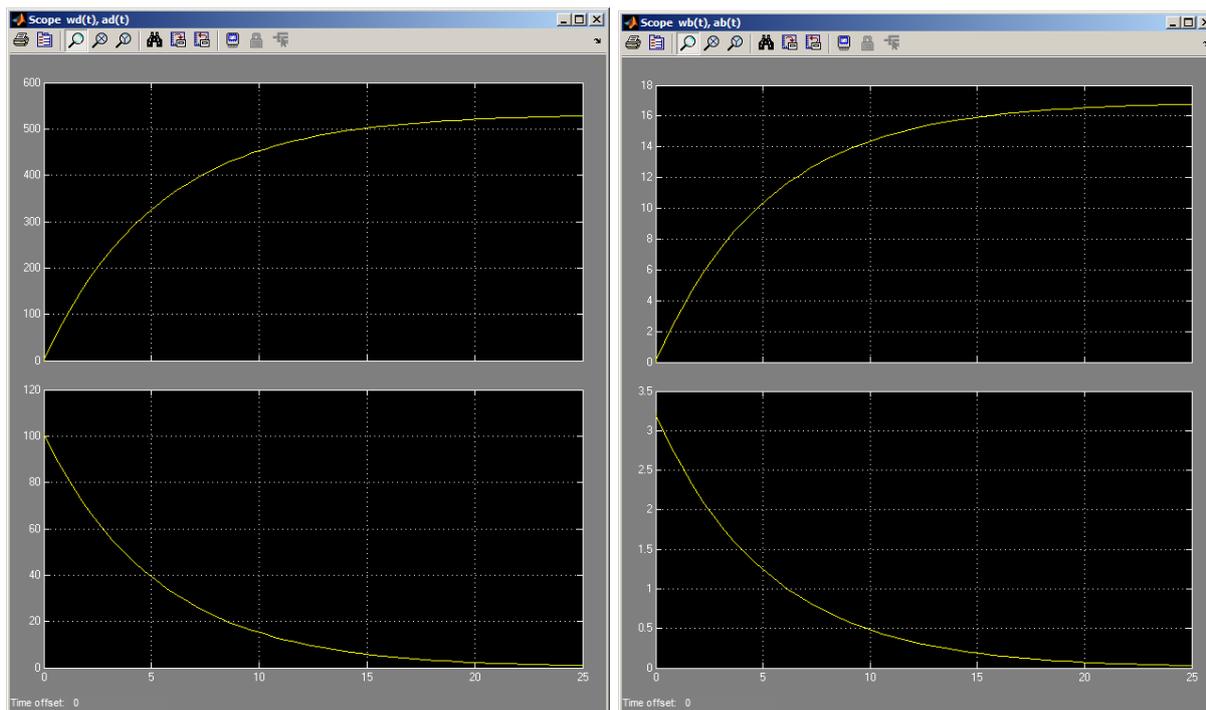


Рис. 3.10. Графики изменения во времени угловой скорости и ускорения входного ( $w_d(t)$ ,  $a_d(t)$ ) и выходного ( $w_b(t)$ ,  $a_b(t)$ ) вала редуктора

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 3.2) собрать в среде Simulink\SimDriveline модель привода грузоподъёмной машины.
2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 3.2) вычислить оптимальное передаточное отношение редуктора  $i_{opt}$ , выбрать согласно ГОСТ 2185–66 отношения каждой ступени  $i_1$  и  $i_2$ .
3. Согласно своему варианту исходных данных (см. табл. 3.2) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.
4. Определить длительность затухания переходных процессов в системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в системе.
5. Получить графики изменения во времени момента двигателя  $M_d$  и скорости подъёма груза  $V_g$ ; установившееся значение поступательной скорости поднимаемого груза  $V_g$ ; графики изменения во времени угловой скорости и ускорения входного и выходного вала редуктора.
6. Сделать вывод о характере движения элементов привода.
7. Оформить отчёт по работе.

## Исходные данные для выполнения работы

Схема моделируемого привода грузоподъемной машины приведена на рис. 3.1, а схема модели в среде Simulink\SimDriveline представлена на рис. 3.2. Параметры привода грузоподъемной машины приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

### Параметры привода грузоподъемной машины

| № вар. | $M_0$ , Нм | $h$ , Нс/рад | $m_g$ , кг | $r_0$ , м | $J_0$ , кг·м <sup>2</sup> | $J_1$ , кг·м <sup>2</sup> | $J_{12}$ , кг·м <sup>2</sup> | $J_2$ , кг·м <sup>2</sup> | $J_6$ , кг·м <sup>2</sup> |
|--------|------------|--------------|------------|-----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1      | 50         | 0,05         | 750        | 0,1       | 0,1                       | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,2                       |
| 2      | 50         | 0,045        | 750        | 0,2       | 0,1                       | 0,1                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,4                       |
| 3      | 75         | 0,04         | 1000       | 0,15      | 0,15                      | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,25                      |
| 4      | 75         | 0,035        | 900        | 0,2       | 0,15                      | 0,1                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,35                      |
| 5      | 100        | 0,03         | 1000       | 0,1       | 0,2                       | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,2                       |
| 6      | 100        | 0,05         | 750        | 0,2       | 0,2                       | 0,05                      | 0,1                          | 0,05                      | 0,3                       |
| 7      | 125        | 0,045        | 1250       | 0,15      | 0,225                     | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,2                       |
| 8      | 125        | 0,04         | 1500       | 0,1       | 0,225                     | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,25                      |
| 9      | 150        | 0,035        | 1500       | 0,2       | 0,25                      | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,4                       |
| 10     | 150        | 0,03         | 1750       | 0,2       | 0,25                      | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,35                      |
| 11     | 60         | 0,05         | 800        | 0,2       | 0,12                      | 0,2                       | 0,25                         | 0,2                       | 0,25                      |
| 12     | 80         | 0,045        | 1000       | 0,2       | 0,15                      | 0,1                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,2                       |
| 13     | 95         | 0,04         | 950        | 0,15      | 0,2                       | 0,2                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,3                       |
| 14     | 75         | 0,035        | 900        | 0,15      | 0,15                      | 0,1                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,35                      |
| 15     | 110        | 0,03         | 1000       | 0,1       | 0,2                       | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,2                       |
| 16     | 120        | 0,05         | 1200       | 0,2       | 0,225                     | 0,05                      | 0,1                          | 0,05                      | 0,3                       |
| 17     | 130        | 0,045        | 1100       | 0,15      | 0,225                     | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,25                      |
| 18     | 125        | 0,04         | 1400       | 0,1       | 0,225                     | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,2                       |
| 19     | 140        | 0,035        | 1600       | 0,2       | 0,25                      | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,2                       |
| 20     | 140        | 0,03         | 1450       | 0,2       | 0,25                      | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,35                      |
| 21     | 120        | 0,05         | 1500       | 0,1       | 0,225                     | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,25                      |
| 22     | 140        | 0,045        | 1500       | 0,15      | 0,25                      | 0,1                       | 0,15                         | 0,1                       | 0,4                       |
| 23     | 150        | 0,04         | 1750       | 0,2       | 0,25                      | 0,15                      | 0,2                          | 0,15                      | 0,3                       |
| 24     | 70         | 0,035        | 800        | 0,1       | 0,15                      | 0,2                       | 0,25                         | 0,2                       | 0,2                       |
| 25     | 90         | 0,03         | 1000       | 0,15      | 0,2                       | 0,1                       | 0,1                          | 0,1                       | 0,2                       |

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace.

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Расчетная схема привода грузоподъемной машины.
3. Схема модели привода грузоподъемной машины в среде Simulink\SimDriveline.
4. Формула и значение оптимального передаточного отношения редуктора  $i_{opt}$  и выбранные отношения каждой ступени  $i_1$  и  $i_2$ .
5. Окна задания параметров модели.
6. Графики переходных процессов момента двигателя  $M_d$  и скорости подъема груза  $V_g$ ; установившееся значение поступательной скорости поднимаемого груза  $V_g$ ; графики изменения во времени угловой скорости и ускорения входного и выходного вала редуктора.
7. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Для чего нужен редуктор (механическая передача)?
2. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimDriveline?
3. Какие типы механических передач моделируют блоки раздела Gears библиотеки SimDriveline?
4. Поясните расчётную схему и уравнение движения привода грузоподъемной машины.
5. Что такое жёсткость механической характеристики электродвигателя?
6. Как вычислить поступательную скорость подъема груза  $V_g$ , зная скорость вращения двигателя  $\omega_d$ ?
7. На какие характеристики привода грузоподъемной машины влияет передаточное отношение редуктора?
8. Каким образом выбирались передаточные отношения каждой ступени  $i_1$  и  $i_2$  редуктора?
9. Опишите назначение блоков, образующих схему модели привода грузоподъемной машины в среде Simulink\SimDriveline.
10. Каковы параметры блоков Simple Gear?
11. Как определить время затухания переходных процессов системы?
12. Что задает блок модели Constant Mb?

## Лабораторная работа № 4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЁМНОЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ

**Цель работы** – моделирование гидростатической (объёмной) передачи привода грузоподъёмной машины.

#### Общие сведения о SimHydraulics

**SimHydraulics** – это специализированная библиотека пакета визуально-блочного моделирования Simulink\Simscape, предназначенная для моделирования гидравлических устройств и систем. Блоки библиотеки SimHydraulics интегрируются в модели Simulink и полноценно функционируют с моделями устройств из других разделов, например, SimMechanics или SimDriveline, входящих вместе с SimHydraulics в общую группу Simscape, позволяя инженерам моделировать и анализировать взаимосвязанную работу механического и гидравлического оборудования [5].

С помощью продукта SimHydraulics инженеры могут рассчитать давление и напор жидкости в системах, построенных на базе стандартных и нестандартных компонентов. Предлагаемые инструменты позволят смоделировать преобразование гидравлической энергии в крутящий момент, приводящий в действие различные механизмы, а также оценить эффект, вызванный открытием и закрытием клапанов. Для получения максимально точных результатов в состав SimHydraulics добавлена библиотека распространенных рабочих жидкостей. Таким образом, SimHydraulics позволяет решать задачи статики, кинематики и динамики различных гидравлических систем [5].

К достоинствам реализации моделирования гидравлических систем при помощи SimHydraulics в Simulink могут быть отнесены простота создания моделей, наглядность и высокая скорость вычислений при моделировании систем с большим числом элементов [5].

В отличие от большинства других блоков Simulink, которые выполняют математические действия или обрабатывают сигналы, блоки SimHydraulics представляют собой непосредственно элементы гидросистем или связи между ними. Многообразие стандартных блоков библиотеки SimHydraulics и их настроечных параметров настолько велико, что позволяет создавать модели практически любых простых и сложных гидравлических систем [5].

## Общие сведения о моделировании гидравлических систем в SimHydraulics

В современном машиностроении используются гидросистемы двух типов [Ру]:

- гидросистемы для подачи жидкости;
- гидравлические приводы.

*Гидравлическим приводом* называется совокупность устройств, предназначенная для передачи механической энергии и (или) преобразования движения посредством рабочей жидкости. Такие гидросистемы обычно относятся к классу замкнутых гидросистем [5].

В литературе также встречается термин «*гидропередача*», под которым понимается силовая часть гидропривода, включающая насос, гидродвигатель и соединительные трубопроводы с рабочей жидкостью [5].

Как правило, даже самый простейший гидравлический привод включает в себя [5]:

- гидробак для хранения и охлаждения рабочей жидкости;
- насос для подачи рабочей жидкости из бака и создания давления в системе;
- различные клапаны (предохранительные, переливные, редукционные, обратные, гидрозамки и другие);
- исполнительный механизм (гидродвигатель, поворотный гидродвигатель или гидромотор);
- фильтр для очистки рабочей жидкости от твердых частиц;
- гидролинии, соединяющие элементы гидросистемы между собой и т.д.

На рис. 4.1 приведены три принципиальные схемы, соответствующие трём классам гидроприводов, которые различаются характером движения выходного звена [5].

Насос всасывает жидкость из бака и нагнетает ее в гидродвигатель через гидрораспределитель. Из гидрораспределителя жидкость сливается в гидробак через другой канал гидрораспределителя. Предохранительный клапан отрегулирован на определенное допустимое давление в гидросистеме и предохраняет гидропривод с приводящим двигателем от перегрузок [5].

Изменение направления движения выходного звена гидродвигателя (реверсирование) осуществляется изменением позиции гидрораспределителя, а регулирование скорости этого движения – изменением рабочего объема насоса [5].

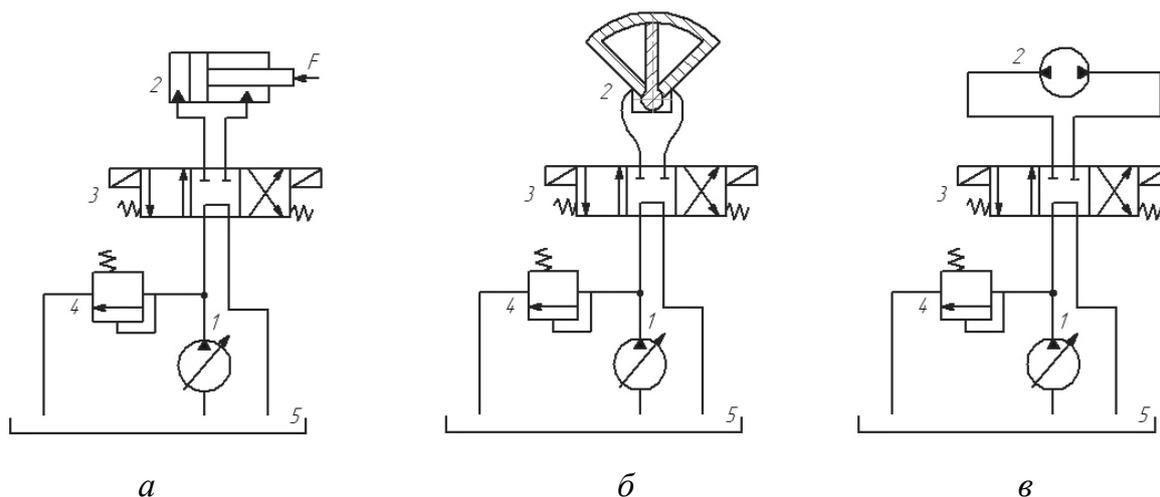


Рис. 4.1. Принципиальные схемы гидроприводов:

*а* – возвратно-поступательного действия;

*б* – поворотного действия; *в* – вращательного действия;

*1* – регулируемый насос; *2* – гидродвигатель (на схеме *а* – гидроцилиндр, на схеме *б* – поворотный гидродвигатель и на схеме *в* – гидромотор);

*3* – гидрораспределитель; *4* – предохранительный клапан; *5* – гидробак

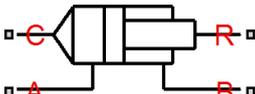
Функции гидроприводов непрерывно расширяются, повышаются требования к их рабочим характеристикам, а следовательно, усложняются их конструкции, что вызывает увеличение сроков проектирования, экспериментальных исследований и доводочных испытаний. В связи с этим эффективным методом исследования рабочих процессов, статики и динамики гидросистем является использование систем автоматизированного моделирования и, в частности, программной среды Simulink\SimHydraulics [5].

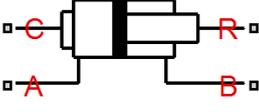
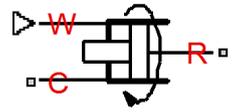
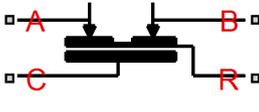
Для функционирования моделей из библиотеки SimHydraulics имеется специальный подраздел библиотеки **Simscape\Foundation Library\Hydraulic**, содержащий модели базовых элементов гидросистем, таких как источники и приёмники рабочей жидкости, датчики параметров рабочей жидкости, гидравлические сопротивления и т.д.

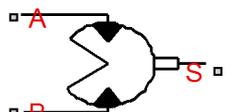
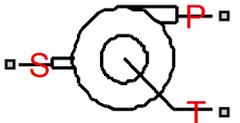
Гидравлические машины моделируются в Simulink с помощью блоков разделов **Hydraulic Cylinders** и **Pumps and Motors** библиотеки SimHydraulics [5].

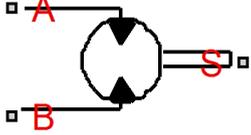
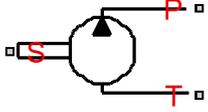
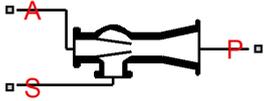
Разделы **Hydraulic Cylinders** и **Pumps and Motors** содержат по 8 блоков, имитирующих типовые гидравлические машины поступательного, поворотного и вращательного действия (табл. 4.1). Пиктограммы и названия на блоках данных разделов дают информацию о типе машины [5].

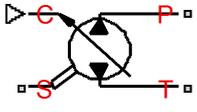
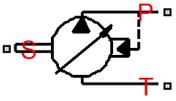
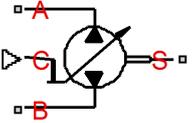
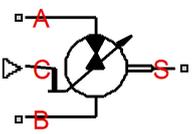
### Модели гидравлических машин в SimHydraulics

| Название  | Блок SimHydraulics   | Описание  |
|---|--|---|
| 1   | 2  | 3   |
| Гидравлический цилиндр одностороннего действия              |  <p>Single-Acting Hydraulic Cylinder</p>            | <p>Блок представляет собой гидравлический цилиндр одностороннего действия, т.е. передающий силу и движение только в одном направлении. В обратном направлении шток движется за счет пружины, веса и т.д.</p> <p>Блок имеет два механических порта <math>R</math> и <math>C</math>, связанных со штоком и гильзой гидроцилиндра соответственно, а также гидравлический порт <math>A</math>, связанный со входным отверстием гидроцилиндра. Порт вывода физического сигнала <math>P</math> показывает текущее удлинение стержня</p> |
| Гидравлический цилиндр одностороннего действия (упрощенный) |  <p>Single-Acting Hydraulic Cylinder (Simple)</p> | <p>Блок гидроцилиндра одностороннего действия (Simple) представляет собой упрощенную версию гидроцилиндра, разработанную для применений, где необходимо воспроизвести только базовую функциональность цилиндра в обмен на повышение числовой эффективности. По этим причинам предполагается, что такие факторы, как сжимаемость жидкости, трение и утечки незначительны. Предполагается, что жесткие упоры полностью неэластичны, чтобы исключить любые возможные колебания в конце хода</p>                                      |
| Гидравлический цилиндр двухстороннего действия              |  <p>Double-Acting Hydraulic Cylinder</p>          | <p>Блок представляет собой гидравлический цилиндр двухстороннего действия, передающий силу и движение в обоих направлениях.</p> <p>Блок имеет два механических порта <math>R</math> и <math>C</math>, связанных со штоком и гильзой гидроцилиндра соответственно, а также два гидравлических порта <math>A</math> и <math>B</math>, связанных с поршневой и штоковой полостями соответственно. Давление в отверстиях <math>A</math> создает усилие в направлении, указанном параметром ориентации цилиндра</p>                    |

| 1  | 2  | 3   |
|--|--|---|
| <p>Гидравлический цилиндр двухстороннего действия (упрощенный)</p> |  <p>Double-Acting Hydraulic Cylinder (Simple)</p> | <p>Блок гидроцилиндров двойного действия (Simple) представляет собой упрощенную версию гидроцилиндра двойного действия. В модели применены те же допущения, что и для цилиндра одностороннего действия (Simple)</p>   |
| <p>Блок центробежной силы во вращающемся блоке цилиндра</p>        |  <p>Centrifugal Force in Rotating Cylinder</p>    | <p>Блок моделирует центробежную силу во вращающемся блоке цилиндра. Блок используется в моделях гидравлических цилиндров для учета центробежных сил, оказываемых жидкостью на поршень, если цилиндр вращается вокруг своей оси симметрии. Такие цилиндры используются в механизмах управления различными фрикционными муфтами, тормозами и так далее.</p> <p>Блок имеет два механических порта <i>R</i> и <i>C</i>, связанных со штоком и гильзой гидроцилиндра соответственно. Порт <i>W</i> – это физический сигнальный порт, через который импортируется угловая скорость вала. Направленность блока регулируется и может регулироваться с помощью параметра ориентации цилиндра</p>                 |
| <p>Блок трения в гидравлическом цилиндре</p>                       |  <p>Cylinder Friction</p>                       | <p>Блок трения в гидравлическом цилиндре имитирует трение при контакте между движущимися телами в гидроцилиндрах и предназначен для использования в сочетании с цилиндрами двухстороннего и одностороннего действия для разработки модели цилиндра с трением. Сила трения моделируется как функция относительной скорости и давления и предполагается, что она представляет собой сумму составляющих Штрибека, кулоновского (сухого) и ньютоновского (вязкого).</p> <p>Блок имеет два механических порта <i>R</i> и <i>C</i>, связанных со штоком и гильзой гидроцилиндра соответственно, а также два гидравлических порта <i>A</i> и <i>B</i>, связанных с поршневой и штоковой полостями цилиндра</p> |

| 1  | 2  | 3   |
|--|--|---|
| <p>Поворотный привод одностороннего действия</p> |  <p>Single-Acting Rotary Actuator</p>   | <p>Блок поворотного привода одностороннего действия моделирует преобразование гидравлической энергии в механическую энергию вращения без использования промежуточных передач, таких как реечная передача, скользящий шлиц, цепь и так далее. Приводы одностороннего действия генерируют крутящий момент и движение только в одном направлении. Порт <i>A</i> представляет собой гидравлический соединительный патрубок, соответствующий камере привода. Порт <i>S</i> представляет собой механический вывод для передачи вращения вала привода</p>  |
| <p>Поворотный привод двухстороннего действия</p> |  <p>Double-Acting Rotary Actuator</p> | <p>Блок поворотного привода двухстороннего действия моделирует преобразование гидравлической энергии в механическую энергию вращения без использования промежуточных передач, таких как реечная передача, скользящий шлиц, цепь и так далее. Гидравлическая жидкость, закачиваемая под давлением в одну из двух камер привода, заставляет вал вращаться и генерировать крутящий момент. Приводы двойного действия генерируют крутящий момент и движение в обоих направлениях. Порты <i>A</i> и <i>B</i> являются гидравлическими соединительными патрубками. Порт <i>S</i> представляет собой механический вывод для передачи вращения вала привода</p> |
| <p>Центробежный насос</p>                        |  <p>Centrifugal Pump</p>              | <p>Блок центробежного насоса представляет собой центробежный насос любого типа в качестве модели, основанной на технических характеристиках. Блок имеет два гидравлических порта <i>T</i> и <i>P</i>, связанных с всасывающим и нагнетающим трубопроводом насоса соответственно, а также механический порт <i>S</i>, который определяет направление вращения приводного вала насоса</p>   |

| 1                           | 2  | 3  |
|-----------------------------|--|--|
| <p>Гидравлический мотор</p> |  <p>Hydraulic Motor</p>           | <p>Блок Hydraulic Motor представляет собой гидравлический двигатель с вращательным движением выходного звена. Основными параметрами для этого блока являются рабочий объем мотора, объемный и полный коэффициенты полезного действия, номинальное давление и угловая скорость вала мотора. Все эти параметры, как правило, указаны в технических паспортах или каталогах.</p> <p>Блок имеет два гидравлических порта <i>A</i> и <i>B</i>, связанных с напорной и сливной трубопроводами гидромотора соответственно, а также механический порт <i>S</i>, который определяет направление вращения вала гидромотора</p> |
| <p>Нерегулируемый насос</p> |  <p>Fixed-Displacement Pump</p> | <p>Блок моделирует насосный блок с фиксированным рабочим объемом любого типа. Ключевыми параметрами являются рабочий объем насоса, объемный и суммарный КПД, номинальное давление и угловая скорость.</p> <p>Блок имеет два гидравлических порта <i>T</i> и <i>P</i>, связанных с всасывающим и нагнетающим трубопроводами насоса соответственно, а также механический порт <i>S</i>, который определяет направление вращения приводного вала насоса (положительное или отрицательное)</p>   |
| <p>Струйный насос</p>       |  <p>Jet Pump</p>                | <p>Блок струйного насоса представляет собой струйный жидкостно-жидкостный насос, состоящий из сопла, горловины и диффузора. Принцип действия аналогичен принципу работы эжектора.</p> <p>Блок имеет следующие порты: <i>A</i> – гидравлический патрубок, связанный со входом в сопло (вход для первичного потока), <i>S</i> – гидравлический патрубок, связанный с всасыванием насоса (вход вторичного потока), <i>P</i> – гидравлический патрубок, соединенный с выпускным отверстием насоса (диффузором)</p>   |

| 1   | 2  | 3  |
|---|--|--|
| Регулируемый насос                          |  <p data-bbox="470 526 726 582">Variable-Displacement Pump</p>                      | <p>Блок представляет собой регулируемый роторный насос. Рабочий объем пропорционален сигналу управления, подаваемому через порт С. Основными параметрами для этого блока являются объемный и полный коэффициенты полезного действия, номинальное давление и угловая скорость приводного вала насоса. Все эти параметры, как правило, указаны в технических паспортах или каталогах</p>   |
| Регулируемый насос с компенсатором давления |  <p data-bbox="470 884 726 974">Variable-Displacement Pressure-Compensated Pump</p> | <p>Блок представляет собой регулируемый роторный насос с компенсатором давления. Основными параметрами для этого блока являются максимальный рабочий объем насоса, диапазон регулирования давления, объемный и полный коэффициенты полезного действия, номинальное давление и угловая скорость приводного вала насоса</p>  |
| Регулируемый гидравлический мотор           |  <p data-bbox="470 1265 726 1332">Variable-Displacement Motor</p>                 | <p>Блок представляет собой регулируемый роторный гидромотор. Рабочий объем пропорционален сигналу управления, подаваемому через физический блок С. Основными параметрами для этого блока являются объемный и полный коэффициенты полезного действия, номинальное давление и угловая скорость выходного вала гидромотора</p>  |
| Гидромашина с переменным рабочим объемом    |  <p data-bbox="470 1724 726 1792">Variable-Displacement Hydraulic Machine</p>     | <p>Блок гидромашин с переменным рабочим объемом представляет собой гидравлическую машину с переменным рабочим объемом любого типа в виде модели, основанной на техническом паспорте. Модель имитирует работу машины как в режиме мотора, так и в режиме насоса. Блок имеет два гидравлических порта А и В, связанных с напорной и сливной трубопроводами машины соответственно, а также механический порт S. Перемещение машины контролируется сигналом, подаваемым через физический сигнальный порт С</p> |

## Постановка задачи

В строительных, дорожных и грузоподъёмных машинах для передачи вращательных кинематических воздействий от силового агрегата (двигателя внутреннего сгорания или электрического двигателя) к рабочим механизмам (грузоподъёмным лебёдкам и барабанам) зачастую используются объёмные гидроприводы вращательного действия – гидростатические передачи или, по-другому, объёмные гидропередачи (ОГП) [6].

Например, автокран КС-55713-1 «Галичанин» на базе автомобильного шасси КАМАЗ-65115 грузоподъёмностью 25 тонн. Грузовые и стреловые механизмы данного автокрана имеют собственные гидроприводы с независимым ручным и полуавтоматическим управлением. Гидросистема крана КС-55713-1 обеспечивает непрерывное перемещение рабочих машин и механизмов в большом диапазоне скоростей звеньев, а также возможность одновременного выполнения различных операций (поворот платформы и подъём крюка) [7].

Упрощенно, без запорно-регулирующей (распределители и делители потока), вспомогательной (подпиточные насосы и гидроаккумуляторы) и защитной (предохранительные клапаны и фильтры) аппаратуры, структуру ОГП можно представить блок-схемой (рис. 4.2). В устройства, образующие ОГП на рис. 4.2, входят механическая передача  $МП$ , гидронасос  $ГН$  и гидромотор  $ГМ$ . Применение  $МП$  на «валу отбора мощности» приводного двигателя обуславливается определённым диапазоном рабочих частот вращения вала гидронасоса, в котором гидронасос имеет высокий КПД [6].

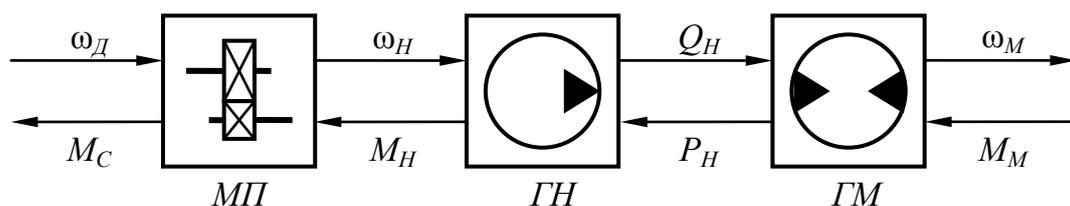


Рис. 4.2. Блок-схема объёмной гидропередачи

Момент сопротивления на входном валу ОГП  $M_C$  определяется с учётом передаточного отношения механической передачи  $i_{МП}$  и механического КПД передачи  $\eta_{МП}$  [6]:

$$M_C = \frac{M_H}{i_{МП} \eta_{МП}}. \quad (4.1)$$

Математическая модель гидронасоса может быть описана уравнениями [6]:

$$M_H = \frac{P_H q_H}{2\pi \eta_{MH}}; \quad (4.2)$$

$$Q_H = \frac{q_H \omega_H \eta_{OH}}{2\pi} = q_H n_H \eta_{OH}; \quad (4.3)$$

$$\omega_H = \frac{\omega_D}{i_{МП}}, \quad (4.4)$$

где  $Q_H$  – подача насоса;  $q_H$  – номинальный рабочий объём насоса;  $\omega_H$  и  $n_H$  – угловая скорость и частота вращения вала насоса;  $\omega_D$  – угловая скорость приводного двигателя (входного вала ОГП);  $M_H$  – момент силы сопротивления на валу гидронасоса;  $P_H$  – давления в напорной линии насоса/мотора;  $\eta_{OH}$ ,  $\eta_{MH}$  – объёмный и механический КПД насоса.

Математическая модель гидромотора может быть описана уравнениями [6]:

$$P_H = \frac{2\pi \left( M_M + J_M \frac{d\omega_M}{dt} \right)}{q_M \eta_{MM}}; \quad (4.5)$$

$$\omega_M = 2\pi n_M = \frac{2\pi Q_H \eta_{OM}}{q_M}, \quad (4.6)$$

где  $q_M$  – номинальный рабочий объём гидромотора;  $\omega_M$  и  $n_M$  – угловая скорость и частота вращения вала гидромотора;  $J_M$  – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу гидромотора;  $M_M$  – статический момент сопротивления на валу гидромотора;  $\eta_{OM}$ ,  $\eta_{MM}$  – объёмный и механический КПД гидромотора соответственно.

*Передачное число гидропередачи*  $U_{ГП}$  определяется отношением угловой скорости вращения вала насоса  $\omega_H$  к угловой скорости вращения вала мотора  $\omega_M$  [6]:

$$U_{ГП} = \frac{\omega_H}{\omega_M}. \quad (4.7)$$

Объёмный КПД гидропередачи [6]:

$$\eta_O = \eta_{OH} \eta_{OM}. \quad (4.8)$$

Параметр  $U_{ГП}$  можно выразить через рабочие объёмы гидромашин:

$$U_{ГП} = \frac{q_M}{q_H} \frac{1}{\eta_O}. \quad (4.9)$$

Коэффициент трансформации гидропередачи  $K_{ГП}$  определяется отношением моментов на валах гидромотора и гидронасоса [6]:

$$K_{ГП} = \frac{M_M}{M_H}. \quad (4.10)$$

Механический КПД гидропередачи [6]:

$$\eta_M = \eta_{MH}\eta_{MM}. \quad (4.11)$$

Параметр  $K_{ГП}$  можно выразить через рабочие объёмы гидромашин:

$$K_{ГП} = \frac{q_M}{q_H} \eta_M. \quad (4.12)$$

Общий КПД гидропередачи [6]:

$$\eta_{ГП} = \eta_O \cdot \eta_M. \quad (4.13)$$

Общий КПД гидропередачи можно выразить через главные коэффициенты гидропередачи  $U_{ГП}$  и  $K_{ГП}$ :

$$\eta_{ГП} = \frac{K_{ГП}}{U_{ГП}}. \quad (4.14)$$

Знание вышеприведенных параметров и зависимостей необходимо инженеру для полного понимания процессов происходящих в ОГП при анализе существующих технических вариантов или при синтезе вновь создаваемых ОГП.

