

М.С.Лурье, О.М.Лурье

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Имитационное моделирование в лабораторном
практикуме, курсовом и дипломном проектировании

Учебное пособие

Часть 2

Федеральное агентство по образованию

**ГОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Имитационное моделирование в лабораторном практикуме,
курсовом и дипломном проектировании**

**Утверждено редакционно-издательским советом ГОУ ВПО «СибГТУ» в качестве
учебного пособия для студентов всех форм обучения
специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604,
2605, 0305, 3207**

2 часть

Красноярск
2006

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании: Учебное пособие для студентов всех форм обучения специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 0305, 3207. 2 часть/М.С.Лурье, О.М.Лурье - Красноярск: СибГТУ, 2006. – 103 с., рис. 92, табл. 2, библиограф. назв. 7.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения неэлектротехнических специальностей. В нем рассмотрено применение программы **MATLAB** и ее приложения **Simulink** для моделирования схем с различными электротехническими устройствами. Все примеры и описания сделаны для новой версии программы **MATLAB 7 / Simulink 6**. Приведены многочисленные примеры решения таких задач. Пособие будет полезно для студентов всех форм обучения при выполнении ими курсовых и дипломных работ, а также аспирантам, занимающимся исследованиями работы динамических систем.

ISBN 5-7931-0087-3

Рецензенты: К.Т.Н., доц. Кожухов В.А. (КрасГАУ);
доц. В.В. Силин (методический совет СибГТУ).

Редакционно-издательский отдел СибГТУ. 660049, Красноярск, пр. Мира, 82, тип. СибГТУ.

@ ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», 2006.

Оглавление

	Стр.
Оглавление	3
Введение	7
1 Программа MATLAB - мощный инструмент для моделирования электротехнических устройств.....	10
1.1 Новое в MATLAB 7 и Simulink 6	10
1.2 Замечания по установке программы и часто возникающих при этом ошибках	12
2 Пакет SimPowerSystems 3.1	14
2.1 Общие положения и определения	16
2.2 Единицы измерения, используемые при моделировании электротехнических устройств в программе Simulink	17
2.1 Блоки источников питания электрических схем	23
2.2 Основные электрические элементы	37
2.2.1 Блоки подгруппы Elements	38
2.3 Электрические машины в SimPowerSystems 3.1	96
2.4 Измерительные и контрольные устройства библиотек Measurements и Extra Library.....	101
2.4.1 Блоки библиотеки Measurements	102
2.4.2 Блоки Measurements библиотеки Extra Library	109
3 Создание собственных блоков для пакета SimPowerSystems 3.1	117
3.1 Принцип создания электротехнических блоков пользователя.....	117
3.2 Модель нелинейного резистора	118
3.2 Модель насыщающегося реактора.....	121
3.3 Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением...	123
3.3.1 SPS модель двигателя на базе источника тока.....	125
3.3.2 SPS модель двигателя на базе источника напряжения	126
4 Powergui - графический интерфейс пользователя пакета моделирования энергетических систем.....	128
4.1 Расчет схемы комплексным методом	130
4.2 Дискретизация модели.....	131
4.3 Расчет установившегося режима.....	133
4.4 Задание начальных условий расчета.....	135
4.5 Инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины.....	136
4.6 Использование Simulink LTI-Viewer для анализа электрических схем.....	139
4.7 Определение импеданса цепи	141
4.8 Гармонический анализ.....	142
4.9 Создание отчета	144
4.10 Инструмент расчета характеристики намагничивания.....	146
Список литературы	148

Введение

В учебном процессе исследование реальных электротехнических устройств зачастую невозможно. Это объясняется многими причинами. Отсутствием лабораторной и приборной базы, большой стоимостью и габаритами изучаемого электрооборудования, а иногда и опасностью работы с ним.

При научных исследованиях, прежде чем конструировать какую либо экспериментальную установку, нужно сначала рассчитать ее параметры, оценить работу, представить себе процессы, протекающие внутри нее, проверить работу отдельных элементов схемы и т.д.

Все эти задачи можно решить с помощью имитационного моделирования, являющегося разновидностью математического моделирования.

Математическое моделирование – это методология научной и практической деятельности, основанная на построении и использовании математических моделей объектов и процессов [1, 2].

Обычно, под математической моделью понимают – совокупность математических объектов и отношений, отображающих предмет исследования [3]. Подчеркнем, что функционирование модели – это процесс, разворачивающийся во времени [4].

Совокупность полученных материалов можно назвать математической моделью данного объекта. Но использование модели в виде разрозненных формул или графических зависимостей не рационально [5]. Для получения полноценной модели, необходимо объединить полученные соотношения в некую законченную структуру.

Как было указано ранее, в первой части работы, наиболее подходящее для этого решение – использование пакета Simulink из программной среды MATLAB [6].

В результате применения элементов Simulink для моделирования устройства получится так называемая имитационная модель. Под имитационной моделью обычно понимают формальное описание логики функционирования исследуемой системы и взаимодействие ее элементов во времени, учитывающее наиболее существенные причинно-следственные связи, присущие системе [7]. Получившееся в результате «виртуальное устройство» позволит проводить все этапы исследования присущие экспериментальному или опытному образцу, а именно:

- проводить планирование модельных экспериментов;
- реализовать план эксперимента;
- производить анализ и интерпретация результатов моделирования.

Достоинствами имитационных моделей являются:

- автоматический учет всех связей и соотношений между элементами схемы;
- получение результатов моделирования в форме аналогичной результатам при испытаниях реальных электрических устройств (в

виде осциллограмм, временных процессов и т.д.), что упрощает анализ и привязку результатов моделирования к реальному объекту;

- возможность исследования работы отдельных элементов устройства, которые недоступны в реальной конструкции, например, возможно отслеживать изменение тока короткозамкнутого ротора при работе асинхронного двигателя или его электрический вращающий момент;
- возможность исследования поведения устройства в условиях труднодостижимых на экспериментальных стендах или вообще недоступных, например, при исследовании прямого пуска мощного двигателя постоянного тока;
- возможность исследовать устройство в динамике, исследуя реакцию его на быстрые изменения входных величин, что на реальных установках выполнить сложно;
- возможность исследования работы устройства в условиях действия различных мешающих факторов, помех;
- возможность оптимизации элементов электрической схемы с использованием встроенных средств Simulink.

В настоящее время MATLAB – матричная лаборатория – является одной из наиболее развитых систем программирования для научно-технических расчетов, дополненная к настоящему времени несколькими десятками более частных приложений, относящихся к вычислительной математике, обработке информации, конструированию электронных приборов, экономике и ряду других разделов прикладной науки.

Изучение системы MATLAB по фирменной документации, может занять у студента слишком много времени. Не только из-за необходимости читать ее на английском языке со специфическим слэнгом, но, главным образом, ввиду неизбежного для таких руководств последовательного и достаточно формального изложения большого объема информации. Все имеющиеся на русском языке пособия в основном следуют этому стереотипу. Даже для опытного специалиста по расчетам на компьютере такое изучение сопряжено с неоправданно большими затратами труда.

Документация по системе и ее приложениям содержит много тысяч страниц (около 5000 для MATLAB 6.5), и поэтому естественно встает вопрос о том, как ее осваивать. Работа с системой требует определенной математической подготовки, так что обучение можно начинать на втором курсе вуза. Основные сведения о системе на русском языке изложены в руководствах, приведенных в перечне литературы.

Но достоинством системы MATLAB является возможность изучения и использования лишь ее части, причем наиболее наглядной – приложения Simulink.

В нашей монографии [8] мы достаточно подробно описали работу с ядром системы, а в 1-й части настоящей работы были рассмотрены вопросы

применения приложения Simulink для создания виртуальных лабораторных работ.

В нашей стране широко применяется программа MATLAB 5.x и 6.x совместно с версиями Simulink 4.x и 5.x. В начале июня 2004 года компания MathWorks выпустила Release 14 (MATLAB 7 и Simulink 6) - новую версию семейства программного обеспечения.

Выпуск MathWorks Release 14 включает в себя все продукты из семейств MATLAB и Simulink (66 наименований), включая 28 существенно обновленных продуктов и 12 новых продуктов. В него входят новые средства программирования, поддержку целочисленной арифметики и арифметики с одиночной точностью, возможность работать с большими объемами данных, а также средства повышения производительности. Данный выпуск позволяет реализовывать крупномасштабные проекты и разрабатывать приложения, для которых критичны производительность и скорость работы.

Simulink 6 содержит новые средства для работы с большими моделями и повышения скорости работы моделей систем управления, связи и обработки сигналов.

Дальнейшее описание будет относиться именно к данной версии программы. В данной работе мы снова рассматриваем некоторые блоки пакета SimPowerSystems, которые уже изучали ранее в 1-й части работы. Это сделано в тех случаях, когда они подверглись изменениям и дополнениям в новой версии программы (MATLAB 7+Simulink 6) или если будет полезно более углубленное их изучение.

Детальное освоение любой большой программной системы – это достаточно длительный процесс, основу которого составляют прилежная индивидуальная работа, и наша монография призвана дать студентам лишь первоначальный импульс этому процессу в отношении программы MATLAB.

1 Программа MATLAB - мощный инструмент для моделирования электротехнических устройств

MATLAB - это высокоуровневый язык для технических расчетов, а также интерактивная среда для анализа данных, разработки алгоритмов и приложений.

Поскольку основы работы с программой MATLAB рассмотрены нами ранее, в дальнейшем мы все внимание посвятим тем ее разделам, которые необходимы при моделировании устройств и схем электротехники. Но, учитывая появление версии MATLAB 7, приведем перечень тех новшеств, которые появились в ней.

1.1 Новое в MATLAB 7 и Simulink 6

Версия MATLAB 7 содержит множество важных новшеств в части эффективности программирования и генерации исполняемого кода, графики и визуализации, математики, доступа к данным, производительности.

MATLAB 7 предлагает встроенную поддержку для целочисленной математики и математики с плавающей точкой, а также языковые конструкции для обработки и анализа больших наборов данных. Большое количество оптимизаций для типов данных, операций, функций и аппаратного обеспечения привело к значительному повышению скорости вычислений пользовательских приложений. Обновлен и усовершенствован компилятор MATLAB Compiler, который теперь полностью поддерживает язык MATLAB, позволяя разработчикам более эффективно создавать независимые приложения.

Среди новых программных возможностей следует отметить переработанный интерфейс, включающий новые программные и отладочные инструменты, автоматический анализ качества кода, а также возможность сохранения файла программы непосредственно в HTML- и Word- форматах. Новые интерактивные инструменты построения графиков обеспечивают более быстрое и удобное создание MATLAB графиков, включая возможность генерации кода для повторного многократного создания графиков.

Повышена надежность вычислений с числами двойной точности, а также осуществлена поддержка других типов данных: целочисленных и одинарной точности, а также вычислений с ними. Обработка новых типов данных без перевода их в числа двойной точности существенно повышает производительность и уменьшает объем используемой памяти. Это позволяет работать с большими массивами данных. Благодаря новым FFT алгоритмам скорость быстрых Фурье преобразований одинарной точности повышена в среднем на 20%. Кроме того, MATLAB теперь использует библиотеку целочисленных алгоритмов Intel MMX, что повышает скорость вычислений с целочисленными данными до 8 раз.

Содержащийся в семействе продуктов MATLAB 7 компилятор MATLAB Compiler теперь поддерживает весь язык MATLAB, включая

большинство приложений (MATLAB Toolboxes). Улучшенный компилятор MATLAB Compiler дает возможность инженерам распространять независимые приложения, разработанные в MATLAB, или включать их в такие средства разработки, как Excel, C, C++, и COM. В результате, инженеры и ученые теперь могут создавать значительно более широкий спектр MATLAB-приложений и более широко их распространять.

Нас более всего интересует новшества, которые коснулись пакета Simulink, который является платформой для эмуляции и модельного проектирования динамических систем.

Версия Simulink 6 улучшает производительность, скорость реакции, точность моделирования и эффективность протекания процессов при моделировании больших систем. Новые возможности его таковы:

- компонентное моделирование больших систем;
- возможность сегментирования модели на несколько файлов, каждый из которых представляет собой отдельную модель;
- возможность моделировать, тестировать и реализовывать каждый компонент отдельно, еще до его вставки в общую модель системы;
- улучшенная интеграция моделей с существующими системами управления файлами и контроля версий;
- инкрементальная загрузка моделей и генерация кода;
- увеличена скорость обновления диаграмм и моделирования для больших моделей;
- созданы рабочие пространства моделей (Model Workspaces), обеспечивающие отдельные области памяти для хранения параметров и переменных каждой модели;
- улучшена поддержка шин для задания интерфейсов, поддержки операций над сигналами шины и описания шин как структур при генерации кода;
- реализована интеграция Simulink и инструмента Stateflow (это пакет для моделирования событийно управляемых систем);
- унифицированный браузер моделей (Model Explorer) позволяет просматривать, создавать, конфигурировать все сигналы, параметры и свойства моделей;
- объединены и унифицированы настройки параметров моделирования и генерации кода;
- введена поддержка создания и сохранения конфигураций параметров моделирования и генерации кода;
- введена возможность управления данными и их визуализацией;
- добавлены новые объекты данных для задания структур, шин и типов данных;
- введены возможности протоколирования данных и добавления контрольных точек без добавления блоков к модели;
- средство Signal & Scope Manager позволяет подключать к модели источники и приемники сигналов без добавления блоков;

- поддержка языка MATLAB;
- генерация С-кода и реализация приложений на основе внедряемых MATLAB-алгоритмов;
- улучшена функциональность для создания S-функций в виде М-файлов;

Дополнительную информацию о всех нововведениях и текущей версии программы можно получить на сайте производителя этого продукта:

(http://www.mathworks.com/products/new_products/R14_transition.html).

1.2 Замечания по установке программы и часто возникающих при этом ошибках

Устойчивая работа программы, отсутствие сбоев и «глюков» возможны только при учете некоторых особенностей присущих данному семейству программного обеспечения. Здесь, как нигде справедливо известное выражение, что все недостатки среды MATLAB есть только продолжение ее достоинств.

В отличие от большинства математических систем, MATLAB является открытой системой. Это означает, что практически все процедуры и функции MATLAB доступны не только для использования, но и для коррекции и модификации, поскольку представляют собой *текстовые файлы* (с расширением .m), как правило, написанные на языке С. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач. В процессе работы программы с текстовыми файлами функций происходит их компиляция в исполняемый код, поэтому важной становится используемая кодировка при чтении файлов.

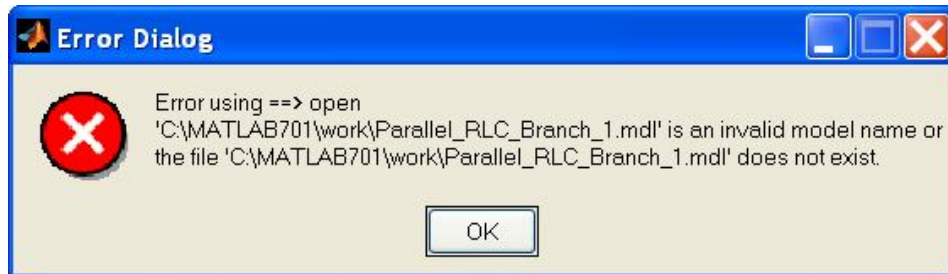
Данная особенность налагает определенные ограничения на использования в операционной системе и при работе самой программы русифицированных кодировок. Программа MATLAB – англоязычная в глубинном смысле этого слова, со всеми вытекающими из этого последствиями. Поэтому для нормальной работы с данной программой следует придерживаться следующих основных правил:

- желательно использовать английскую версию WINDOWS, что не исключает установки русифицированных офисных программ;
- учетное имя пользователя операционной системы и программы MATLAB должно вводиться на английском языке;
- наименования диска, папок для хранения файлов моделей и программ, а также имена самих моделей и программ должны быть только на английском языке;
- желательно не русифицировать наименования блоков моделей или подсистем, но если это необходимо для лучшего понимания работы устройства, можно попробовать это сделать, произведя проверку (сохранив при этом копию выполненной работы с англоязычным тек-

стом), которая должна включать три этапа: проверку на сохранение файла, проверка чтения файла и проверку выполнения файла.

Имеющиеся в продаже пиратские копии «русифицированной» MATLAB, на самом деле работоспособны не полностью, что должны понимать пользователи данной программы.

В случае установки программы на русифицированную операционную систему может возникнуть проблема при чтении файлов моделей разработанных в предыдущей версии (MATLAB 6.x). При этом возникает окно, показанное на рисунке 1.1

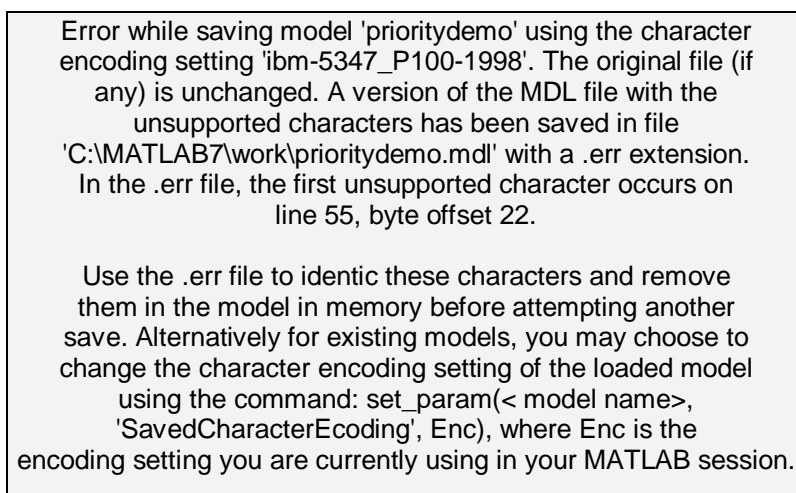


*Рисунок 1.1 – Сообщение об ошибке чтения файла
Parallel_RLC_Branch_1.mdl*

В главном окне **MATLAB** возникает сообщение:

Warning: Unable to load model file 'C:\MATLAB701\work\Parallel_RLC_Branch_1.mdl'. Run "bdclose all; set_param(0, 'CharacterEncoding', Enc)" where Enc is one of windows-1252, ISO-8859-1, then load the model. The first character that is not supported in the current character encoding setting ('ibm-5347_P100-1998') occurs on line 37, byte offset 22. To correctly load models with non-ASCII characters, you must explicitly use the character encoding that was used to save the file. Type "help slCharacterEncoding" for more information on setting character encoding and to learn more about which encodings are commonly found on your platform.