Отметим, что при проектировании новой ОГП некоторые ключевые параметры ОГП нельзя выбирать произвольно, так как они регламентированы нормативными документами – стандартами ГОСТ. Например, номинальное давление в гидросистеме  $P_{НОМ}$  выбирается согласно стандарту ГОСТ 12445–80, а номинальные рабочие объёмы гидронасоса и гидромотора – согласно ГОСТ 13824–80 [8, 9].

При выборе номинального рабочего объёма гидромотора необходимо учитывать следующее условие по номинальному давлению в гидросистеме [6]:

$$q_M \geq 2 \frac{2\pi M_M}{P_{НОМ} \eta_{MM}}, \quad (4.15)$$

иначе при больших значениях момента сопротивления на валу гидромотора  $M_M$  давление в напорных магистралях ОГП превысит номинальное и может случиться разрыв гидролиний или повреждение запорно-регулирующей аппаратуры.



с помощью которых в модель Simscape подаются значения моментов и угловых скоростей от цифровых источников сигналов Simulink.

- **Ideal Torque Sensor** и **Ideal Motion Sensor** (Simscape\Foundation Library\Mechanical\Mechanical Sensors) – датчики момента и вращения в среде Simscape.

- **Fixed-Displacement Pump** (Simscape\SimHydraulics\Pumps and Motors) – блок, моделирующий нерегулируемый насос.

- **Hydraulic Motor** (Simscape\SimHydraulics\Pumps and Motors) – блок, моделирующий нерегулируемый гидромотор.

- **Mechanical Rotational Reference (MRR)** (Simscape\Foundation Library\Mechanical\Rotational Elements) – механический вращательный опорный блок.

- **Hydraulic Reference (HR)** (Simscape\Foundation Library\Hydraulic\Hydraulic Elements) – гидравлический контрольный блок представляет собой соединение с атмосферным давлением.

- **Constant** (Simulink\Sources) – блок ввода константы.

- **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.

- **Display** (Simulink\Sinks) – виртуальный цифровой индикатор.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели ОГП производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с переменным шагом вычислений (рис. 4.4).

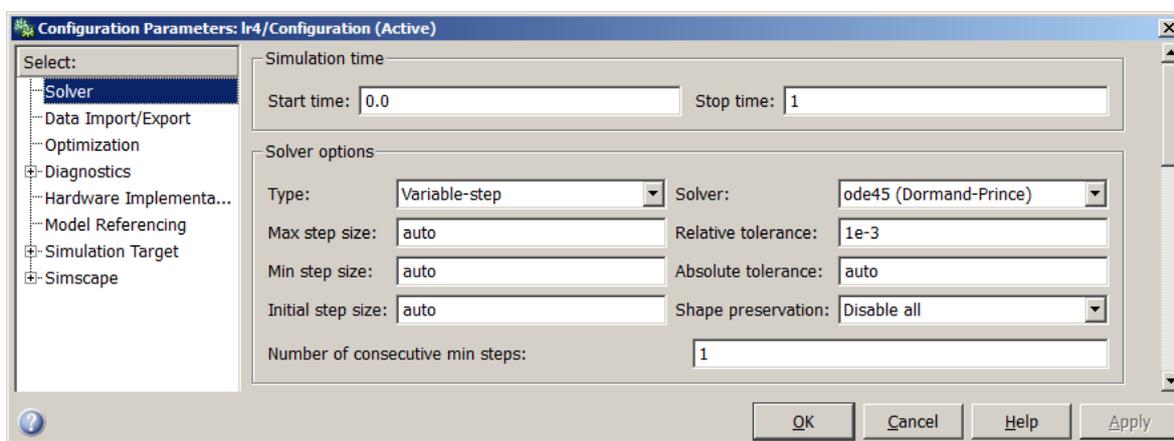


Рис. 4.4. Окно настройки решателя модели

Блок **Solver Configuration** определяет параметры для решателя модели, которые необходимы для моделирования гидросистемы. В данном блоке задается начальное состояние моделирования, особые алгоритмы и время дискретизации расчёта и т.д. (рис. 4.5). Настройки блока оставляем **по умолчанию**.

Модель рабочей жидкости ОГП реализована блоком **Hydraulic Fluid**, определяющим тип и параметры гидравлической жидкости в системе (плотность, вязкость, объёмный модуль упругости) (см. рис. 4.5). В блоке представлен набор стандартных зарубежных гидравлических жидкостей, выбор которых осуществляется из выпадающего списка. При соединении блока Hydraulic Fluid с любой гидравлической линией модели SimHydraulics, система автоматически идентифицирует гидравлические блоки и устанавливает единые свойства гидравлической жидкости применительно ко всем блокам модели.

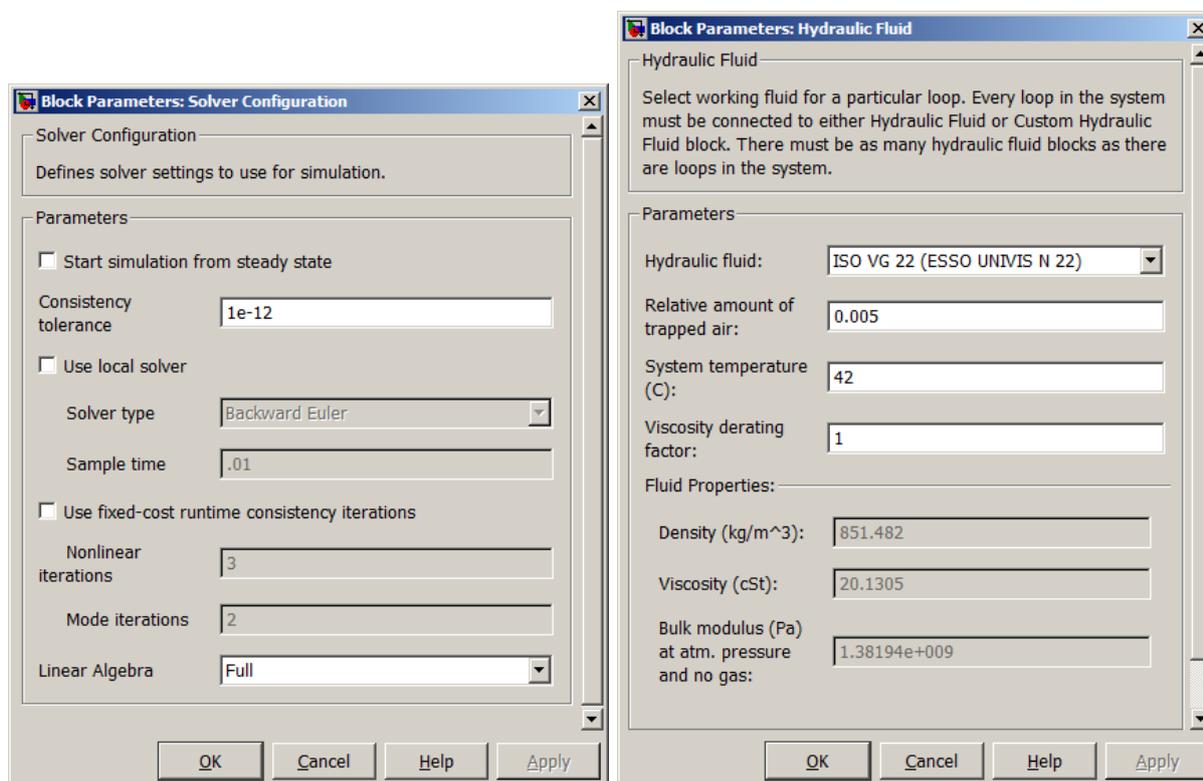


Рис. 4.5. Окна настройки блоков Solver Configuration и Hydraulic Fluid

Простая зубчатая механическая передача реализована блоком **Gear Box**. Параметром блока является передаточное отношение **MP GearRatio**. Направление вращения выходного вала определяется знаком передаточного отношения, при положительном отношении направления вращения валов совпадают, а при отрицательном – нет (рис. 4.6).

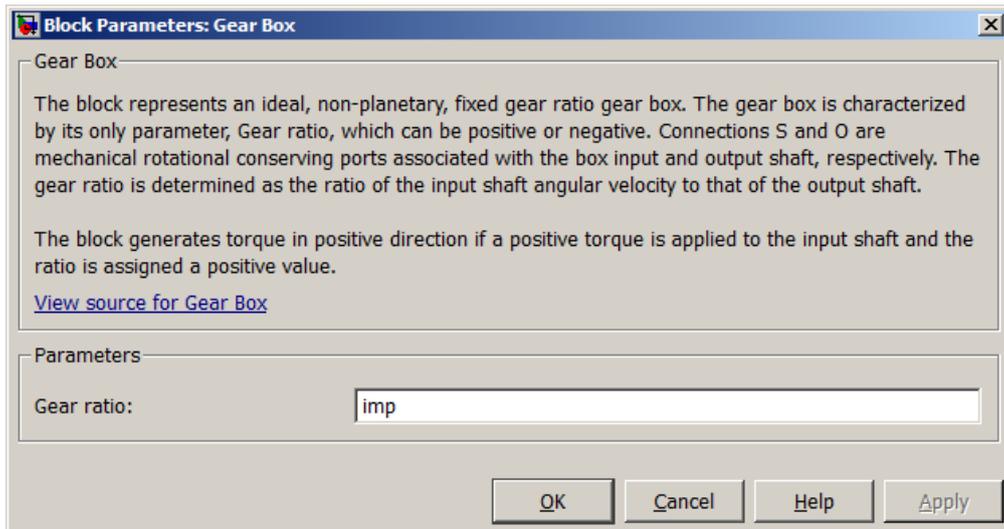


Рис. 4.6. Окно настройки блока Gear Box

Для задания угловой скорости вращения  $\omega_d$  и вывода из модели момента сопротивления входного вала ОГП  $M_C$  используются виртуальные конверторы **Simulink-PS Converter** и **PS-Simulink Converter** в паре с блоками **Ideal Angular Velocity Source** и **Ideal Torque Sensor**. В окнах конверторов S-PS и PS-S выбираются единицы измерения угловой скорости и момента силы – рад/с и Н·м, соответственно (рис. 4.7). **Ideal Torque Sensor** выводит из модели Simscape физический сигнал о текущем моменте на валу. Блоки **Ideal Angular Velocity Source** и **Ideal Torque Sensor** не настраиваются.

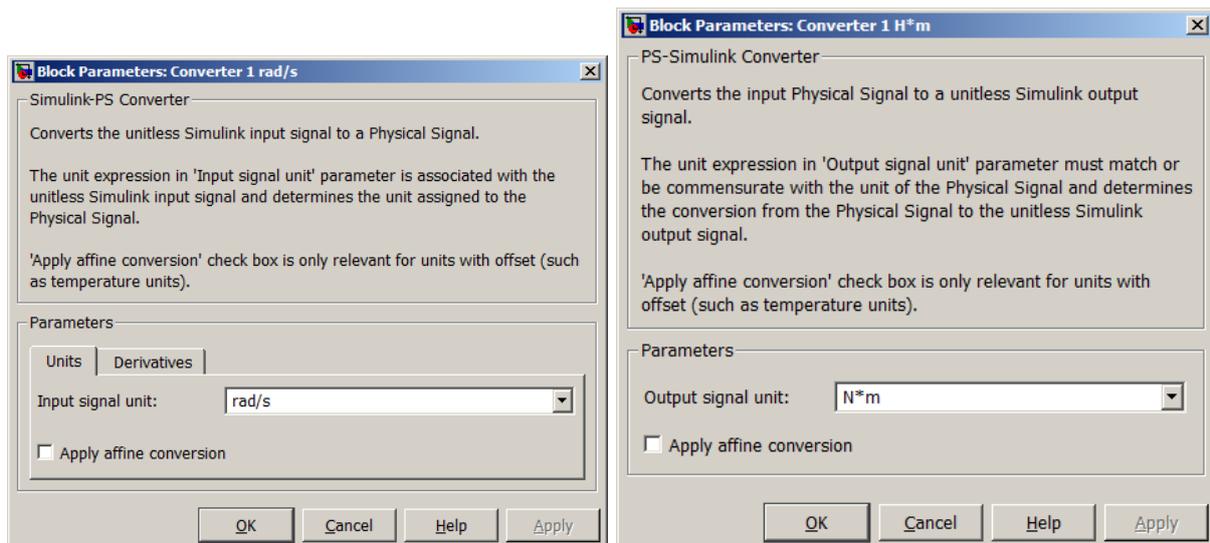


Рис. 4.7. Окна настройки блоков Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter

Для привязки вращающихся механических тел к окружающей среде в моделях SimHydraulics используются блоки **Mechanical Rotational Reference (MRR)** (не настраивается) – механический вращательный опорный блок, представляющий собой опорную точку или раму для всех механических вращающихся тел системы. Все вращательные порты блоков устройств, жестко закрепленных на раме, должны быть соединены с механическим вращательным опорным блоком.

Для учета инерционных свойств механической передачи гидромотора, а также связанных с их валами вращающихся тел используются блоки **Inertia** –  $J_1$ ,  $J_2$  и  $J_m$ . Блок **Inertia** задает момент инерции тела относительно нужной оси в  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$  (рис. 4.8). Начальная угловая скорость инерции **Initial velocity** определяет состояние блока в начале моделирования.

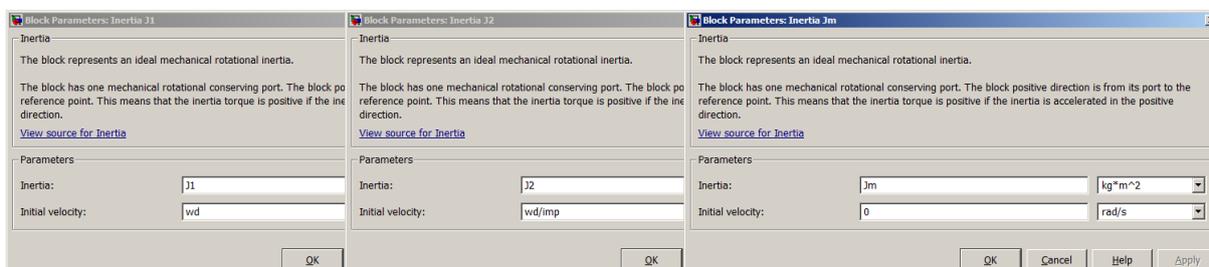


Рис. 4.8. Окна настройки блоков Inertia

Гидронасос реализован блоком **Fixed-Displacement Pump** и представляет собой нерегулируемый насос (рис. 4.9). Параметрами этого блока являются:

- номинальный рабочий объем насоса  $q_H$  (Pump displacement);
- объёмный КПД  $\eta_{OH}$  (Volumetric efficiency);
- полный КПД  $\eta_H = \eta_{OH} \cdot \eta_{MH}$ , (Total efficiency);
- номинальное давление  $P_{НОМ}$  (Nominal pressure);
- номинальная угловая скорость вала насоса  $\omega_{H\_НОМ}$  (Nominal angular velocity);
- номинальная кинематическая вязкость жидкости (Nominal kinematic viscosity).

Гидромотор реализован блоком **Hydraulic Motor** и представляет собой гидравлический двигатель с вращательным движением выходного звена (рис. 4.10). Параметры этого блока практически полностью совпадают с параметрами блока гидронасоса Fixed-Displacement Pump за исключением рабочего объёма гидромотора  $q_M$  (Motor displacement).

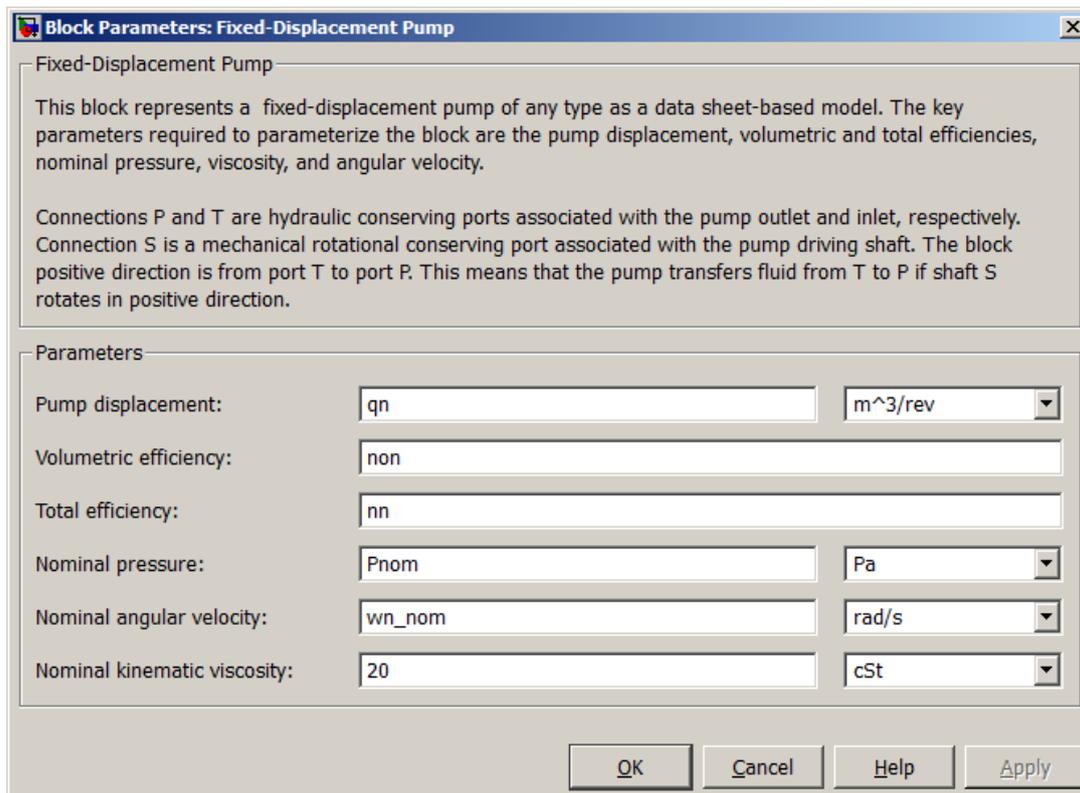


Рис. 4.9. Окно настройки блока Fixed-Displacement Pump

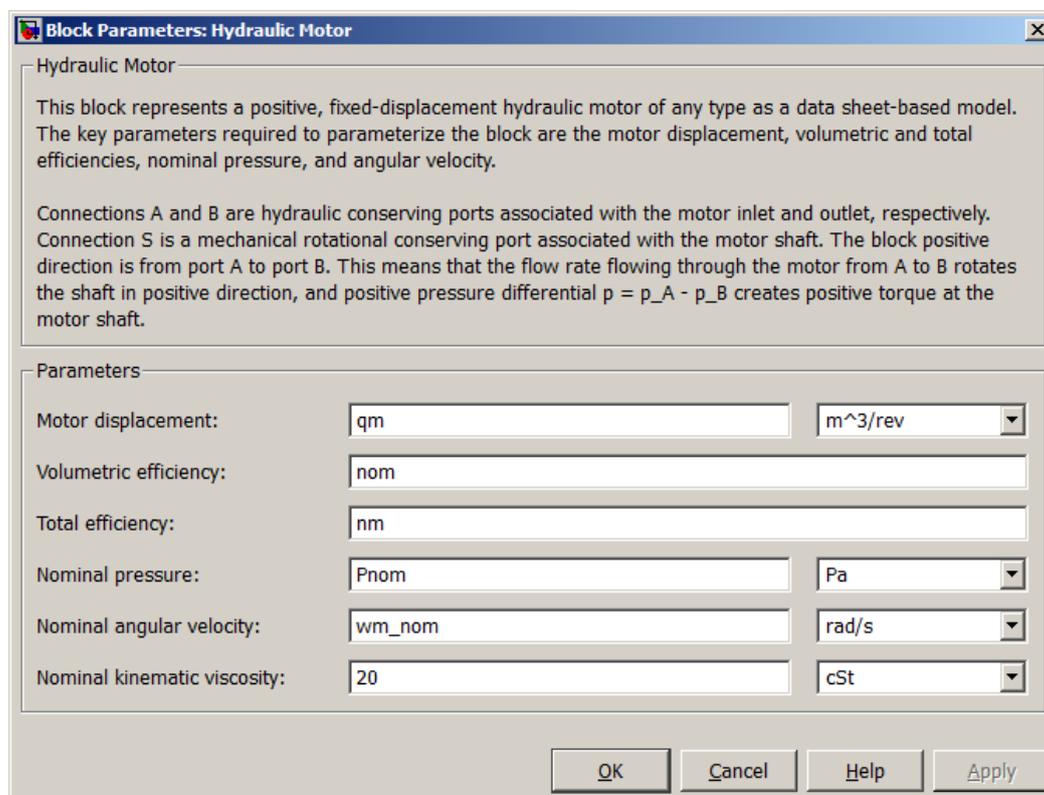


Рис. 4.10. Окно настройки блока Hydraulic Motor

Для задания момента сопротивления на валу гидромотора  $M_M$  используется виртуальный конвертор **Simulink-PS Converter** в паре с **Ideal Torque Source**. Для получения значений угловой скорости вращения вала гидромотора  $\omega_M$  используется виртуальный конвертор **PS-Simulink Converter** в паре с **Ideal Motion Sensor**. **Ideal Motion Sensor** выводит информацию о вращении в виде двух сигналов: угол оси  $A$  и угловая скорость  $W$ . В окнах конверторов S-PS и PS-S выбираются нужные единицы измерения угловой скорости и момента силы – рад/с и Н·м, соответственно (см. рис. 4.7). Блоки **Ideal Torque Source** и **Ideal Motion Sensor** не настраиваются.

В блоках **Constant** и **Gain** задаются постоянные коэффициенты модели:  $W_d$ ,  $M_m$  (см. рис. 4.3).

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск, установив время моделирования, достаточное для затухания переходных процессов системы. Результатами моделирования являются установившиеся значения и графики переходных процессов момента сопротивления на входном валу ОГП  $M_C$  и угловой скорости вращения вала гидромотора  $\omega_M$  (рис. 4.11).

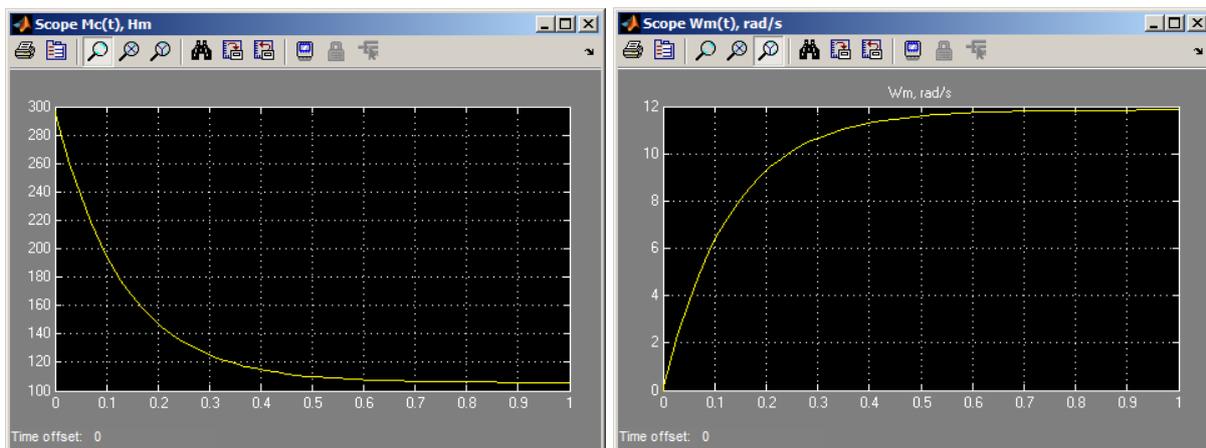


Рис. 4.11. График изменения во времени момента  $M_C$  и угловой скорости  $\omega_M$

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 4.3) собрать в среде Simulink\SimHydraulics модель объёмной гидropередачи.

2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 4.2) подсчитать полные КПД насоса и мотора как произведение объёмного и механического КПД ( $\eta_H = \eta_{OH} \cdot \eta_{MH}$ ;  $\eta_M = \eta_{OM} \cdot \eta_{MM}$ ), а также объёмный и механический КПД гидropередачи  $\eta_O$  и  $\eta_M$  по формулам (4.8) и (4.11).

3. Согласно своему варианту исходных данных найти отношение номинального рабочего объёма гидромотора к объёму гидронасоса ( $q_M/q_H$ ) по формуле (4.9).

4. Подобрать с учётом условия (4.15) номинальный рабочий объём гидромотора  $q_M$  по ГОСТ 13824–80. Берем минимальный подходящий по (4.15)  $q_M$  из любого ряда стандарта.

5. Подобрать с учётом вычисленного отношения  $q_M/q_H$  и выбранного стандартного  $q_M$  номинальный рабочий объём гидронасоса  $q_H$  по ГОСТ 13824–80.

6. Согласно своему варианту исходных данных (см. табл. 4.2) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.

7. Определить длительность затухания переходных процессов в системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в системе.

8. Получить графики переходных процессов угловой скорости вращения вала гидромотора  $\omega_M$  и момента сопротивления на входном валу ОГП  $M_C$  при заданной угловой скорости вращения входного вала ОГП  $\omega_D$ , а также установившиеся значения момента  $M_C$  и угловой скорости  $\omega_M$ .

9. Сделать вывод о характере движения выходного вала ОГП.

10. Оформить отчёт по работе.

### Исходные данные для выполнения работы

Схема моделируемой ОГП грузоподъёмной машины приведена на рис. 4.2, а схема модели ОГП в среде Simulink\SimHydraulic представлена на рис. 4.3. Параметры ОГП грузоподъёмной машины приведены в табл. 4.2:

- $i_{МП}$  – передаточное отношение механической передачи;
- $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции валов механической передачи;
- $\omega_D$  – угловая скорость приводного двигателя;
- $\omega_{H\_НОМ}$  – номинальная угловая скорость вращения гидронасоса;
- $\omega_{M\_НОМ}$  – номинальная угловая скорость вращения гидромотора;
- $P_{НОМ}$  – номинальное давление в гидросистеме;
- $\eta_{ОН}$ ,  $\eta_{МН}$ ,  $\eta_{ОМ}$ ,  $\eta_{ММ}$  – объёмные и механические КПД насоса и мотора;
- $M_M$  – статический момент сопротивления на валу гидромотора;
- $J_M$  – момент инерции, приведенный к валу гидромотора;
- $U_{ГП}$  – передаточное число гидропередачи.

Таблица 4.2

### Параметры объёмной гидропередачи

| №<br>вар. | $i_{МП}$ | $J_{1,2}$<br>кг·м <sup>2</sup> | $J_{2,2}$<br>кг·м <sup>2</sup> | $\omega_D$ ,<br>рад/с | $\omega_{H\text{ ном}}$ ,<br>рад/с | $\omega_{M\text{ ном}}$ ,<br>рад/с | $P_{НОМ}$ ,<br>МПа | $\eta_{ОН}$ | $\eta_{МН}$ | $\eta_{ОМ}$ | $\eta_{ММ}$ | $M_M$ ,<br>Нм | $J_M$ ,<br>кг·м <sup>2</sup> | $U_{ГП}$ |
|-----------|----------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------------------------|----------|
| 1         | 0,8      | 0,3                            | 0,15                           | 151                   | 188                                | 151                                | 8                  | 0,92        | 0,87        | 0,92        | 0,87        | 250           | 2,1                          | 2,5      |
| 2         | 0,714    | 0,2                            | 0,1                            | 120                   | 168                                | 34                                 | 25                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 1000          | 8,3                          | 10       |
| 3         | 0,625    | 0,3                            | 0,15                           | 131                   | 209                                | 70                                 | 16                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 600           | 5,0                          | 6        |
| 4         | 0,55     | 0,2                            | 0,1                            | 127                   | 230                                | 46                                 | 25                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 1000          | 8,3                          | 10       |
| 5         | 0,5      | 0,3                            | 0,15                           | 126                   | 251                                | 63                                 | 16                 | 0,92        | 0,87        | 0,92        | 0,87        | 800           | 6,7                          | 8        |
| 6         | 0,8      | 0,2                            | 0,1                            | 126                   | 157                                | 21                                 | 32                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 1500          | 12,5                         | 15       |
| 7         | 0,714    | 0,3                            | 0,15                           | 105                   | 147                                | 29                                 | 20                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 1000          | 8,3                          | 10       |
| 8         | 0,625    | 0,4                            | 0,2                            | 111                   | 178                                | 24                                 | 32                 | 0,92        | 0,89        | 0,92        | 0,89        | 1500          | 12,5                         | 15       |
| 9         | 0,55     | 0,3                            | 0,15                           | 109                   | 199                                | 20                                 | 32                 | 0,95        | 0,95        | 0,95        | 0,95        | 2000          | 16,7                         | 20       |
| 10        | 0,5      | 0,4                            | 0,2                            | 105                   | 209                                | 23                                 | 32                 | 0,9         | 0,85        | 0,9         | 0,85        | 1800          | 15,0                         | 18       |
| 11        | 0,8      | 0,5                            | 0,25                           | 184                   | 230                                | 46                                 | 20                 | 0,95        | 0,87        | 0,95        | 0,87        | 1000          | 8,3                          | 10       |
| 12        | 0,714    | 0,2                            | 0,1                            | 179                   | 251                                | 21                                 | 40                 | 0,92        | 0,89        | 0,92        | 0,87        | 2400          | 20,0                         | 24       |
| 13        | 0,625    | 0,2                            | 0,1                            | 92                    | 147                                | 37                                 | 16                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 800           | 6,7                          | 8        |
| 14        | 0,55     | 0,2                            | 0,1                            | 104                   | 188                                | 75                                 | 10                 | 0,92        | 0,87        | 0,92        | 0,87        | 500           | 4,2                          | 5        |
| 15        | 0,5      | 0,3                            | 0,15                           | 84                    | 168                                | 17                                 | 32                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 2000          | 16,7                         | 20       |
| 16        | 0,8      | 0,2                            | 0,1                            | 168                   | 209                                | 26                                 | 32                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 1600          | 13,3                         | 16       |
| 17        | 0,714    | 0,3                            | 0,15                           | 164                   | 230                                | 29                                 | 32                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 1600          | 13,3                         | 16       |
| 18        | 0,625    | 0,4                            | 0,2                            | 111                   | 178                                | 45                                 | 16                 | 0,9         | 0,89        | 0,9         | 0,87        | 800           | 6,7                          | 8        |
| 19        | 0,55     | 0,3                            | 0,15                           | 109                   | 199                                | 25                                 | 32                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 1600          | 13,3                         | 16       |
| 20        | 0,5      | 0,4                            | 0,2                            | 110                   | 220                                | 55                                 | 16                 | 0,9         | 0,85        | 0,9         | 0,85        | 800           | 6,7                          | 8        |
| 21        | 0,8      | 0,4                            | 0,2                            | 193                   | 241                                | 40                                 | 25                 | 0,95        | 0,87        | 0,95        | 0,87        | 1200          | 10,0                         | 12       |
| 22        | 0,714    | 0,3                            | 0,15                           | 187                   | 262                                | 26                                 | 32                 | 0,92        | 0,89        | 0,92        | 0,87        | 2000          | 16,7                         | 20       |
| 23        | 0,625    | 0,4                            | 0,2                            | 98                    | 157                                | 20                                 | 32                 | 0,95        | 0,85        | 0,95        | 0,85        | 1600          | 13,3                         | 16       |
| 24        | 0,55     | 0,5                            | 0,25                           | 98                    | 178                                | 12                                 | 32                 | 0,92        | 0,87        | 0,92        | 0,87        | 2000          | 16,7                         | 20       |
| 25        | 0,5      | 0,2                            | 0,1                            | 94                    | 188                                | 27                                 | 25                 | 0,9         | 0,87        | 0,9         | 0,87        | 1400          | 11,7                         | 14       |

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Блок-схема объёмной гидропередачи.
3. Численные значения полных КПД насоса и мотора, а также объёмный и механический КПД гидропередачи.
4. Расчётные формулы и выбранные по ГОСТ 13824-80 значения номинальных рабочих объёмов гидронасоса и гидромотора.
5. Схема модели объёмной гидропередачи в среде Simulink\SimHydraulic с окнами задания параметров модели.
6. Установившиеся значения и графики переходных процессов момента  $M_C$  и угловой скорости вращения вала гидромотора  $\omega_M$ .
7. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие существуют классы гидроприводов по характеру движения выходного звена?
2. Для чего в ОГП нужен редуктор (механическая передача)?
3. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimHydraulics?
4. Какие типы гидромашин моделируют блоки библиотеки SimHydraulics?
5. Поясните блок-схему и уравнения движения элементов ОГП.
6. Что такое передаточное число гидропередачи?
7. Что такое коэффициент трансформации гидропередачи?
8. Как вычислить общий КПД гидропередачи?
9. На какие параметры ОГП влияет номинальное давление в гидросистеме  $P_{НОМ}$ ?
10. Каким образом выбирались значения номинальных рабочих объёмов гидронасоса и гидромотора?
11. Опишите назначение блоков, образующих схему модели объёмной гидропередачи в среде Simulink\SimHydraulics.
12. Каковы параметры блоков Fixed-Displacement Pump и Hydraulic Motor?
13. Для чего нужны блоки Mechanical Rotational Reference (MRR)?
14. Как определить время затухания переходных процессов системы?
15. Что задает блок модели Constant Md?

## Лабораторная работа № 5

### МОДЕЛИРОВАНИЕ *RLC*-ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы** – моделирование и исследование электрической цепи постоянного тока с последовательным соединением резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов.

#### Общие сведения о SimPowerSystems

**SimPowerSystems** – это специализированная библиотека пакета визуально-блочного моделирования Simulink программного комплекса MATLAB, предназначенная для моделирования электротехнических и энергетических устройств и систем. В библиотеку SimPowerSystem включены модели электроэнергетических компонентов, включая трёхфазные машины, электроприводы и компоненты для прикладных задач, такие как гибкие системы передачи переменного тока (flexible AC transmission systems (FACTS)) и системы возобновляемой энергии [10].

Модели SimPowerSystems можно использовать для разработки систем управления и испытания работы системных уровней. SimPowerSystems предоставляет возможности для гармонического анализа, вычисления общего нелинейного искажения (total harmonic distortion (THD)), потокораспределения нагрузки (load flow) и других типов автоматизированного анализа электроэнергетических систем. Можно параметризовать модели, используя переменные и выражения в MATLAB® и проектировать системы управления для электроэнергетической системы в Simulink [10].

Блоки этой библиотеки полностью совместимы с другими разделами Simulink. Можно добавлять механические, гидравлические, пневматические и другие компоненты к модели, используя Simscape и выполнять проверку модели в единой среде симуляции [10].

При помощи SimPowerSystems можно выполнять построение модели системы способами, напоминающими сборку физической системы. Компоненты в модели соединяются физическими связями, которые представляют идеальные электропроводящие пути. Этот подход позволяет пользователю описывать физическую структуру системы вместо того, чтобы выводить и реализовывать уравнения для системы. По схеме модели системы SimPowerSystems автоматически

вычисляет дифференциальные алгебраические уравнения, которые определяют поведение системы. Эти уравнения интегрируются в остальную часть модели Simulink [10].

Можно использовать сенсорные блоки в SimPowerSystems, чтобы измерять ток и напряжение в силовой сети и передавать сигналы об измерениях в стандартные блоки Simulink. Можно передавать Simulink сигналы в блоки источники энергии для задания величины электрического тока и напряжения. При помощи блоков сенсоров и блоков источников можно подключать алгоритм управления, разработанный в Simulink к сети SimPowerSystems [10].

### **Общие сведения о моделировании электрических цепей в SimPowerSystems**

Процессы, возникающие в электрической цепи при переходе от одного установившегося энергетического режима к другому установившемуся энергетическому режиму, называются *переходными процессами* (режимами). Причиной возникновения переходных процессов является коммутация, т.е. скачкообразное изменение структуры цепи, параметров её элементов, а также подключение или отключение источников энергии.

При этом если электрическая цепь содержит индуктивные и ёмкостные элементы, то энергия электрического или магнитного поля, запасенная в соответствующем элементе, не может измениться скачком при коммутации. Поэтому если в процессе коммутации индуктивность (ёмкость) элемента не изменяется, то значение тока в индуктивности (напряжения на ёмкости) сразу же после коммутации равно соответствующему значению до коммутации, а затем может плавно изменяться от этого значения к новому установившемуся.

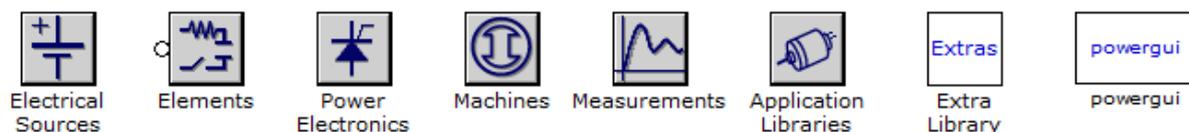
Ток и напряжение на сопротивлении, напряжение на индуктивности и ток через ёмкость могут меняться скачком при коммутации. Эти величины определяются по состоянию цепи после коммутации.

Возможности моделирования различных режимов электрических цепей в Simulink прежде всего определяются блоками, входящими в библиотеку SimPowerSystems, которую можно выбрать в окне браузера библиотек Simulink (рис. 5.1).

Основные разделы библиотеки SimPowerSystems:

- **Application libraries** – библиотека приложений;
- **Electrical Sources** – источники электрической энергии;

- **Elements** – электротехнические элементы;
- **Extra library** – расширенные средства анализа и моделирования;
- **Machines** – электрические машины;
- **Measurements** – измерительные и контрольные устройства;
- **Power Electronics** – устройства силовой электроники;
- **Powergui** – графический интерфейс пользователя пакета моделирования энергетических систем.



**SimPowerSystems 5.3**  
 Copyright 1997-2010 Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc.

Рис. 5.1. Окно библиотеки Simulink\SimPowerSystems

Для работы модели SimPowerSystems необходим блок Powergui – графический интерфейс пользователя (рис. 5.2), который размещается в корне раздела библиотеки SimPowerSystems. С помощью него удобно проводить анализ электрических цепей. Единственный блок Powergui помещается в окне модели в любое место и не подключается к другим элементам. Он позволяет задать начальные значения переменных модели, выполнить расчет установившегося режима, осуществить инициализацию схемы, содержащей электрические машины, найти полное сопротивление (импеданс) цепи и т.д. [10, 11].

В окне блока Powergui расположены кнопки, с помощью которых можно открыть следующие инструменты анализа [10, 11]:

- расчёт установившегося режима для токов и напряжений;
- задание начальных условий (начальные напряжения для конденсаторов и токи для катушек);
- получение информации (инициализация) о трехфазных схемах, содержащих электрические машины из раздела Machines, расчёт потокораспределения нагрузки Load Flow;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи. Открывается окно, в котором показан график зависимости импеданса цепи от частоты;

- выполнение быстрого преобразования Фурье FFT;
- создание отчёта;
- создание характеристики намагничивания магнитопровода;
- расчёт RLC параметров длинной линии.

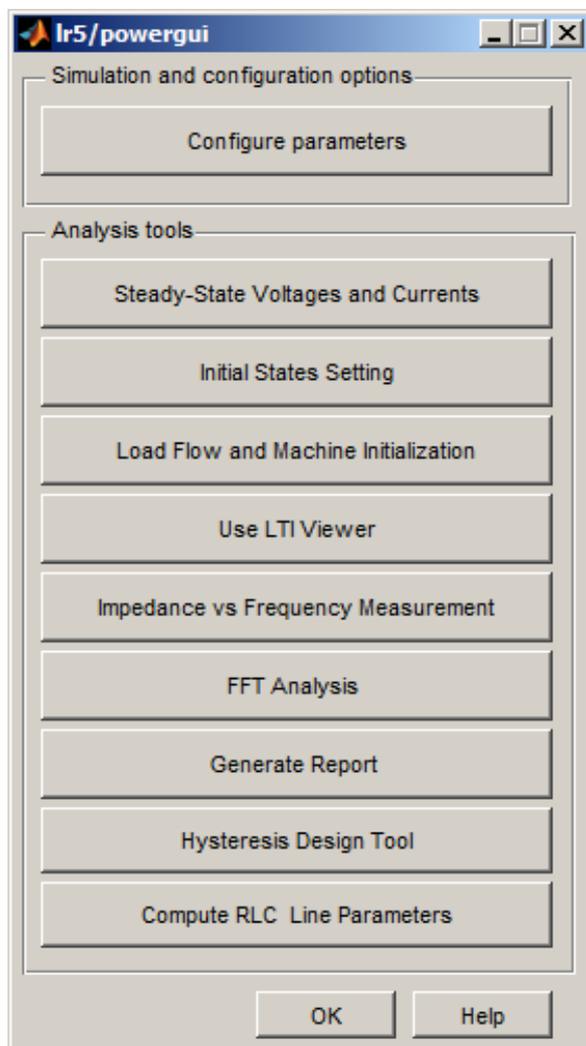
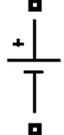
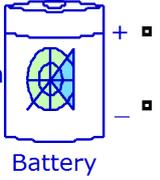
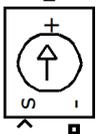
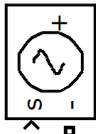
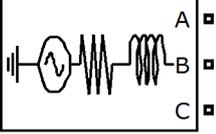
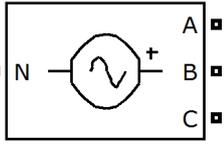


Рис. 5.2. Окно блока Powergui

Блоки источников электрической энергии используются для моделирования различных электрических сигналов (токов и напряжений). Раздел Electrical Sources содержит 8 блоков, имитирующих типовые идеальные источники (если это не оговорено заранее), т.е. их собственное сопротивление равно нулю (табл. 5.1) [10, 11].

Эти источники образуют функционально полный набор источников электрической энергии. Установка параметров источников электрической энергии производится в окне настройки элемента, для чего необходимо щелкнуть правой мышкой по элементу.

## Модели источников электрической энергии в SimPowerSystems

| Название                                       | Блок SimPowerSystems  | Описание  |
|--|---|---|
| 1  | 2   | 3   |
| Идеальный источник постоянного напряжения      |  DC Voltage Source                         | Блок вырабатывает сигнал постоянного по уровню напряжения   |
| Идеальный источник переменного тока            |  AC Current Source                         | Блок вырабатывает сигнал синусоидального тока с постоянной амплитудой, частотой и фазой   |
| Идеальный источник переменного напряжения      |  AC Voltage Source                         | Блок вырабатывает сигнал синусоидального напряжения с постоянной амплитудой, частотой и фазой   |
| Батарея  |  Battery                                  | Аккумуляторный блок реализует универсальную динамическую модель, параметризованную для представления наиболее популярных типов перезаряжаемых батарей |
| Управляемый источник тока                      |  Controlled Current Source               | Блок вырабатывает сигнал постоянного или синусоидального тока в соответствии с сигналом управления  |
| Управляемый источник напряжения                |  Controlled Voltage Source               | Блок вырабатывает сигнал постоянного или синусоидального напряжения в соответствии с сигналом управления  |
| Трёхфазный источник напряжения                 |  Three-Phase Source                      | Блок вырабатывает трёхфазную систему напряжений. Можно выбирать способы соединения фаз источника и задать полное сопротивление источника              |
| Трёхфазный программируемый источник напряжения |  Three-Phase Programmable Voltage Source | Блок вырабатывает трёхфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты, а также гармонического состава    |

Для измерения различных электрических параметров необходимы блоки раздела **Measurements** (рис. 5.3). Блоки **Voltage Measurements**, **Current Measurements** – измерители напряжения и тока предназначены для соединений измерительных блоков библиотеки Simulink с блоками пакета SimPowerSystems. Эти блоки имеют р-входы для подключения измерителя к электрической цепи, а также по одному m-выходу (в блоке амперметра он обозначен «i», а в блоке вольтметра – «v») подключаемые к виртуальным осциллографам Scope.

Блок **Impedance Measurement** позволяет измерить частотную зависимость полного сопротивления между двумя точками исследуемой схемы. Трехфазный измерительный блок **Three-Phase V-I Measurement** используется для измерения мгновенных трёхфазных напряжений и токов в цепи. При последовательном подключении к трёхфазным элементам он возвращает линейные или фазные напряжения и токи [10, 11].

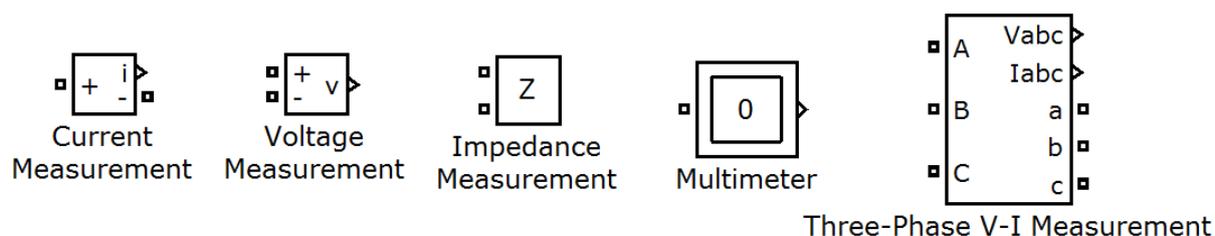


Рис. 5.3. Блоки раздела SimPowerSystems\Measurements

Особый интерес представляет блок **Multimeter**. Этот блок позволяет измерить электрические переменные исследуемой схемы, в которой установлены измерительные приборы Voltage Measurement, Current Measurement, Impedance Measurement. Окно настройки этого блока содержит два поля. В левом поле после нажатия кнопки Refresh появляются измеряемые переменные. Все или часть из них могут быть переведены во второе (правое) поле с помощью специальной кнопки для измерения и регистрации результатов [10, 11].

Для расширенных преобразований параметров электрической энергии имеется подраздел **Measurements** в разделе **Extra library**. Блоки данного раздела позволяют вычислить среднее или среднеквадратичное значение переменной величины, анализ гармонических составляющих трёхфазного сигнала, вычислить амплитуду и фазу переменного сигнала, активную и реактивную составляющую электрической мощности [10, 11].

Блоки раздела Elements используются для моделирования различных элементов (приёмников) электрической энергии. Раздел Elements содержит множество блоков, имитирующих как типовые соединения идеализированных элементов, так и готовые электротехнические аппараты – трансформаторы (рис. 5.4) [10, 11].

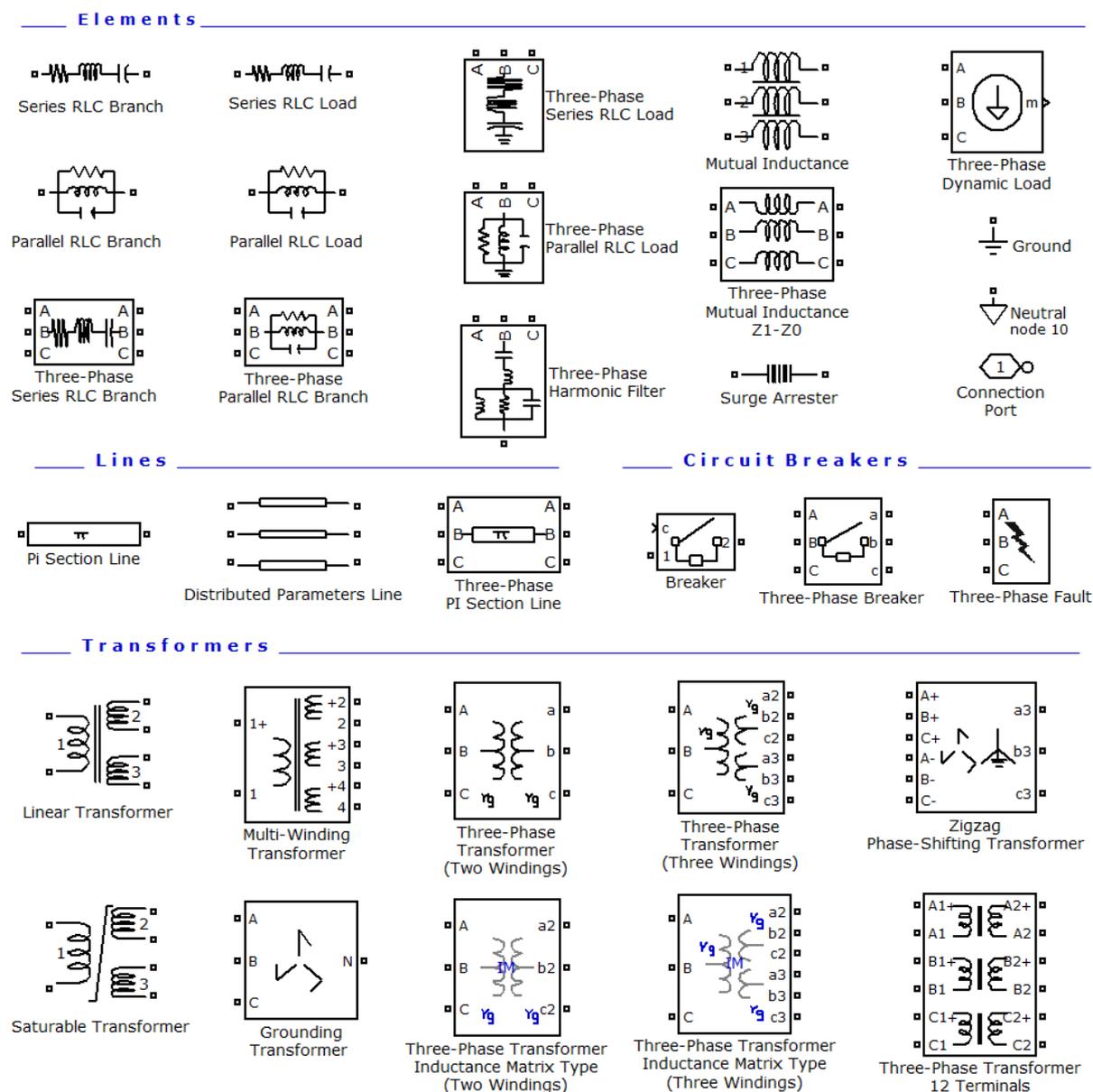


Рис. 5.4. Блоки раздела SimPowerSystems\Elements

Рассмотрим некоторые из них [10, 11]:

- **Series RLC Branch** – последовательное соединение RLC элементов, параметры которых задаются через сопротивление в омах, индуктивность в генри и ёмкость в фарадах.

- Parallel RLC Branch – параллельное соединение RLC элементов. Параметры аналогичны блоку Series RLC Branch.
- Series RLC Load и Parallel RLC Load – последовательная и параллельная активно-реактивная нагрузка. Параметрами нагрузки являются номинальное напряжение, частота, активная и реактивная индуктивная и реактивная ёмкостная мощность.
- Three-Phase Series/Parallel RLC Load/Branch симметричная последовательная/параллельная трёхфазная активно-реактивная нагрузка/соединение элементов. Параметры для каждой фазы приёмника аналогичны блокам Series/Parallel RLC Load/Branch.
- Mutual Inductance – этот блок предназначен для моделирования катушек или проводников, имеющих магнитную связь. Он позволяет моделировать три или два магнитно-связанных элемента.
- Three-Phase Harmonic Filter (трёхфазный фильтр гармоник) – это шунтирующие элементы, которые используются в энергосистемах для уменьшения искажений напряжения и коррекции коэффициента мощности. Трёхфазный фильтр гармоник построен на базе различных соединений RLC-элементов.
- Ground (Заземление) – задает на электрической схеме одинаковые (нулевые) потенциалы для подключенных точек.
- Neutral (нейтраль) – задает привязку к точке нейтрали трёхфазной цепи с определённым номером.
- PI Section Line – линия электропередачи с сосредоточенными параметрами.
- Distributed Parameters Line – линия электропередачи с распределенными параметрами.
- Breaker – блок выключателя реализует автоматический выключатель, в котором в момент размыкания и замыкания можно управлять либо с помощью внешнего сигнала Simulink (режим внешнего управления), либо с помощью таймера внутреннего управления (режим внутреннего управления).
- Linear Transformer (Линейный трансформатор) – моделирует трех или двух обмоточный однофазный трансформатор. Нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника не учитывается.
- Three-Phase Transformer (Two Windings) – блок трёхфазного трансформатора (две обмотки) реализует трёхфазную трансформаторную группу. Блок позволяет выбрать тип подключения обмоток, при этом значок блока автоматически обновляется.

## Постановка задачи

На рис. 5.5 представлена электрическая схема замещения последовательной  $RLC$ -цепи с источником постоянного напряжения.

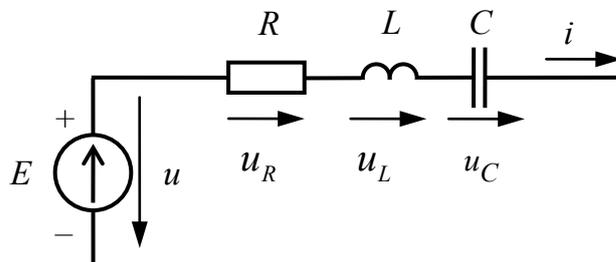


Рис. 5.5. Схема замещения последовательной  $RLC$ -цепи

Для такой цепи согласно второму закону Кирхгофа можно записать уравнение [12]:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (5.1)$$

Для мгновенных значений напряжения и тока в резистивном элементе справедливо соотношение, определяемое законом Ома [12]:

$$u_R = Ri. \quad (5.2)$$

Поэтому напряжение на индуктивном элементе равно по значению и в каждый момент времени противоположно по направлению ЭДС самоиндукции [12]:

$$u_L = -e = L \frac{di}{dt}. \quad (5.3)$$

Если напряжение, приложенное к ёмкостному элементу, будет изменяться, то будет изменяться и заряд, т.е. в ёмкостном элементе появится ток [12]:

$$i = C \frac{du_C}{dt}. \quad (5.4)$$

Тогда переходный процесс в такой цепи можно описать неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка [12]:

$$u = u_R + u_L + u_C = RC \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2u_C}{dt^2} + u_C. \quad (5.5)$$

Напряжение на ёмкостном элементе достигает наибольшего значения в момент времени  $t = \pi/\omega_0$  ( $\omega_0$  – собственная частота колебательного процесса) и может превышать почти в 2 раза установившееся напряжение.

Расчёт переходных процессов в цепях постоянного тока – достаточно сложная задача, трудноосуществимая без использования специального программного обеспечения, такого как Simulink.

На основании изложенного, требуется провести моделирование и исследование переходных процессов в последовательной  $RLC$ -цепи в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimPowerSystems.

### Моделирование $RLC$ -цепи постоянного тока

На рис. 5.6 представлена блок-схема модели последовательной  $RLC$ -цепи в среде Simulink\SimPowerSystems MATLAB 2010.

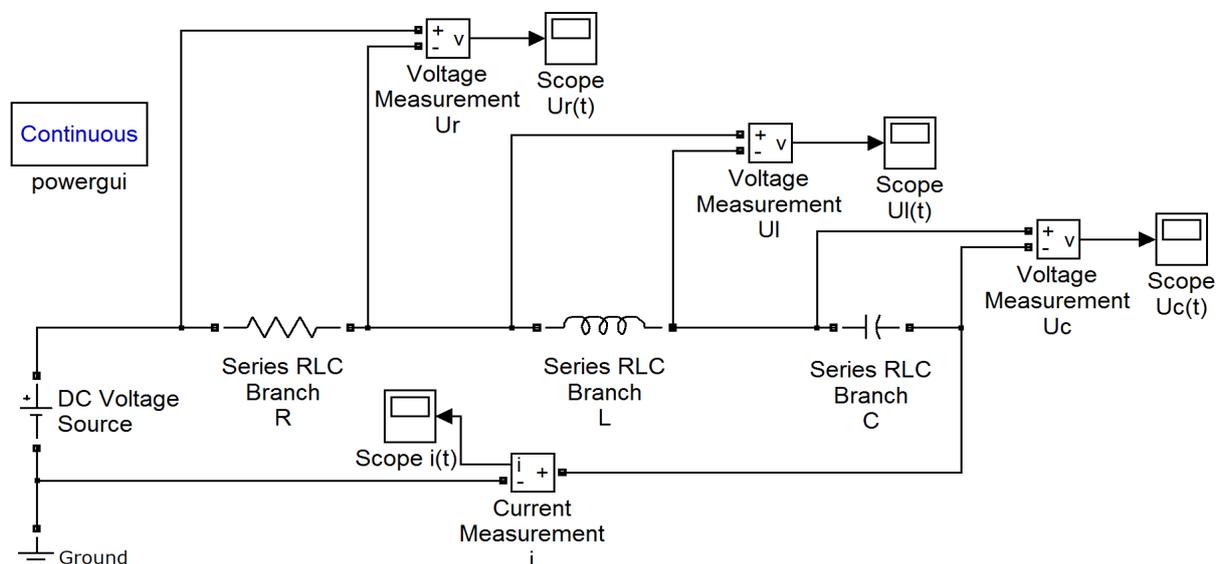


Рис. 5.6. Блок-схема модели последовательной  $RLC$ -цепи в среде Simulink\SimPowerSystems

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Powergui** (SimPowerSystems\ ) – графический интерфейс пользователя. Нужен для функционирования модели.
- **DC Voltage Source** (SimPowerSystems\Electrical Sources) – идеальный источник постоянного напряжения.
- **Series RLC Branch** (SimPowerSystems\Elements) – последовательное соединение RLC элементов. Элементы R, L, C.
- **Voltage Measurements** и **Current Measurements** (SimPowerSystems\Measurements) – измерители напряжения и тока. Данные блоки не имеют настроек.

- **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.
- **Ground** (SimPowerSystems\Elements) – задает на электрической схеме нулевой потенциал «минуса» источника.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели цепи производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с переменным шагом вычислений (рис. 5.7).

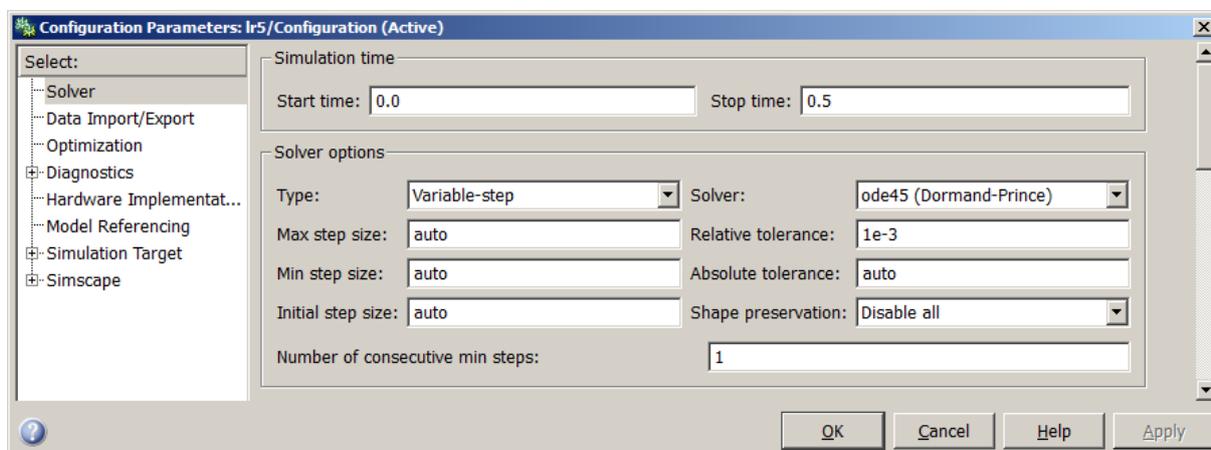


Рис. 5.7. Окно настройки решателя модели

**DC Voltage Source** – идеальный источник постоянного напряжения. Параметр блока – напряжение  $u$  в вольтах (рис. 5.8).

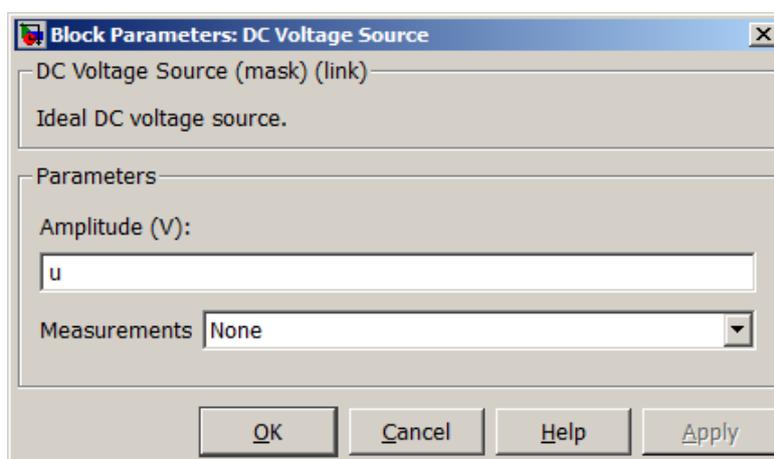


Рис. 5.8. Окно настройки блока DC Voltage Source

Блоки **Series RLC Branch (R, L, C)** – последовательное соединение RLC элементов. Данные блоки моделируют независимые электротехнические элементы – активный, индуктивный и ёмкостный. Параметры элементов, соответственно, сопротивление  $R$  в Ом, индуктивность  $L$  в Гн и ёмкость  $C$  в Ф. Для реализации измерения на каждом элементе в отдельности используем три блока Series RLC Branch, соединённых последовательно, в каждом из которых выбирается только одна из трёх составляющих  $R$ ,  $L$  или  $C$  (рис. 5.9).

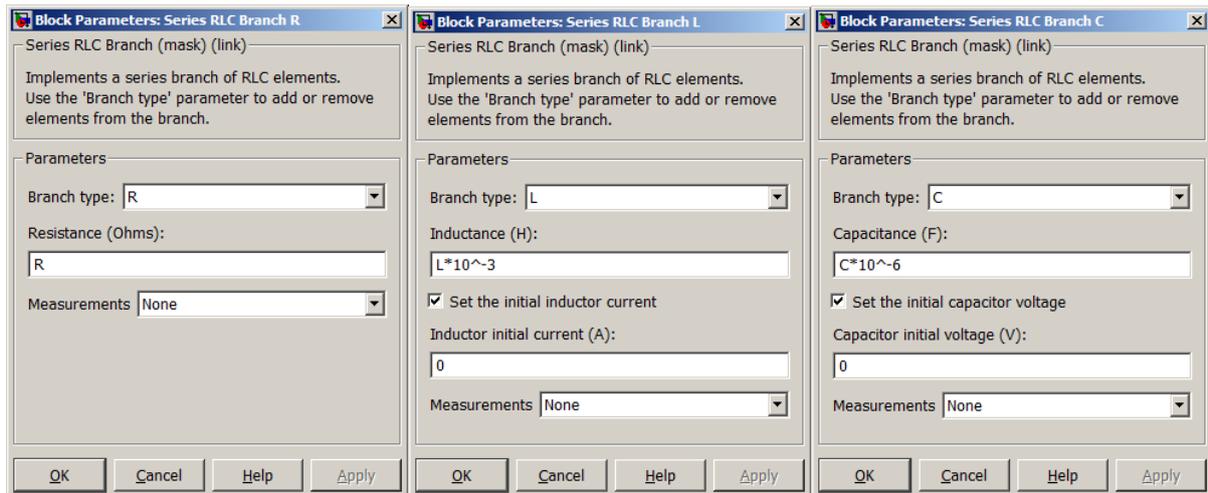


Рис. 5.9. Окно настройки блоков Series RLC Branch

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск, установив время моделирования, достаточное для затухания переходных процессов системы. Результатами моделирования являются графики переходных процессов напряжений на элементах цепи  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  и общего тока цепи  $I$  (рис. 5.10).