При чтении или сохранении файлов моделей, может появиться окно с сообщением о неверной кодировке, показанное на рисунке 1.2



*Рисунок 1.2 – Сообщение об ошибке сохранения файла **prioritydemo** из-за неверной кодировки*

По советам форума сайта: <http://matlab.exponenta.ru/forum/index.php> во всех этих случаях, следует выполнить команду:

```
Bdclose all
set_param(0,'CharacterEncoding','windows-1252')
```

Данный текст удобно оформить в виде М-файла, сохранить его на диске и запускать после каждого включения программы.

2 Пакет SimPowerSystems 3.1

Библиотека блоков SimPowerSystems 3.1 является одной из множества дополнительных библиотек Simulink 6 ориентированных на моделирование конкретных устройств. Пакет SimPowerSystems 3.1 содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. Он пришел на смену пакету одноименному, входившему в состав версии Simulink 5.x. Хотя его структура и состав несколько изменились, в целом, все знания, полученные о работе его блоков в составе пакета Simulink 5, остаются справедливыми.

В состав SimPowerSystems входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и т.п. оборудования. Имеется также раздел содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них (см. рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Состав пакета SimPowerSystems 3.1 для моделирования электротехнических устройств

Следует отметить, что все программы и модели, разработанные в программной среде предыдущих версий MATLAB, остаются работоспособными

и в новой версии. Их также можно запускать, видоизменять и успешно применять по назначению.

Хотя библиотека SimPowerSystems достаточно обширна, но если все же нужного блока в библиотеке нет, студент имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков, реализуя возможности Simulink по созданию подсистем, так и на основе блоков основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения.

Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, студент может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, имеется возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса (полного сопротивления) участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему, рисунок 2.2.

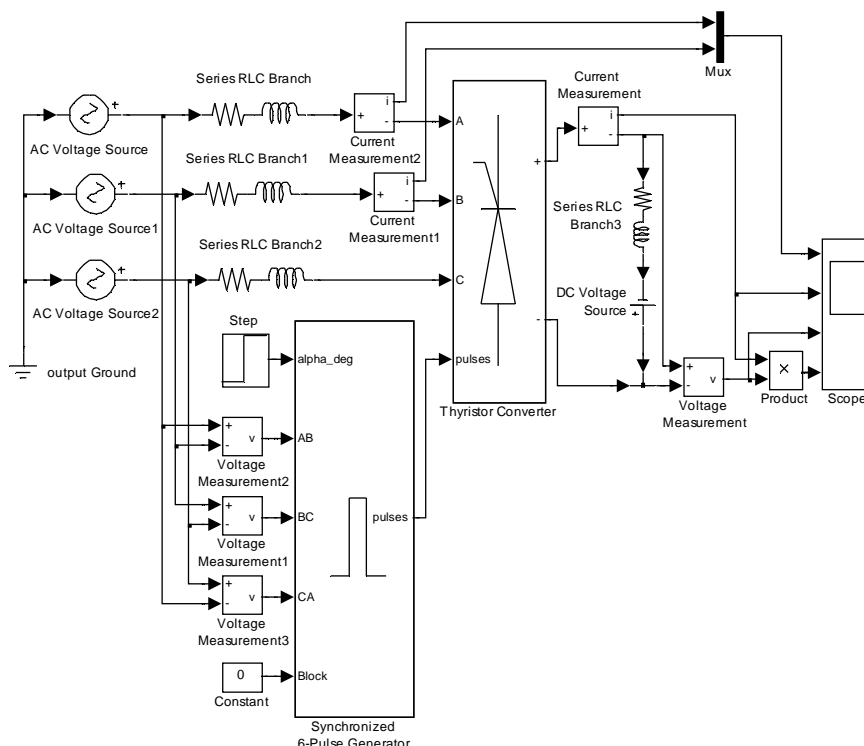


Рисунок 2.2 – Пример сочетания блоков SimPowerSystems с функциональными блоками других библиотек Simulink

Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит повысить ее ра-

ботоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems (в дальнейшем SPS-модели) можно использовать не только блоки остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически не ограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Таким образом, SimPowerSystems на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем.

2.1 Общие положения и определения

Библиотека SimPowerSystems 3.0 имеет восемь основных разделов:

- **Application Libraries** – библиотеки приложений, включающие в себя:
 - **Distributed Resources Library** - библиотеку первичных двигателей в виде ветрогенераторов;
 - **Electric Drives library** - библиотека электроприводов;
 - **Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Library** - библиотека для создания моделей систем электроснабжения;
- **Electrical Sources** - источники электрической энергии;
- **Elements** - электротехнические элементы;
- **Extra Library** – дополнительная библиотека, включающая элементы из различных областей (измерительные приборы, электрические машины и т.д.);
- **Machines** - электрические машины;
- **Measurements** - измерительные и контрольные устройства;
- **Phasor Elements** – включает только один блок (блок синхронного компенсатора);
- **Power Electronics** - устройства силовой электроники.

Используя блоки из этих разделов, можно за короткое время создать полноценную модель достаточно сложной электротехнической системы.

Методика создания SPS-модели ни чем не отличается от методики создания модели на основе базовой библиотеки Simulink. Так же как и для обычной Simulink-модели (S-модели), необходимо выполнить расстановку блоков на схеме, задать их параметры, соединить блоки и установить параметры расчета модели в целом. Однако SPS-модели имеют и некоторые особенности:

1. Входы и выходы SPS-блоков (в данной версии программы), в отличие от блоков Simulink (S -блоков), не показывают направление передачи сигнала, поскольку фактически являются эквивалентами электрических контактов. Таким образом, электрический ток может через вход или выход блока протекать в двух направлениях: как во внутрь блока, так и наружу.
2. Соединительные линии между блоками являются, по сути, электрическими проводами, по которым ток может протекать также в двух

направлениях. В S-моделях же информационный сигнал распространяется только в одном направлении - от выхода одного блока к входу другого.

3. S-блоки и SPS-блоки не могут быть непосредственно соединены друг с другом. Сигнал от S-блока можно передать к SPS-блоку через управляемые источники тока или напряжения, а, наоборот - с помощью измерителей тока или напряжения.
4. В пакете SimPowerSystems предыдущей версии Simulink 5, для соединений несколько линий связи (проводов) должны были использоваться специальные блоки - Connectors (соединители). В новой версии SimPowerSystems 3.1 такая библиотека вообще отсутствует. Электрические проводники в схеме могут соединяться напрямую в узлы с любым количеством ветвей.
5. При расчете схемы содержащей нелинейные блоки следует использовать методы, которые дают наилучшие результаты по быстродействию:
 - **ode15s** – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования,
 - **ode23tb** – неявный метод Рунге-Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем,

2.2 Единицы измерения, используемые при моделировании электротехнических устройств в программе Simulink

При указании параметров электротехнических элементов могут использоваться абсолютные и относительные единицы. Система абсолютных единиц приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Единицы измерения

Параметр	Обозначение	Ед. измерения
Time (время)	second	S (с)
Length (расстояние)	meter	M (м)
Mass (масса)	kilogram	kg (кг)
Energy (энергия)	joule	J (Дж)
Current (ток)	ampere	A (А)
Voltage (напряжение)	volt	V (В)
Active power (активная мощность)	watt	W (Вт)
Apparent power (полная мощность)	volt-ampere	VA (ВА)
Reactive power (реактивная мощность)	var	var (Вар)
Impedance (полное сопротивление)	ohm	Ohm (Ом)
Resistance (сопротивление)	ohm	Ohm (Ом)
Inductance (индуктивность)	henry	H (Гн)
Capacitance (емкость)	farad	F (Ф)
Flux linkage (потокосцепление)	volt-second	V·s (В·с)

Продолжение таблицы 1.1

Rotation speed (угловая скорость)	radians per second	rad/s (рад/с)
	revolutions per minute	rpm (об/мин)
Torque (момент)	newton-meter	N·m (Н·м)
Inertia (момент инерции)	kilogram-meter ²	kg·m ² (кг·м ²)
Friction factor (коэффициент трения)	newton-meter-second	N·m·s (Н·м·с)

В некоторых моделях для задания параметров используются также и относительные единицы (р.е., о.е.). Общая формула для перехода к относительным единицам имеет вид:

$$y = \frac{Y}{Y_{\delta}}, \quad (2.1)$$

где Y - значение физической величины (параметра, переменной и т.п.) в исходной системе единиц, например, в системе единиц СИ;

Y_{δ} - базисное (базовое) значение физической величины, выраженное в той же системе единиц и принятое в качестве единицы измерения величины Y в системе относительных единиц.

Основными базисными единицами электрических величин, при разработке моделей в SimPowerSystem выбраны две независимые величины:

- P_{δ} - базисная мощность, равная номинальной активной мощности устройства (P_n),
- U_{δ} - базисное напряжение, равное номинальному действующему значению напряжения питания устройства (U_n).

Все остальные электрические базисные единицы определяются через эти две единицы. Например, базисный электрический ток:

$$I_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{U_{\delta}}, \quad (2.2)$$

базисное сопротивление:

$$R_{\delta} = \frac{U_{\delta}^2}{P_{\delta}}. \quad (2.3)$$

Для цепей переменного тока должна задаваться базисная частота f_{δ} , равная, как правило, номинальной частоте питающего напряжения f_n .

Для трансформатора, имеющего несколько обмоток, одна и та же мощность (номинальная мощность трансформатора) будет использоваться для всех обмоток. Однако, в соответствии приведенными выше выражениями, каждая обмотка может иметь разные базисные напряжения, ток и сопротивление.

Для асинхронной электрической машины дополнительно задаются:

$$\Omega_{\delta} - \text{базисная угловая скорость}, \quad (2.4)$$

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\Omega_{\delta}} - \text{базисный момент}. \quad (2.5)$$

Вместо момента инерции, при задании параметров машины в относительных единицах, используется инерционная постоянная:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \times J \cdot \Omega_1^2}{P_n}, \quad (2.6)$$

где J - момент инерции,

Ω_1 - угловая скорость вращения магнитного поля.

Инерционная постоянная выражается в секундах. Величина инерционной постоянной показывает, какое время вал электрической машины будет вращаться под действием запасенной кинетической энергии во вращающихся частях машины при номинальной нагрузке. Для машин большой мощности значение этой постоянной лежит в пределах 3 - 5 с. Для машин малой мощности эта величина меньше: 0.5 - 0.7 с.

Пример:

Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора имеют следующие значения (таблица 1.2):

Таблица 1.2 – Номинальные параметры трансформатора

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	m	3	-
Nominal power (номинальная мощность)	P_n	300	кВА
Nominal frequency (номинальная частота сети)	f_n	60	Гц
Первичная обмотка:			
Схема соединения	-	звезда	-
Nominal voltage (номинальное напряжение)	$U1_n$	25	кВ
Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)	$R1^*$	0.01	о.е.
Leakage reactance (Индуктивность рассеяния)	$L1^*$	0.02	о.е.
Вторичная обмотка:			
Схема соединения	-	треугольник	-
Nominal voltage (номинальное напряжение)	$U2_n$	600	В
Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)	$R2^*$	0.01	о.е.
Leakage reactance (Индуктивность рассеяния)	$L2^*$	0.02	о.е.
Magnetizing losses at nominal voltage in % of nominal current (потери на намагничивание при номинальном напряжении в % от номинального тока):			
Resistive (активные)	$I1_{0a}$	1	%
Inductive (реактивные)	$I1_{0p}$	1	%

Выражения для определения базисных единиц даны в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Базисные величины трансформатора

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единицы измерения
Frequency (частота)	$f_{\delta} = f_n$	50	Гц
Первичная обмотка:			
Power (мощность)	$P_{1\delta} = \frac{P_n}{m} = \frac{300 \cdot 10^3}{3}$	$100 \cdot 10^3$	ВА
Voltage (напряжение)	$U_{1\delta} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}$	14434	В
Current (ток)	$I_{1\delta} = \frac{P_{1\delta}}{U_{1\delta}} = \frac{100 \cdot 10^3}{14434}$	6,928	А
Impedance (полное сопротивление)	$Z_{1\delta} = \frac{U_{1\delta}}{I_{1\delta}} = \frac{14434}{6,928}$	2083	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R_{1\delta} = \frac{U_{1\delta}}{I_{1\delta}} = \frac{14434}{6,928}$	2083	Ом
Inductance (индуктивность)	$L_{1\delta} = \frac{Z_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\delta}} = \frac{2083}{2 \cdot 3,142 \cdot 50}$	6,63	Гн
Вторичная обмотка:			
Power (мощность)	$P_{2\delta} = \frac{P_n}{m} = \frac{300 \cdot 10^3}{3}$	$100 \cdot 10^3$	ВА
Voltage (напряжение)	$U_{2\delta} = U_2 = 600$	600	В
Current (ток)	$I_{2\delta} = \frac{P_{2\delta}}{U_{2\delta}} = \frac{100 \cdot 10^3}{600}$	166,7	А
Impedance (полное сопротивление)	$Z_{2\delta} = \frac{U_{2\delta}}{I_{2\delta}} = \frac{600}{166,7}$	3,60	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R_{2\delta} = \frac{U_{2\delta}}{I_{2\delta}} = \frac{600}{166,7}$	3,60	Ом
Inductance (индуктивность)	$L_{2\delta} = \frac{Z_{2\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\delta}} = \frac{3,60}{2 \cdot 3,142 \cdot 50}$	0,01146	Гн

Значения параметров обмоток в абсолютных единицах могут быть определены следующим образом:

Первичная обмотка:

$$R_1 = R_1 * R_{1\delta} = 0,01 \cdot 2083 \text{ Ом},$$

$$L_1 = L_1 * L_{1\delta} = 0,02 \cdot 6,63 = 0,1326 \text{ Гн}.$$

Вторичная обмотка:

$$R_2 = R_2 * R_{2\delta} = 0,01 \cdot 3,60 = 0,036 \text{ Ом},$$

$$L2 = L2^* \cdot L2_{\sigma} = 0,02 \cdot 0,01146 = 0,229 \text{ мГн.}$$

Для цепи намагничивания значение активных потерь равное 1% и значение реактивных потерь равное 1% означает, что активное сопротивление цепи намагничивания равно 100 о.е. и реактивное сопротивление цепи намагничивания равно 100 о.е. Следовательно, абсолютные значения параметров цепи намагничивания равны:

$$R_m = 100 \cdot R1_{\sigma} = 100 \cdot 2083 = 208,3 \text{ кОм,}$$

$$L_m = 100 \cdot L1_{\sigma} = 100 \cdot 6,63 = 663,05 \text{ Гн.}$$

Пример:

Параметры трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя с фазным ротором имеют следующие значения (таблица 1.4):

Таблица 1.4 – Номинальные параметры электродвигателя

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	m	3	-
Число пар полюсов	p	2	-
Nominal power (номинальная мощность)	P_n	2238	ВА
Nominal frequency (номинальная частота сети)	f_n	60	Гц
Line-to-line voltage (номинальное линейное напряжение)	U_n	220	В
Mutual inductance (взаимоиндуктивность обмоток)	L_m	69,31	мГн
Rotor inertia (момент инерции ротора)	J	0,089	кг·м ²
Параметры статора:			
Активное сопротивление	R_s	0,435	Ом
Индуктивность	L_s	0,002	Гн
Параметры ротора, приведенные к статору:			
Активное сопротивление	R'_r	0,816	Ом
Индуктивность	L'_r	0,002	Гн

Выражения для определения базисных единиц рассматриваемого асинхронного двигателя и их значения приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Базисные величины для асинхронного двигателя

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единицы измерения
Power (мощность)	$P_{\sigma} = \frac{P_n}{m} = \frac{2238}{3}$	746	ВА
Frequency (частота)	$f_{\sigma} = f_n$	60	Гц
Voltage (напряжение)	$U_{\sigma} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}}$	127,0	В

Продолжение таблицы 1.5

Current (ток)	$I_{\bar{o}} = \frac{P_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}} = \frac{746}{127,0}$	5,874	А
Impedance (полное сопротивление)	$Z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}}} = \frac{127,0}{5,874}$	21,62	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}}} = \frac{127,0}{5,874}$	21,62	Ом
Inductance (индуктивность)	$L_{\bar{o}} = \frac{Z_{\bar{o}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\bar{o}}} = \frac{21,62}{2 \cdot 3,142 \cdot 60}$	0,05735	Гн
Speed (скорость)	$\Omega_{\bar{o}} = \Omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{p} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 60}{2}$	188,5	рад/с
Torque (момент)	$M_{\bar{o}} = \frac{P_{\bar{o}} \cdot m}{\Omega_{\bar{o}}} = \frac{746 \cdot 3}{188,5}$	11,87	Н·м

Значения параметров обмоток двигателя и цепи намагничивания могут быть определены следующим образом:

Сопротивление статора

$$R_{s*} = \frac{R_s}{R_{\bar{o}}} = \frac{0,435}{21,62} = 0,0201 \text{ о.е.}$$

Индуктивность статора:

$$L_{s*} = \frac{L_s}{L_{\bar{o}}} = \frac{0,002}{0,05735} = 0,0349 \text{ о.е.}$$

Сопротивление ротора:

$$R_{r*} = \frac{R_r'}{R_{\bar{o}}} = \frac{0,816}{21,62} = 0,0377 \text{ о.е.}$$

Индуктивность ротора:

$$L_{r*} = \frac{L_r'}{L_{\bar{o}}} = \frac{0,002}{0,05735} = 0,0349 \text{ о.е.}$$

Величина инерционной постоянной равна:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \times J \cdot \Omega_1^2}{P_n} = \frac{\frac{1}{2} \times 0,089 \cdot 188,5^2}{2238} = 0,7065 \text{ с.}$$

Рассчитанные параметры асинхронной машины заданы "по умолчанию" для модели машины в относительных единицах (блок **Asynchronous Machine pu Units**).

При наблюдении переменных блоком **Scope** следует иметь в виду, что блок показывает *мгновенные* значения переменных. Иными словами, максимальное значение синусоидальной переменной, показываемое осциллографом, будет в $\sqrt{2}$ больше, чем заданное в параметрах блока действующее значение.