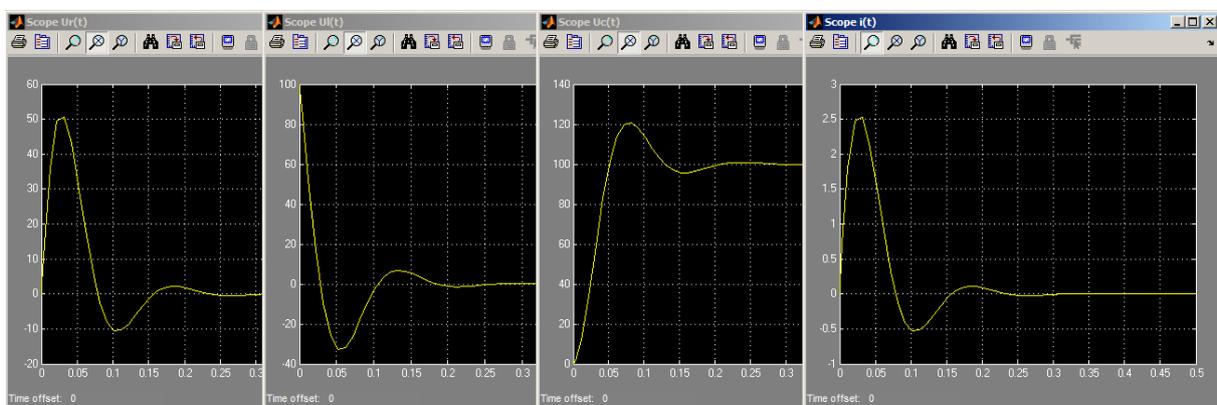


Рис. 5.10. Графики изменения во времени напряжений  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  и тока цепи  $I$

## Исходные данные для выполнения работы

Схема моделируемой последовательной  $RLC$ -цепи приведена на рис. 5.5, а схема модели в среде Simulink\SimPowerSystems представлена на рис. 5.6. Варианты исходных данных – параметров  $RLC$ -цепи приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Параметры  $RLC$ -цепи постоянного тока

| № вар. | $u$ , В | $R$ , Ом | $L$ , мГн | $C$ , мкФ |
|--------|---------|----------|-----------|-----------|
| 1      | 10      | 10       | 100       | 500       |
| 2      | 20      | 20       | 200       | 600       |
| 3      | 30      | 30       | 300       | 700       |
| 4      | 40      | 40       | 400       | 800       |
| 5      | 50      | 50       | 500       | 900       |
| 6      | 60      | 30       | 150       | 50        |
| 7      | 70      | 35       | 200       | 70        |
| 8      | 80      | 40       | 250       | 90        |
| 9      | 90      | 45       | 300       | 120       |
| 10     | 100     | 50       | 350       | 150       |
| 11     | 15      | 10       | 150       | 50        |
| 12     | 25      | 20       | 200       | 70        |
| 13     | 35      | 30       | 250       | 90        |
| 14     | 45      | 40       | 300       | 120       |
| 15     | 55      | 50       | 350       | 150       |
| 16     | 65      | 30       | 100       | 500       |
| 17     | 75      | 35       | 200       | 600       |
| 18     | 85      | 40       | 300       | 700       |
| 19     | 95      | 45       | 400       | 800       |
| 20     | 110     | 55       | 500       | 900       |
| 21     | 12      | 12       | 150       | 50        |
| 22     | 24      | 12       | 200       | 70        |
| 23     | 32      | 16       | 250       | 90        |
| 24     | 40      | 8        | 300       | 120       |
| 25     | 54      | 9        | 350       | 150       |

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace. При задании значений параметров модели необходимо учитывать приставки единиц измерения, применяемые в табл. 5.2:  $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$ ;  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ .

## Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 5.6) собрать в среде Simulink из блоков разделов SimPowerSystems модель последовательной  $RLC$ -цепи.
2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 5.2) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.
3. Определить длительность затухания переходных процессов в системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в системе.
4. Получить графики переходных процессов напряжений на элементах цепи  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  и общего тока цепи  $I$ .
5. Сделать анализ характера переходных процессов в цепи.
6. Оформить отчёт по работе.

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема замещения последовательной  $RLC$ -цепи.
3. Численные значения параметров модели.
4. Схема модели последовательной  $RLC$ -цепи в среде Simulink\SimPowerSystems с окнами задания параметров модели.
5. Графики переходных процессов напряжений на элементах цепи  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  и общего тока цепи  $I$ .
6. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimPowerSystems?
2. Какие типы источников и приёмников электрической энергии моделируют блоки библиотеки SimPowerSystems?
3. Поясните расчётную схему, параметры и уравнения последовательной  $RLC$ -цепи.
4. Перечислите единицы измерения параметров элементов цепи.
5. Почему ток в последовательной  $RLC$ -цепи постоянного тока стремится к нулю?
6. Опишите назначение и параметры блоков, образующих схему модели  $RLC$ -цепи в среде Simulink\SimPowerSystems.
7. Для чего нужен блок Powergui?

## Лабораторная работа № 6

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Цель работы** – моделирование и анализ неоднородной однофазной цепи синусоидального тока с разветвлённой структурой.

#### Общие сведения о моделировании и гармоническом анализе цепей синусоидального тока в SimPowerSystems

В настоящее время центральное производство и распределение электрической энергии осуществляются в основном на переменном токе. Цепи с изменяющимися – переменными – токами по сравнению с цепями постоянного тока имеют ряд особенностей. Переменные токи и напряжения вызывают переменные электрические и магнитные поля. В результате изменения этих полей в цепях возникают явления самоиндукции и взаимной индукции, которые оказывают самое существенное влияние на процессы, протекающие в цепях, усложняя их анализ.

*Переменным* называется электрический ток, который периодически изменяется во времени как по величине, так и по направлению,

$$i = f(t) = f(t + T), \quad (6.1)$$

где  $T$  – период, наименьший промежуток времени, через который наблюдаются повторения значений тока [12].

Величина, обратная периоду, называется частотой тока и измеряется в герцах (Гц) [12]:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (6.2)$$

Мгновенное значение синусоидально изменяющейся с течением времени величины [12]:

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \psi_a), \quad (6.3)$$

где  $A_m$  – максимальное значение или амплитуда;  $(\omega t + \psi_a)$  – фаза;  $\psi_a$  – начальная фаза;  $\omega$  – угловая частота, рад/с.

Период  $T$  (с), угловая частота  $\omega$  и линейная частота  $f$  (Гц) связаны соотношением [12]:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (6.4)$$

Действующие значения (среднеквадратичные RMS) синусоидальных ЭДС, напряжения и тока являются среднеквадратичными значениями их мгновенных значений и обозначаются  $E$ ,  $U$ ,  $I$  [12]:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (6.5)$$

При анализе цепи переменного тока необходимо рассматривать амплитудные и фазовые отношения между токами и напряжениями.

Для мгновенных значений напряжения и тока в *резистивном элементе* справедливо соотношение, определяемое законом Ома [12]:

$$u_R = RI_{Rm} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u), \quad (6.6)$$

а их начальные фазы одинаковые [12]:

$$\psi_u = \psi_i, \quad (6.7)$$

т.е. ток и напряжение в резистивном элементе изменяются синфазно – совпадают по фазе.

Напряжение на индуктивном элементе по закону электромагнитной индукции связано с током зависимостью [12]:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \omega LI_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.8)$$

а их начальные фазы – соотношением [12]:

$$\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}. \quad (6.9)$$

Ток ёмкостного элемента связан с напряжением зависимостью:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = \omega CU_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u) = I_{Cm} \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.10)$$

а начальные фазы – соотношением [12]:

$$\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}. \quad (6.11)$$

В самом простом случае (для несложных электрических цепей с небольшим числом анализируемых параметров) расчёт мгновенных и действующих значений электрических величин в среде Simulink можно осуществлять индивидуально по каждому участку цепи с помощью блоков **Fourier** и **RMS**, находящихся в разделе **SimPowerSystems\Extra Library\Measurements** [10, 11].

Блок Fourier (Фурье) (рис. 6.1, а) выполняет анализ периодического входного сигнала на заданной (несущей) частоте. Блок Фурье предназначен для вычисления величины (амплитуды) и начальной фазы основной или любой гармонической составляющей входного сигнала. Блок RMS (рис. 6.1, б) выполняет вычисление действующего значения (среднеквадратичного или RMS-значения) переменной величины для электрического сигнала на заданной (несущей) частоте [10, 11].

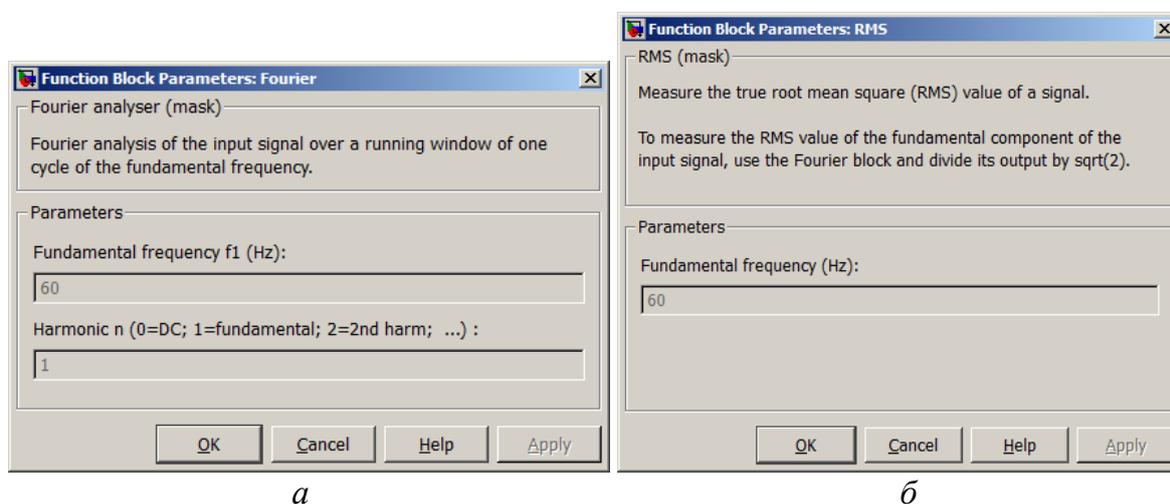


Рис. 6.1. Окно блоков Fourier и RMS  
а – блок Fourier; б – блок RMS

Однако, если мы будем размещать вышеописанный комплект блоков (Fourier и RMS) для измерения амплитуд, фаз и действующих значений всех переменных токов и напряжений, имеющих в сложной электрической цепи, то её модель будет загромождена. Поэтому в разделе SimPowerSystems имеется инструмент *автоматизированного гармонического анализа* с графическим интерфейсом пользователя – Powergui [10].

Для того чтобы выполнить гармонический анализ для схемы, открываем мышью блок Powergui, и в появившемся окне (см. рис. 5.2) необходимо нажать кнопку Steady-State Voltages and Currents (Установившийся режим напряжений и токов).

В результате откроется окно Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool (рис. 6.2), в правой части которого имеются настройки анализа [10]:

- **Units** (Peak values/RMS values). Выбор амплитудных или действующих значений величин.
- **Frequency**. Выбор значения частоты основной гармоники тока в цепи.
- **Display**. Выбор отображаемых в окне параметров:
  - *States* – установившиеся значения напряжений конденсатора и токов катушки индуктивности схемы.
  - *Measurement* – измеряемые переменные, те, для которых установлен параметр voltage and current/voltage в пункте Measurements в настройках блоков модели.
  - *Sources* – установившиеся значения напряжения и тока электрических источников цепи.
  - *Nonlinear elements* – установившиеся напряжения и токи нелинейных блоков схемы.
- **Format**. Выбор требуемого формата чисел.
- **Ordering**. Выбор порядка отображения: «Имя – значение» или «Значение – Имя» для анализируемых переменных.

В левой нижней части окна Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool после нажатия кнопки «Update Steady-State Values» выводятся результаты моделирования в виде амплитуд и начальных фаз соответствующих токов и напряжений.

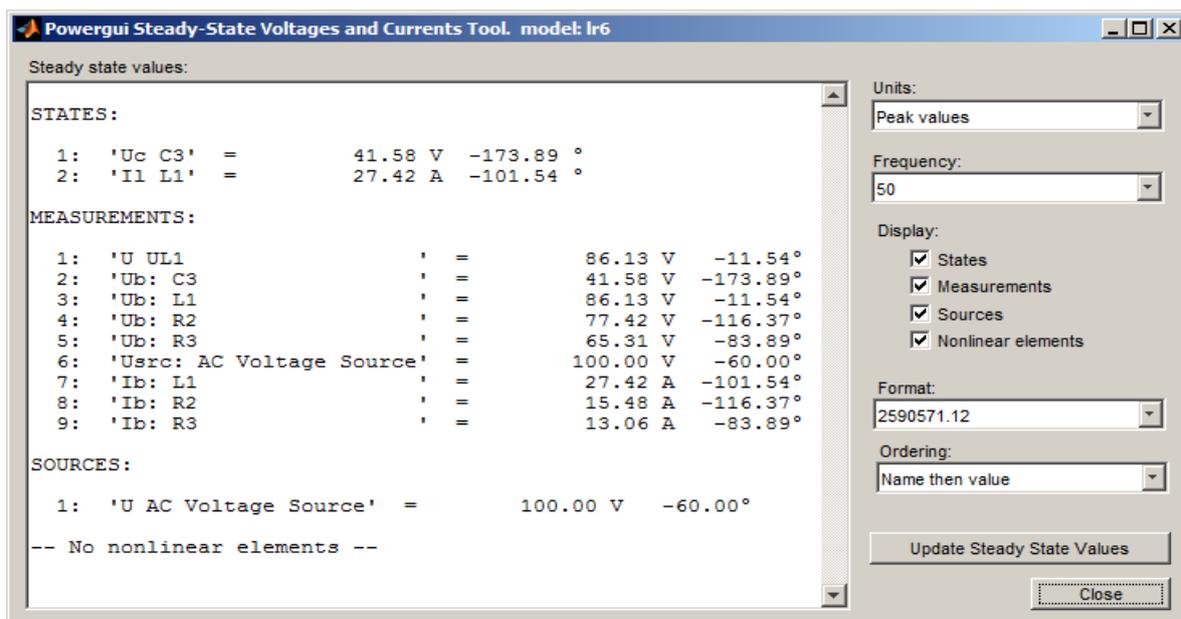


Рис. 6.2. Окно инструмента Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool

## Постановка задачи

На рис. 6.3 в качестве примера представлена схема замещения разветвлённой однофазной электрической цепи с одним источником переменной ЭДС.

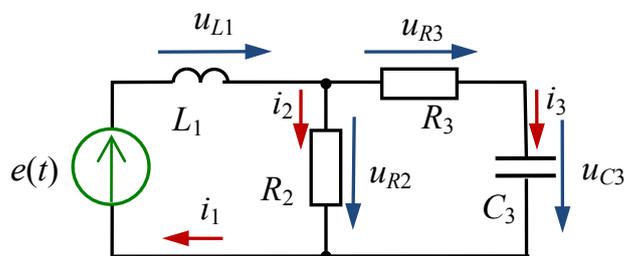


Рис. 6.3. Схема замещения однофазной электрической цепи

Цепь имеет следующие электрические параметры:

- мгновенное значение ЭДС источника цепи:  
 $e(t) = 100\sin(2\pi f \cdot t + 0^\circ)$ ,  $f = 50$  Гц;

- величины резистивных сопротивлений  $R_2 = R_3 = 10$  Ом;

- величина индуктивности  $L_1 = 100$  мГн;

- величина ёмкости  $C_3 = 100$  мкФ.

Циклическая частота ЭДС  $\omega$  задана в мгновенном значении  $e(t)$  через линейную частоту в Гц и равна 314,16 рад/с. Для всех переменных величин данной цепи она одинакова. Начальная фаза  $e(t)$  (из мгновенного значения)  $\psi_e = 0^\circ$ .

**Для вышеприведенной однофазной цепи необходимо:**

1. Найти мгновенные и действующие значения токов цепи.
2. Получить графики изменения токов цепи во времени.
3. Найти мгновенные и действующие значения напряжений на всех элементах.
4. Определить полную мощность цепи, в виде комплексного выражения, состоящего из активной и реактивной мощности цепи.

Математическое описание процессов, происходящих в цепи переменного тока, очень сложно, а расчёт синусоидальных величин трудно осуществим без использования специального программного обеспечения, такого как Simulink.

На основании изложенного, требуется провести моделирование и анализ разветвлённой однофазной электрической цепи в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimPowerSystems.

## Моделирование однофазной электрической цепи

На рис. 6.4, в качестве примера, представлена блок-схема модели разветвлённой однофазной электрической цепи с одним источником переменной ЭДС в Simulink.

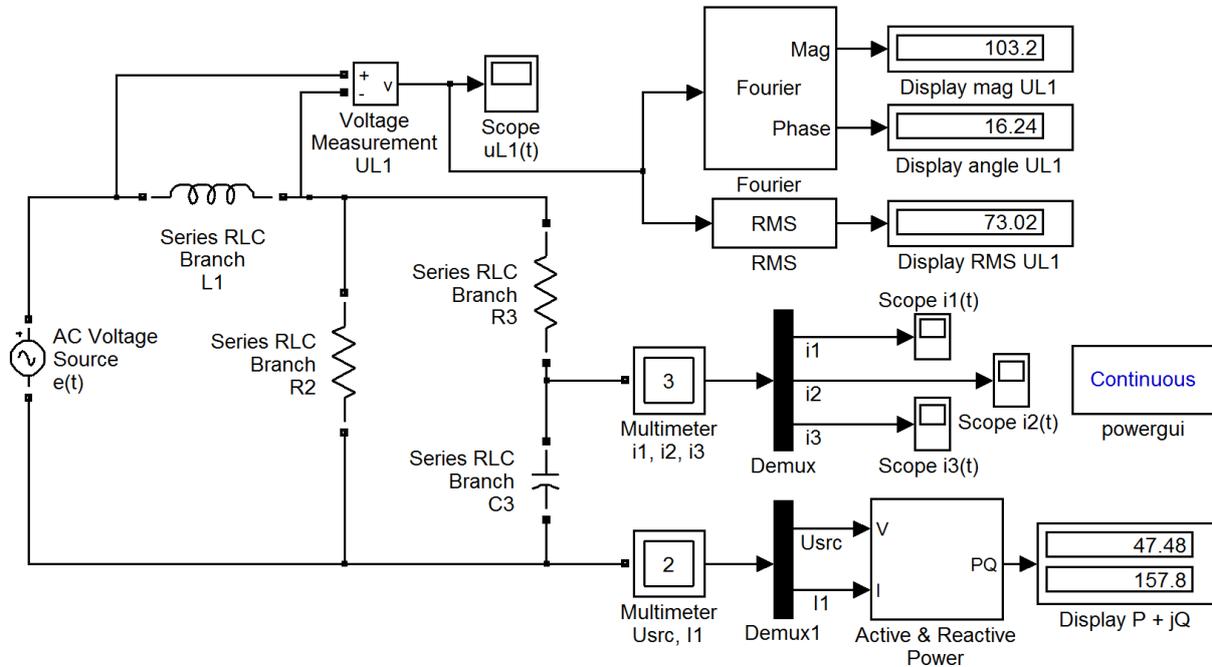


Рис. 6.4. Блок-схема модели разветвлённой однофазной электрической цепи в среде Simulink\SimPowerSystems

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Powergui** (SimPowerSystems\ ) – графический интерфейс пользователя. Нужен для функционирования модели.
- **AC Voltage Source** (SimPowerSystems\Electrical Sources) – идеальный источник переменного напряжения.
- **Series RLC Branch** (SimPowerSystems\Elements) – последовательное соединение RLC элементов. Элементы L1, R2, R3, C3.
- **Voltage Measurements** (SimPowerSystems\Measurements) – измеритель напряжения.
- **Fourier** (SimPowerSystems\Extra Library\Measurements) – предназначен для вычисления амплитуды и начальной фазы сигнала.
- **RMS** (SimPowerSystems\Extra Library\Measurements) – предназначен для вычисления действующего значения сигнала.
- **Multimeter** (SimPowerSystems\Measurements) – многофункциональный измеритель электрических величин.

- **Active & Reactive Power** (SimPowerSystems\Extra Library\Measurements) – блок активной и реактивной мощности измеряет активную мощность  $P$  и реактивную мощность  $Q$ , связанные с периодической парой напряжение-ток, которая может содержать гармоники.

- **Demux** (Simulink\Signal Routing) – разветвитель сигналов. Служит для выделения из многокомпонентного сигнала блока **Multimeter** отдельных сигналов измеряемых величин.

- **Display** (Simulink\Sinks) – виртуальный цифровой индикатор.

- **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели цепи производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** время моделирования выставляем 0,1 с, чтобы уместились 5 периодов величин, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с постоянным шагом вычислений 0,001 с (рис. 6.5).

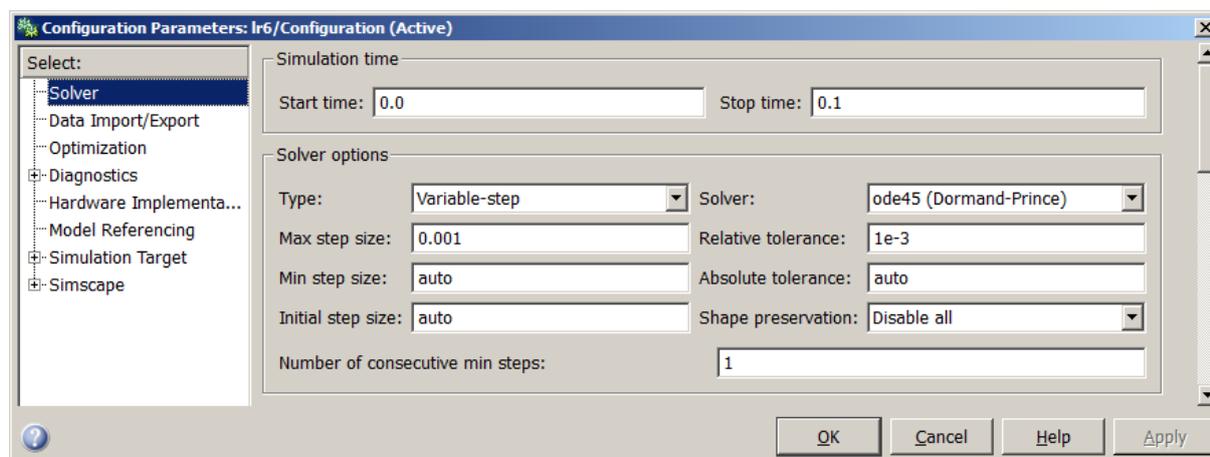


Рис. 6.5. Окно настройки решателя модели

**AC Voltage Source** – идеальный источник переменного напряжения. Параметры блока – амплитуда напряжения (ЭДС)  $E_m$  в вольтах; начальная фаза  $\psi_e = 0^\circ$ ; линейная частота  $f$  в герцах (рис. 6.6). В пункте **Measurements** (измерение) выбираем Voltage (напряжение) для дальнейшего использования функций автоматизированного гармонического анализа.

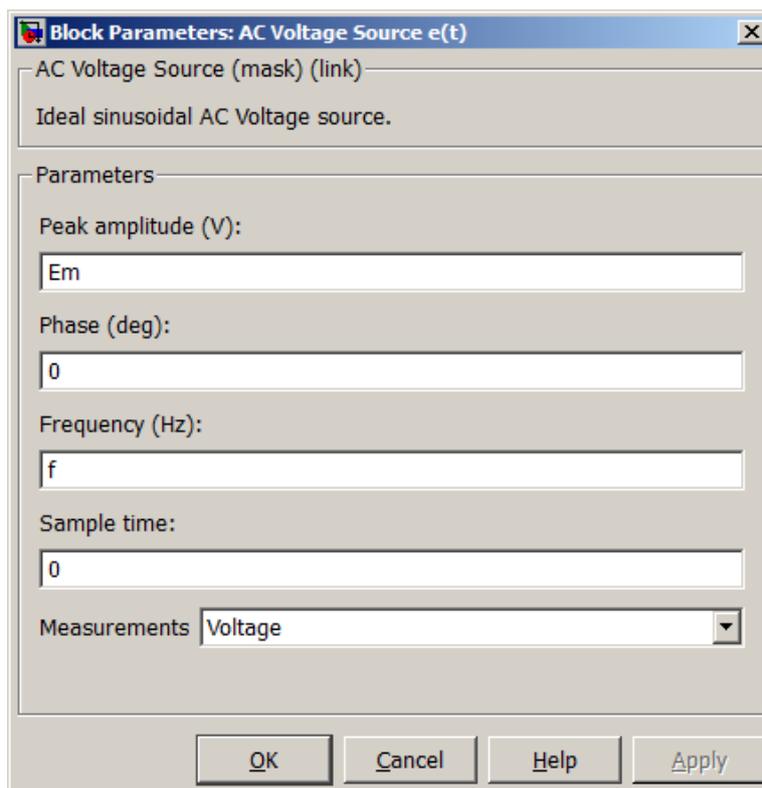


Рис. 6.6. Окно настройки блока AC Voltage Source

Блоки **Series RLC Branch (L1, R2, R3, C3)** – последовательное соединение RLC элементов. Параметры элементов, соответственно, сопротивление  $R$  в Ом, индуктивность  $L$  в Гн и ёмкость  $C$  в Ф. Для реализации каждого элемента по отдельности используем четыре блока Series RLC Branch, в каждом из которых выбирается только одна из трёх составляющих  $R$ ,  $L$  или  $C$  (рис. 6.7). В пункте **Measurements** (измерение) выбираем Branch voltage and current или просто Branch voltage (для элемента C3) для дальнейшего использования функций автоматизированного гармонического анализа.

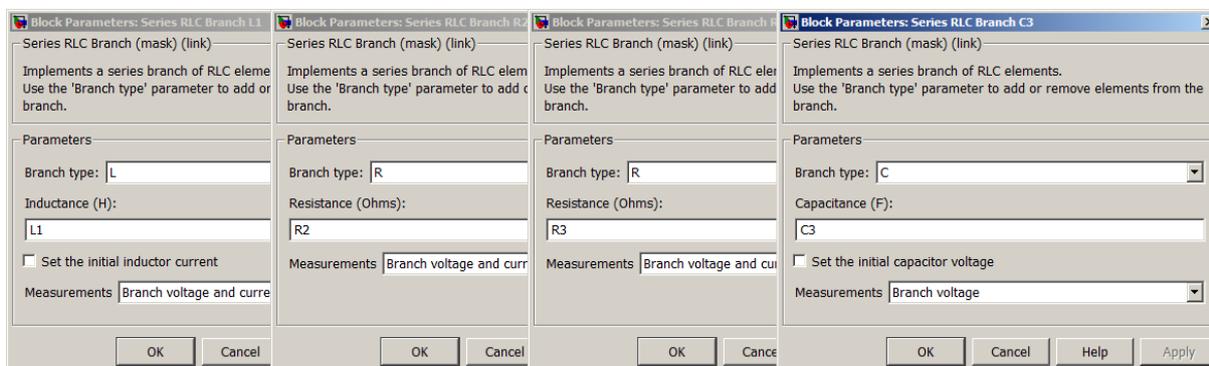


Рис. 6.7. Окно настройки блоков Series RLC Branch

Для получения мгновенного значения напряжения  $u_{L1}(t)$  используется виртуальный измеритель: вольтметр Voltage Measurement. Этот блок подключается к виртуальному осциллографу Scope  $u_{L1}(t)$ .

В блоках **Fourier** и **RMS** прописываем линейную частоту  $f$  в Гц (рис. 6.8). Значения параметров выводятся через блоки Display. Блок Fourier в данной модели выводит значения амплитуды и начальной фазы напряжения  $u_{L1}(t)$ . Блок RMS в данной модели выполняет вычисление действующего значения напряжения  $u_{L1}(t)$ .

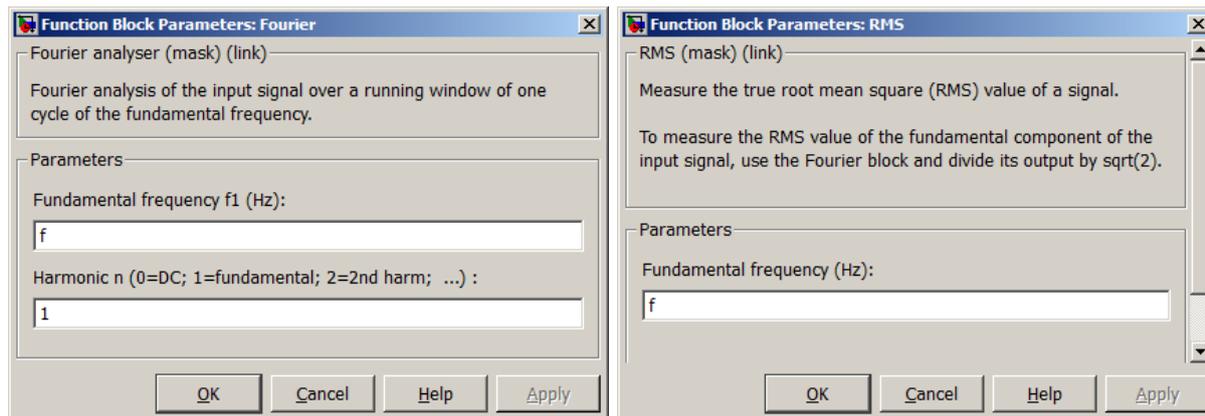


Рис. 6.8. Окно настройки блоков Fourier и RMS

Также для автоматизированного анализа и получения графиков токов и напряжений используется блок **Multimeter**. Блок подключается к любому месту цепи и имеет возможность выводить в одном комплексном сигнале множество измеряемых величин, тех, для которых установлен параметр voltage and current в пункте Measurements в настройках блоков модели.

Так блок **Multimeter i1, i2, i3** выводит сигналы токов  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$ . Они должны быть перенесены из левого поля блока в правое посредством специальных кнопок. Графики токов можно посмотреть как в виртуальных осциллографах Scope, так и вывести автоматически, установив галочку Plot selected measurements в настройках блока Multimeter (рис. 6.9). Графики автоматически появятся после запуска модели (рис. 6.10). Таким образом, можно анализировать все величины цепи.

Блок **Multimeter Usrc, I1** выводит сигналы напряжения источника и тока источника – тока первой ветви, протекающего через элемент L1 (рис. 6.11). В правом поле окна **Multimeter** должны находиться данные параметры.

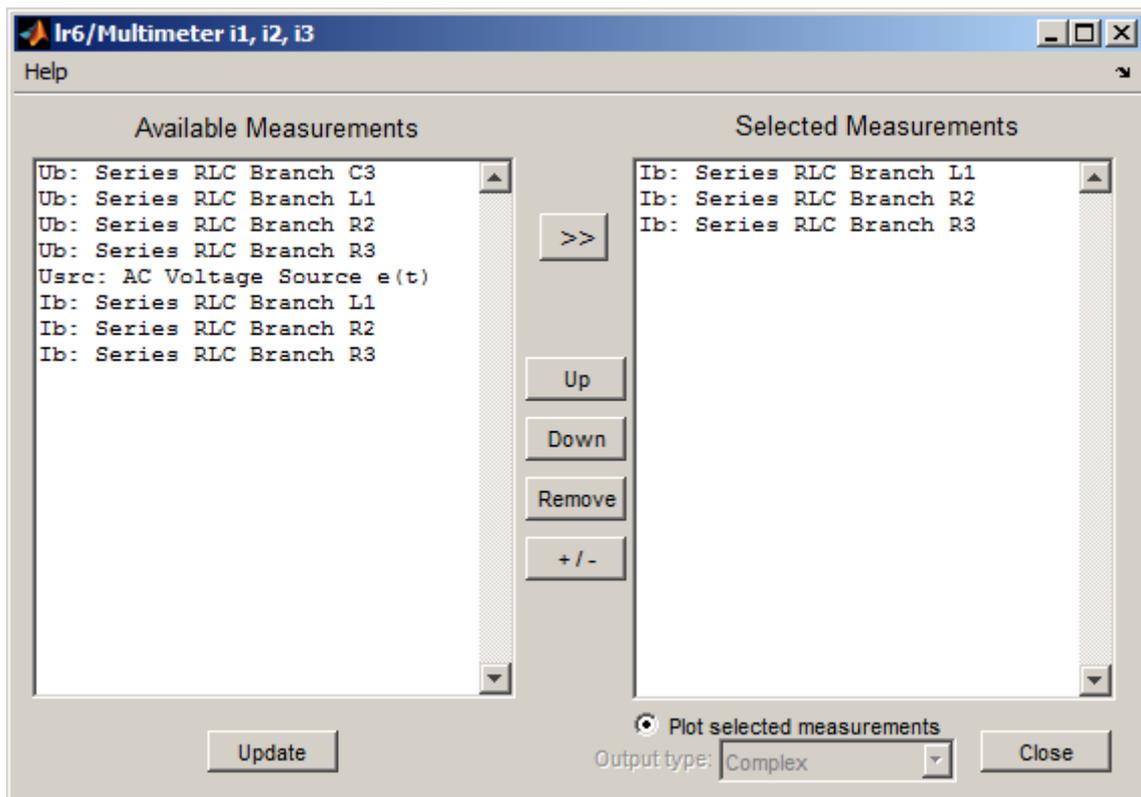


Рис. 6.9. Окно настройки блока Multimeter i1, i2, i3

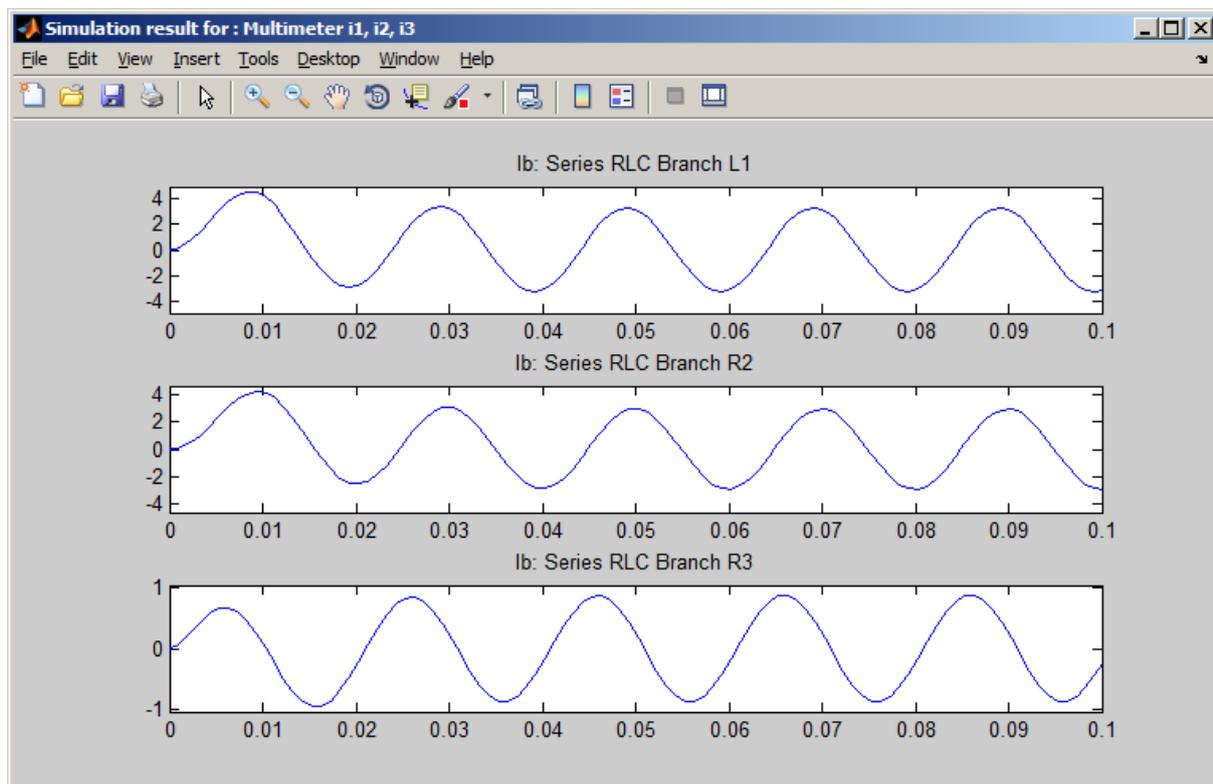


Рис. 6.10. Окно графиков токов  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$

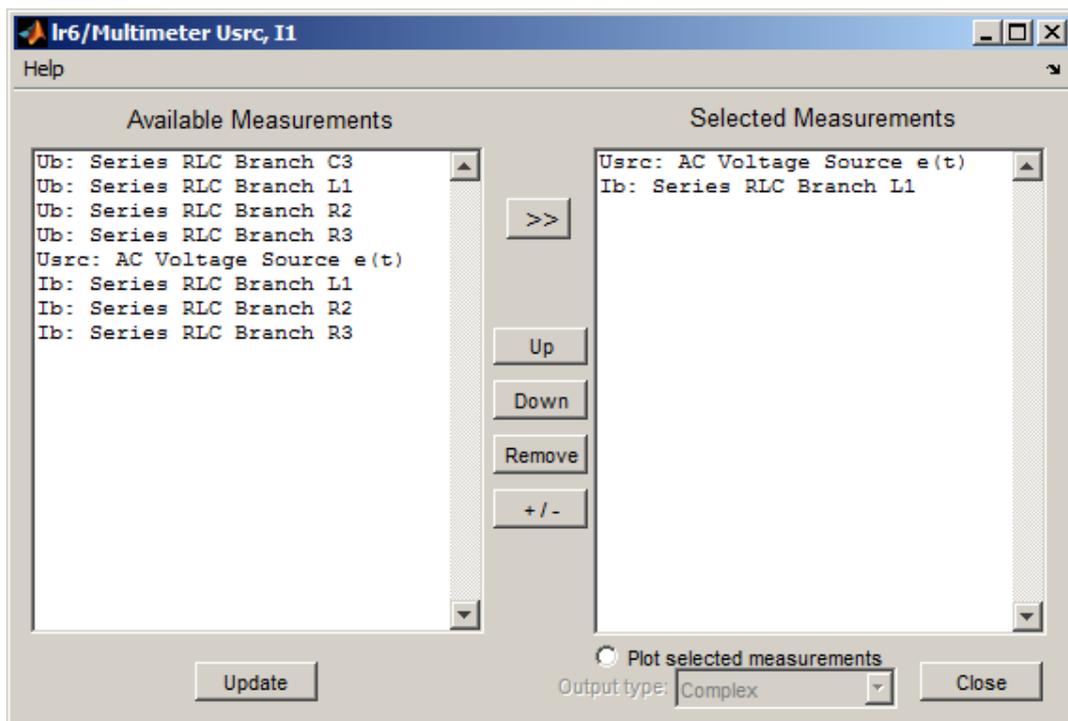


Рис. 6.11. Окно настройки блока Multimeter Usrc, I1

Для получения значения полной мощности цепи в виде её активной и реактивной составляющих:  $\underline{S} = P + jQ$  необходимо использовать блок **Active & Reactive Power**. Входами блока являются сигналы напряжения источника и тока источника, получаемые из блока Multimeter. В блоке Active & Reactive Power вводится линейная частота источника  $f$  (рис. 6.12). Значения параметров  $P$  и  $Q$  выводятся через блок Display.

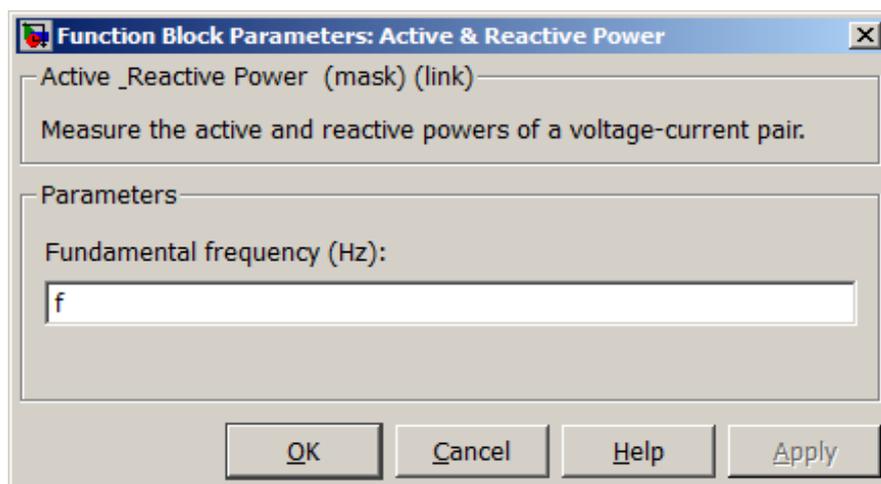


Рис. 6.12. Окно настройки блока Active & Reactive Power

Автоматизированный гармонический анализ для схемы выполняется с помощью блока Powergui и инструмента Steady-State Voltages and Currents (Установившийся режим напряжений и токов). В окне Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool (рис. 6.13) появятся все анализируемые переменные величины с требуемыми параметрами.

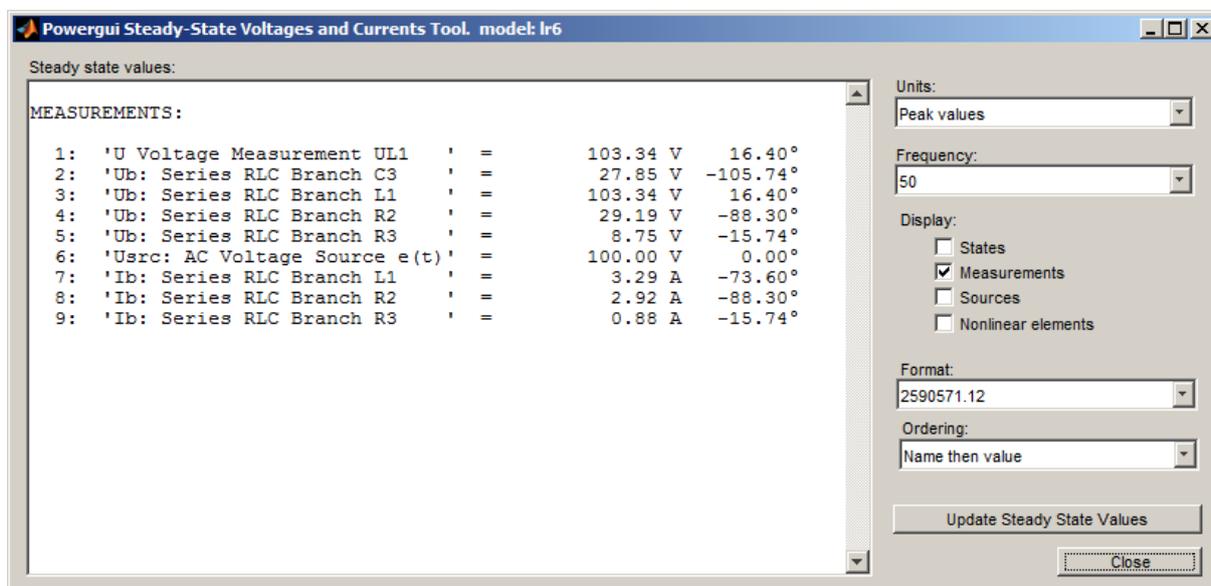


Рис. 6.13. Окно инструмента Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск. Результатами моделирования являются графики токов ветвей цепи  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  (см. рис. 6.10), значения активной и реактивной составляющих полной мощности цепи  $P + jQ$  (см. рис. 6.4) и результаты гармонического анализа с амплитудами и начальными фазами всех величин цепи (см. рис. 6.13).

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме своего варианта исходных данных (рис. 6.14) собрать в среде Simulink из блоков разделов SimPowerSystems модель однофазной электрической цепи.

2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 6.1) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.

3. Получить значения амплитуд, начальных фаз и действующих значений всех переменных токов и напряжений цепи, используя инструмент автоматизированного гармонического анализа.

4. Получить графики токов  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  через блок Multimeter.

5. Получить активную и реактивную составляющие полной мощности  $\underline{S} = P + jQ$  через блоки Multimeter и Active & Reactive Power.
6. Сделать анализ нагрузки цепи по полученной полной мощности  $\underline{S}$ .
7. Оформить отчёт по работе.

### Исходные данные для выполнения работы

Схемы моделируемых разветвлённых однофазных электрических цепей приведены на рис. 6.14. Варианты исходных данных – мгновенное значение ЭДС источника цепи, параметры элементов цепи и номер соответствующей схемы приведены в табл. 6.1.

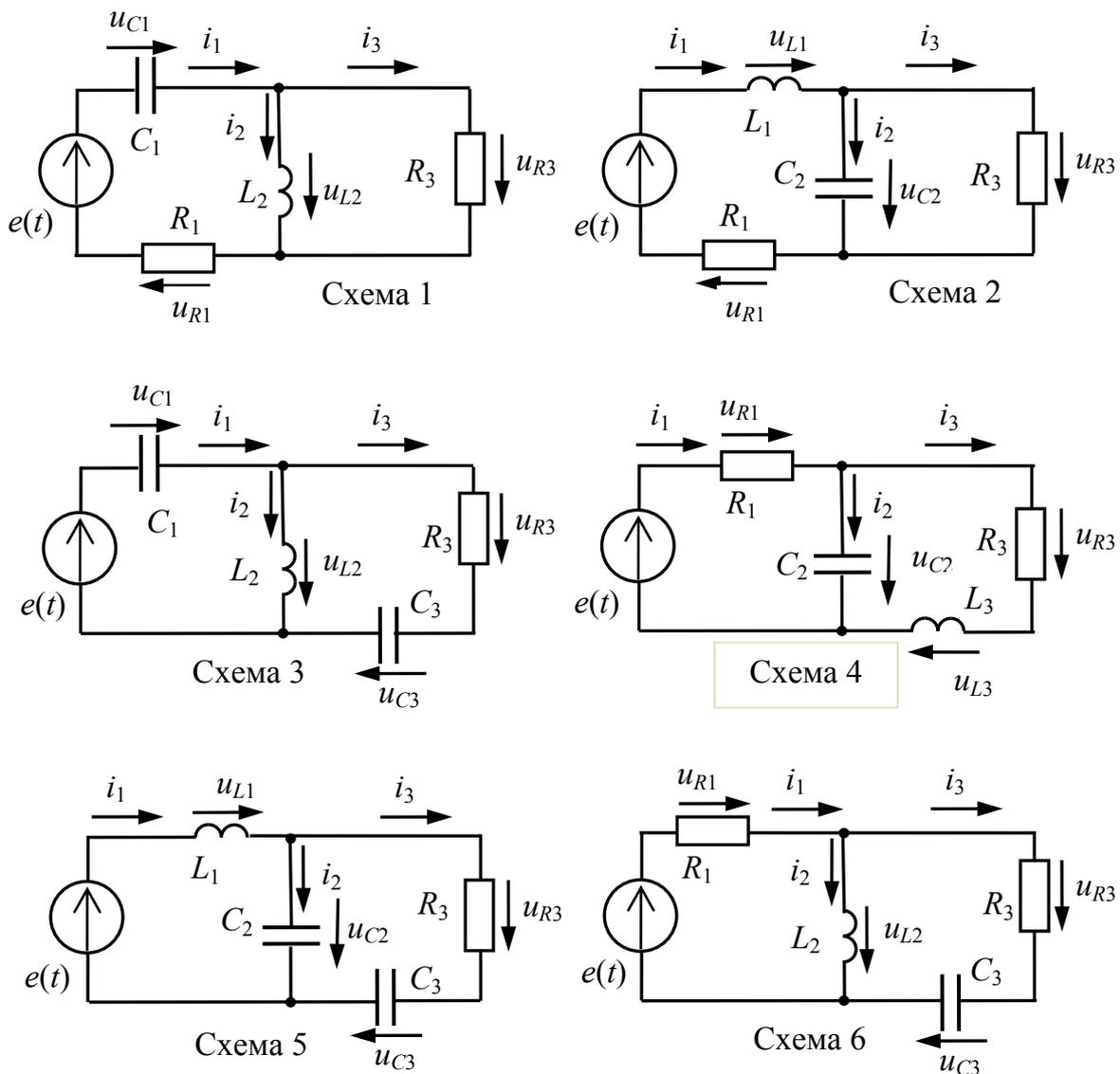


Рис. 6.14. Схемы замещения электрических цепей синусоидального тока

Таблица 6.1

**Параметры электрических цепей синусоидального тока**

| № вар. | Схема 1            |                    |                    |                    |  |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
|        | $R_1, \text{ Ом}$  | $C_1, \text{ мкФ}$ | $L_2, \text{ мГн}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 1      | 8,2                | 402,0              | 51,0               | 16,0               | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 2      | 12,1               | 316,0              | 75,0               | 21,5               | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 3      | 14,0               | 261,0              | 82,5               | 24,9               | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 4      | 16,9               | 215,0              | 95,3               | 31,6               | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 5      | 20,5               | 147,0              | 121,0              | 46,4               | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
|        | Схема 2            |                    |                    |                    |  |
|        | $R_1, \text{ Ом}$  | $L_1, \text{ мГн}$ | $C_2, \text{ мкФ}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 6      | 8,2                | 51,0               | 402,0              | 16,0               | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 7      | 12,1               | 75,0               | 316,0              | 21,5               | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 8      | 14,0               | 82,5               | 261,0              | 24,9               | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 9      | 16,9               | 95,3               | 215,0              | 31,6               | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 10     | 20,5               | 121,0              | 147,0              | 46,4               | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
|        | Схема 3            |                    |                    |                    |  |
|        | $C_1, \text{ мкФ}$ | $L_2, \text{ мГн}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $C_3, \text{ мкФ}$ | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 11     | 402,0              | 51,0               | 14,7               | 402,0              | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 12     | 316,0              | 75,0               | 21,5               | 316,0              | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 13     | 261,0              | 82,5               | 31,6               | 261,0              | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 14     | 215,0              | 95,3               | 46,4               | 215,0              | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 15     | 147,0              | 121,0              | 56,2               | 147,0              | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
|        | Схема 4            |                    |                    |                    |  |
|        | $R_1, \text{ Ом}$  | $C_2, \text{ мкФ}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $L_3, \text{ мГн}$ | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 16     | 16,0               | 402,0              | 8,2                | 51,0               | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 17     | 21,5               | 316,0              | 12,1               | 75,0               | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 18     | 24,9               | 261,0              | 14,0               | 82,5               | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 19     | 31,6               | 215,0              | 16,9               | 95,3               | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 20     | 46,4               | 147,0              | 20,5               | 121,0              | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
|        | Схема 5            |                    |                    |                    |  |
|        | $L_1, \text{ мГн}$ | $C_2, \text{ мкФ}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $C_3, \text{ мкФ}$ | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 21     | 24,9               | 402,0              | 9,0                | 402,0              | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 22     | 36,5               | 316,0              | 11,0               | 316,0              | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 23     | 53,6               | 261,0              | 16,0               | 261,0              | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 24     | 78,7               | 215,0              | 30,0               | 215,0              | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 25     | 115,0              | 147,0              | 36,5               | 147,0              | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
|        | Схема 6            |                    |                    |                    |  |
|        | $R_1, \text{ Ом}$  | $L_2, \text{ мГн}$ | $R_3, \text{ Ом}$  | $C_3, \text{ мкФ}$ | $e(t), \text{ В}$                                      |
| 26     | 16,0               | 51,0               | 8,2                | 402,0              | $e(t) = 24\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 27     | 21,5               | 75,0               | 12,1               | 316,0              | $e(t) = 36\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 28     | 24,9               | 82,5               | 14,0               | 261,0              | $e(t) = 42\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 29     | 31,6               | 95,3               | 16,9               | 215,0              | $e(t) = 54\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |
| 30     | 46,4               | 121,0              | 20,5               | 147,0              | $e(t) = 72\sin(\omega t + 0^\circ), f = 50 \text{ Гц}$ |

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace. При задании значений параметров модели необходимо учитывать приставки единиц измерения, применяемые в табл. 6.1:  $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$ ;  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема замещения разветвлённой однофазной электрической цепи и численные значения параметров цепи.
3. Схема модели разветвлённой однофазной электрической цепи в среде Simulink\SimPowerSystems с окнами задания параметров модели.
4. Значения амплитуд, начальных фаз и действующих значений всех переменных токов и напряжений схемы цепи.
5. Графики токов  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$ .
6. Комплексное выражение полной мощности  $\underline{S} = P + jQ$ .
7. Вывод по работе (анализ нагрузки цепи).

### Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimPowerSystems?
2. Какие типы источников и приёмников электрической энергии моделируют блоки библиотеки SimPowerSystems?
3. Поясните расчётную схему и параметры разветвлённой однофазной электрической цепи.
4. Перечислите единицы измерения параметров элементов цепи.
5. Опишите назначение и параметры блоков, образующих схему модели разветвлённой однофазной электрической цепи в среде Simulink\SimPowerSystems.
6. Что такое полная мощность цепи переменного тока?
7. Как по полученным результатам моделирования определить коэффициент мощности цепи?
8. Какие результаты и параметры дает автоматизированный гармонический анализ?
9. Для чего нужен блок Powergui?

## Лабораторная работа № 7

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы** – моделирование и исследование однофазного трансформатора напряжения.

#### Общие сведения о моделировании однофазных трансформаторов в SimPowerSystems

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, имеющий две (или более) индуктивно связанные обмотки и служащий для преобразования энергии переменного тока с одними параметрами в энергию переменного тока с другими параметрами [12].

Трансформаторы позволяют передавать мощность от источника к приёмнику при разных напряжениях и токах. Трансформаторы используются для преобразования электрической энергии при передаче её на расстояния, во вторичных источниках электропитания и в различных электронных схемах [12].

Основные рабочие параметры трансформатора [12]:

- номинальные первичное и вторичное напряжения  $U_{1H}$  и  $U_{2H}$ ;
- номинальная полная мощность  $S_H$ ;
- ток и потери мощности холостого хода  $I_{10}(I_{XX})$  и  $P_{10}(P_{XX})$ ;
- напряжение и потери мощности короткого замыкания  $u_{k\%}$  и  $P_{1K}(P_{K3})$ ;
- коэффициент трансформации  $k$ ;
- схема и группа соединений обмоток;
- коэффициент нагрузки трансформатора  $\beta$ ;
- коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$ .

Принцип действия однофазного трансформатора состоит в следующем: к первичной обмотке А–Х подводится питающее напряжение  $U_1$  с частотой  $f_1$ . Со вторичной обмотки а–х снимается напряжение  $U_2$ , которое подводится к потребителю электрической энергии (рис. 7.1).

Каждая обмотка характеризуется количеством витков ( $w_1$  у первичной и  $w_2$  у вторичной), активным  $R_i$ , реактивным индуктивным  $X_i$  и полным  $Z_i$  сопротивлениями.

На рис. 7.1 указаны условно положительные направления токов, МДС и магнитного потока трансформатора с учётом правила Ленца при заданных направлениях навивки и расположений обмоток.

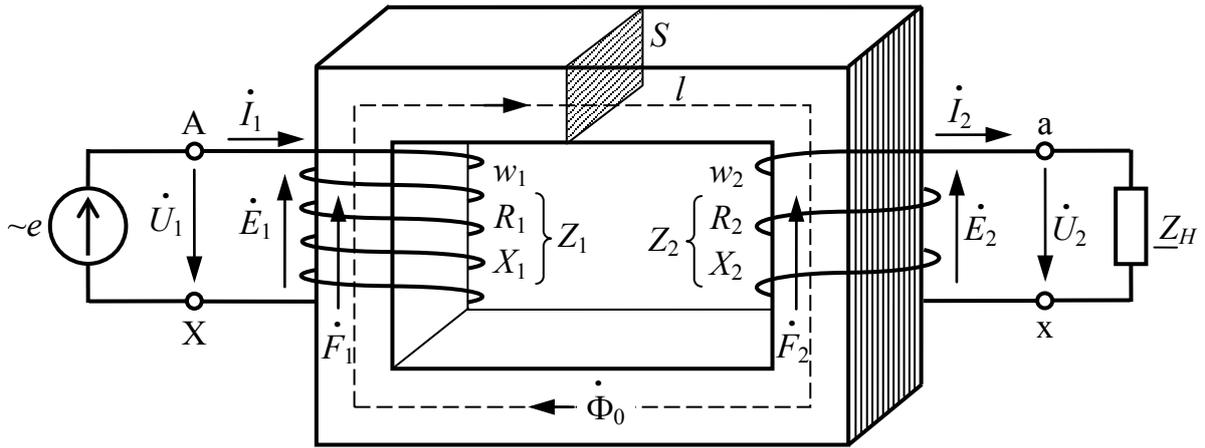


Рис. 7.1. Схема замещения однофазного трансформатора

Под действием напряжения, приложенного к первичной обмотке, в ней протекает ток  $I_1$ , произведение  $I_1 w_1$  является МДС первичной обмотки  $F_1$ , а произведение  $I_2 w_2$  – МДС вторичной обмотки  $F_2$ . Результирующая МДС  $F_0$  определяет величину *основного переменного магнитного потока*  $\Phi_0$ , замыкающегося по магнитопроводу [12].

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 - \dot{F}_2 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2 ; \quad (7.1)$$

$$\dot{\Phi}_0 = \frac{\dot{F}_0}{R_M} = \frac{\mu_a S}{l} \dot{F}_0 ; \quad (7.2)$$

$$\Phi_0 = \Phi_{0\max} \sin \omega t , \quad (7.3)$$

где  $R_M$  – магнитное сопротивление материала сердечника;  $l$  – длина средней магнитной линии сердечника;  $S$  – площадь сечения сердечника;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника;  $\omega$  – циклическая частота напряжения в первичной обмотке.

Основной переменный магнитный поток  $\Phi_0$  наводит ЭДС *самоиндукции* в первичной обмотке  $E_1$  и ЭДС *взаимоиндукции*  $E_2$  – во вторичной. По отношению к нагрузке вторичная обмотка трансформатора является источником электрической энергии с ЭДС  $E_2$  [12].

Мгновенные и действующие значения ЭДС обмоток [12]:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} ; \quad (7.4)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} ; \quad (7.5)$$

$$E_1 = \omega w_1 \Phi_{0\max} / \sqrt{2} = 4,44 f w_1 \Phi_{0\max} ; \quad (7.6)$$

$$E_2 = \omega w_2 \Phi_{0\max} / \sqrt{2} = 4,44 f w_2 \Phi_{0\max} . \quad (7.7)$$

Помимо ЭДС, наводимых в обмотках основным переменным магнитным потоком  $\Phi_0$  в сердечнике, в них также наводятся ЭДС рассеяния  $E_S$  переменными магнитными потоками рассеяния  $\Phi_S$ , замыкающимися по немагнитной среде (воздух, масло, медь и др.). Магнитные потоки рассеяния уменьшают степень электромагнитной связи обмоток, однако в связи с их малыми значениями относительно  $\Phi_0$  данными величинами и наводимыми ими ЭДС можно пренебречь.

Коэффициент трансформации трансформатора находится как отношение действующего значения ЭДС обмотки высшего напряжения к действующему значению ЭДС обмотки низшего напряжения или как отношение числа витков обмоток [12]:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (7.8)$$

На основании второго закона Кирхгофа можно записать уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмотки [12]:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \quad (7.9)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \dot{I}_2. \quad (7.10)$$

Номинальной полной мощностью трансформатора называется указанное в паспорте значение полной мощности, на которую трансформатор может быть нагружен непрерывно в номинальных условиях установки при номинальной частоте и напряжении [12]:

$$S_H = U_{2H} I_{2H} \approx U_{1H} I_{1H}. \quad (7.11)$$

В режиме нагрузки трансформатора получают *нагрузочные характеристики* – зависимости напряжения вторичной обмотки  $U_2$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  и КПД трансформатора  $\eta$  от тока нагрузки  $I_2$  при  $\cos\varphi_2 = \text{const}$  и  $U_1 = \text{const}$  (рис. 7.2) [12].

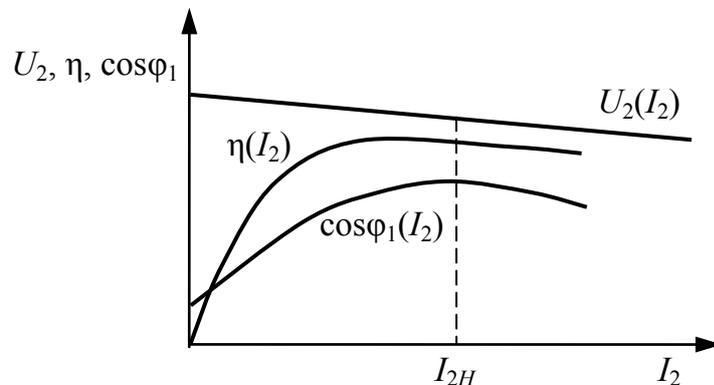


Рис. 7.2. Нагрузочные характеристики трансформатора

Выражения для определения КПД трансформатора [12]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Зависимость  $U_2(I_2)$  является *внешней характеристикой* трансформатора. Согласно выражению (7.10), изменение тока нагрузки трансформатора  $I_2$  приводит к изменению напряжения  $U_2$  на зажимах его вторичной обмотки [12].

КПД трансформатора  $\eta$  в номинальном режиме обычно составляет от 80 до 95% и представляет собой отношение полезной мощности к мощности, потребляемой им из сети, а также может определяться через мощность нагрузки с учетом магнитных и электрических потерь.

Электрические потери  $P_{\Sigma}$  являются переменными, так как их величина зависит от величин токов в обмотках или от *коэффициента нагрузки* трансформатора  $\beta$ . При неизменном первичном напряжении ( $U_1 = \text{const}$ ) магнитные потери  $P_M$  постоянны, т. е. не зависят от нагрузки трансформатора. Максимально возможный КПД трансформатора достигается при чисто активной нагрузке  $\cos\varphi_2 = 1$  [12].

Однофазные и трёхфазные трансформаторы моделируются в Simulink с помощью блоков раздела **Elements** библиотеки SimPowerSystems (см. рис. 5.4) [13].

**Linear Transformer** – линейный трансформатор. Блок моделирует линейный двух- или трёхобмоточный трансформатор (рис. 7.3). Параметры модели [13]:

- **Nominal power and frequency** – номинальная полная мощность  $P_n$  [ВА] и частота тока трансформатора  $f_n$  [Гц].
- **Winding 1 parameters** – электрические параметры первичной обмотки:
  - $V_1$  – номинальное напряжение первичной обмотки [В];
  - $R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки [Ом];
  - $L_1$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки [Гн].
- **Winding 2 parameters** – электрические параметры вторичной обмотки:
  - $V_2$  – номинальное напряжение вторичной обмотки [В];
  - $R_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки [Ом];
  - $L_2$  – индуктивность рассеяния вторичной обмотки [Гн].
- **Magnetization resistance and inductance** – магнитное сопротивление  $R_m$  [Ом] и индуктивность  $L_m$  [Гн] магнитной цепи трансформатора.

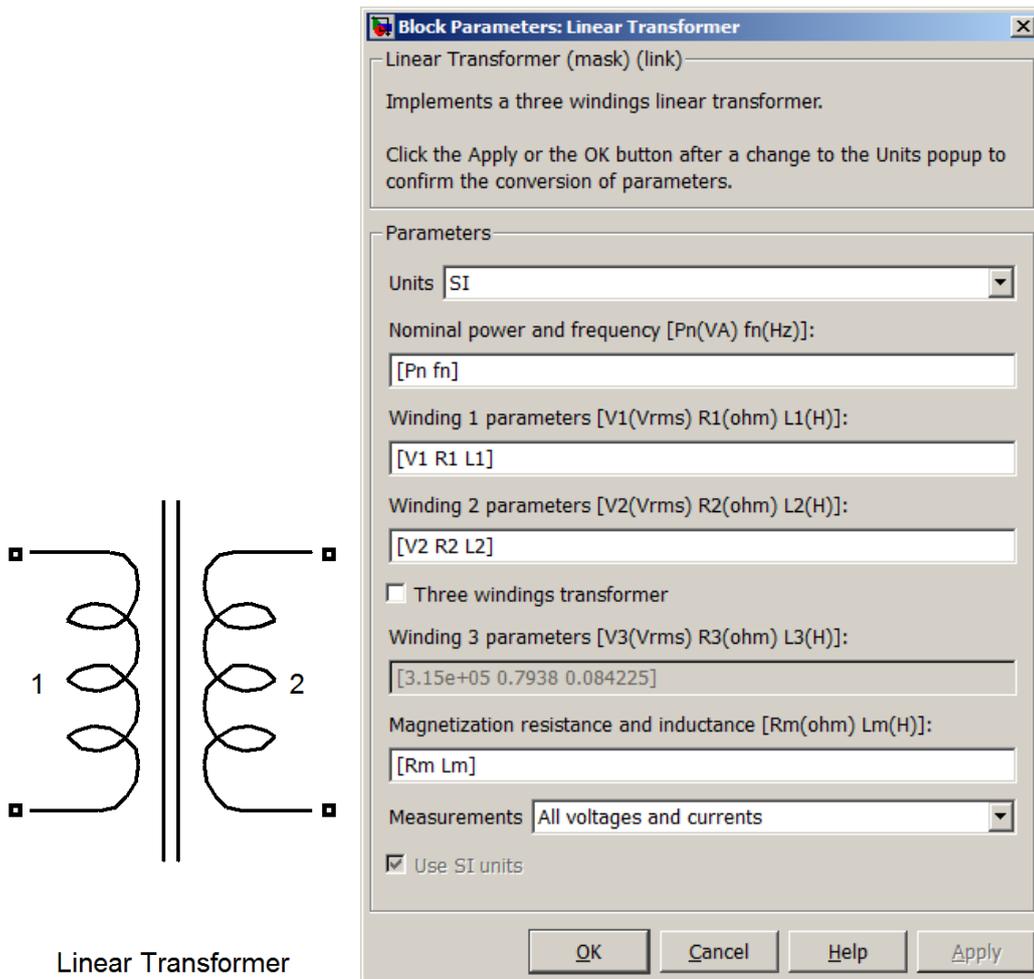


Рис. 7.3. Модель линейного однофазного трансформатора в SimPowerSystems

Приведем в соответствие обозначение параметров модели трансформатора в SimPowerSystems с общепринятыми обозначениями в отечественной литературе.

Номинальная полная мощность трансформатора  $P_n - S_H$ , ВА.