Использование относительных единиц имеет следующие преимущества:

- Облегчается сравнение значений переменных в разных режимах работы. Например, если величина напряжения какого-либо участка электрической цепи равна 1.5 о.е., то это означает, что величина напряжения этого участка в 1.5 раза больше, чем номинальное питающее напряжение.

- Величины полных сопротивлений слабо меняются при изменении мощности и питающего напряжения устройства. Например, для всех трансформаторов в диапазоне мощностей от 3 до 300 кВА реактивное сопротивление рассеяния изменяется в пределах между 0.01 и 0.03 о.е., а сопротивления обмоток изменяются от 0.01 до 0.005 о.е., безотносительно номинального напряжения. В свою очередь, для трансформаторов в диапазоне мощностей от 300 кВА до 300 МВА реактивное сопротивление рассеяния изменяется в пределах между 0.03 и 0.12 о.е., а сопротивления обмоток изменяются от 0.005 до 0.002 о.е. Поэтому, если параметры трансформатора мощностью 10 кВА не известны, не будет большой ошибкой принять среднее значение 0.02 о.е. для реактивности рассеяния и 0.0075 о.е. для обмоточных сопротивлений.

- Вычисления в относительных единицах упрощены. Когда все полные сопротивления энергетической системы вычислены на общей энергетической базе и номинальных напряжениях подсетей, то общее полное сопротивление может быть вычислено простым суммированием полных сопротивлений подсетей без учета коэффициентов трансформации.

2.1 Блоки источников питания электрических схем

Библиотека источников электрической энергии Electrical Sources пакета SimPowerSystem 3.1 показана на рисунке 2.3.

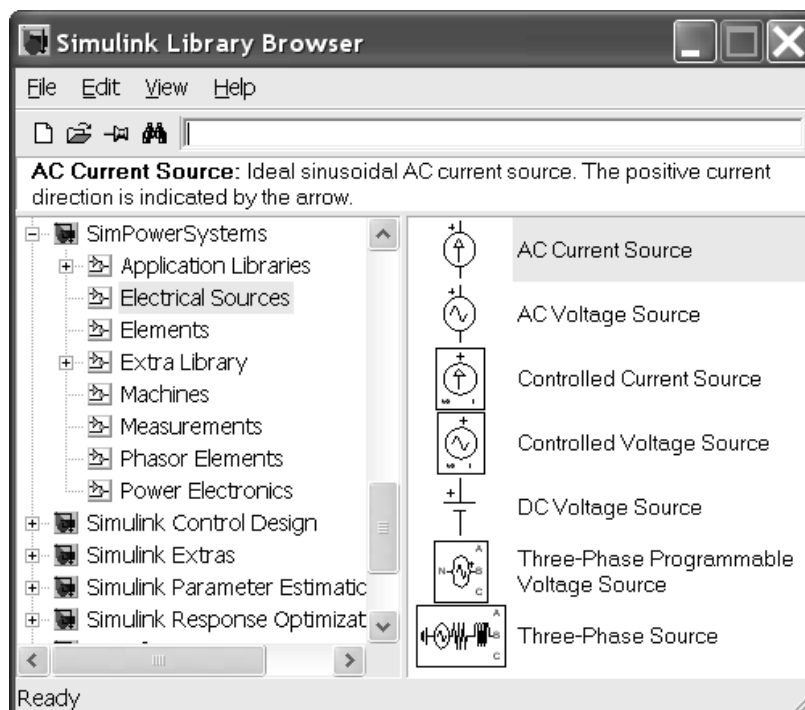
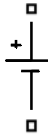


Рисунок 2.3 – Библиотек Electrical Sources и источников Electrical Sources

В нее входит семь элементов. Ниже, мы подробно, рассмотрим каждый из них и приведем соответствующие примеры применения данных элементов в различных схемах.

 DC Voltage Source	Идеальный источник постоянного напряжения
Назначение:	Вырабатывает постоянное по уровню напряжение

Двойной щелчок на изображении блока в окне модели открывает окно задания параметров, изображенное на рисунке 2.4.

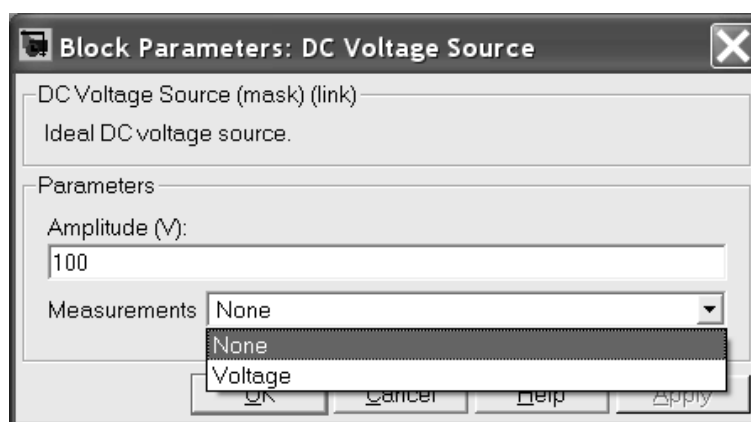


Рисунок 2.4 – Окно задания параметров блока **DC Voltage Source**

Параметры блока:

Amplitude (V) [Амплитуда (В)] - Задаёт величину выходного напряжения источника.

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Voltage** - выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, т.е. его собственное сопротивление равно нулю.

Пример:

На рисунке 2.5 показан пример включения активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение. Подключение источника к нагрузке обеспечивается блоком **Breaker** (ключом), который замыкает электрическую цепь по сигналу, вырабатываемому генератором ступенчатого сигнала **Step**. Измерение тока в цепи выполняется с помощью блока **Current Measurement**. Полученный измерителем сигнал отображается с помощью блока **Scope**.

Примечание: Упоминаемые здесь и далее блоки (**Breaker**, **Step**, **Current Measurement**, **Scope**) рассмотрены ранее в первой части настоящей

работы. Далее мы вернемся к некоторым из них для более углубленного изучения.

Здесь и далее окно блока **Scope** (осциллограф) несколько отредактировано (цвет фона изменен на белый). Эта операция в окне блока становится доступной по командам:

```
set(0,'ShowHiddenHandles','On')
set(gcf,'menubar','figure')
```

Применение данных команд описано ранее, в первой части работы, и далее не будет комментироваться.

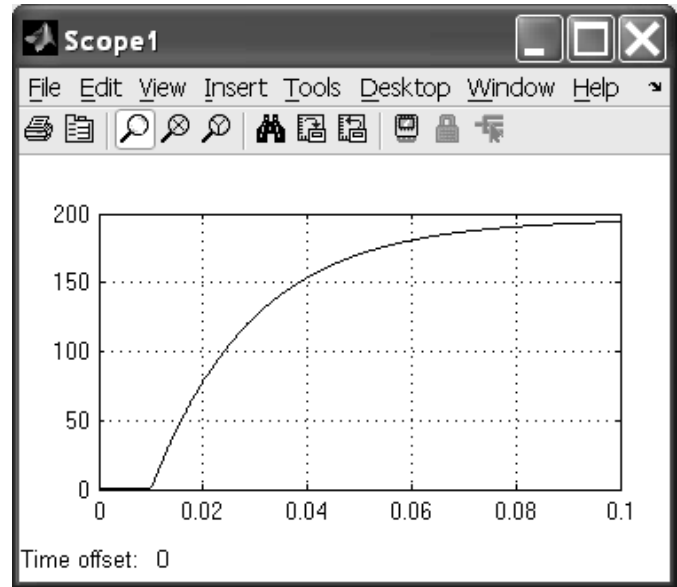
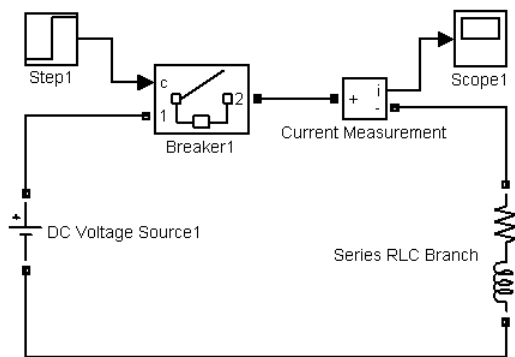



Рисунок 2.5 – Пример применения блока **DC Voltage Source** для моделирования процесса включения катушки на постоянное напряжение

 AC Voltage Source	Идеальный источник переменного напряжения
Назначение:	Вырабатывает синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой

Двойной щелчок на изображении блока в окне модели открывает окно задания параметров, изображенное на рисунке 2.6.

Параметры блока:

Peak Amplitude (V) [Амплитуда] - Амплитуда выходного напряжения источника;

Phase (deg) [Фаза (град)] - Начальная фаза;

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] - Частота источника;

Sample time [Шаг дискретизации] - Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей;

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Voltage** - выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, т.е. его собственное сопротивление равно нулю.

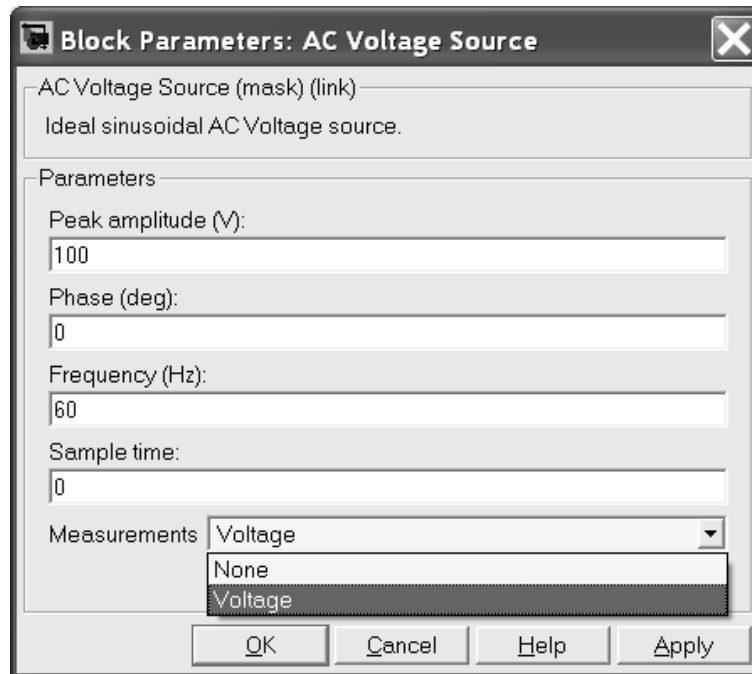


Рисунок 2.6 – Окно задания параметров блока *AC Voltage Source*

Пример:

На рисунке 2.7 показана схема, моделирующая подключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного напряжения. Там же приведен график тока в нагрузке.

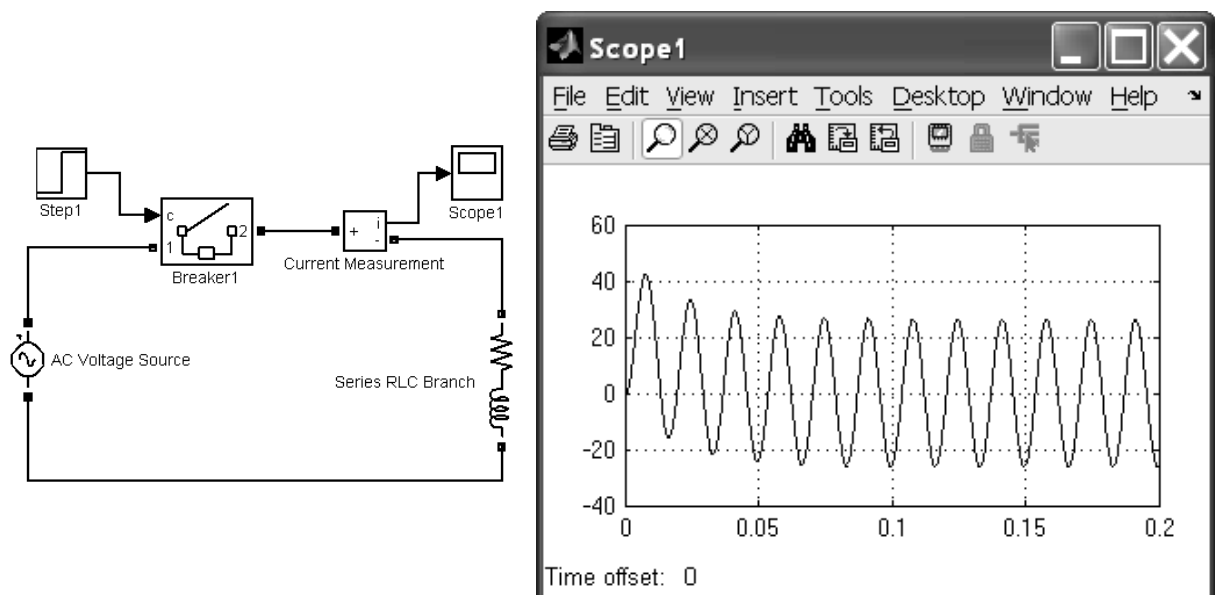

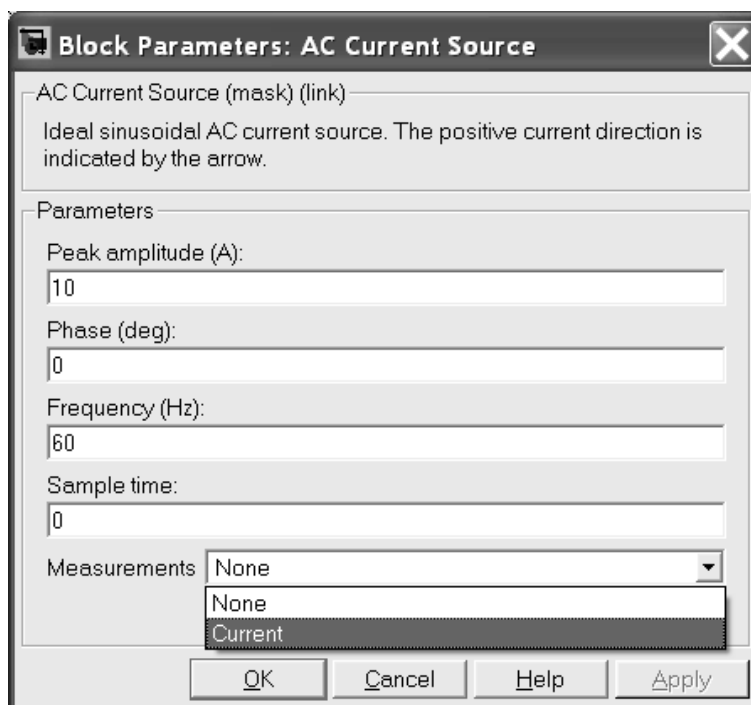


Рисунок 2.7 – Схема включения катушки на переменное напряжение

 AC Current Source	Идеальный источник переменного тока
Назначение:	Вырабатывает синусоидальный ток с постоянной амплитудой.

Двойной щелчок на изображении блока в окне модели открывает окно задания параметров, изображенное на рисунке 2.8.

Рисунок 2.8 – Окно задания параметров блока *AC Current Source*

Параметры блока:

Peak Amplitude (A) [Амплитуда] - Амплитуда выходного тока источника;

Phase (deg) [Фаза (град)] - Начальная фаза;

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] - Частота источника;

Sample time [Шаг дискретизации] - Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей;

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Current** - выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, т.е. его собственное сопротивление равно бесконечности.

Пример:

На рисунке 2.9 показана схема, моделирующая работу двух источников тока на активную нагрузку. Источники имеют одинаковую амплитуду тока (3 А), но разную частоту (50 и 60 Гц). Ток в нагрузке является суммой токов этих двух источников.

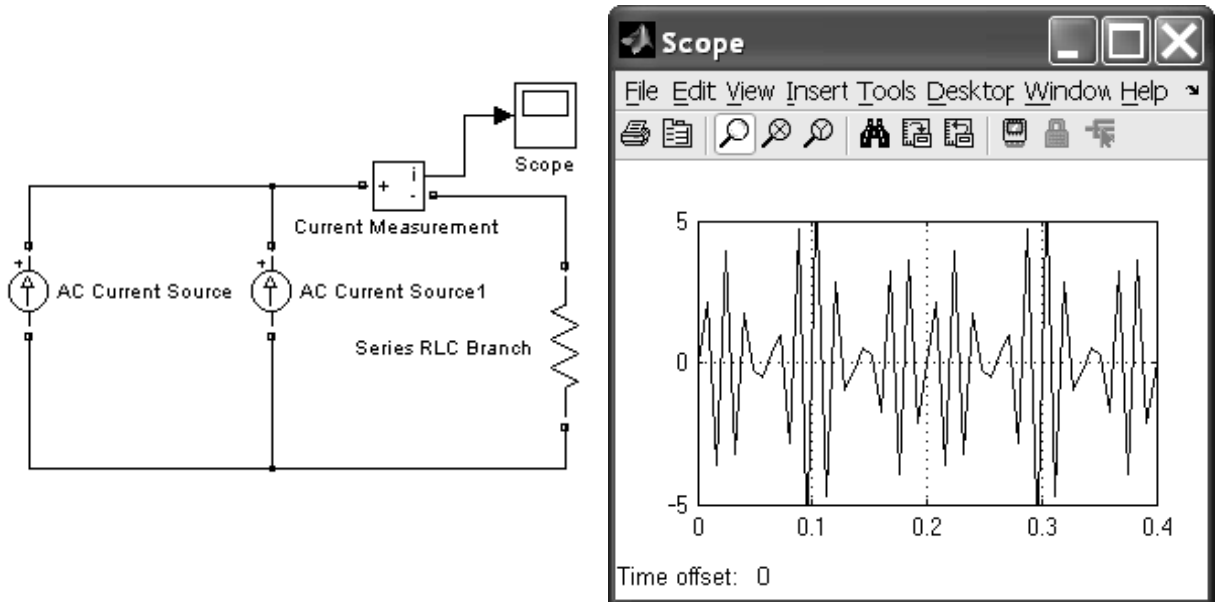
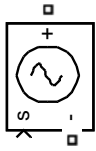


Рисунок 2.9 – Схема суммирования токов на источниках тока

 Controlled Voltage Source	Управляемый источник напряжения
Назначение:	Вырабатывает напряжение в соответствии с сигналом управления.

Окно задания параметров, изображенно на рисунке 2.10.

Параметры блока:

Initialize [Инициализация] - При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами - амплитудой, фазой и частотой;

Source type [Тип источника] - Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- **AC** - источник переменного напряжения,
- **DC** - источник постоянного напряжения;

Initial amplitude (V) [Начальная амплитуда (В)] - Начальное значение выходного напряжения источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника;

Phase (deg) [Начальная фаза (град)] - Начальная фаза. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного напряжения;

Initial frequency (Hz) [Initial частота (Гц)] - Начальная частота источника. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного напряжения;

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** -, нет переменных для отображения,
- **Voltage** - выходное напряжение источника.

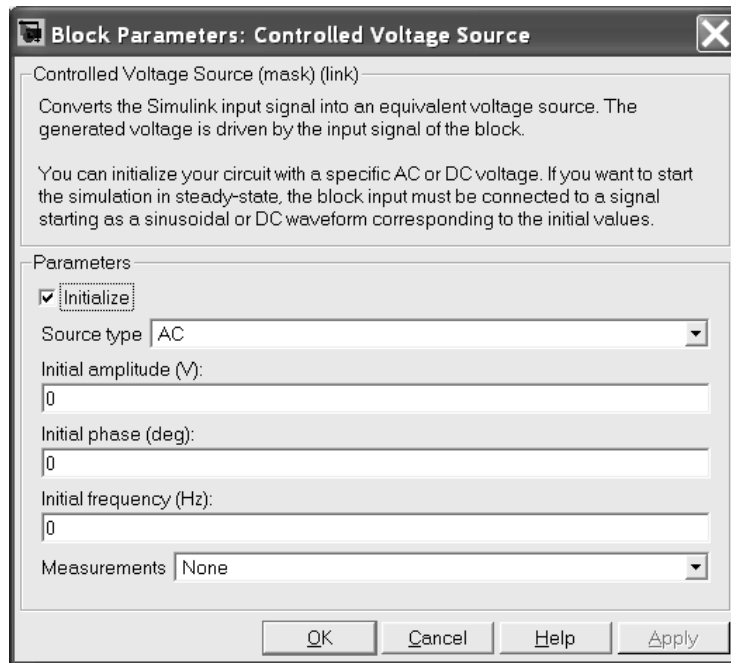


Рисунок 2.10 – Окно задания параметров блока *Controlled Voltage Source*

Внутреннее собственное сопротивление блока равно нулю.

Пример:

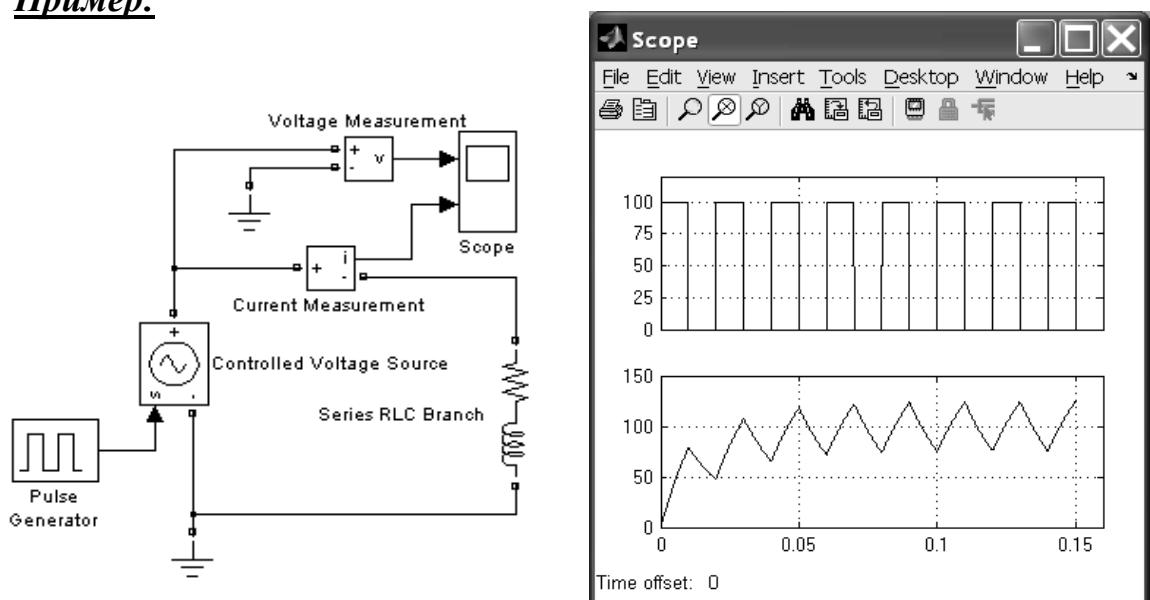
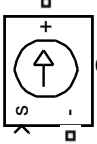


Рисунок 2.11 – Схема формирования на катушке импульсного напряжения

На рис. 2.11 показана схема с использованием управляемого источника напряжения, формирующего по сигналу управления прямоугольное напряжение на нагрузке.

 Controlled Current Source	Управляемый источник тока
Назначение:	Вырабатывает ток соответствие с сигналом управления.

Окно задания параметров показано на рисунке 2.12.

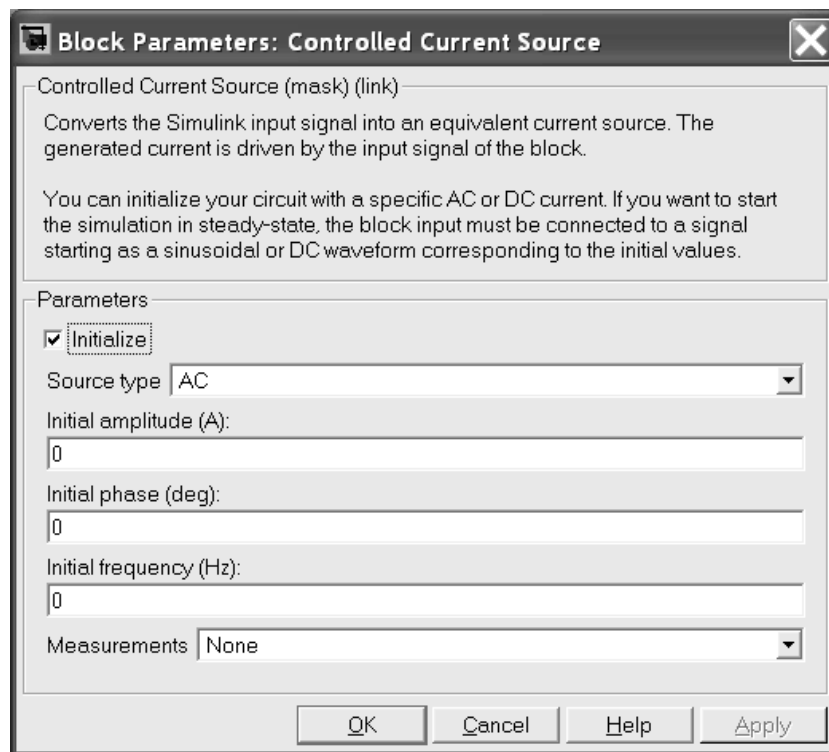


Рисунок 2.12 – Окно задания параметров блока *Controlled Current Source*

Параметры блока:

Initialize [Инициализация] - При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами - амплитудой, фазой и частотой;

Source type [Тип источника] - Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- **AC** - источник переменного тока,
- **DC** - источник постоянного тока;

Initial amplitude (A) [Начальная амплитуда (A)] - Начальное значение выходного тока источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника;

Phase (deg) [Начальная фаза (град)] - Начальная фаза. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока;

Initial frequency (Hz) [Initial частота (Гц)] - Начальная частота источника. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока;

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Current** - выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, т.е. его собственное сопротивление равно бесконечности.

Пример:

На рисунке 2.13 показана схема с использованием управляемого источника тока, формирующего в нагрузке серии синусоидальных импульсов тока.

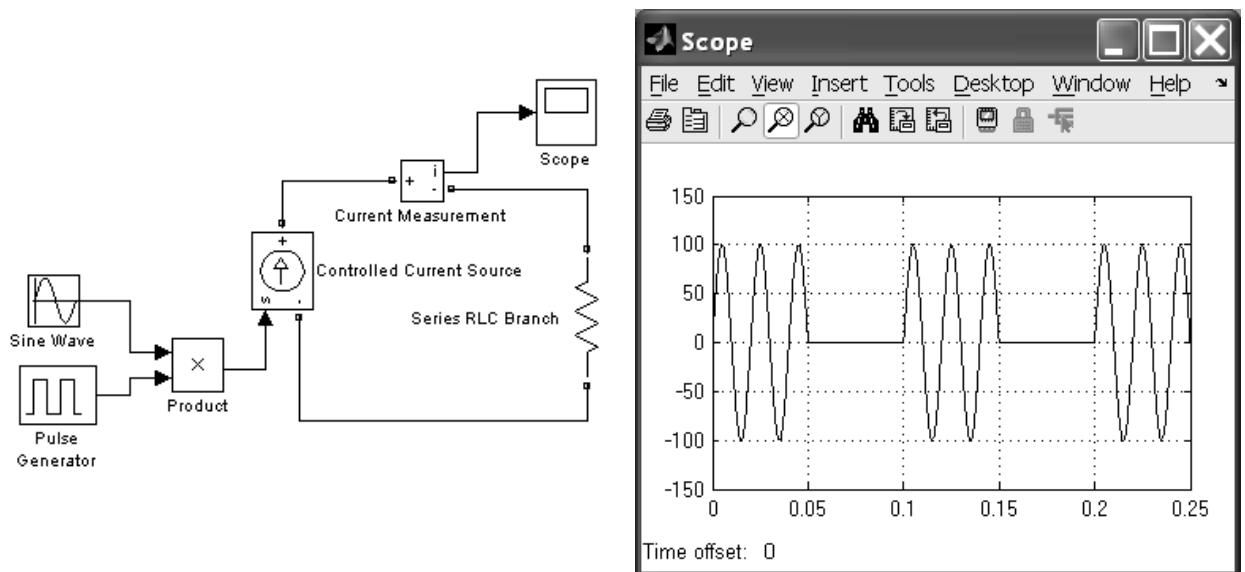


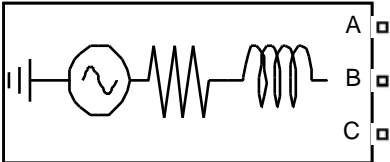
Рисунок 2.13 – Схема формирования синусоидальных пачек импульсов

В данной схеме, прямоугольные импульсы, поступающие с генератора импульсов **Pulse Generator**, и синусоидальный сигнал с выхода генератора **Sine Wave** перемножаются с помощью блока из **Product**. Полученный сигнал поступает на управляющий вход генератора тока **Controlled Current Source**. Как видно из осциллограммы, ток в цепи с активной нагрузкой точно повторяет форму управляющего сигнала.

Данный пример еще раз показывает возможность сочетания электротехнических блоков библиотеки SimPowerSystems с базовыми математическими блоками Simulink.

Такое сочетание в ряде случаев оказывается весьма полезным и по ходу дальнейшего изложения материала мы будем пояснять данное положение на примерах.

О работе блоков общей библиотеки Simulink можно прочитать в литературных источниках [8, 9, 10, 11].

 <p>Three-Phase Source</p>	Трехфазный источник напряжения
Назначение:	Вырабатывает трехфазную систему напряжений.

Окно задания параметров показано на рисунке 2.14.

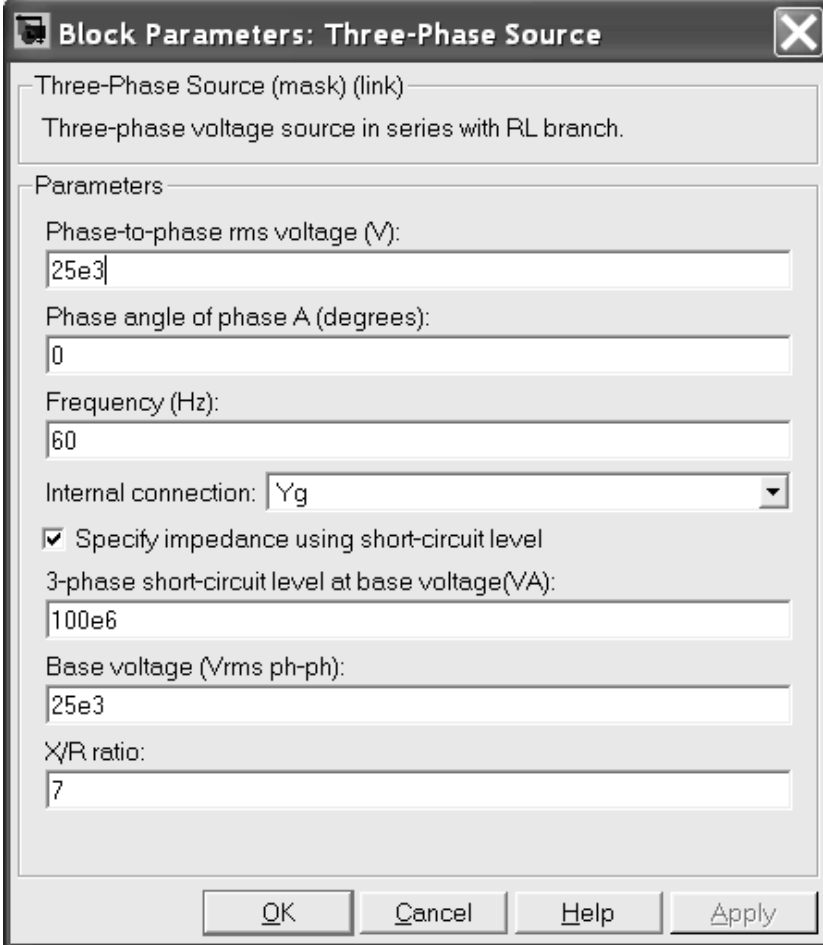


Рисунок 2.14 – Окно задания параметров блока **Three-Phase Source**

Параметры блока:

Phase-to-phase rms voltage (V) [Действующее значение линейного напряжения];

Phase angle of phase A (deg) [Начальная фаза напряжения в фазе A (град)];

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] - Частота источника;

Internal connection [Соединение фаз источника] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** - звезда,
- **Yn** - звезда с нулевым проводом,
- **Yg** - звезда с заземленной нейтралью;

Specify impedance using short-circuit level [Задать собственное полное сопротивление источника используя параметры короткого замыкания] - При установке данного параметра в окне диалога появляются дополнительные графы для ввода параметров короткого замыкания источника.

Source resistance (Ohms) [Собственное сопротивление источника (Ом)];

Source inductance (H) [Собственная индуктивность источника (Гн)];

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA) [Мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения];

Base voltage (Vrms ph-ph) [Действующее значение линейного базового напряжения] - Величина базового линейного напряжения источника при котором определена мощность короткого замыкания;

X/R ratio [Отношение индуктивного и активного сопротивлений].

При задании импеданса источника через мощность короткого замыкания реактивное сопротивление источника определяется по выражению:

$$X = \frac{U_{K3}^2}{Q_{K3}}, \quad (2.7)$$

где Q_{K3} - мощность короткого замыкания;

U_{K3} - напряжение источника при котором определена мощность короткого замыкания.

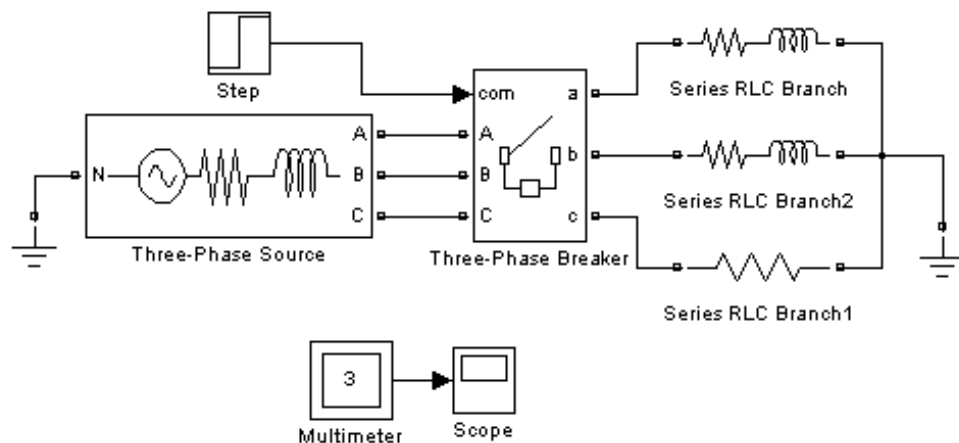
Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

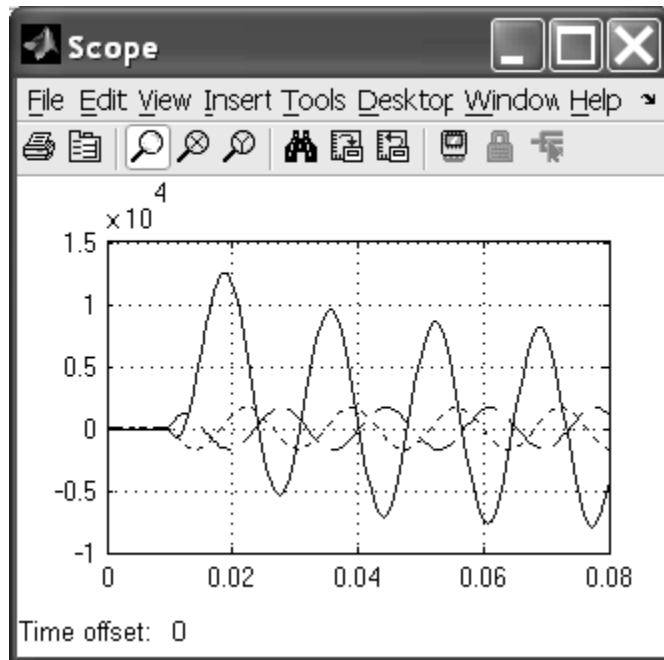
$$R = \frac{X}{k}, \quad (2.8)$$

где k - отношение X к R (параметр X / R ratio).