Линейная частота  $f_n - f$ , Гц.

Номинальное напряжение первичной обмотки:  $V_1 - U_{1H}$ , В.

Номинальное напряжение вторичной обмотки:  $V_2 - U_{2H}$ , В.

Все параметры модели линейного трансформатора могут быть определены через паспортные характеристики аппарата [12].

Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{U_{1H}^2}{S_H} \frac{u_{k\%}}{100\%} \cos \varphi_k \text{ [Ом]}, \quad (7.13)$$

где  $u_{k\%}$  – напряжение короткого замыкания;  $\cos \varphi_k$  – коэффициент мощности короткого замыкания.

Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = \frac{R_1}{k^2} = R_1 \left( \frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \text{ [Ом]}, \quad (7.14)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Индуктивное сопротивление и индуктивность первичной обмотки

$$X_1 = \frac{1}{2} \frac{U_{1H}^2}{S_H} \frac{u_{k\%}}{100\%} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k^2} \text{ [Ом]}; \quad (7.15)$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} \text{ [Гн]}. \quad (7.16)$$

Индуктивное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки

$$X_2 = \frac{X_1}{k^2} = X_1 \left( \frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \text{ [Ом]}; \quad (7.17)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} \text{ [Гн]}. \quad (7.18)$$

Магнитное сопротивление и индуктивность магнитной цепи

$$R_m = \frac{U_{1H}^2}{S_H} \frac{100\%}{I_{10\%}} \text{ [Ом]}; \quad (7.19)$$

$$X_m = R_m \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0^2} \text{ [Ом]}; \quad (7.20)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \text{ [Гн]}, \quad (7.21)$$

где  $I_{10}$  – ток мощности холостого хода, в процентах от номинального;  $\cos \varphi_0$  – коэффициент мощности холостого хода.

### Постановка задачи

На рис. 7.4 представлена принципиальная схема линейного однофазного двухобмоточного трансформатора напряжения  $T$ , работающего на переменную нагрузку  $R_H$ . Трансформатор питается от источника переменного напряжения с действующим значением, равным номинальному напряжению первичной обмотки  $U_{1H}$ .

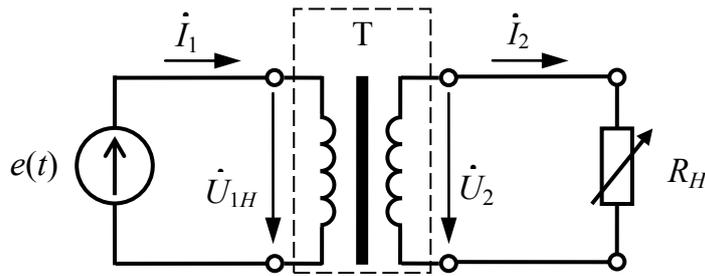


Рис. 7.4. Схема принципиальная трансформатора

**Для вышеприведенного трансформатора необходимо:**

1. Найти действующие значения напряжений и токов, активную и реактивную составляющие полной мощности  $\underline{S} = P + jQ$  первичной и вторичной обмотки для заданного сопротивления нагрузки.
2. Коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  первичной обмотки и КПД трансформатора  $\eta$  для заданного сопротивления нагрузки.
3. Получить и построить нагрузочные характеристики трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$  при изменении  $S_2$  от 0 до  $1,1S_H$ .

Расчёт параметров трансформатора трудноосуществим без использования специального программного обеспечения, такого как Simulink. Поэтому требуется провести моделирование и исследование однофазного трансформатора напряжения в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimPowerSystems.

### Моделирование однофазного трансформатора

На рис. 7.5 представлена блок-схема модели линейного однофазного двухобмоточного трансформатора в среде Simulink.

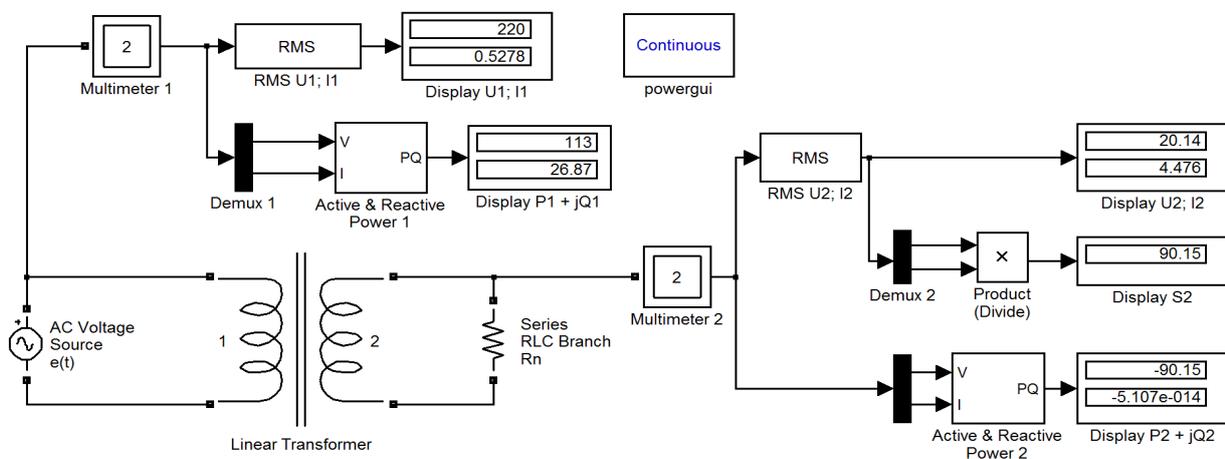


Рис. 7.5. Блок-схема модели трансформатора в среде Simulink\SimPowerSystems

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Powergui** (SimPowerSystems\ ) – графический интерфейс пользователя. Нужен для функционирования модели.
- **AC Voltage Source** (SimPowerSystems\Electrical Sources) – идеальный источник переменного напряжения.
- **Linear Transformer** (SimPowerSystems\Elements) – линейный трансформатор.
- **Series RLC Branch** (SimPowerSystems\Elements) – последовательное соединение RLC элементов. Элемент Rn.
- **RMS** (SimPowerSystems\Extra Library\Measurements) – предназначен для вычисления действующего значения сигнала.
- **Multimeter** (SimPowerSystems\Measurements) – многофункциональный измеритель электрических величин.
- **Active & Reactive Power** (SimPowerSystems\ExtraLibrary\Measurements) – блок активной и реактивной мощности измеряет активную мощность  $P$  и реактивную мощность  $Q$ , связанные с периодической парой напряжение-ток, которая может содержать гармоники.
- **Product (Divide)** (Simulink\Math Operations) – блок произведения/деления, он производит произведение/деления входных скалярных или векторных входных сигналов.
- **Demux** (Simulink\Signal Routing) – разветвитель сигналов. Служит для выделения из многокомпонентного сигнала блока **Multimeter** отдельных сигналов измеряемых величин.
- **Display** (Simulink\Sinks) – виртуальный цифровой индикатор. Для примера рассмотрим следующие параметры трансформатора:
  - номинальная полная мощность  $S_H = 90$  ВА;
  - ток холостого хода (в процентах от номинального)  $I_{10\%} = 18,5\%$ ;
  - коэффициент мощности холостого хода  $\cos\varphi_0 = 0,12$ ;
  - коэффициент мощности короткого замыкания  $\cos\varphi_k = 0,55$ ;
  - напряжения короткого замыкания в процентах  $u_{k\%} = 11\%$ ;
  - сопротивления нагрузки трансформатора  $R_H = 4,5$  Ом.

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели цепи производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** время моделирования выставляем 0,1 с, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с автоматическим шагом вычислений (рис. 7.6).

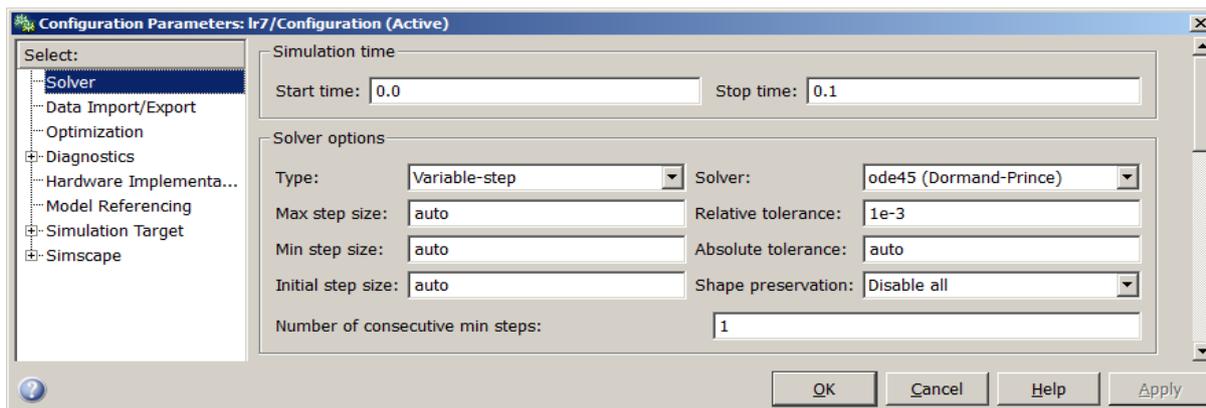


Рис. 7.6. Окно настройки решателя модели

**AC Voltage Source** – идеальный источник переменного напряжения. Параметры блока – амплитуда напряжения  $V = \sqrt{2} \cdot U_{1H}$  (V1) В; начальная фаза  $0^\circ$ ; линейная частота  $f_n = 50$  Гц (рис. 7.7).

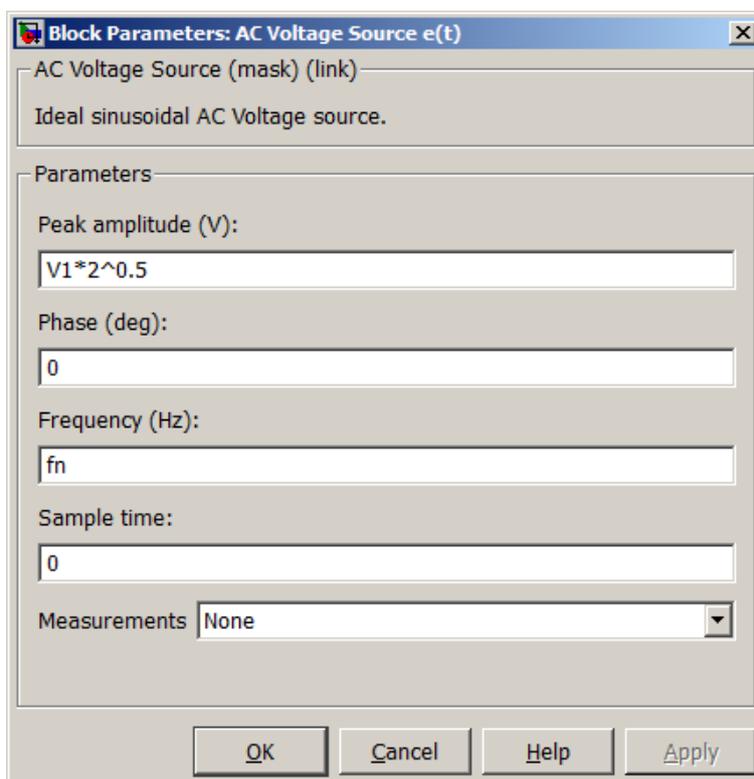


Рис. 7.7. Окно настройки блока AC Voltage Source

**Linear Transformer** – линейный трансформатор. Параметры блока описаны выше в общих сведениях по работе (см. рис. 7.3).

Используя формулы (7.13) – (7.21) и паспортные параметры трансформатора, получим параметры модели трансформатора в SimPowerSystems:

- электрические параметры первичной обмотки: номинальное напряжение  $U_{1H} = 220$  В; активное сопротивление  $R_1 = 16,2$  Ом; индуктивность  $L_1 = 78,3$  мГн;
- электрические параметры вторичной обмотки: номинальное напряжение  $U_{2H} = 22$  В; активное сопротивление  $R_2 = 0,162$  Ом; индуктивность  $L_2 = 0,78$  мГн;
- параметры магнитной цепи трансформатора: магнитное сопротивление  $R_m = 2900$  Ом и индуктивность  $L_m = 9,2$  Гн.

В единицах измерения (см. рис. 7.3) выбираем единицы СИ (SI).

Блоки **Series RLC Branch (Rn)** – последовательное соединение RLC элементов. Параметры элементов, соответственно, сопротивление  $R$  в Ом, индуктивность  $L$  в Гн и ёмкость  $C$  в Ф. Для реализации чисто активной нагрузки на вторичной обмотке трансформатора в блоке выбирается составляющая  $R$  и задается её значение Rn в Ом (рис. 7.8).

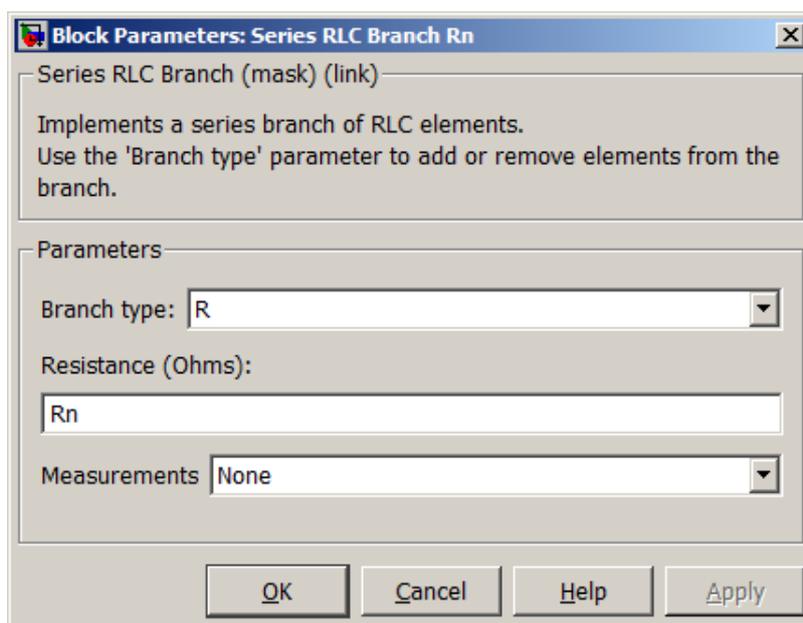


Рис. 7.8. Окно настройки блока Series RLC Branch

Для измерений напряжений и токов используются блоки **Multi-meter** (мультиметр) (рис. 7.9) – один для напряжения и тока первичной обмотки, второй для напряжения и тока вторичной обмотки (должен быть установлен параметр **all voltage and current** в пункте Measurements в настройках блока Linear Transformer).

RMS блоки выполняет вычисление действующих значений напряжений и токов первичной и вторичной обмоток. В блоках **RMS** прописываем линейную частоту  $f_n = 50$  Гц (рис. 7.10). Значения параметров выводятся через блоки **Display**.

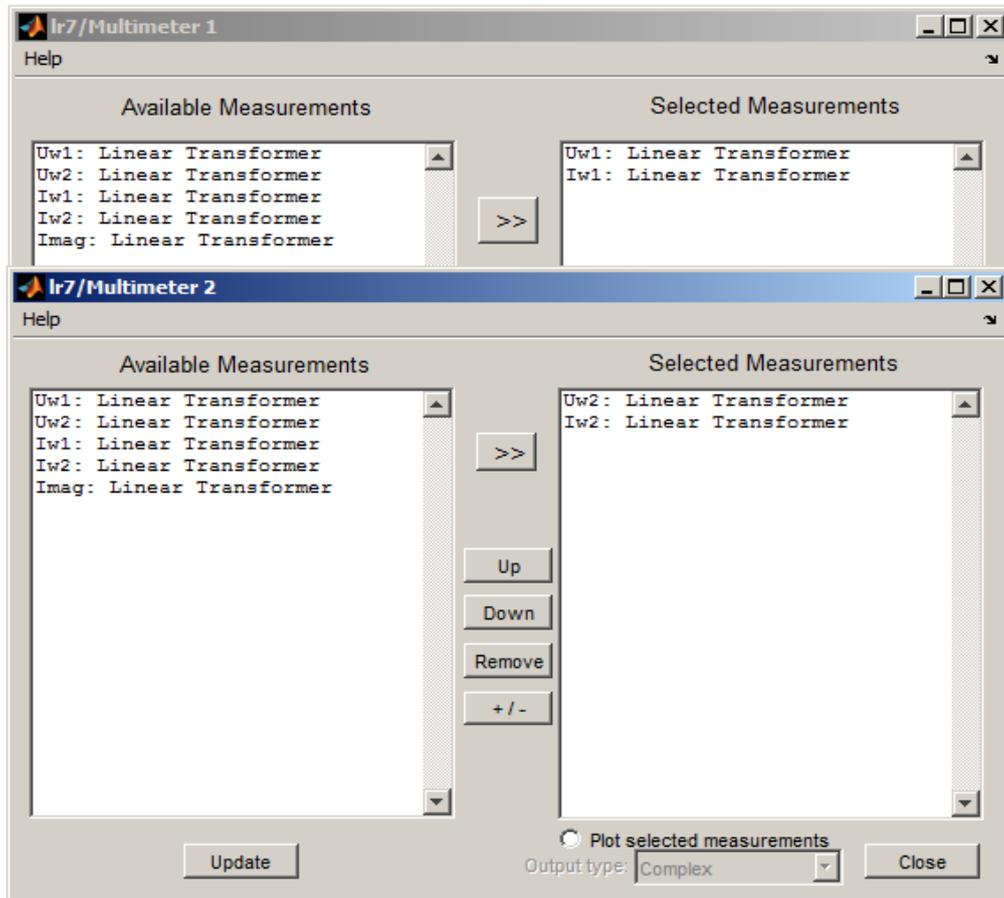


Рис. 7.9. Окна настройки блоков Multimeter 1 и Multimeter 2

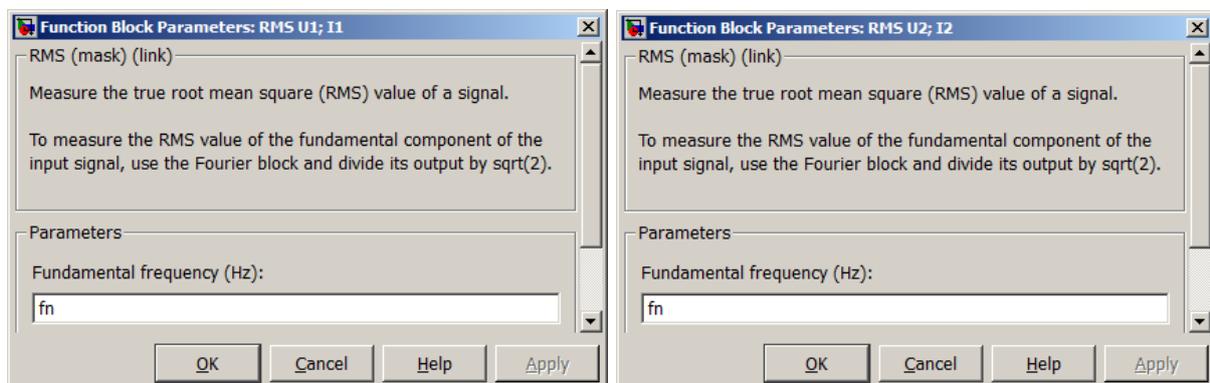


Рис. 7.10. Окна настройки блоков RMS

Для получения значения полной мощности цепи в виде её активной и реактивной составляющих:  $\underline{S} = P + jQ$  необходимо использовать блок **Active & Reactive Power**. Входами блока являются сигналы напряжения источника и тока источника, получаемые из блока Multimeter. В блоке Active & Reactive Power вводится линейная частота источника  $f_n = 50$  Гц (рис. 7.11). Значения параметров  $P$  и  $Q$  выводятся через блок **Display**.

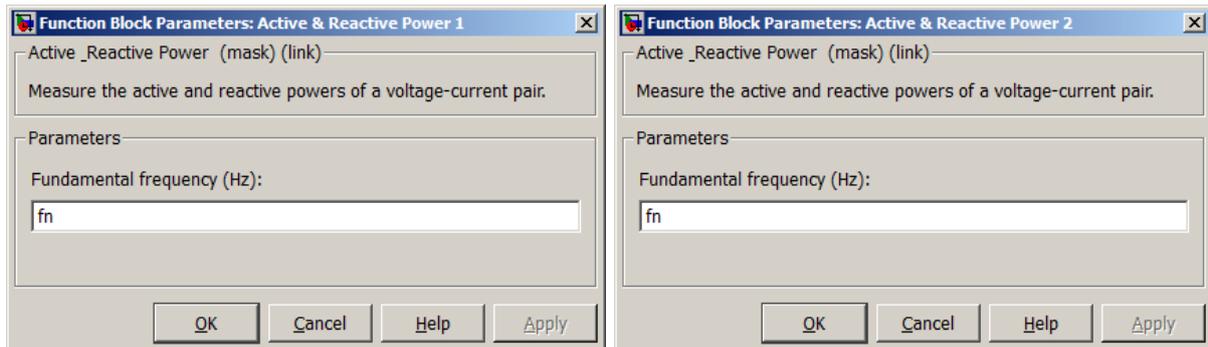


Рис. 7.11. Окна настройки блоков Active & Reactive Power

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск. Результатами моделирования являются действующие значения напряжений и токов первичной  $U_1$ ;  $I_1$  и вторичной  $U_2$ ;  $I_2$  обмоток, значения активной и реактивной составляющих полной мощности первичной  $P_1 + jQ_1$  и вторичной  $P_2 + jQ_2$  обмоток, а также величина полной мощности вторичной обмотки  $S_2$  (см. рис. 7.5). Знак « $\leftarrow$ » у выходных мощностей  $P_2 + jQ_2$  связан с инвертированной фазой вторичного тока трансформатора по отношению к первичному согласно закономерностям, заложенным в модели, его игнорируем.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  первичной обмотки и КПД трансформатора  $\eta$  для заданного сопротивления нагрузки определяются по полученным параметрам модели.

Нагрузочные характеристики  $U_2 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$  получаем, произвольно меняя сопротивление нагрузки в диапазоне, обеспечивающем изменение выходной мощности трансформатора  $S_2$  от 0,1 до  $1,1S_H$ . Таким образом, в данном примере меняем сопротивление нагрузки от  $10R_n$  ( $S_2 \approx 0,1S_H$ ) до  $0,9R_n$  ( $S_2 \approx 1,1S_H$ ).

## Исходные данные для выполнения работы

Схемы замещения однофазного трансформатора приведена на рис. 7.4 , а схема модели однофазного трансформатора в среде Simulink\SimPowerSystems представлен на рис. 7.5.

При моделировании однофазного трансформатора параметры источника переменного напряжения согласуются с номинальным напряжением первичной обмотки  $U_{1H}$  трансформатора, линейная частота тока источника принимается стандартной  $f = 50$  Гц.

Варианты исходных данных в виде параметров однофазных трансформаторов приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

**Параметры трансформаторов серии ОСМ**

| № вар. | Модель             | $U_{1H}$ , В | $U_{2H}$ , В | $S_H$ , ВА | $I_{10\%}$ , % | $u_{k\%}$ , % | $\cos\varphi_0$ | $\cos\varphi_k$ | $R_H$ , Ом |
|--------|--------------------|--------------|--------------|------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|
| 1      | ОСМ1-0,063-220/12  | 220          | 12           | 63         | 24,5           | 13,6          | 0,13            | 0,60            | 10         |
| 2      | ОСМ1-0,063-220/110 | 220          | 110          | 63         | 24,5           | 13,6          | 0,13            | 0,60            | 240        |
| 3      | ОСМ1-0,063-380/42  | 380          | 42           | 63         | 24,5           | 13,6          | 0,13            | 0,60            | 45         |
| 4      | ОСМ1-0,16-220/12   | 220          | 12           | 160        | 23,0           | 8,6           | 0,13            | 0,60            | 4          |
| 5      | ОСМ1-0,16-220/24   | 220          | 24           | 160        | 23,0           | 8,6           | 0,13            | 0,60            | 10         |
| 6      | ОСМ1-0,16-380/12   | 380          | 12           | 160        | 23,0           | 8,6           | 0,13            | 0,60            | 6          |
| 7      | ОСМ1-0,25-220/42   | 220          | 42           | 250        | 22,6           | 6,6           | 0,12            | 0,55            | 20         |
| 8      | ОСМ1-0,25-380/24   | 380          | 24           | 250        | 22,6           | 6,6           | 0,12            | 0,55            | 4          |
| 9      | ОСМ1-0,25-380/110  | 380          | 110          | 250        | 22,6           | 6,6           | 0,12            | 0,55            | 50         |
| 10     | ОСМ1-0,4-220/24    | 220          | 24           | 400        | 20,0           | 5,4           | 0,12            | 0,55            | 4          |
| 11     | ОСМ1-0,4-220/36    | 220          | 36           | 400        | 20,0           | 5,4           | 0,12            | 0,55            | 6          |
| 12     | ОСМ1-0,4-380/36    | 380          | 36           | 400        | 20,0           | 5,4           | 0,12            | 0,55            | 7          |
| 13     | ОСМ1-0,63-220/56   | 220          | 56           | 630        | 19,5           | 4,8           | 0,10            | 0,52            | 10         |
| 14     | ОСМ1-0,63-380/36   | 380          | 36           | 630        | 19,5           | 4,8           | 0,10            | 0,52            | 7          |
| 15     | ОСМ1-0,63-380/110  | 380          | 110          | 630        | 19,5           | 4,8           | 0,10            | 0,52            | 35         |
| 16     | ОСМ1-1,0-220/36    | 220          | 36           | 1000       | 17,0           | 4,2           | 0,10            | 0,52            | 6          |
| 17     | ОСМ1-1,0-220/110   | 220          | 110          | 1000       | 17,0           | 4,2           | 0,10            | 0,52            | 30         |
| 18     | ОСМ1-1,0-380/110   | 380          | 110          | 1000       | 17,0           | 4,2           | 0,10            | 0,52            | 25         |
| 19     | ОСМ1-1,6-220/36    | 220          | 36           | 1600       | 13,6           | 3,6           | 0,09            | 0,50            | 4          |
| 20     | ОСМ1-1,6-220/130   | 220          | 130          | 1600       | 13,6           | 3,6           | 0,09            | 0,50            | 25         |
| 21     | ОСМ1-1,6-220/130   | 220          | 130          | 1600       | 13,6           | 3,6           | 0,09            | 0,50            | 25         |
| 22     | ОСМ1-2,5-220/110   | 220          | 110          | 2500       | 12,0           | 3,3           | 0,10            | 0,50            | 8          |
| 23     | ОСМ1-2,5-380/56    | 380          | 56           | 2500       | 12,0           | 3,3           | 0,10            | 0,50            | 3          |
| 24     | ОСМ1-2,5-380/110   | 380          | 110          | 2500       | 12,0           | 3,3           | 0,10            | 0,50            | 6          |
| 25     | ОСМ1-2,5-380/260   | 380          | 260          | 2500       | 12,0           | 3,3           | 0,10            | 0,50            | 30         |

Численные значения параметров модели можно задавать непосредственно в блоках модели либо использовать параметрическое задание в виде глобальных переменных, значения которых записываются в рабочую область MATLAB – Workspace.

### Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 7.5) собрать в среде Simulink из блоков разделов SimPowerSystems модель однофазного трансформатора, работающего на переменную нагрузку.

2. Согласно своему варианту исходных данных (см. табл. 7.1) задать численные значения параметров и настроить решатель модели.

3. Получить действующие значения напряжений и токов, значения активной и реактивной составляющих полной мощности первичной и вторичной обмоток, величину полной мощности вторичной обмотки  $S_2$  для заданного сопротивления нагрузки.

4. Определить коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  первичной обмотки и КПД трансформатора  $\eta$  для заданного сопротивления нагрузки.

5. Получить и построить нагрузочные характеристики  $U_2 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$  в диапазоне выходной мощности трансформатора  $S_2$  от  $0,1$  до  $1,1S_H$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.

2. Схема замещения однофазного трансформатора и численные значения параметров аппарата.

3. Схема модели однофазного трансформатора в среде Simulink\SimPowerSystems с окнами задания параметров модели.

4. Действующие значения напряжений и токов, значения активной и реактивной составляющих полной мощности первичной и вторичной обмоток, величину полной мощности вторичной обмотки  $S_2$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  первичной обмотки и КПД трансформатора  $\eta$  для заданного сопротивления нагрузки.

5. Графики нагрузочных характеристик  $U_2 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$  в диапазоне выходной мощности трансформатора  $S_2$  от  $0,1$  до  $1,1S_H$ .

6. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimPowerSystems?
2. Какие типы источников и приёмников электрической энергии моделируют блоки библиотеки SimPowerSystems?
3. Поясните схему замещения однофазного трансформатора.
4. Опишите назначение и параметры блоков, образующих схему модели однофазного трансформатора в среде Simulink\SimPowerSystems.
5. Как определить КПД трансформатора?
6. Как определить коэффициент мощности трансформатора?
7. Как получить характеристики  $U_2 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$ ?

## Лабораторная работа № 8

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО АГРЕГАТА

**Цель работы** – моделирование работы вентиляционного агрегата с приводом от трёхфазного асинхронного двигателя.

#### Общие сведения о моделировании трёхфазных асинхронных двигателей в SimPowerSystems

*Асинхронная электрическая машина* – это динамический электромагнитный аппарат, в неподвижной части которого возбуждается вращающееся магнитное поле, а подвижная часть вращается асинхронно, т.е. с угловой скоростью, отличной от угловой скорости магнитного поля [12].

Область применения асинхронных двигателей (АД) распространяется на электроприводы бытовых и промышленных вентиляторов, компрессоров и насосов; электроприводы различных грузоподъемных машин и механизмов, включая подъемники и башенные краны; электроприводы крупного горного оборудования, такого как дробилки, экскаваторы, буровые установки.

Асинхронный двигатель (рис. 8.1, *а*) состоит из двух основных частей: *статора* и *ротора*, разделённых воздушным зазором [12].

*Статор* – это неподвижная часть машины, которая состоит из станины с сердечником и трёхфазной обмотки, представляющей собой катушки медного провода (рис. 8.1, *б*). Начала и концы фаз обмотки статора выведены на клеммы клеммной коробки, расположенной на корпусе машины (рис. 8.1, *в*) [12].

*Ротор* – вращающаяся часть машины, представляющая собой вал на подшипниках с цилиндрическим сердечником, собранным из тонких пластин электротехнической стали (рис. 8.1, *г*). Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется заливкой собранного сердечника алюминиевым сплавом, в результате образуются витки обмотки, залитые в пазах, и короткозамыкающие кольца по торцам [12].

Частота вращения магнитного поля статора (*синхронная частота*) определяется в [об/мин] как [12]:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (8.1)$$

где  $f_1$  – линейная частота тока в обмотке статора (линейная частота питающего напряжения, обычно 50 Гц);  $p$  – число пар полюсов статора.

Число пар полюсов  $p$  магнитного поля статора АД определяется количеством последовательно соединенных катушечных групп в каждой фазе обмотки. При этом катушечные группы одной фазы сдвинуты по окружности статора относительно катушечных групп другой фазы обмотки на угол  $120^\circ/p$  [12].