Пример:

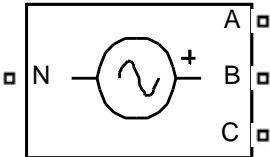
На рисунке 2.15,а показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке. Токи в нагрузке измерены с помощью блока **Multimetr** (рисунок 2.15,б).





б

Рисунок 2.15 – Токи в фазах при включении трехфазного источника на несимметричную нагрузку

 <p>Three-Phase Programmable Voltage Source</p>	<p>Трехфазный программируемый источник напряжения</p>
<p>Назначение:</p>	<p>Вырабатывает трехфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты, а также гармонического состава</p>

Окно задания параметров приведено на рисунке 2.16.

Параметры блока:

Positive-sequence [Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)]

[Прямая последовательность [Амплитуда Фаза (градусы) Частота (Гц)]] - Параметр задается в виде вектора из трех элементов;

Time variation of [Изменение во времени] - Раскрывающийся список позволяет выбрать параметр источника, который будет изменяться с течением времени. Значение параметра выбирается из списка:

- **None** - Нет изменяющихся во времени параметров источника,
- **Amplitude** - Амплитуда,
- **Phase** - Фаза,
- **Frequency** – Частота;

Type of variation [Способ изменения] - Параметр задает вид изменения выбранного параметра источника. Вид изменения выбирается из списка:

- **Step** - Ступенчатое изменение,
- **Ramp** - Линейное изменение,
- **Modulation** - Модуляция,
- **Table of time-amplitude pairs** - Таблица - 'время-значение';

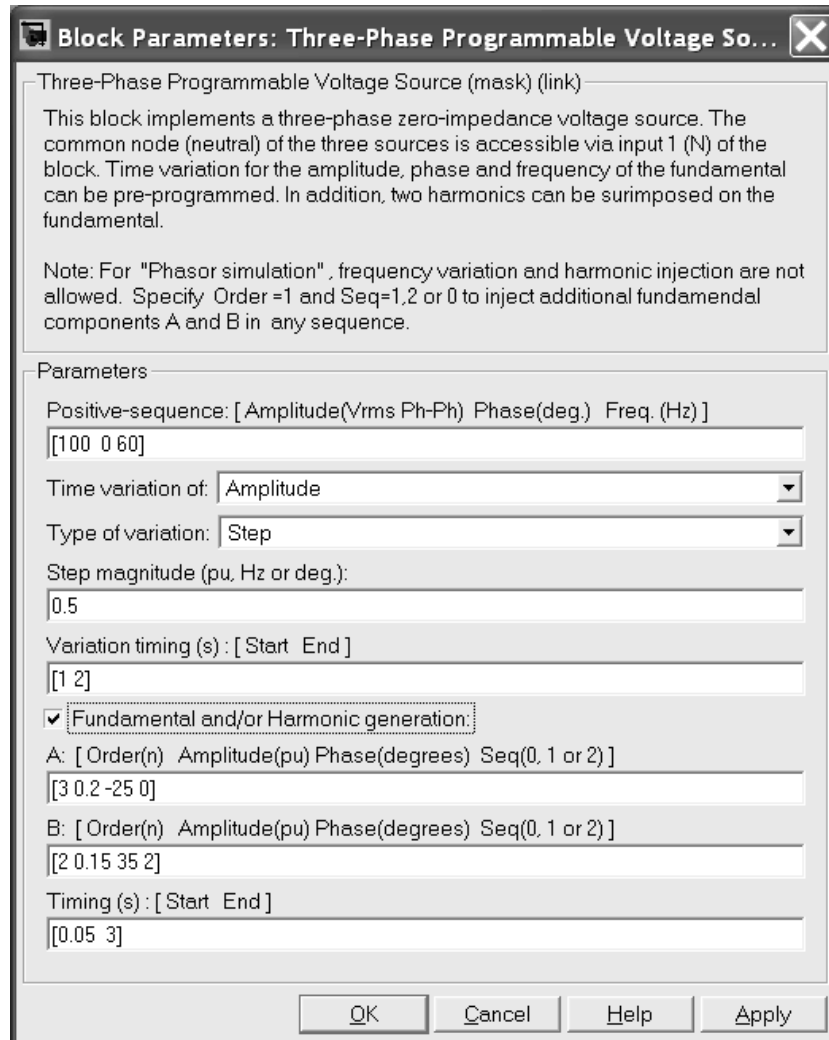


Рисунок 2.16 – Окно параметров блока *Three-Phase Programmable Voltage Source*

Step magnitude [Уровень ступенчатого сигнала] - Задает величину, на которую ступенчато изменяется выбранный параметр. Изменение величины напряжения задается в относительных единицах (о.е.), фазы - в эл. градусах и частоты - в Гц. Например, если выбрано ступенчатое изменение амплитуды сигнала равное 0.5, то это означает, что величина выходного напряжения источника будет увеличена на 0.5 относительно указанного в первой графе значения. Время в течение, которого величина выходного напряжения будет изменена, задается в графе **Variation timing**;

Rate of change (value/s) [Скорость изменения (величина/с)] - Задает скорость изменения параметра источника. Изменение величины напряжения задается в о. е./с, фазы - в эл. градусах/с и частоты - в Гц/с;

Amplitude of the modulation [Амплитуда модуляции] - В данной графе задается амплитуда модуляции параметра источника. Амплитуда модуляции напряжения задается в относительных единицах (о.е.), фазы - в эл. градусах и частоты - в Гц;

Frequency of the modulation (Hz) [Частота модуляции (Гц)];

Variation timing (s) [Start End] - [Время действия изменения [Начало Конец]] - Параметр определяет время начала и время окончания изменения выбранного параметра источника. Параметр задается в виде вектора из двух значений (начальное и конечное время);

Fundamental and/or Harmonic generation [Наложение прямой обратной или нулевой последовательности и/или высших гармоник];

A: [Order(n) Amplitude Phase(degrees) Seq(0, 1 or 2)]

[A: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]] - В графе задается вектор параметров генерируемой гармоники напряжения. В него входят: номер гармоники; амплитуда (в относительных единицах); начальная фаза; последовательность (0 - нулевая, 1 - прямая, 2 - обратная). Результирующее выходное напряжение будет являться суммой напряжений заданных в графе **Positive-sequence** и в данной графе;

B: [Order(n) Amplitude Phase(degrees) Seq(0, 1 or 2)]

[B: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]] - Параметр задается аналогично предыдущему;

Harmonic timing (s) [Start End] [Время действия гармоники (с) [Начало Конец]] - В графе задается вектор начального и конечного значения времени для генерации гармоник.

Источник является идеальным источником напряжения (его внутреннее сопротивление равно нулю).

Пример:

На рисунке 2.17 показана схема с использованием трехфазного программируемого источника напряжения.

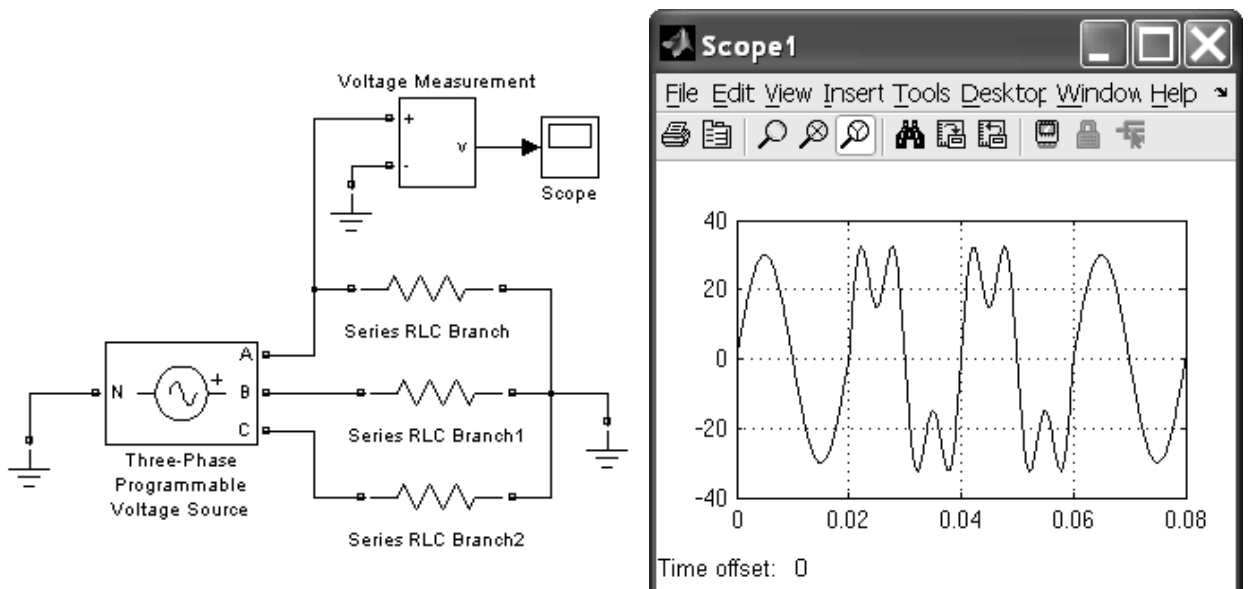


Рисунок 2.17 – Применение трехфазного программируемого источника

Источник подключен к симметричной активной нагрузке величиной 10 Ом. Действующее значение фазного напряжения источника 30 В. В интервале времени от 0.02 до 0.06 с источник дополнительно генерирует третью гармонику напряжения прямой последовательности с амплитудой 0.5 о.е. Напряжение одной из фаз приведено на экране осциллографа.

2.2 Основные электрические элементы

В состав библиотеки Elements входят 29 блоков, показанных ниже.

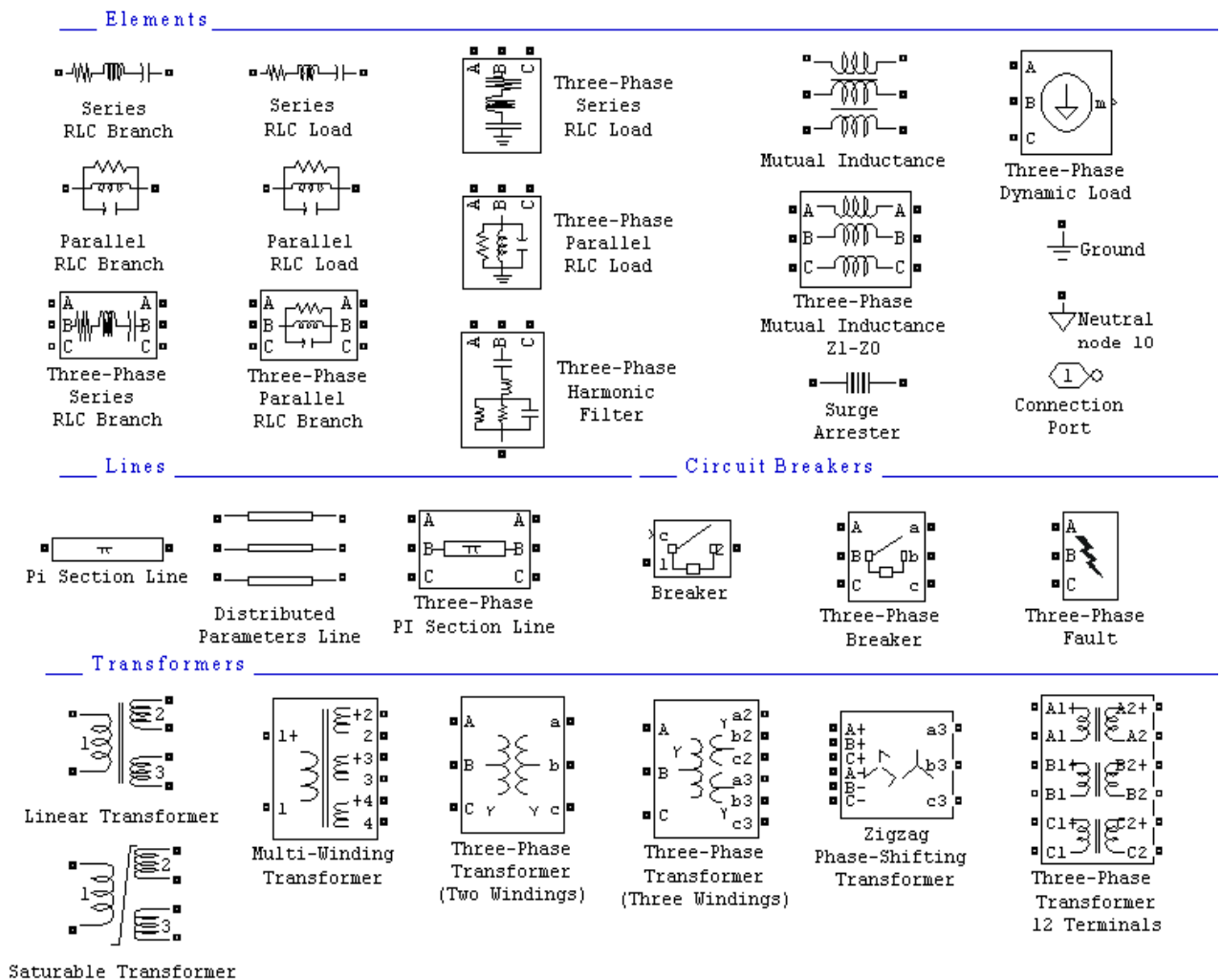


Рисунок 2.18 – Блоки электрических элементов библиотеки Elements

В своей основе, их характеристики остаются такими же, как и в предыдущей версии программы, но есть и отличия. Далее мы подробно рассмотрим параметры и вопросы применения большинства из них.


Как видно из рисунка 2.18, все блоки разделены на четыре группы:

- **Elements** (элементы) – блоки для моделирования различного рода электрических нагрузок, одно и трехфазных;
- **Lines** (линии) – блоки для моделирования линий с распределенными параметрами;

- **Circuit Breakers** (коммутаторы) – блоки для моделирования коммутационных процессов в цепях, в том числе и аварийных (**Three-Phase Fault**);
- **Transformers** (трансформаторы) – блоки для моделирования трансформаторов.

Рассмотрим их последовательно.

2.2.1 Блоки подгруппы Elements

 Series RLC Branch	Последовательная RLC-цепь
Назначение:	Моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора

Окно задания параметров показано на рисунке 2.19.

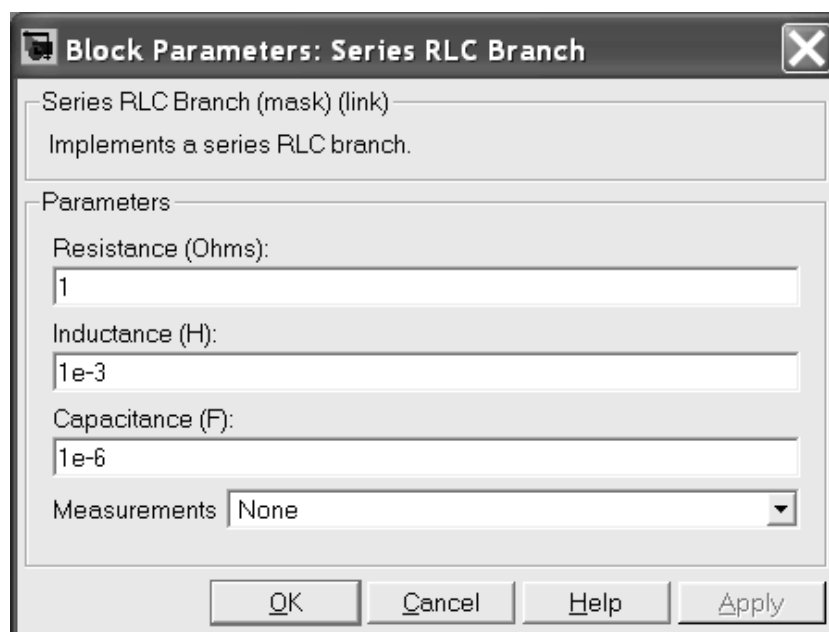


Рисунок 2.19 – Окно параметров блока *Series RLC Branch*

Параметры блока:

Resistance R (Ohms) [Сопротивление (Ом)] - Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет;

Inductance L (H) [Индуктивность (Гн)] - Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее величину нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет;

Capacitance C (F) [Емкость (Ф)] - Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости нужно задать равной **inf** (бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет;

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage** - напряжение на зажимах цепи,
- **Branch current** - ток цепи,
- **Branch voltage and current** - напряжение и ток цепи;

Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки:

- **Ib** - ток цепи,
- **Ub** - напряжение цепи.

Пример:

На рисунке 2.20 показана схема с использованием последовательного колебательного контура. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами: $R = 0.1$ Ом, $L = 0.001$ Гн и $C = 0.001$ Ф.

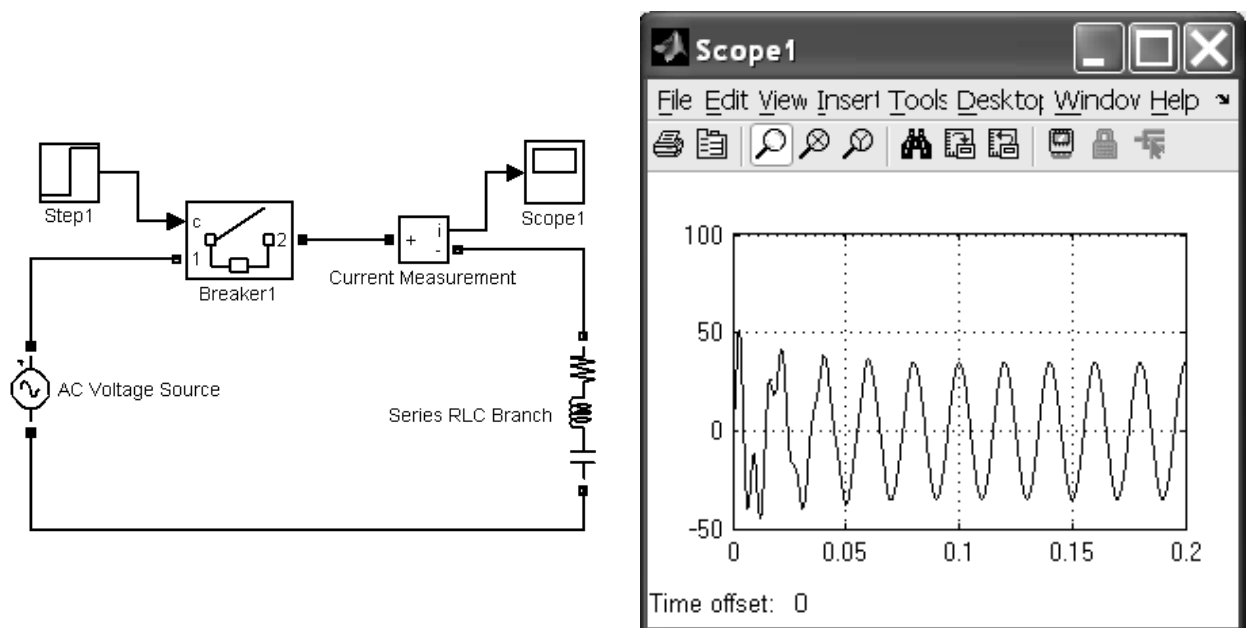


Рисунок 2.20 – Пример использования в модели последовательного контура RLC

Данный блок позволяет создать и одиночный элемент.

Если необходим один резистор, то другим элементам задаются значения: $L=0$; $C=inf$.

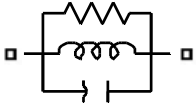
Если необходима одна индуктивность, то: $R=0$; $C=inf$.

Если нужен один конденсатор, то принимают: $R=0$; $L=0$.

Соответственно, меняется вид отображаемой пиктограммы элемента.

К сожалению, обозначение резистора и индуктивности в системе MATLAB несколько отличаются от принятых в нашей стране. Для предыду-

щей версии пакета SimPowerSystems (Simulink 5), существовала возможность изменения отображения элемента, путем корректировки одного из файлов программы (см. <http://matlab.exponenta.ru/simpower/default.php>), но изменения в рассматриваемой версии настолько велики, что старые советы непригодны.

 <p>Parallel RLC Branch</p>	Параллельная RLC-цепь
Назначение:	Моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора

Окно задания параметров показано на рисунке 2.21.

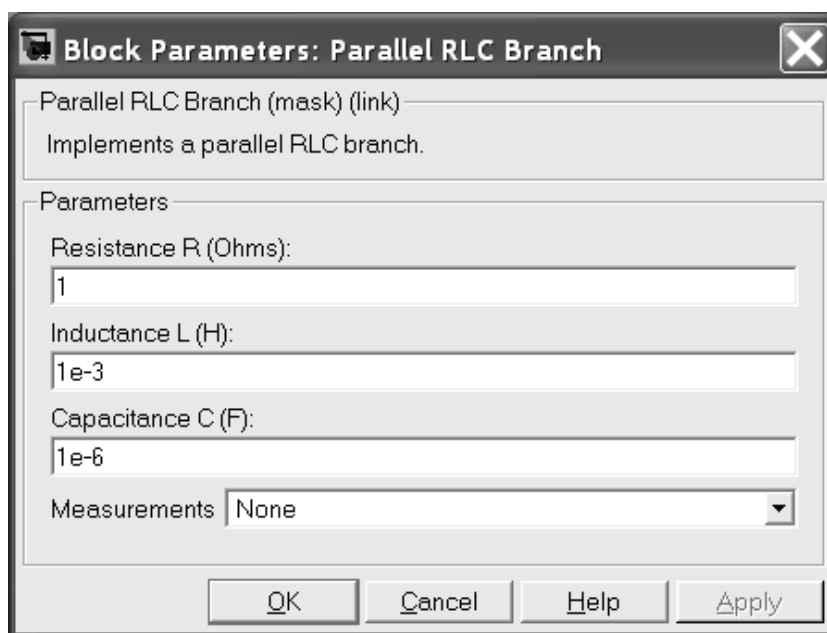


Рисунок 2.21 – Окно параметров блока *Parallel RLC Branch*

Параметры блока аналогичны указанным выше для блока последовательного соединения RLC - **Series RLC Branch**.

Пример:

На рисунке 2.22 показана схема с использованием параллельного колебательного контура. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:

$$R = 0.1 \text{ Ом}, L = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн и } C = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.}$$

На осциллограмме приведен ток в цепи во время вид переходного процесса включения ее на переменное напряжение.

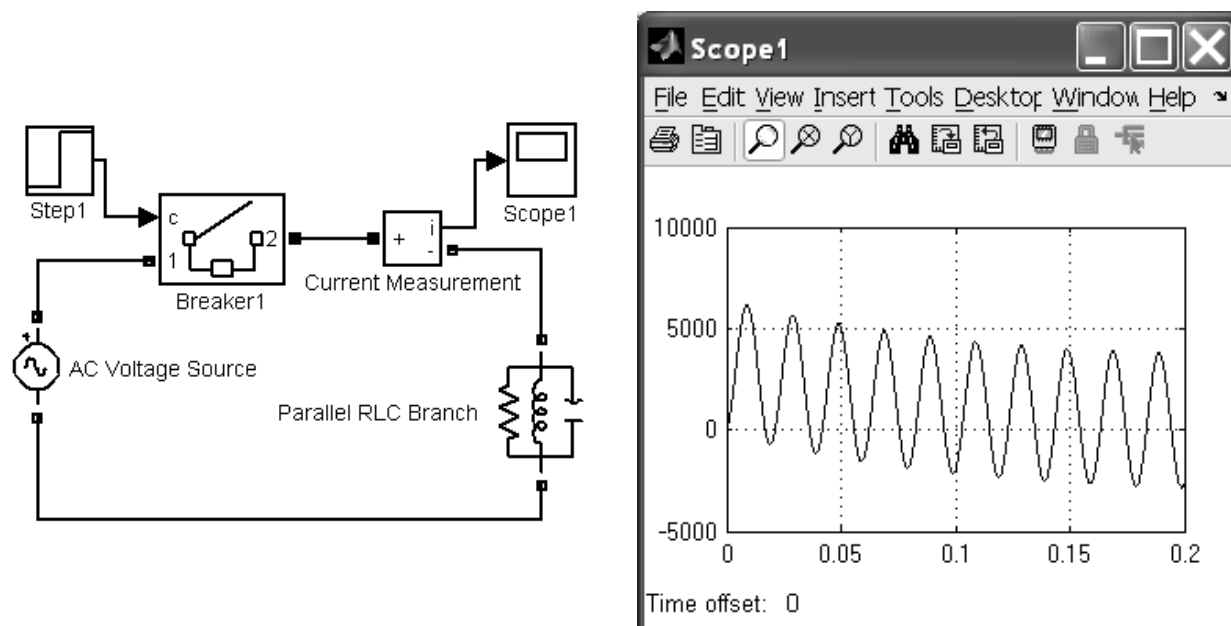



Рисунок 2.22 – Пример использования в модели параллельного контура
Parallel RLC Branch

 Series RLC Load	Последовательная RLC-нагрузка
Назначение:	Моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цепи при номинальном напряжении и частоте

Окно задания параметров изображено на рисунке 2.23.

Параметры блока:

Nominal voltage Vn (Vrms) [Номинальное напряжение (В)] - Значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов;

Nominal frequency fn (Hz) [Номинальная частота (Гц)] - Значение частоты, для которого определены мощности элементов;

Active power P (W) [Активная мощность (Вт)];

Inductive reactive power QL (positive var) [Реактивная мощность индуктивности (ВАр)] - Потребляемая индуктивностью реактивная мощность;

Capacitive reactive power QC (negative var) [Реактивная мощность емкости (ВАр)] - Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage** - напряжение на зажимах цепи,
- **Branch current** - ток цепи,
- **Branch voltage and current** - напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки:

- **Ib** - ток цепи,
- **Ub** - напряжение цепи.

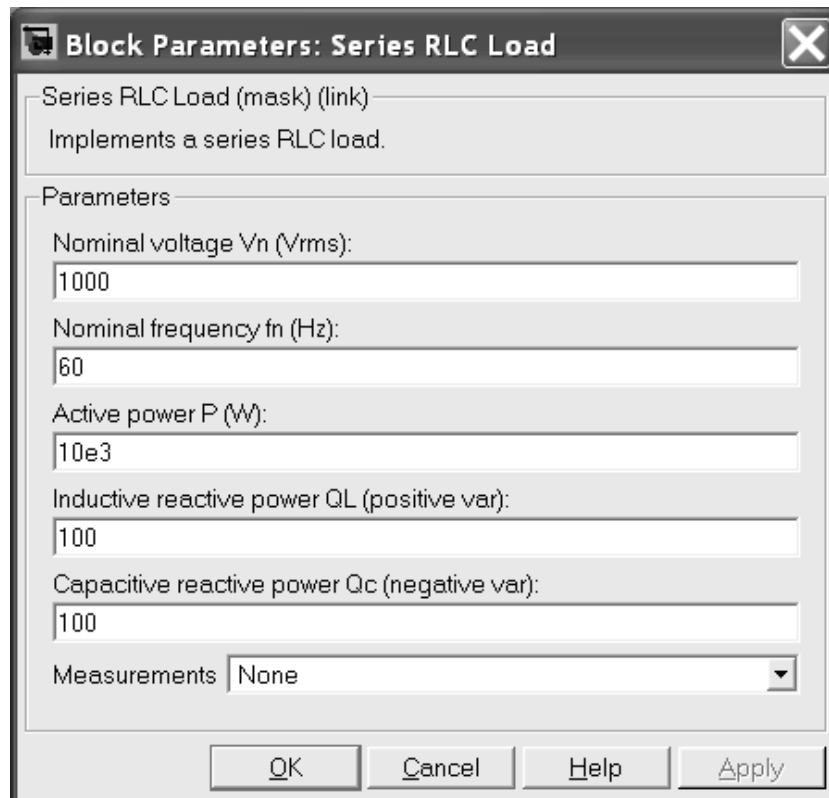


Рисунок 2.23 – Окно параметров блока *Series RLC Load*

Величины мощностей могут быть определены по следующим выражениям:

$$P = R \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}, \quad (2.9)$$

$$Q_L = \omega L \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}, \quad (2.10)$$

$$Q_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}, \quad (2.11)$$

где P - активная мощность;

Q_L - реактивная мощность индуктивности;

Q_C - реактивная мощность емкости;

ω - круговая частота напряжения;

U - действующее значение напряжения,

Пример:

На рисунке 2.24 показана схема с использованием последовательной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:

$U_n = 100 \text{ В}; f_n = 50 \text{ Гц}; P = 121.347 \text{ Вт}; Q_L = 381.224 \text{ Вар}; Q_C = 3863 \text{ ВАр}.$

При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам последовательной RLC-цепи, показанной на рисунке 2.20. Аналогичны, будут и процессы в цепи.

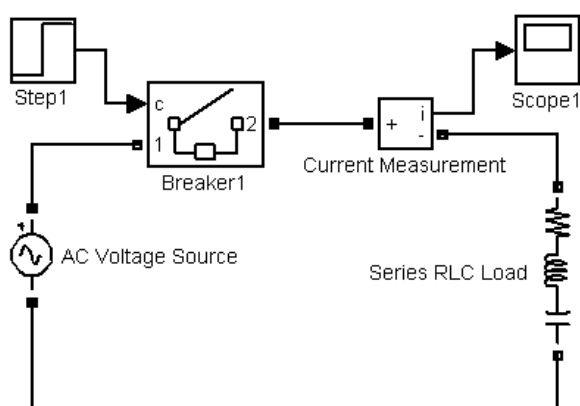
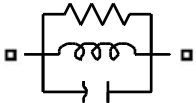


Рисунок 2.24 – Схема с использованием последовательной нагрузки **Series RLC Load**

 <p>Parallel RLC Load</p>	<p>Параллельная RLC-нагрузка</p>
<p>Назначение:</p>	<p>Моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цепи при номинальном напряжении и частоте</p>

Окно задания параметров изображено на рисунке 2.25

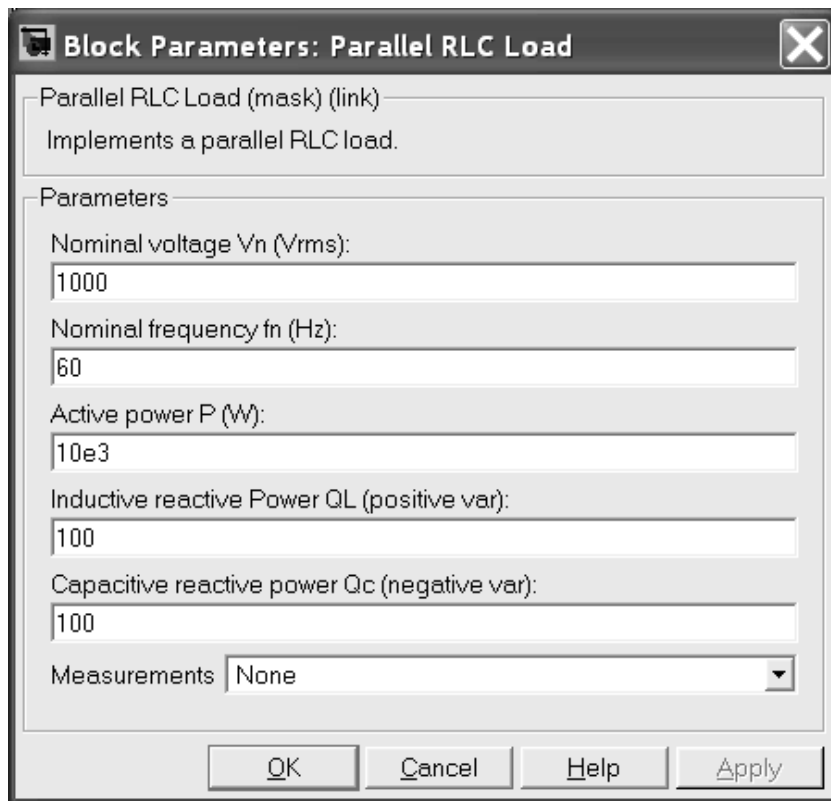


Рисунок 2.25 – Окно задания параметров блока **Parallel RLC Load**

Параметры блока аналогичны параметрам блока **Series RLC Load** (см. выше), но выражения для расчета мощностей будут другими:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2.12)$$

$$Q_L = \frac{U^2}{\omega L}, \quad (2.13)$$

$$Q_C = U^2 \omega C, \quad (2.14)$$

где P - активная мощность;

Q_L - реактивная мощность индуктивности;

Q_C - реактивная мощность емкости;

ω - круговая частота напряжения;

U - действующее значение напряжения.

Пример:

На рисунке 2.26 показана схема с использованием последовательной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:

$$U_n = 100 \text{ В}, f_n = 50 \text{ Гц}, P = 100 \text{ кВт}, Q_L = 318.3 \text{ кВАр} \text{ и } Q_C = 31.42 \text{ ВАр}.$$

При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам параллельной RLC-цепи, показанной на рисунке 2.21. Аналогичны, будут и процессы в цепи.

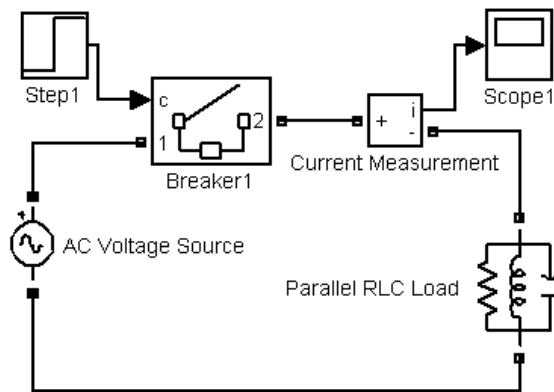



Рисунок 2.26 - Схема с использованием последовательной нагрузки *Parallel RLC Load*

 <p>Three-Phase Series RLC Branch</p>	Трехфазная последовательная RLC-цепь
Назначение:	Моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех RLC-цепей

Окно задания параметров показано на рисунке 2.27.