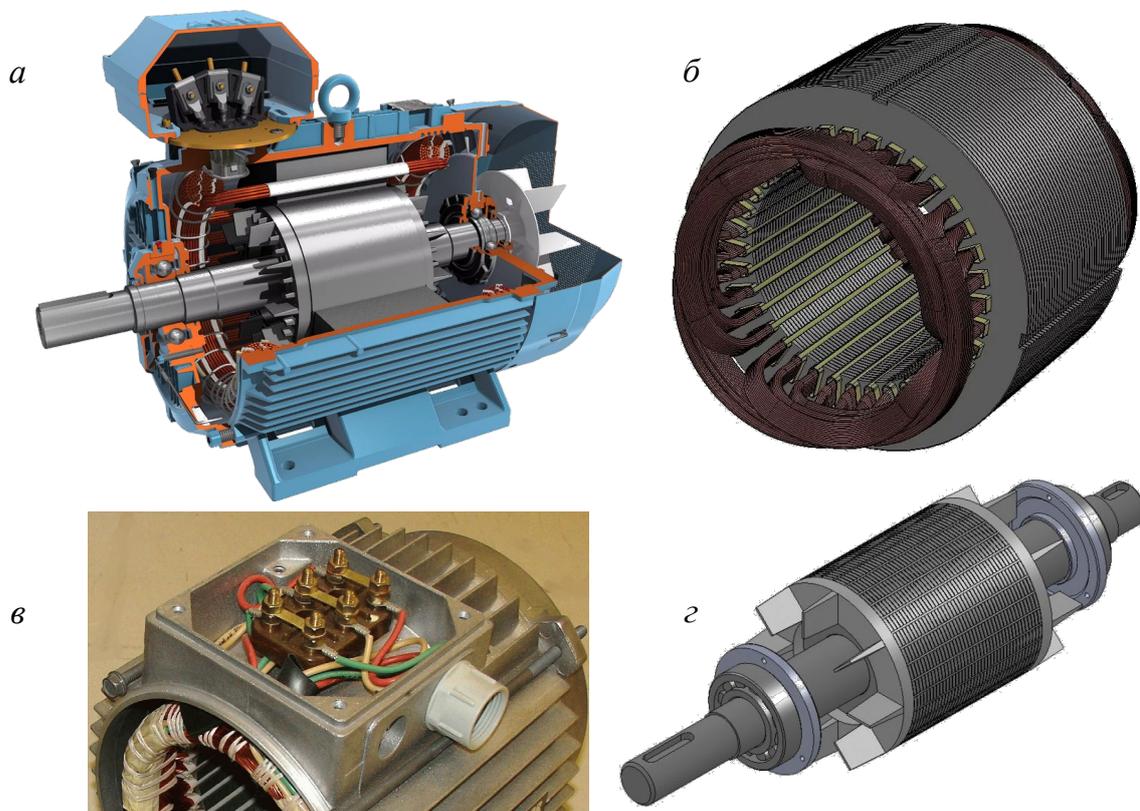


Рис. 8.1. Устройство трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

В связи с особенностями электромагнитных процессов АД не может самостоятельно обеспечить частоту вращения ротора  $n_2$ , равную синхронной частоте вращения  $n_1$ . Мерой относительной разницы частот вращения ротора  $n_2$  и магнитного поля статора  $n_1$  является параметр *скольжение* [12]:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (8.2)$$

Скольжение  $S$  обычно выражают в долях единицы или в процентах, тогда выражение (8.2) необходимо умножить на 100%. В режиме двигателя у асинхронной машины  $0 < S < 1$  [12].

Активная мощность  $P_1$  определяет среднюю мощность необратимого преобразования в двигателе электрической энергии, получаемой

из трёхфазной сети, поэтому она определяется как мощность трёхфазного симметричного приёмника [12]:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1Л} I_{1Л} \cos \varphi_1, \quad (8.3)$$

где  $U_{1\phi}$  и  $U_{1Л}$  – фазное и линейное питающие напряжения;  $I_{1\phi}$  и  $I_{1Л}$  – фазный и линейный токи статора;  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности фазы статора.

Преобразование электрической энергии в механическую в АД, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_2$  всегда меньше мощности на входе  $P_1$ , потребляемой из сети, на величину *суммарных потерь мощности*  $\Sigma P$ . КПД асинхронного двигателя [12]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}. \quad (8.4)$$

КПД трёхфазных АД общепромышленного назначения в номинальном режиме составляет при мощности до 1 кВт 60–75%; от 1 до 10 кВт 75–88% и при мощности свыше 10 кВт 88–94% [12].

Электромагнитный момент АД создаётся взаимодействием токов в роторе с вращающимся магнитным полем статора. Электромагнитный момент  $M$  равен отношению электромагнитной мощности АД  $P_{ЭМ}$  к угловой скорости вращения магнитного поля  $2\pi n_1/60$  [рад/с] [12]:

$$M = \frac{60P_{ЭМ}}{2\pi n_1} = \frac{60m_2 R_2 I_2^2}{2\pi n_1 S}, \quad (8.5)$$

где  $R_2$  – активное сопротивление фазы ротора;  $m_2$  – число фаз обмоток ротора;  $I_2$  – ток фазы ротора.

После приведения выражения (8.5) к величине питающего напряжения фазы АД  $U_{1\phi}$  получим следующее выражение [12]:

$$M = \frac{60m_1 R_2' U_{1\phi}^2}{2\pi n_1 S \left[ (R_1 + R_2'/S)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (8.6)$$

где  $m_1$  – число фаз обмоток статора;  $R_1$  и  $X_1$  – активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора;  $R_2'$  и  $X_2'$  – приведённые к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки ротора.

Зависимость  $M = f(S)$  называют *механической характеристикой* асинхронной машины. В данном выражении момента  $M$  аргументом является скольжение  $S$ , которое для АД может принимать значения в диапазоне от 0 до 1.

Другую механическую характеристику  $n_2 = f(M)$ , более наглядно иллюстрирующую эксплуатационные свойства АД, можно получить из характеристики  $M = f(S)$ , рассчитав при тех же значениях аргумента скольжения  $S$  частоту  $n_2$  согласно формуле (8.2) [12]:

$$n_2 = n_1(1 - S). \quad (8.7)$$

В связи со сложностью расчётов эффективным методом исследования рабочих процессов трёхфазных асинхронных двигателей является использование систем автоматизированного моделирования и, в частности, программной среды Simulink\SimPowerSystems [13].

Электрические машины моделируются в Simulink с помощью блоков раздела **Machines** библиотеки SimPowerSystems (рис. 8.2).

Раздел **Machines** содержит 19 блоков, имитирующих типовые электрические машины переменного и постоянного тока (синхронные и асинхронные, коллекторные и бесколлекторные, непрерывного и дискретного действия). Пиктограммы и названия на блоках данных разделов дают информацию о типе машины. Модели разработаны под стандартные единицы измерения системы СИ (SI Units) и под относительные единицы (pu Units) [13].

В качестве выхода электрических машин используется комбинированный порт  $m$ , содержащий вектор выходных параметров машины, для разделения которого на отдельные сигналы используется блок Machine Measurement Demux [13].

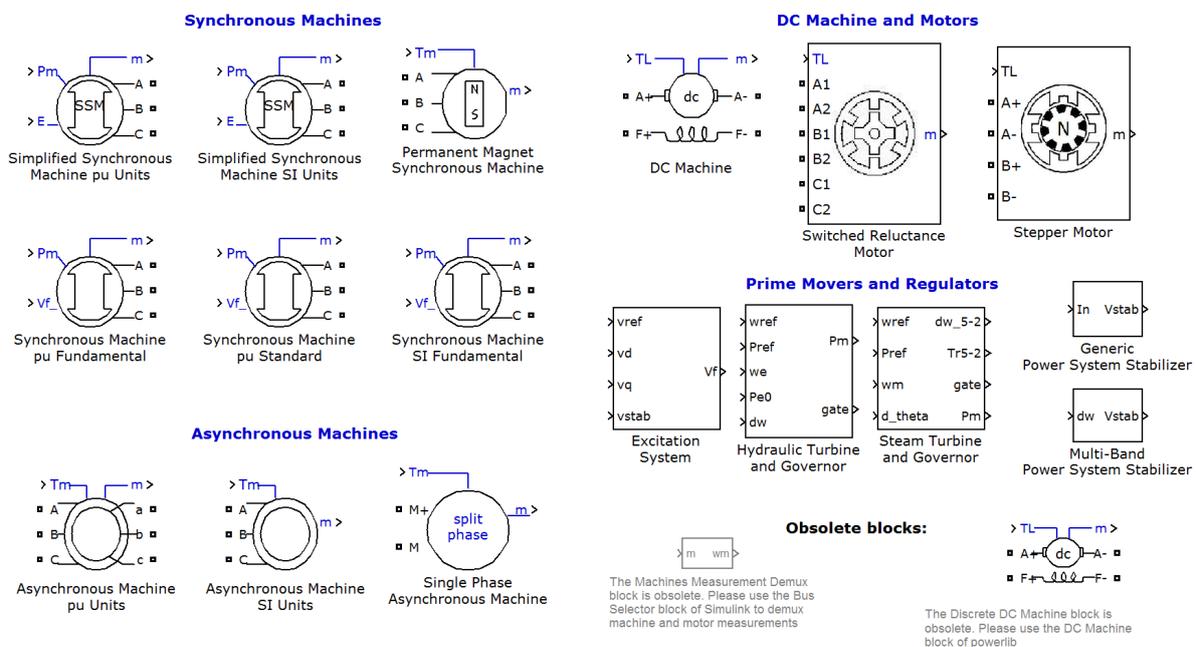


Рис. 8.2. Блоки раздела SimPowerSystems\Machines

Модель трёхфазного АД представлена блоком **Asynchronous Machine** (SI Units) раздела **Machines**. Блок позволяет моделировать динамику трёхфазных АД с фазным или короткозамкнутым ротором.

Блок имеет следующие настройки (рис. 8.3) [13]:

- **Preset model** – заготовки моделей. Набор предопределенных электрических и механических параметров для серийных машин с короткозамкнутым ротором.

- **Mechanical input** – механический вход. Позволяет выбрать либо момент сопротивления (Torque  $T_m$ ), приложенный к валу машины, либо угловую скорость вращения ротора (Speed  $w$ ), в качестве сигнала Simulink, подаваемого на вход блока.

- **Rotor type** – тип ротора. Если параметру типа ротора присвоено значение **Squirrel-cage** (короткозамкнутый), начальные условия могут быть вычислены утилитой **Load Flow and Machine Initialization** в блоке **Powergui**.

- Wound – фазный (с трёхфазной обмоткой);
- Squirrel-cage – короткозамкнутый ротор;
- Double squirrel-cage – двойной короткозамкнутый ротор.

- **Reference frame** – система отсчёта. Определяет систему отсчёта, которая используется для преобразования входных напряжений и выходных токов:

- Rotor (Park transformation) – Ротор (трансформация парка);
- Stationary (Clarke or  $\alpha\beta$  transformation) – Стационарный (преобразование Кларка или  $\alpha\beta$ );
- Synchronous – Синхронный.

- **Mask units** – определяет единицы измерения электрических и механических параметров модели.

Модель трёхфазного АД имеет следующие электрические параметры (см. рис. 8.3):

- **Nominal power, voltage (line-line) and frequency** – номинальная полная мощность  $P_n$  ( $S_n$ ) [ВА], номинальное линейное напряжение (RMS-значение)  $V_n$  [В] и линейная частота тока  $f_n$  [Гц].

- **Stator resistance and inductance** – активное сопротивление и индуктивность рассеяния фазы обмотки статора  $R_s$  [Ом],  $L_l$  [Гн].

- **Rotor resistance and inductance** – активное сопротивление фазы ротора и индуктивность рассеяния фазы ротора  $R_r$  [Ом],  $L_l$  [Гн], приведенные к обмотке статора.

- **Mutual inductance** – индуктивность намагничивания машины  $L_m$  [Гн]. Индуктивность магнитной цепи машины.

- **Inertia constant, friction factor, and pole pairs** – комбинированный коэффициент инерции машины и груза  $J$  [кг·м<sup>2</sup>], коэффициент вязкого трения системы  $F$  [Нм·с] и число пар полюсов  $p$ .

- **Initial conditions** – начальные условия. задается вектор начальных механических и электрических параметров машины:

- initial slip  $S$  – начальное скольжение машины;
  - electrical angle  $\Theta_e$  (th) – начальный электрический угол тока фазы ротора, зависит от угловой скорости вращения машины и числа её полюсов;

- stator current magnitude (ias, ibs, ics), and phase angles (phaseas, phasebs, phasecs) – начальные значения амплитуд и начальных фаз токов фаз обмотки статора.

- **Simulate saturation** – симуляция насыщения указывает, имитируется ли магнитное насыщение железа ротора и статора или нет.

- **Saturation parameters** – параметры насыщения. Магнитное насыщение железа статора и ротора (насыщение взаимного потока) моделируется нелинейной функцией (в данном случае полиномом) с использованием точек кривой насыщения холостого хода. Точки полинома задаются в окне параметров насыщения.

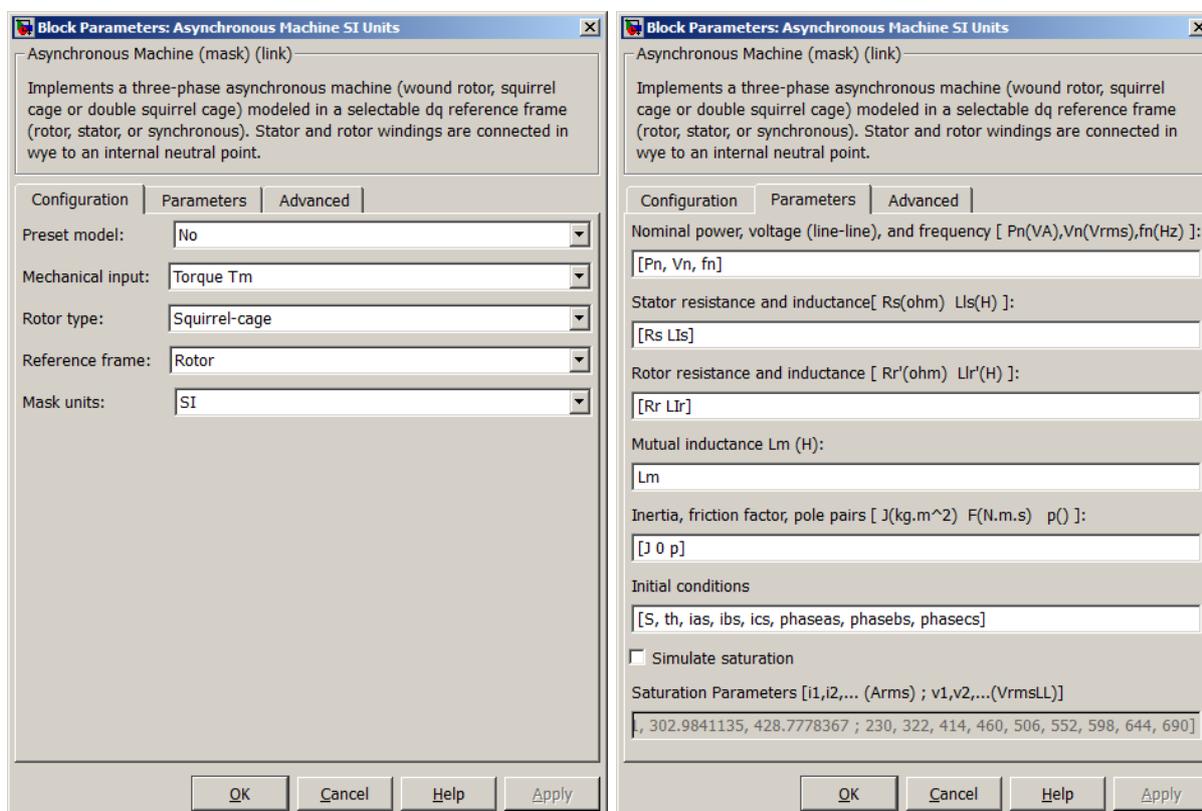


Рис. 8.3. Окна блока Asynchronous Machine (SI Units) в SimPowerSystems

## Постановка задачи

Промышленные вентиляторы – это механизмы для подачи воздуха по воздуховодам промышленных вентиляционных систем и производственным помещениям. Производительность воздуха, создаваемая подобными вентиляторами, может быть в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч кубометров в час, а давление – до десятков килопаскалей. При этом потребляемая мощность может составлять от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт. Общая затрачиваемая мощность на привод вентилятора составляет до 8% от всей вырабатываемой электроэнергии.

На рис. 8.4 представлена схема вентиляционного агрегата, состоящая из электропривода – трёхфазного асинхронного электродвигателя АД с короткозамкнутым ротором и осевого вентилятора ВО, имеющего механическую характеристику  $M_g = f(\omega)$ . Суммарный момент инерции системы  $J$  приведен к оси АД.

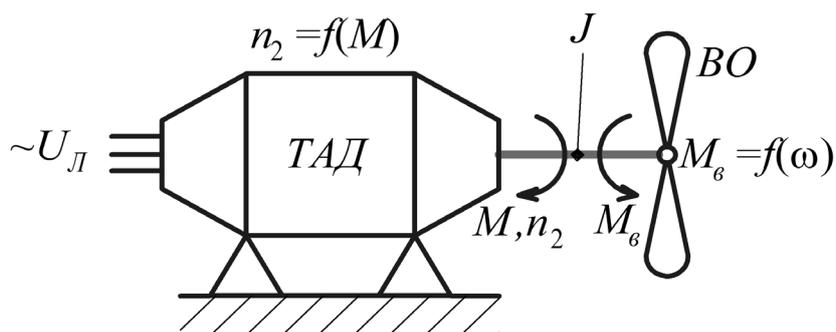


Рис. 8.4. Расчётная схема вентиляционного агрегата

### Для вышеприведенного агрегата необходимо:

1. Получить установившиеся значения и графики изменения во времени момента  $M$  и частоты вращения ротора АД  $n_2$ .
2. Определить активную и реактивную составляющие полной мощности статора АД  $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  фазы статора и КПД машины  $\eta$  в установившемся режиме.
3. Получить механические характеристики машины  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$  с момента пуска до установившегося режима по нагрузке.

Расчёт параметров такой сложной электромеханической системы трудноосуществим без использования специального программного обеспечения, такого как Simulink. Поэтому требуется провести моделирование и исследование динамики вентиляционного агрегата в среде Simulink программного комплекса MATLAB с помощью библиотеки SimPowerSystems.

## Моделирование вентиляционного агрегата

На рис. 8.5 представлена блок-схема модели вентиляционного агрегата в среде Simulink\SimPowerSystems MATLAB 2010.

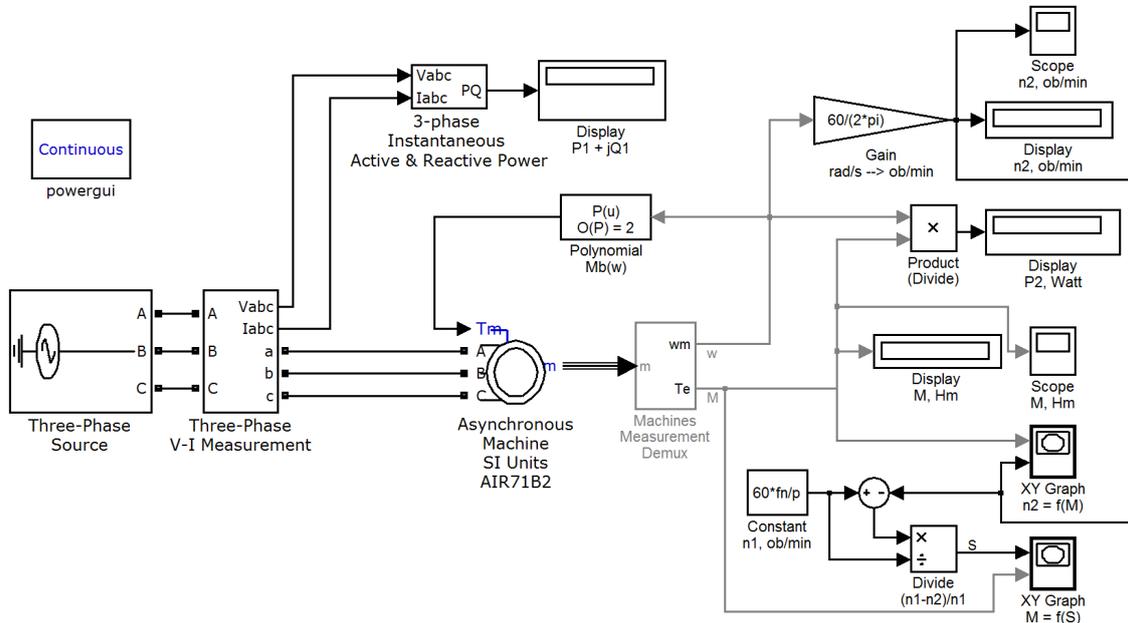


Рис. 8.5. Схема модели вентиляционного агрегата в среде Simulink\SimPowerSystems

В структурную схему модели входят следующие блоки:

- **Powergui** (SimPowerSystems\) – графический интерфейс пользователя. Нужен для функционирования модели.
- **Three-Phase Source** (SimPowerSystems\Electrical Sources) – источник трёхфазной системы напряжений.
- **Three-Phase V-I Measurement** (SimPowerSystems\Measurements) – трёхфазный измерительный блок V-I используется для измерения мгновенных значений трёхфазных напряжений и токов в цепи.
- **Asynchronous Machine (SI Units)** (SimPowerSystems\Machines) – трёхфазный АД.
- **Polynomial** (Simulink\Math Operations) – блок, реализующий полиномиальную зависимость  $M_g = f(\omega)$ .
- **Machine Measurement Demux** (SimPowerSystems\Machines) – демультиплексор сигналов параметров АД.
- **3-phase instantaneous active and reactive power** (SimPowerSystems\ExtraLibrary\Measurements) – блок трёхфазной активной и реактивной мощности измеряет мгновенные значения активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  трёхфазного приёмника.

• **Product (Divide)** (Simulink\Math Operations) – блоки произведения/деления, они производят произведение/деления входных скалярных или векторных входных сигналов.

• **Gain** (Simulink\Math Operations) – усилительный блок.

• **Constant** (Simulink\Sources) – блок ввода константы.

• **Display** (Simulink\Sinks) – виртуальный цифровой индикатор.

• **Scope** (Simulink\Sinks) – виртуальный осциллограф, предназначенный для получения временных характеристик параметров.

• **XY Graph** (Simulink\Sinks) – виртуальный графопостроитель статических характеристик.

Для примера рассмотрим следующие параметры вентиляционного агрегата:

– трёхфазный АД с короткозамкнутым ротором АИР71В2;

– приведенный момент инерции системы  $J = 0,044 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

– механическая характеристика вентилятора  $M_6(\omega) = 0,00003\omega^2 + 0,0013\omega + 1$ .

#### **Рабочие параметры АД АИР71В2:**

• линейное напряжение питающей сети  $U_{1л} = 380 \text{ В}$ ;

• линейная частота тока питающей сети  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ ;

• синхронная частота вращения  $n_1 = 3000 \text{ об/мин}$ ;

• номинальная мощность на валу  $P_{2н} = 1,1 \text{ кВт}$ ;

• номинальная частота вращения  $n_{2н} = 2800 \text{ об/мин}$ ;

• номинальный КПД  $\eta_n = 79,5\%$ ;

• номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{1н} = 0,83$ ;

• отношение пускового тока статора двигателя к номинальному (коэффициент пуска по току)  $I_{1п}/I_{1н} = 6$ ;

• коэффициент пуска по моменту (кратность пускового момента)  $M_n/M_n = 2,1$ ;

• коэффициент перегрузки по моменту (кратность максимального момента)  $\lambda = M_{кр}/M_n = 2,2$ .

Ниже приведены рисунки с окнами настройки решателя модели и параметров блоков модели.

Настройка решателя модели вентиляционного агрегата производится через меню окна модели **Simulation** команда **Configuration Parameters**. Во вкладке **Solver** настраиваем время моделирования из расчёта полного затухания переходных процессов в системе, а также устанавливаем метод решения дифференциальных уравнений системы ode45 (Dormand-Prince) с переменным шагом вычислений (рис. 8.6).

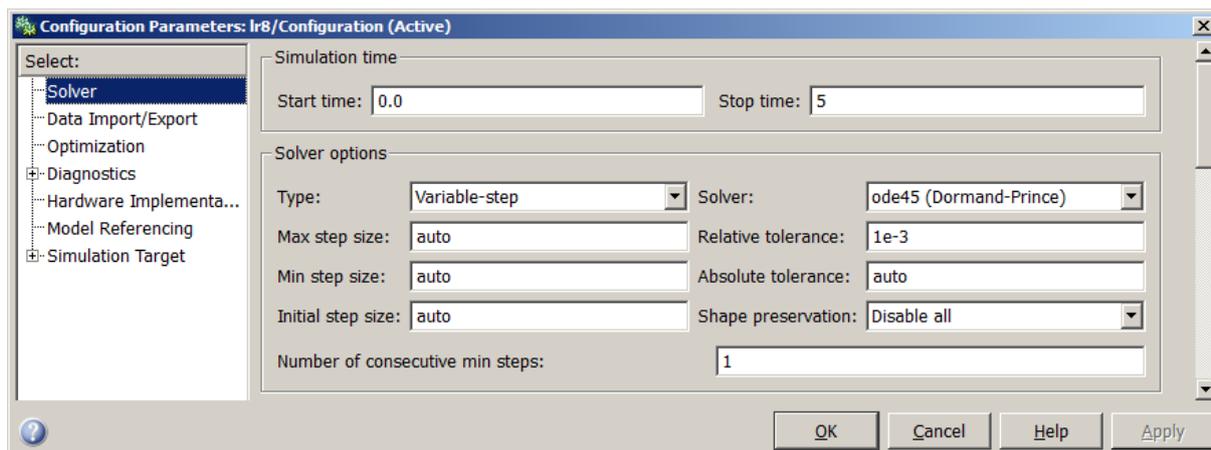


Рис. 8.6. Окно настройки решателя модели

Источник трёхфазной системы напряжений реализован блоком **Three-Phase Source**. Параметры блока – номинальное линейное напряжение (RMS-значение)  $V_n$  ( $U_{1,l}$ ) в вольтах; начальная фаза напряжения фазы А сети  $\psi_a = 0^\circ$ ; линейная частота тока  $f_n$  ( $f_1$ ) в герцах (рис. 8.7). Внутреннее соединение фаз источника (Internal connection) выбираем  $Y_g$  – звезда с заземленной нейтралью.

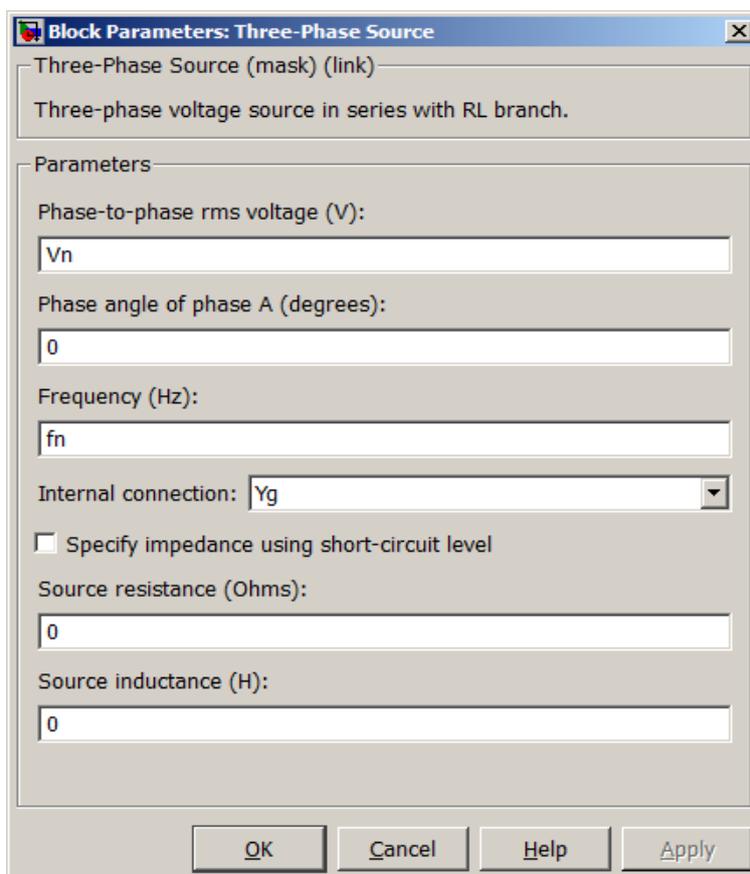


Рис. 8.7. Окно настройки блока Three-Phase Source

Для измерения мгновенных значений фазных напряжений и токов статора АД используется трёхфазный измерительный блок **Three-Phase V-I Measurement** (рис. 8.8).

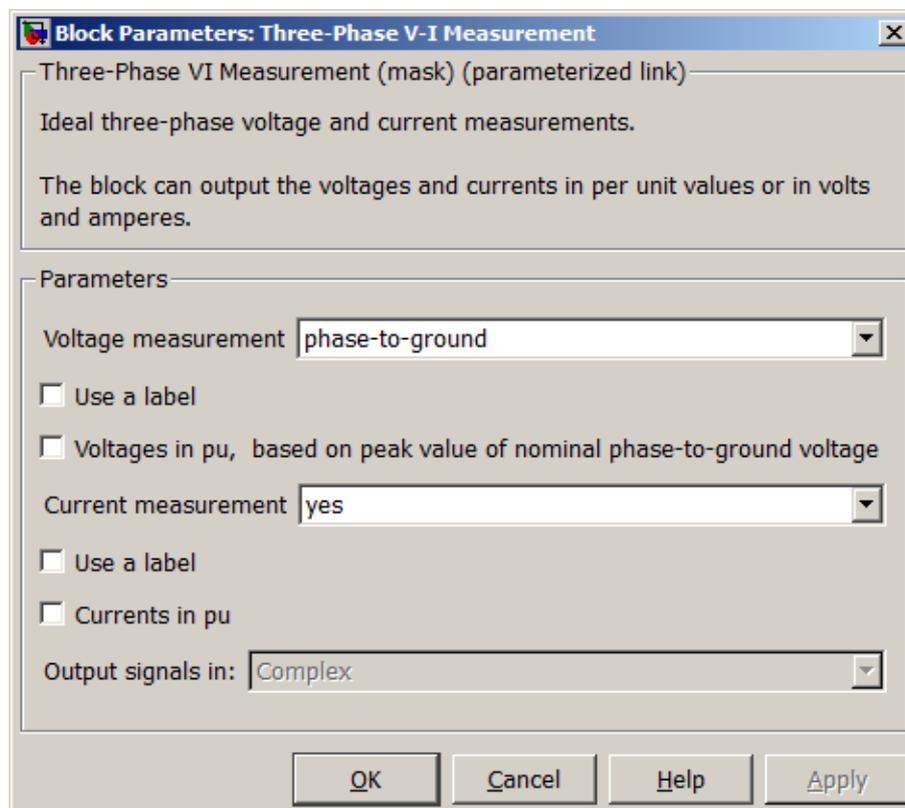


Рис. 8.8. Окно настройки блока Three-Phase V-I Measurement

Для получения значения полной мощности АД в виде мгновенных значений её активной и реактивной составляющих:  $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$  используется блок **3-phase instantaneous active and reactive power**. Входами блока являются сигналы мгновенных значений фазных напряжений и токов статора АД, получаемые из блока **Three-Phase V-I Measurement**. Блок не имеет настроек. Значения параметров  $P_1$  и  $Q_1$  выводятся через блок **Display**.

**Asynchronous Machine (SI Units)** – трёхфазный АД с параметрами, задаваемыми в системе СИ. Настройки и параметры блока описаны выше в общих сведениях по работе (см. рис. 8.3).

Используя каталожные и паспортные данные двигателя, можно получить параметры модели АД в SimPowerSystems. В рассматриваемом примере для АД АИР71В2 имеем следующие значения:

- **Nominal power, voltage (line-line) and frequency:**  
 $P_n (S_n) = P_{2H}/(\eta_n \cdot \cos\varphi_{1n}) = 1667 \text{ ВА}; V_n = 400 \text{ В}; f_n = 50 \text{ Гц}.$

- **Stator resistance and inductance:**  $R_s = 7,9$  [Ом],  $L_{Is} = 32,7$  мГн.
- **Rotor resistance and inductance:**  $R_r = 7,2$  Ом,  $L_{Ir} = 32,7$  мГн.
- **Mutual inductance:**  $L_m = 0,6953$  Гн.
- **Inertia constant, friction factor, and pole pairs:**  $J = 0,044$  кг·м<sup>2</sup>,  $F = 0$  Нм·с и  $p = 1$ .

• **Initial conditions** – начальные условия. Задается вектор начальных механических и электрических параметров машины:

- initial slip  $S = 1$ ;
- electrical angle  $\Theta_e$  (th) = 0;
- stator current magnitude ( $i_{as} = 0$ ,  $i_{bs} = 0$ ,  $i_{cs} = 0$ ), and phase angles ( $phase_{as} = 0$ ,  $phase_{bs} = 0$ ,  $phase_{cs} = 0$ ).

В окне **Initial conditions** изначально должно быть записано выражение: [1 0 0 0 0 0 0].

- **Simulate saturation:** отключено.

Для получения значений начальных механических и электрических параметров машины воспользуемся утилитой **Load Flow and Machine Initialization** в блоке Powergui. В окне Powergui выбираем утилиту (рис. 8.9).