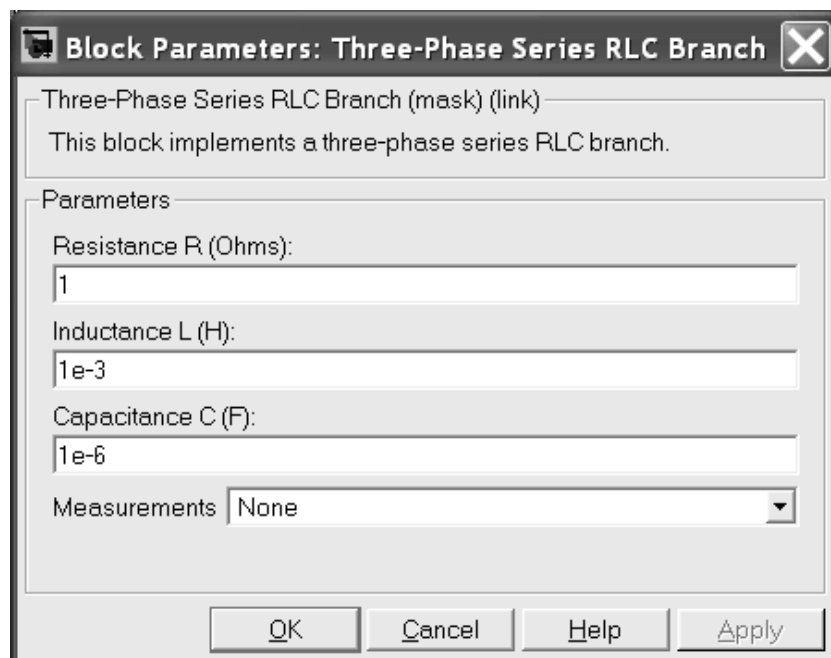


Рисунок 2.27 – Окно параметров блока *Three-Phase Series RLC Branch*

Параметры блока:

Resistance R (Ohms) [Сопротивление (Ом)] - Величина активного сопротивления в одной фазе. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет;

Inductance L (H) [Индуктивность (Гн)] - Величина индуктивности в одной фазе. Для исключения индуктивности из цепи ее величину нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет;

Capacitance C (F) [Емкость (Ф)] - Величина емкости в одной фазе. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости нужно задать равной **inf** (бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет;

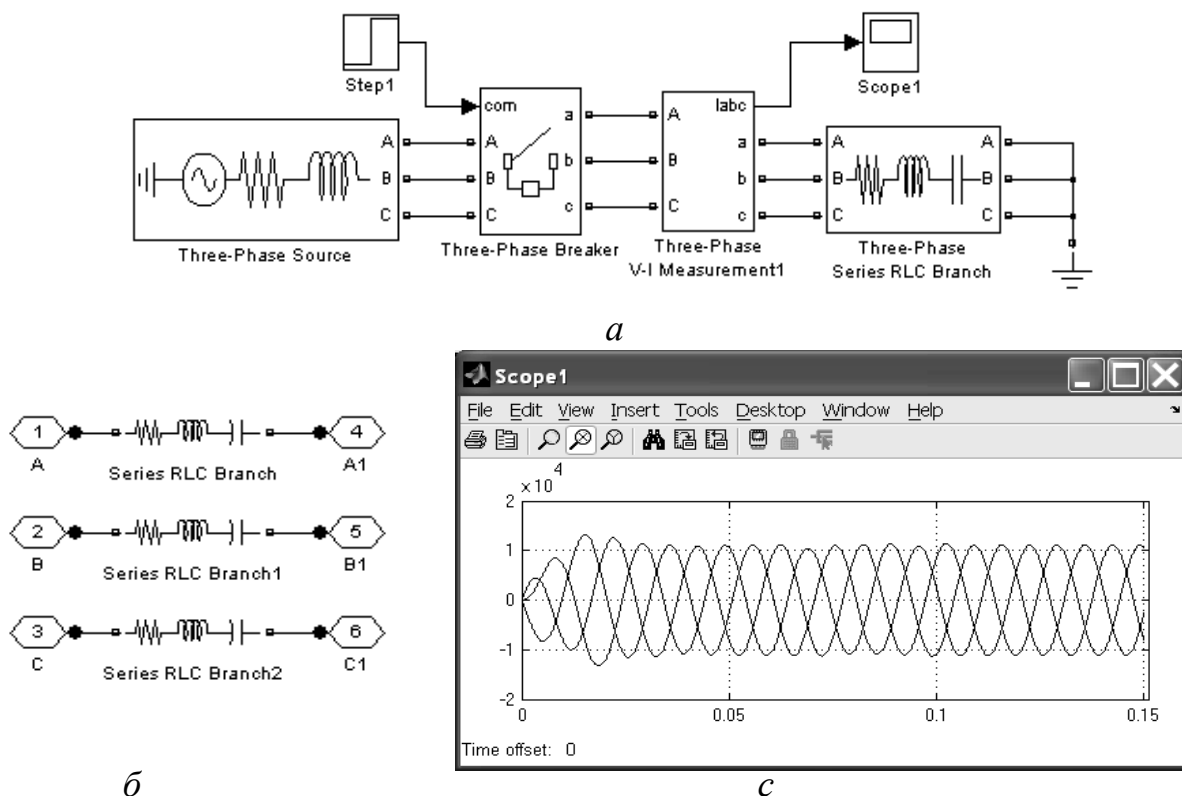
Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбирать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные. Значения параметра выбираются из списка, аналогичному для блока **Series RLC Load**.

Пример:

На рисунке 2.28 показана схема, в которой трехфазная последовательная RLC-цепь подключается к трехфазному источнику напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц. Подключение осуществляется с помощью блока **Three-Phase Breaker**. Параметры цепи выбраны следующими:

$$R = 0.1 \text{ Ом}, L = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн и } C = 0.05 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.}$$

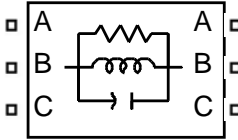
Для измерения тока в трехфазной системе использован блок **Three-Phase V-I Measurement**. На рисунке 2.28,б показана также эквивалентная схема блока **Three -Phase Series RLC Branch**.



*а – схема цепи, б – эквивалентная схема блока **Three-Phase Series RLC Branch**; с – осциллограммы токов*

Рисунок 2.28 – Схема трехфазной цепи с трехфазной нагрузкой в виде последовательной цепи RLC

Кривые токов в окне осциллографа обозначаются разным цветом. В черно-белом формате они могут быть помечены маркерами, но в нашем примере, они не имеют маркеров и показаны одним цветом, поскольку это не принципиально для понимания примера.

 <p>Three-Phase Parallel RLC Branch</p>	Трехфазная параллельная RLC-цепь
Назначение:	Моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-цепей. На рисунке показана также схема блока Three -Phase Parallel RLC Branch

Окно задания параметров показано на рисунке 2.29.

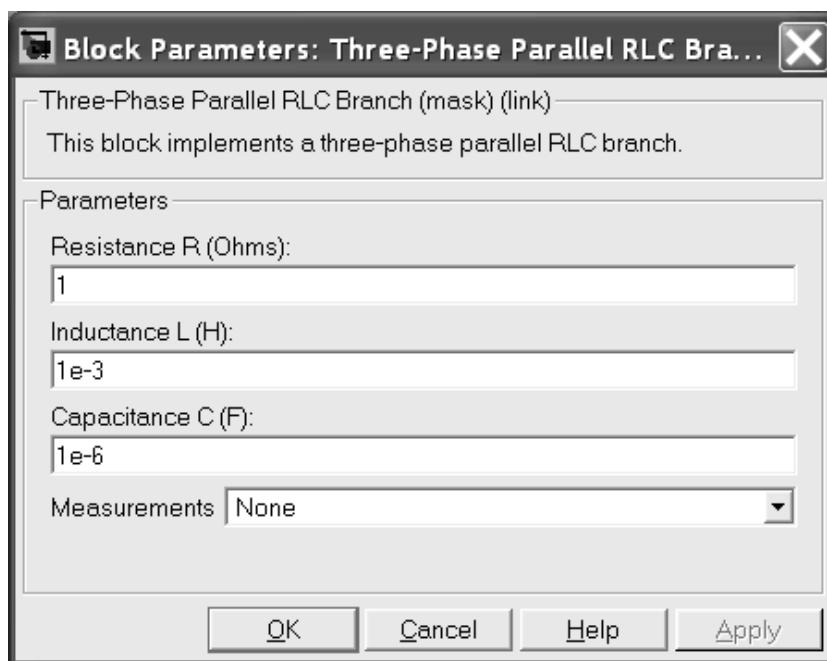


Рисунок 2.29 – Окно параметров блока *Three-Phase Parallel RLC Branch*

Параметры блока:

Resistance R (Ohms) [Сопротивление (Ом)] - Величина активного сопротивления в одной фазе. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет;

Inductance L (H) [Индуктивность (Гн)] - Величина индуктивности в одной фазе. Для исключения индуктивности из цепи ее величину нужно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет;

Capacitance C (F) [Емкость (Ф)] - Величина емкости в одной фазе. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости нужно задать равной **inf**

(бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет;

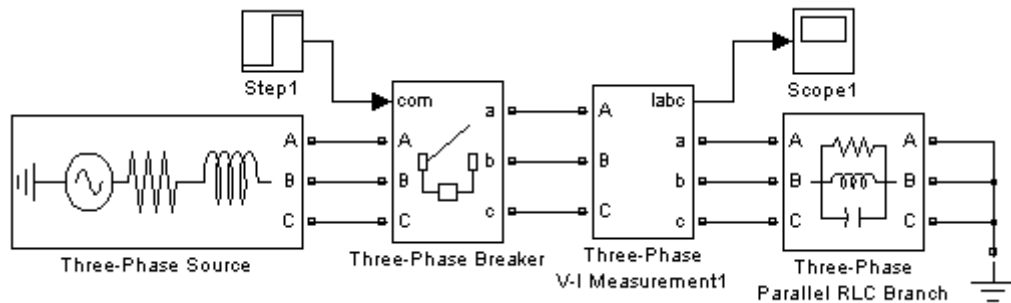
Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет брать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные. Значения параметра выбираются из списка, аналогичному для блока **Parallel RLC Load**.

Пример:

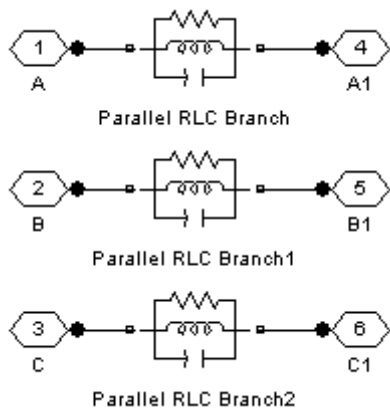
На рисунке 2.30 показана схема, в которой трехфазная параллельная RLC-цепь подключается к трехфазному источнику напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц. Параметры цепи выбраны следующими:

$$R = 0.1 \text{ Ом}, L = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн и } C = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.}$$

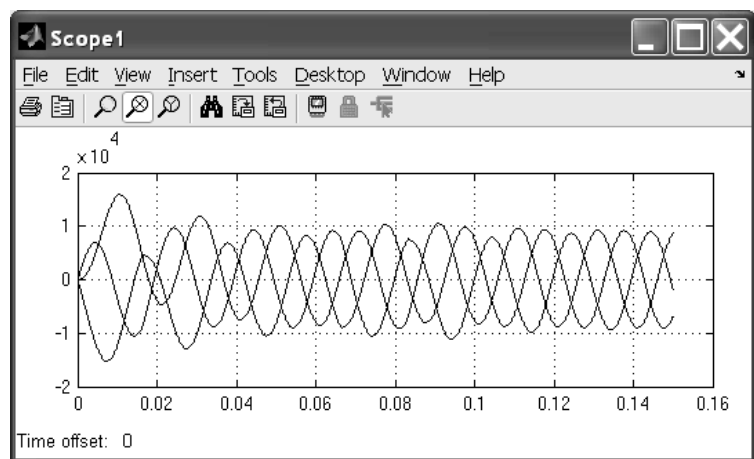
На рисунке показана также схема блока **Three-Phase Parallel RLC Branch**.



a



б



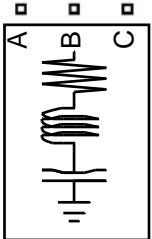
с

a – схема цепи, *б* – эквивалентная схема блока **Three-Phase Parallel RLC Branch**; *с* – осциллограммы токов

Рисунок 2.30 – Схема трехфазной цепи с трехфазной нагрузкой в виде параллельной цепи RLC

Блоки **Three-Phase Series RLC Branch** и **Three-Phase Parallel RLC Branch** применимы только для симметричных нагрузок. В них удобнее вводить параметры нагрузки сразу для всех фаз одновременно. Но, когда нагрузка трехфазной цепи должна быть несимметрична, следует использовать эквивалентные схемы трехфазных нагрузок, показанные на рисунках 2.28,б и

2.30,б. В них можно задавать индивидуальные параметры отдельно для каждой фазы нагрузки.

 <p>Three-Phase Series RLC Load</p>	Трехфазная последовательная RLC-нагрузка
Назначение:	Моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех последовательных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей: звезда и треугольник. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте

Окно задания параметров показано на рисунке 2.31.

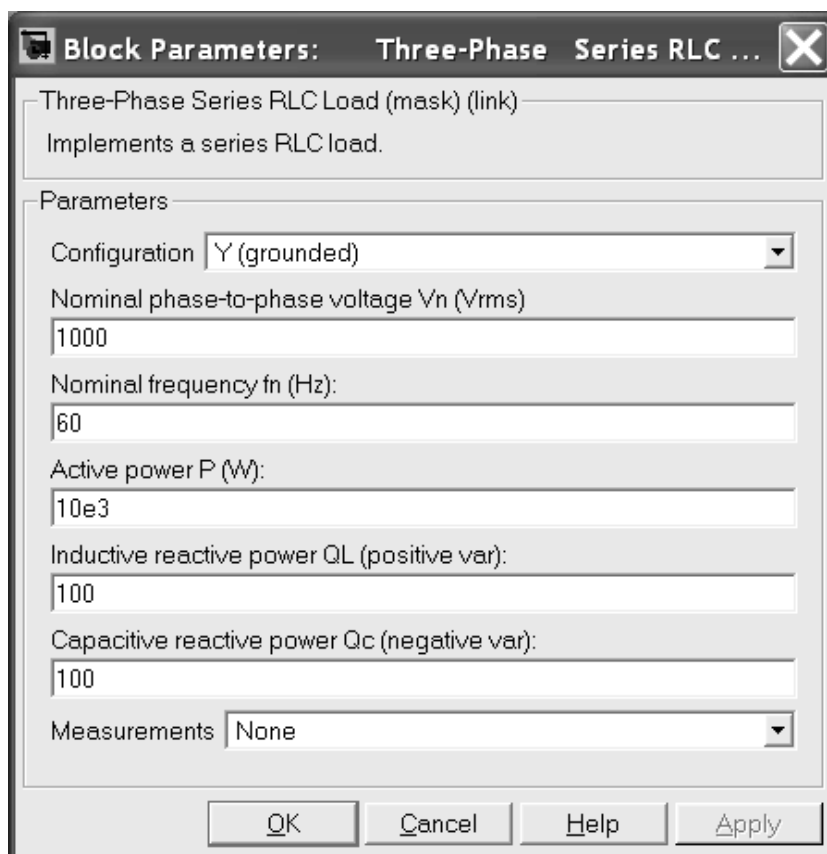


Рисунок 2.31 – Окно параметров блока *Three-Phase Series RLC Load*

Параметры блока:

Nominal phase-phase voltage Vn (Vrms) [Номинальное линейное напряжение (В)] - Значение действующего линейного напряжения цепи, для которого определены мощности элементов;

Nominal frequency fn (Hz) [Номинальная частота (Гц)] - Значение частоты, для которого определены мощности элементов;

Active power P (W) [Активная мощность на три фазы(Вт)];

Inductive reactive power QL (positive var) [Реактивная мощность индуктивности на три фазы (ВАр)] - Потребляемая индуктивностью реактивная мощность;

Capacitive reactive power QC (negative var) [Реактивная мощность емкости на три фазы (ВАр)] - Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

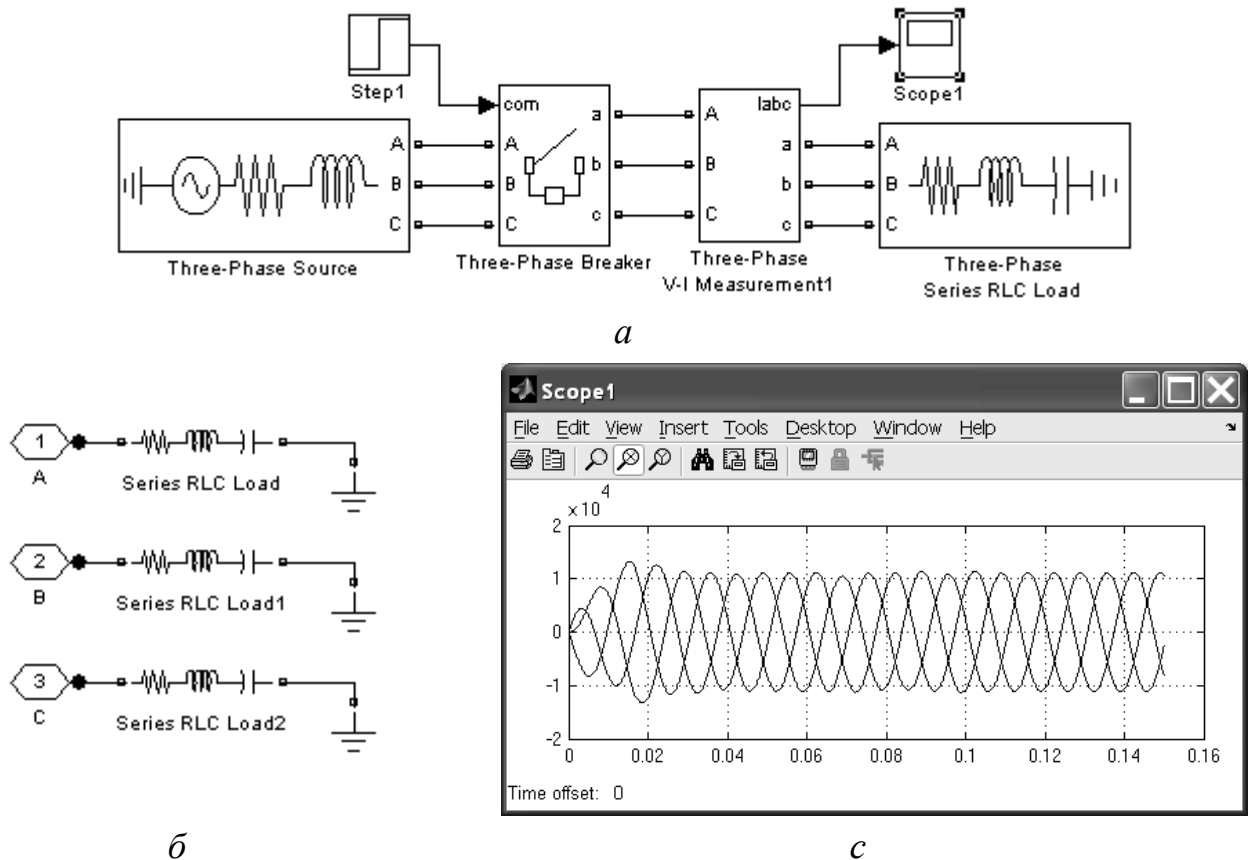
Configuration [Конфигурация цепи] – Параметр может принимать значения:

- **Y(grounded)** – звезда с заземленной нейтралью;
- **Y(floating)** – звезда с изолированной нейтралью;
- **Y(neutral)** - звезда с нейтралью соединенной с внешним контактом блока;
- **Delta** – треугольник.

В соответствии с выбранным параметром изменяется и пиктограмма блока.

Пример:

На рисунке 2.32 показана схема с использованием трехфазной последовательной нагрузочной цепи.



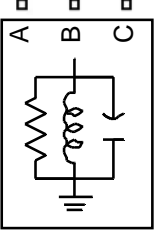
а – схема цепи, б – эквивалентная схема блока **Three-Phase Series RLC Load**; с – осциллограммы токов

Рисунок 2.32 – Схема трехфазной цепи с параллельной нагрузкой RLC

На схеме источник переменного напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:

$U_n = 25 \text{ кВ}$, $f_n = 50 \text{ Гц}$, $P = 188.7 \text{ МВт}$, $Q_L = 59.29 \text{ МВАр}$ и $Q_C = 120.1 \text{ МВАр}$.