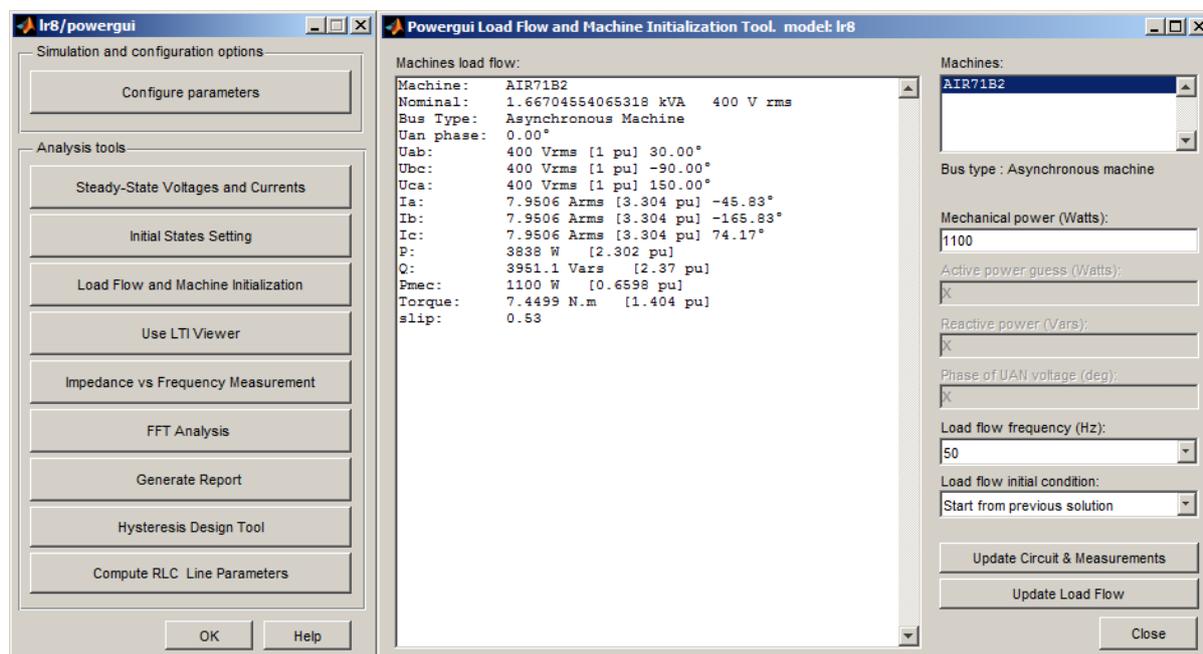


Рис. 8.9. Окно настройки утилиты Load Flow and Machine Initialization

В окне утилиты будут прописаны все машины, присутствующие в модели. Выделим моделируемый АД и внесем в окно Mechanical power (Watts) паспортную механическую мощность АД  $P_{2H} = 1100$  Вт.

Далее в настройках в окне **Load flow initial condition** выберем **Auto** или **Start from previous solution** и нажимаем кнопку **Update Load Flow** для расчёта начальных механических и электрических параметров машины. Данные параметры отобразятся в окне Machine load flow и автоматически запишутся в настройки модели АД.

Утилита вычисляет начальное скольжение машины (slip)  $S$ ; начальный электрический угол тока фазы ротора; начальные значения амплитуд и начальных фаз токов фаз обмотки статора. Однако вычисленное автоматически начальное скольжение  $S = 0,53$  не соответствует пуску двигателя. Поэтому данные параметры в настройках **Initial conditions** блока **Asynchronous Machine** необходимо исправить **ВРУЧНУЮ**, выставив  $S = 1$  (рис. 8.10).

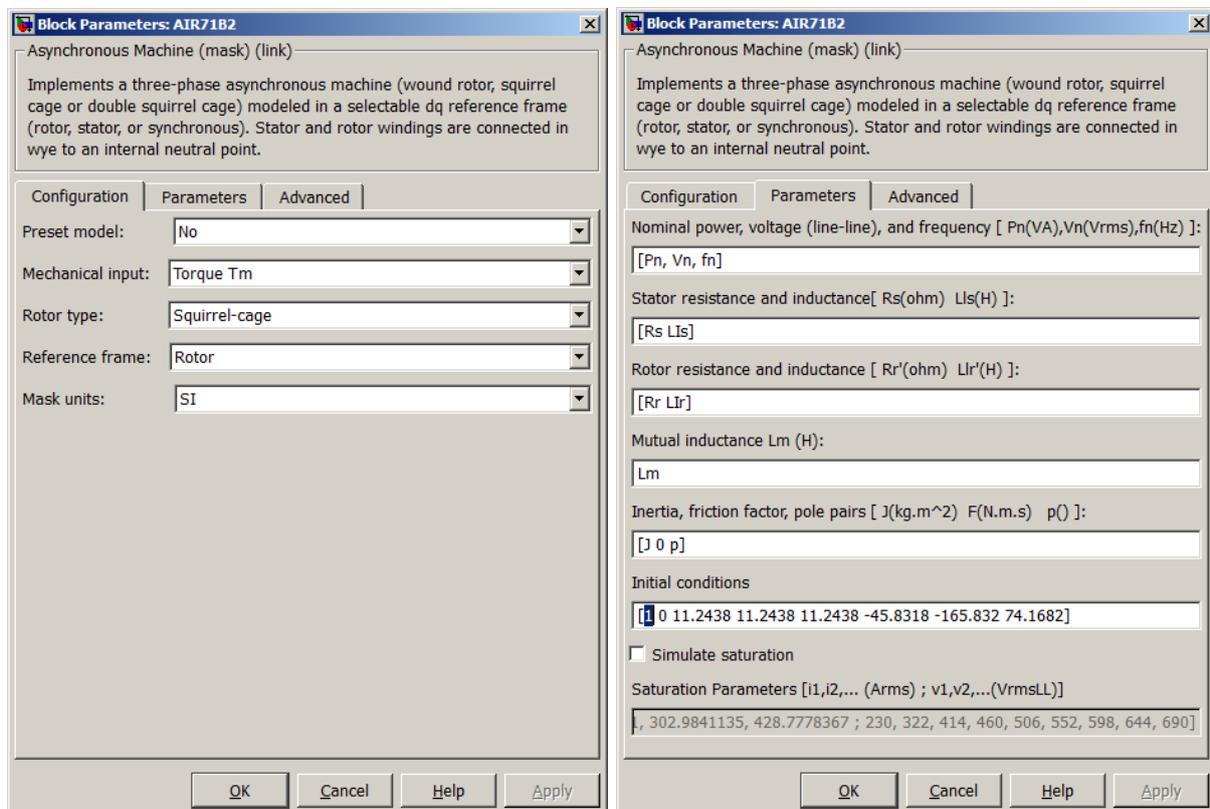


Рис. 8.10. Окна блока Asynchronous Machine (SI Units) в SimPowerSystems

В блоке **Machine Measurement Demux** – демультимплексоре сигналов параметров АД указываем тип машины **Asynchronous** и требуемые выходные параметры машины – угловую скорость вращения ротора  $\omega_m$  и электромагнитный крутящий момент  $T_e$  (М) (рис. 8.11).

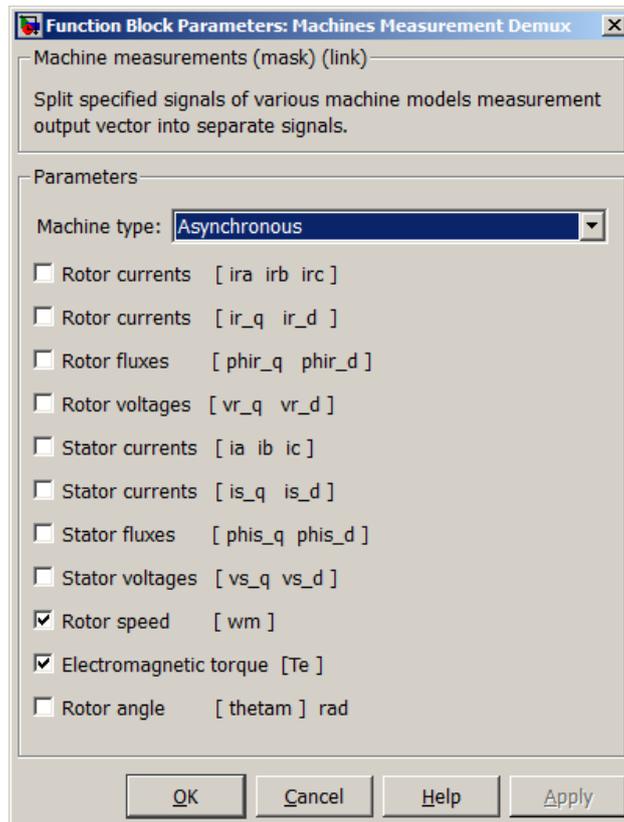


Рис. 8.11. Окно настройки блока Machine Measurement Demux

Блок **Polynomial**, реализующий полиномиальную зависимость  $M_e = f(\omega) = 0,00003\omega^2 + 0,0013\omega + 1$ , имеет настройку в виде вектора коэффициентов полинома, порядок которого определяется автоматически по количеству коэффициентов (рис. 8.12). Коэффициенты сортируются от высшего порядка к низшему, в форме, принятой поливалентной функцией MATLAB –  $[0.00003\omega^2 \ 0.0013\omega^1 \ 1\omega^0]$ .

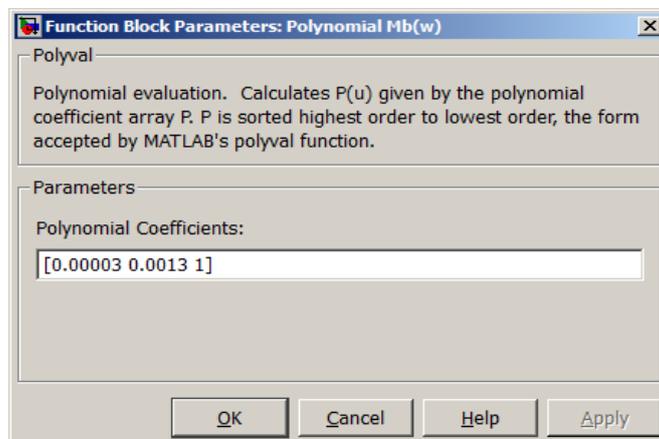


Рис. 8.12. Окно настройки блока Polynomial

Блоки **Product (Divide)** – блоки произведения/деления, необходимые для вычисления механической мощности АД  $P_2 = M \cdot \omega$  [Вт], а также скольжения машины  $S$  по формуле (8.2) (рис. 8.13).

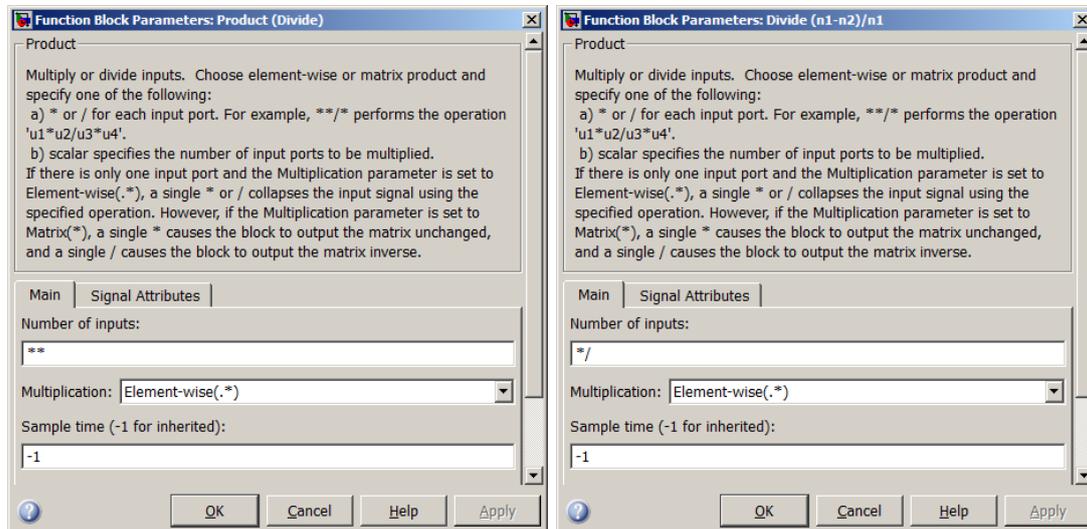


Рис. 8.13. Окна настройки блоков Product (Divide)

Для построения механических характеристик машины  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$  используются блоки **XY Graph** – виртуальные графопостроители характеристик. В настройках блоков указываются границы области построения графиков: для момента  $M$  – от 0 до  $1,1M_{\max}$ , для частоты  $n_1$  – от 0 до  $n_1$ , для скольжения машины  $S$  от 0 до 1 (рис. 8.14).

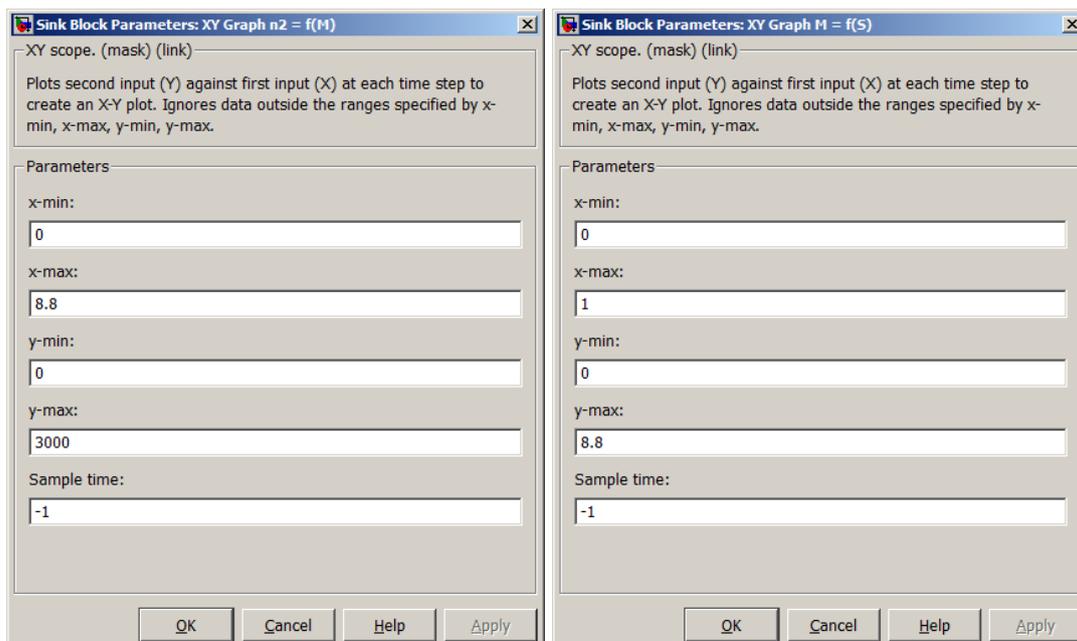


Рис. 8.14. Окна настройки блоков XY Graph

В блоках **Constant** и **Gain** задаются постоянные коэффициенты модели: частота вращения магнитного поля статора  $n_1$ , [об/мин] и коэффициент преобразования угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , [рад/с] в частоту вращения ротора  $n_2$ , [об/мин] (см. рис. 8.5).

После сборки модели и введения численных значений параметров необходимо произвести запуск, установив время моделирования, достаточное для затухания переходных процессов системы.

Результатами моделирования являются установившиеся значения и графики переходных процессов частоты вращения ротора  $n_2$  и крутящего момента двигателя  $M$  (рис. 8.15), активная и реактивная мощности статора АД  $P_1 + jQ_1$ , механическая мощность АД  $P_2$ , механические характеристики  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$  с момента пуска до установившегося режима по нагрузке (рис. 8.16).

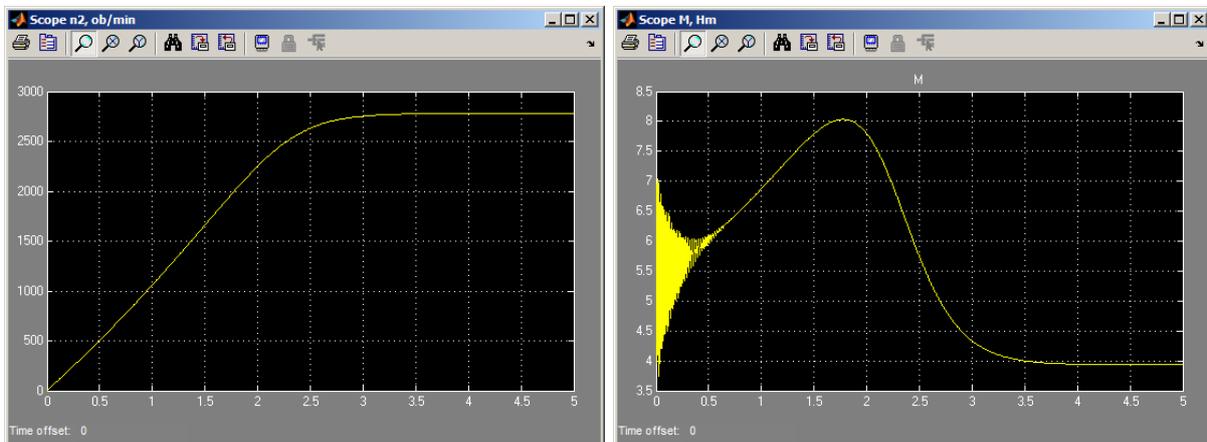


Рис. 8.15. Графики изменения во времени частоты вращения ротора  $n_2$  и крутящего момента двигателя  $M$

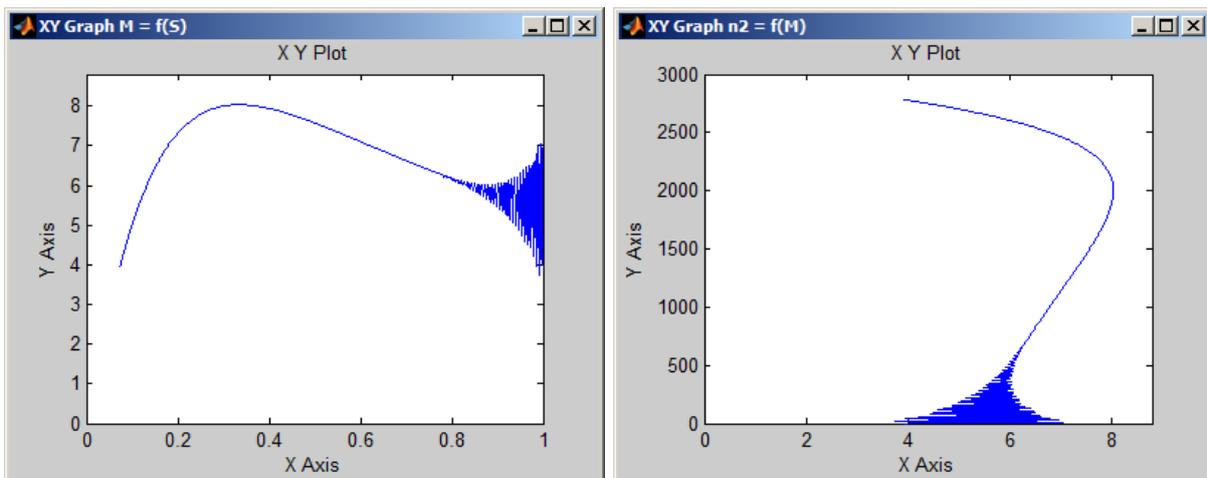


Рис. 8.16. Графики механических характеристик АД  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$

## Порядок выполнения работы

1. Согласно схеме (см. рис. 8.5) собрать в среде Simulink\ SimPowerSystems модель вентиляционного агрегата.

2. Согласно своему варианту исходных данных (табл. 8.1) задать численные значения параметров модели и настроить решатель модели.

3. Получить значения начальных механических и электрических параметров машины с помощью утилиты **Load Flow and Machine Initialization**. Исправить вручную значение начального скольжения, выставив  $S = 1$  в настройках **Initial conditions** блока **Asynchronous Machine**.

4. Определить длительность затухания переходных процессов в системе. Установить время моделирования с учётом затухания переходных процессов в системе.

5. Получить установившиеся значения и графики переходных процессов частоты вращения ротора  $n_2$  и момента двигателя  $M$ .

6. Определить активную и реактивную составляющие полной мощности статора АД  $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  фазы статора и КПД машины  $\eta$  в установившемся режиме.

7. Получить механические характеристики машины  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$  с момента пуска до установившегося режима по нагрузке.

8. Оформить отчёт по работе.

## Исходные данные для выполнения работы

Расчётная схема моделируемого вентиляционного агрегата приведена на рис. 8.4, а схема модели в среде Simulink/SimPowerSystems представлена на рис. 8.5. Для всех вариантов линейное напряжение питающей сети  $U_{1Л} = 380$  В, а линейная частота тока  $f_1 = 50$  Гц. Параметры системы приведены в табл. 8.1:

- $M_e(\omega)$  – механическая характеристика вентилятора;
- $J$  – приведенный момент инерции системы;
- $P_{2н}$  – номинальная механическая мощность;
- $\eta_n$  – номинальный КПД;
- $\cos\varphi_{1н}$  – номинальный коэффициент мощности;
- $p$  – число пар полюсов машины;
- $R_s, LIs$  – активное сопротивление и индуктивность рассеяния фазы обмотки статора;
- $R_r, LIr$  – активное сопротивление фазы ротора и индуктивность рассеяния фазы ротора, приведенные к обмотке статора;
- $Lm$  – индуктивность намагничивания машины.

Таблица 8.1

### Параметры вентиляционного агрегата

| №<br>вар. | Модель<br>двигателя | $M_e(\omega)$                                 | $J$ ,<br>кг·м <sup>2</sup> | $P_{2H}$ ,<br>кВт | $\eta_H$ ,<br>% | $\cos\varphi_{1H}$ | $p$ | $R_s$ ,<br>Ом | $Lls$ , Гн | $Rr$ ,<br>Ом | $Llr$ , Гн | $Lm$ ,<br>Гн |
|-----------|---------------------|---|----------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----|---------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 1         | АИР80А2             | $M_e = 0,00004\omega^2 + 0,0004\omega + 1$    | 0,058                      | 1,5               | 81              | 0,85               | 1   | 7,300         | 0,01488    | 3,215        | 0,01488    | 0,5055       |
| 2         | АИР80В2             | $M_e = 0,00006\omega^2 + 0,0006\omega + 2$    | 0,081                      | 2,2               | 83              | 0,87               | 1   | 3,770         | 0,01337    | 2,635        | 0,01337    | 0,4240       |
| 3         | АИР90L2             | $M_e = 0,00008\omega^2 + 0,0008\omega + 2$    | 0,108                      | 3,0               | 88              | 0,89               | 1   | 1,268         | 0,01297    | 2,051        | 0,01297    | 0,4284       |
| 4         | АИР100S2            | $M_e = 0,00011\omega^2 + 0,0011\omega + 3$    | 0,139                      | 4,0               | 87              | 0,88               | 1   | 1,053         | 0,01043    | 1,622        | 0,01043    | 0,3057       |
| 5         | АИР100L2            | $M_e = 0,00016\omega^2 + 0,0016\omega + 3,6$  | 0,186                      | 5,5               | 88              | 0,89               | 1   | 0,603         | 0,00789    | 1,193        | 0,00789    | 0,2504       |
| 6         | АИР112M2            | $M_e = 0,0002\omega^2 + 0,002\omega + 5$      | 0,245                      | 7,5               | 87,5            | 0,88               | 1   | 0,800         | 0,00582    | 0,569        | 0,00582    | 0,1687       |
| 7         | АИР132M2            | $M_e = 0,00028\omega^2 + 0,0028\omega + 9$    | 0,346                      | 11,0              | 88              | 0,89               | 1   | 0,547         | 0,00399    | 0,350        | 0,00399    | 0,1262       |
| 8         | АИР160S2            | $M_e = 0,00033\omega^2 + 0,0055\omega + 15$   | 0,458                      | 15,0              | 90,5            | 0,90               | 1   | 0,387         | 0,00201    | 0,149        | 0,00201    | 0,0842       |
| 9         | АИР80А4             | $M_e = 0,00022\omega^2 + 0,0022\omega + 2$    | 0,247                      | 1,1               | 75              | 0,81               | 2   | 13,201        | 0,01019    | 5,416        | 0,01019    | 0,4893       |
| 10        | АИР80В4             | $M_e = 0,0003\omega^2 + 0,003\omega + 3$      | 0,326                      | 1,5               | 78,5            | 0,83               | 2   | 7,024         | 0,01792    | 4,705        | 0,01792    | 0,4624       |
| 11        | АИР90L4             | $M_e = 0,00044\omega^2 + 0,0044\omega + 4$    | 0,460                      | 2,2               | 81              | 0,83               | 2   | 4,557         | 0,01323    | 2,555        | 0,01323    | 0,3320       |
| 12        | АИР100S4            | $M_e = 0,0006\omega^2 + 0,006\omega + 6$      | 0,608                      | 3,0               | 82              | 0,83               | 2   | 2,435         | 0,01315    | 2,440        | 0,01315    | 0,2723       |
| 13        | АИР100L4            | $M_e = 0,00077\omega^2 + 0,0077\omega + 7$    | 0,788                      | 4,0               | 85              | 0,84               | 2   | 1,160         | 0,01010    | 1,914        | 0,01010    | 0,2256       |
| 14        | АИР112M4            | $M_e = 0,0011\omega^2 + 0,011\omega + 10$     | 1,049                      | 5,5               | 87,5            | 0,88               | 2   | 0,771         | 0,00725    | 1,109        | 0,00725    | 0,2177       |
| 15        | АИР132S4            | $M_e = 0,00145\omega^2 + 0,0145\omega + 14,5$ | 1,387                      | 7,5               | 87,5            | 0,86               | 2   | 0,688         | 0,00513    | 0,694        | 0,00513    | 0,1363       |
| 16        | АИР132M4            | $M_e = 0,0021\omega^2 + 0,021\omega + 20$     | 1,958                      | 11,0              | 87,5            | 0,87               | 2   | 0,558         | 0,00273    | 0,396        | 0,00273    | 0,0900       |
| 17        | АИР80В6             | $M_e = 0,00055\omega^2 + 0,0055\omega + 5,5$  | 0,679                      | 1,1               | 74,0            | 0,74               | 3   | 10,948        | 0,02130    | 8,126        | 0,02130    | 0,4070       |
| 18        | АИР90L6             | $M_e = 0,0007\omega^2 + 0,007\omega + 7$      | 0,898                      | 1,5               | 76,0            | 0,72               | 3   | 8,501         | 0,01493    | 4,536        | 0,01493    | 0,2855       |
| 19        | АИР100S6            | $M_e = 0,0008\omega^2 + 0,008\omega + 8$      | 1,005                      | 1,7               | 74,0            | 0,76               | 3   | 8,447         | 0,01563    | 3,843        | 0,01563    | 0,2880       |
| 20        | АИР100L6            | $M_e = 0,0011\omega^2 + 0,011\omega + 10$     | 1,268                      | 2,2               | 81,5            | 0,74               | 3   | 3,525         | 0,01749    | 3,307        | 0,01749    | 0,2469       |
| 21        | АИР112МА6           | $M_e = 0,00145\omega^2 + 0,0145\omega + 14,5$ | 1,676                      | 3,0               | 81,0            | 0,76               | 3   | 3,172         | 0,01168    | 1,996        | 0,01168    | 0,1895       |
| 22        | АИР112МВ6           | $M_e = 0,002\omega^2 + 0,02\omega + 20$       | 2,171                      | 4,0               | 82,0            | 0,81               | 3   | 2,156         | 0,00928    | 1,515        | 0,00928    | 0,1807       |
| 23        | АИР132S6            | $M_e = 0,0026\omega^2 + 0,026\omega + 26$     | 2,892                      | 5,5               | 85,0            | 0,80               | 3   | 1,326         | 0,00739    | 0,908        | 0,00739    | 0,1340       |
| 24        | АИР132М6            | $M_e = 0,0042\omega^2 + 0,042\omega + 30$     | 3,823                      | 7,5               | 85,0            | 0,81               | 3   | 0,794         | 0,00571    | 0,838        | 0,00571    | 0,1052       |
| 25        | АИР160S6            | $M_e = 0,0066\omega^2 + 0,066\omega + 36$     | 5,397                      | 11,0              | 87,5            | 0,84               | 3   | 0,595         | 0,00311    | 0,353        | 0,00311    | 0,0791       |

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Расчётная схема вентиляционного агрегата.
3. Схема модели вентиляционного агрегата в среде Simulink/SimPowerSystems с окнами задания параметров модели.
4. Установившиеся значения и графики переходных процессов частоты вращения ротора  $n_2$  и момента двигателя  $M$ .
5. Активная и реактивная составляющие полной мощности статора АД  $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  фазы статора и КПД машины  $\eta$  в установившемся режиме.
6. Механические характеристики машины  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$ .
7. Вывод по работе.

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Какие задачи позволяет решать Simulink и его библиотека SimPowerSystems?
2. Какие типы электрических машин моделируют блоки библиотеки SimPowerSystems?
3. Опишите основы конструкции асинхронного двигателя.
4. Что называют скольжением асинхронной машины?
5. Опишите назначение и параметры блоков, образующих схему модели вентиляционного агрегата в среде Simulink\SimPowerSystems.
6. Зачем в модели присутствует блок Polynomial?
7. Как определяется механическая мощность асинхронного двигателя?
8. Как определить КПД асинхронного двигателя?
9. Как определить коэффициент мощности асинхронного двигателя?
10. Как получить характеристики  $M = f(S)$  и  $n_2 = f(M)$ ?

## Библиографический список

1. Игнатов, С. Д. Моделирование механических систем при помощи расширений Simulink : учебное пособие / С. Д. Игнатов, С. В. Котыкин. – Омск : СибАДИ, 2016. – 115 с. : рис. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-93204-918-1. – Текст: электронный. – URL: <http://bek.sibadi.org/MegaPro/Web>. (дата обращения: 01.09.2023).
2. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB : учебное пособие / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. А. Руппель [и др.]. – Омск, 2007. – 84 с. – ISBN 978-5-93204-332-5.
3. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics) : учебное пособие / В. М. Мусалимов, Г. Б. Заморуев, И. И. Калапышина, А. Д. Перечесова. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. – 114 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/70925> (дата обращения: 03.10.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. ГОСТ 2185–66. Передачи зубчатые цилиндрические. Основные параметры : государственный стандарт союза ССР (переиздание (ноябрь 1993 г.) с Изменениями N 1, 2, 3, утвержденными в апреле 1978 г., июне 1982 г., декабре 1991 г. (ИУС 6-78, 10-82, 5-92)) : официальное издание : дата введения 1968-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1993. – 4 с.
5. Руппель, А.А. Моделирование гидравлических систем в MATLAB : учебное пособие / А. А. Руппель, А. А. Сагандыков, М. С. Корытов. – Омск : СибАДИ, 2009. – 171 с. – Библиогр.: с. 171. – 150 экз. – ISBN 978-5-93204-500-8.
6. Федорец, В.А. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков : учеб. пособие / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, [и др.]. – Киев : Высшая школа. Главное изд-во, 1987. – 375 с.
7. КС-55713-1 «Галичанин» : [сайт]. – Галич, 2015. – URL : <https://www.gakz.ru/rus/catalog/25tonn/ks-55713-1> (дата обращения: 01.09.2023). – Текст. Изображение : электронные.
8. ГОСТ 12445–80 (ИСО 2944). Гидроприводы объёмные, пневмоприводы и смазочные системы. Номинальные давления : государственный стандарт союза ССР : официальное издание : дата введения 1980-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.
9. ГОСТ 13824–80. Гидроприводы объёмные и смазочные системы. Номинальные рабочие объёмы : межгосударственный стандарт союза ССР : официальное издание : дата введения 1980-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2000. – 4 с.
10. Моделирование в среде MATLAB-Simulink : метод. указания к лабораторным работам / сост. : А.И. Герасимов, В. В. Регеда, О. Н. Регеда. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 111 с.
11. Щербаков, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MATLAB и SIMULINK / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушец ; Министерство образования Российской Федерации; Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2003. – 160 с. – ISBN 5-93204-154-4.

12. Лазута, И. В. Расчет и анализ электрических цепей и устройств : учебно-методическое пособие / И. В. Лазута, И. А. Реброва. – Омск : СибАДИ, 2019. – 148 с. – ISBN 978-5-00113-127-4. – URL: <http://bek.sibadi.org/MegaPro/Web>. (дата обращения: 03.10.2023).

13. Платоненков, С. В. Моделирование электромеханических систем в среде MATLAB : учебное пособие / С. В. Платоненков, Е. В. Лимонникова. – Архангельск : САФУ, 2016. – 104 с. – ISBN 978-5-261-01121-7. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/96534> (дата обращения: 03.10.2023).