При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам трехфазной последовательной RLC-цепи, показанной на рисунке 2.28. На рисунке показана также эквивалентная схема блока **Three-Phase Series RLC Load**.

	Трехфазная параллельная RLC-нагрузка
Назначение:	Моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей: звезда и треугольник. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте

Окно задания параметров показано на рисунке 2.33.

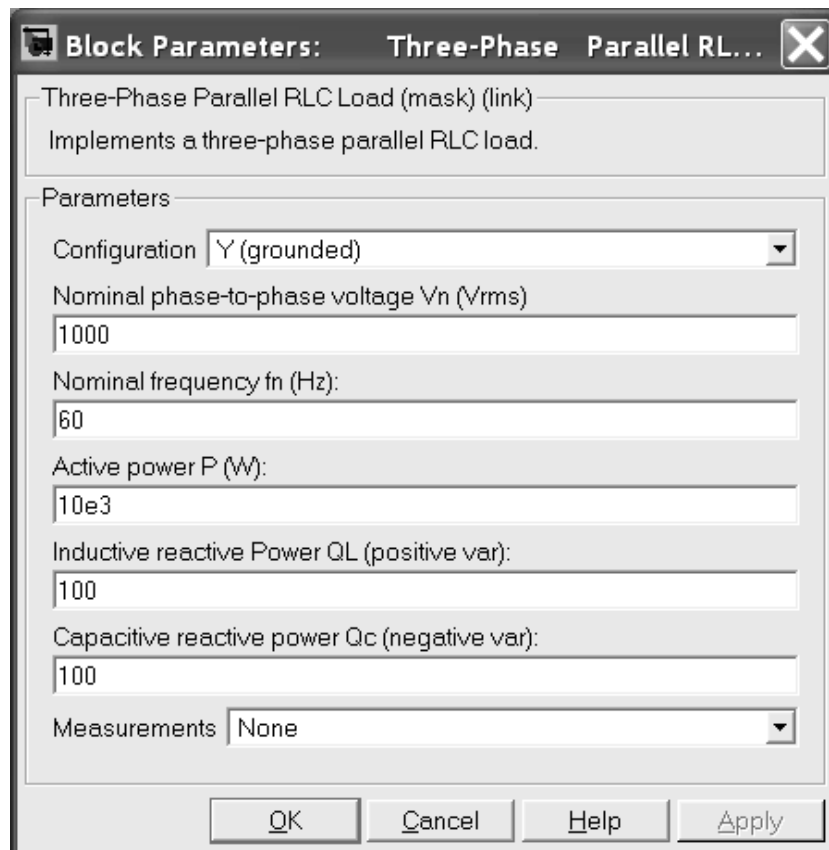


Рисунок 2.33 – Окно параметров блока **Three-Phase Parallel RLC Load**

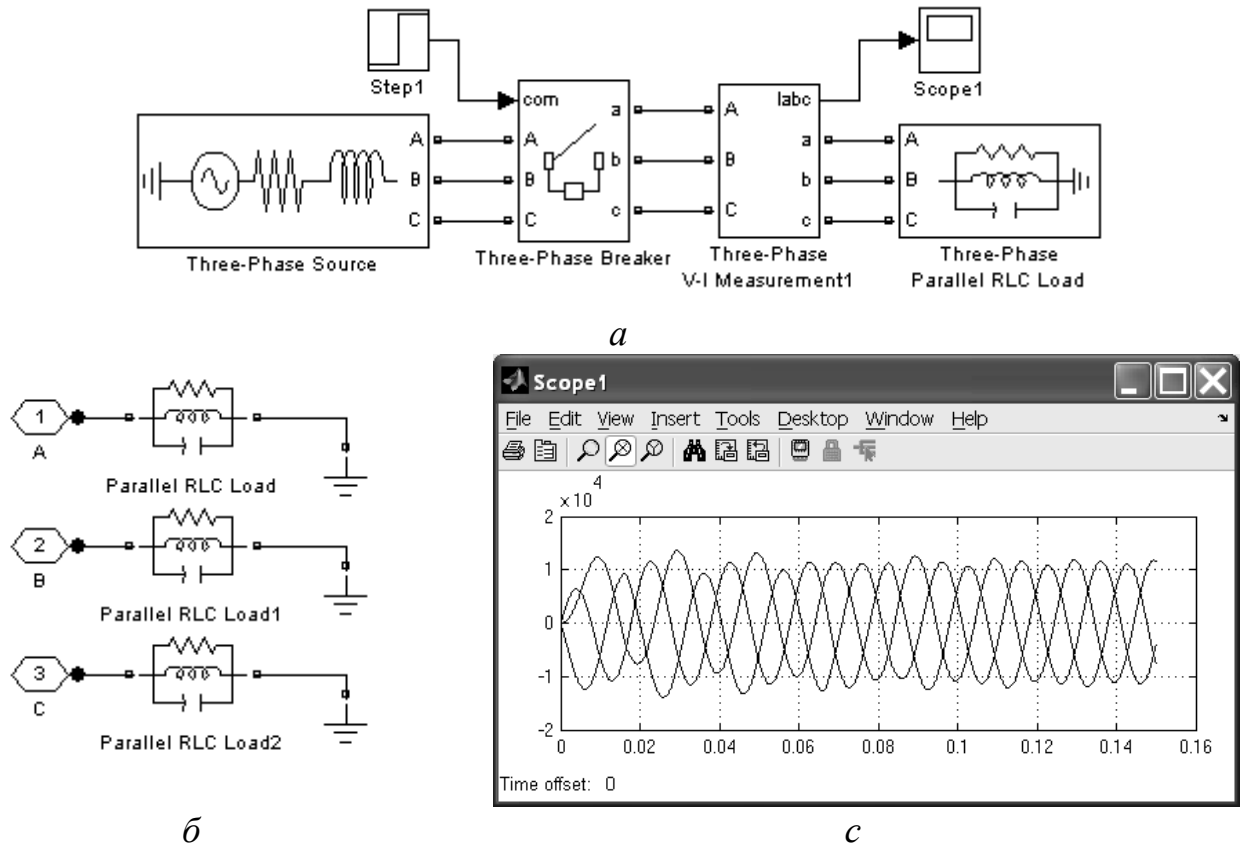
Как видно из рисунка 2.33 параметры блока полностью аналогичны параметрам блока **Three-Phase Series RLC Load**.

Пример:

На рисунке 2.34 показана схема с использованием параллельной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:

$U_n = 25$ кВ, $f_n = 50$ Гц, $P = 2083$ МВт, $Q_L = 6631$ МВАр и $Q_C = 654.5$ кВАр.

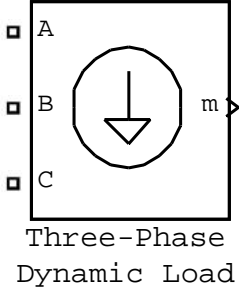
При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам параллельной RLC-цепи, показанной на рисунке 2.30,б. На рисунке показана также эквивалентная схема блока **Three-Phase Parallel RLC Load**.



*а – схема цепи, б – эквивалентная схема блока **Three-Phase Parallel RLC Load**; с – осциллограммы токов*

Рисунок 2.34 – Схема трехфазной цепи с параллельной нагрузкой RLC

Блоки **Three-Phase Series RLC Load** и **Three-Phase Parallel RLC Load** применимы только для симметричных нагрузок. В них удобнее вводить параметры нагрузки сразу для всех фаз одновременно. Но, когда нагрузка трехфазной цепи должна быть несимметрична, следует использовать эквивалентные схемы трехфазных нагрузок, показанные на рисунках 2.32,б и 2.34,б. В них можно задавать индивидуальные параметры отдельно для каждой фазы нагрузки.

 <p>Three-Phase Dynamic Load</p>	Трехфазная динамическая нагрузка
Назначение:	Трехфазный блок динамической нагрузки моделирует трехфазную, трехпроводную динамическую нагрузку, чья активная мощность P и реактивная мощность Q изменяются как функция напряжения прямой последовательности. Токи обратной и нулевой последовательности не моделируются, поэтому фазные токи нагрузки являются сбалансированными даже при не сбалансированных напряжениях.

Полное сопротивление нагрузки сохраняется постоянным, если напряжение на зажимах нагрузки более низкое, чем заданная величина V_{\min} . Когда напряжение на зажимах больше, чем величина V_{\min} , активная мощность P и реактивная мощность Q нагрузки изменяется в соответствии с передаточными функциями:

$$\begin{aligned}
 P(s) &= P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \frac{(1 + T_{p1}s)}{(1 + T_{p2}s)}, \\
 Q(s) &= Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \frac{(1 + T_{q1}s)}{(1 + T_{q2}s)},
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

где V_0 - начальное напряжение прямой последовательности;

P_0 и Q_0 - начальные значения активной и реактивной мощности при напряжении V_0 ;

V - напряжение прямой последовательности;

n_p и n_q - показатели степени (обычно между 1 и 3) управляющие свойствами нагрузки;

T_{p1} и T_{p2} - постоянные времени, управляющие динамикой активной мощности P ;

T_{q1} и T_{q2} - постоянные времени, управляющие динамикой реактивной мощности Q ;

Для моделирования, например, токовой нагрузки постоянной величины требуется задать n_p и n_q равными 1, а для задания постоянного по величине полного сопротивления нагрузки необходимо задать n_p и n_q равными 2.

Выход **m** блока является вектором, содержащим три сигнала: напряжение прямой последовательности в относительных единицах (p.u.); активная мощность P (Вт) и реактивная мощность нагрузки Q (ВАр).

Окно параметров блока показано на рисунке 2.35.

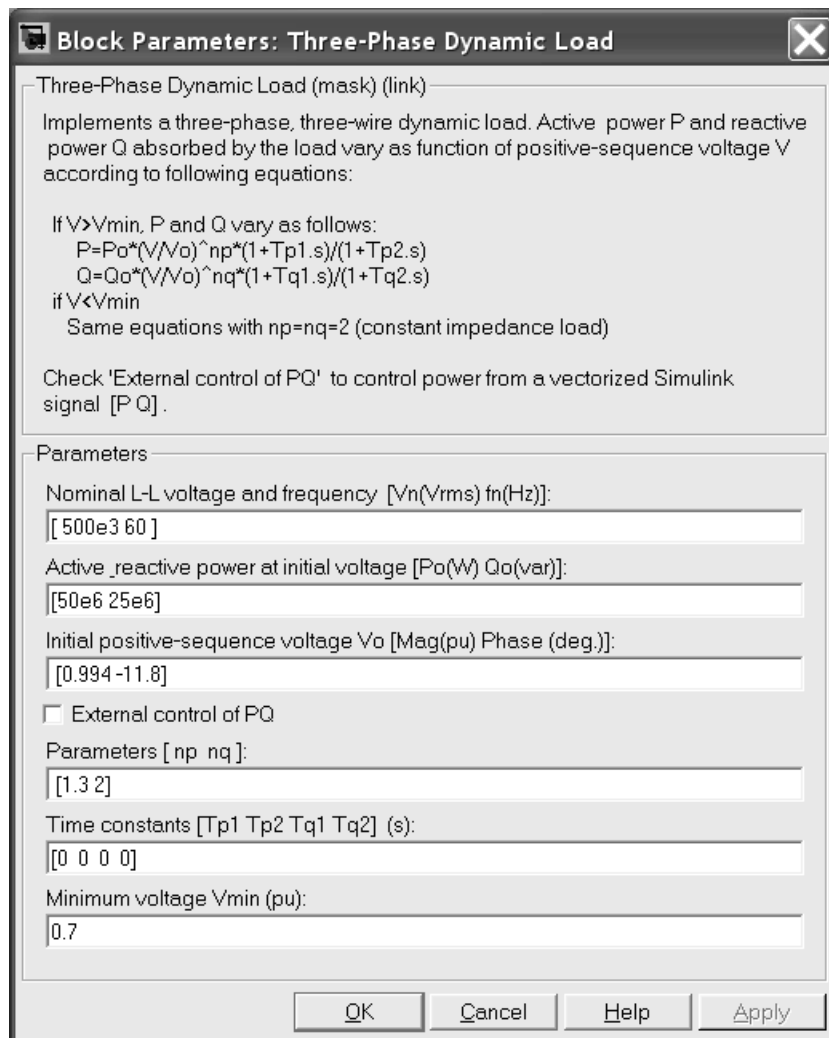


Рисунок 2.35 – Окно настройки параметров блока **Three-Phase Dynamic Load**

Параметры блока:

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn (Hz)] [Номинальное линейное напряжение и частота];

Active & reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)] [Значения активной и реактивной мощности при начальном напряжении];

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase(deg.)] [Начальное напряжение прямой последовательности]. Параметр задается вектором, содержащим значение модуля напряжения **Mag** и его начальной фазы **Phase**. Величина напряжения задается в относительных единицах (по отношению к номинальному напряжению), а фаза - в эл. градусах;

External control of PQ [Внешнее управление активной и реактивной мощностью] - При установке флажка на пиктограмме блока появляется дополнительный входной порт, на который следует подавать векторный сигнал из двух элементов для управления P и Q ;

Parameters [np nq] [Параметры n_p и n_q] - Показатели степени управляющие свойствами нагрузки;

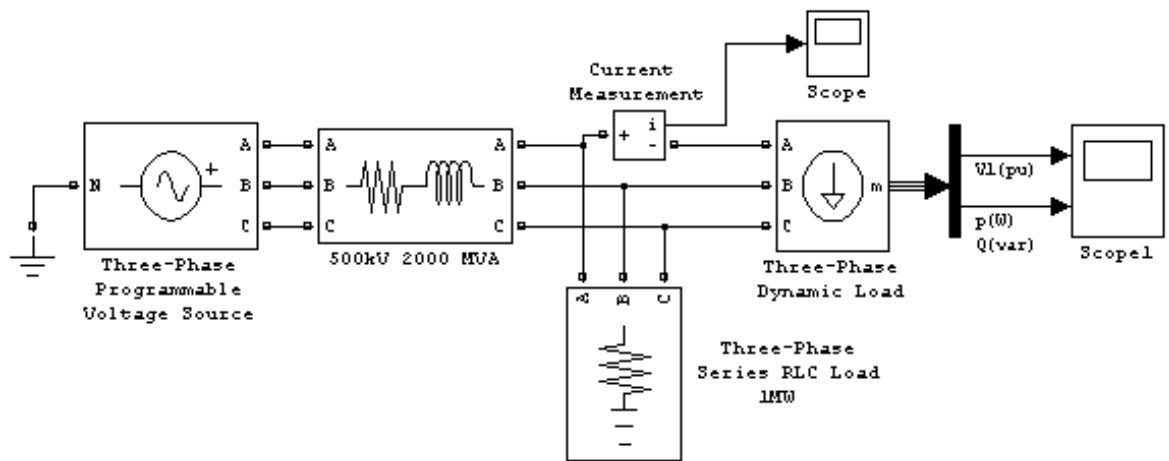
Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s) [Постоянные времени нагрузки $T_{p1}, T_{p2}, T_{q1}, T_{q2}$].

Minimum voltage Vm in (pu) [Минимальное напряжение V_0] - Параметр задается в относительных единицах.

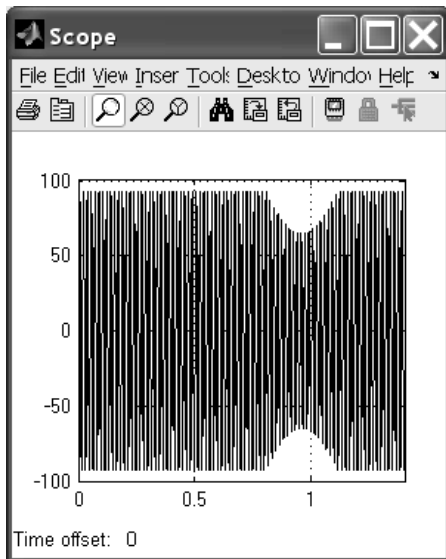
Пример:

На рисунке 2.36 показана схема с использованием трехфазной динамической нагрузки.

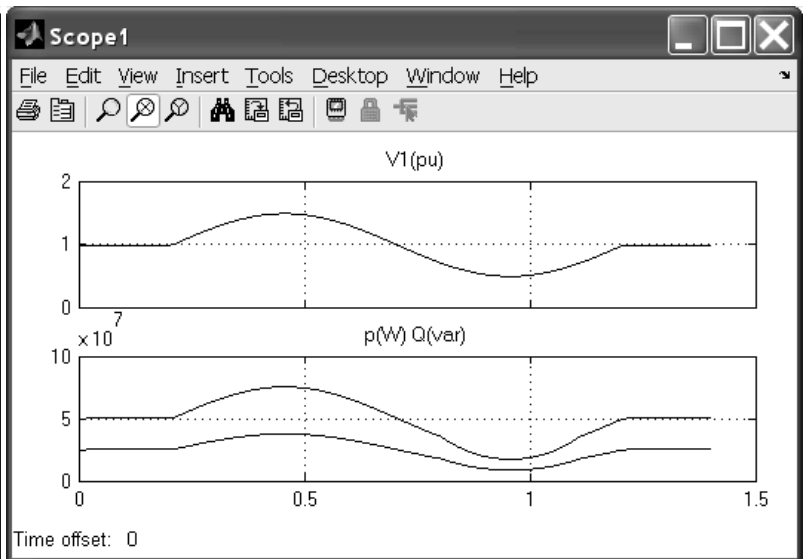
Поскольку блок **Three-Phase Dynamic Load** создан на базе источников тока, то он не может быть последовательно включен с индуктивными элементами, поэтому параллельно динамической нагрузке добавлена малая активная нагрузка (1 MW).



a



б



с

a – схема цепи; б – ток в фазе А; с – напряжение прямой последовательности, активная P и реактивная мощность нагрузки Q

Рисунок 2.36 – Пример цепи электроснабжения с динамической нагрузкой *Three-Phase Dynamic Load*

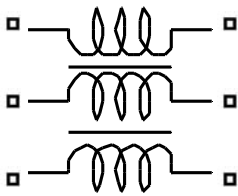
 <p>Mutual Inductance</p>	<p>Взаимная индуктивность</p>
<p>Назначение:</p>	<p>Блок взаимной индуктивности предназначен для моделирования катушек или проводников имеющих магнитную связь. Блок позволяет моделировать три или два магнитно-связанных элемента</p>

Схема модели взаимной индуктивности показана на рисунке 2.37.

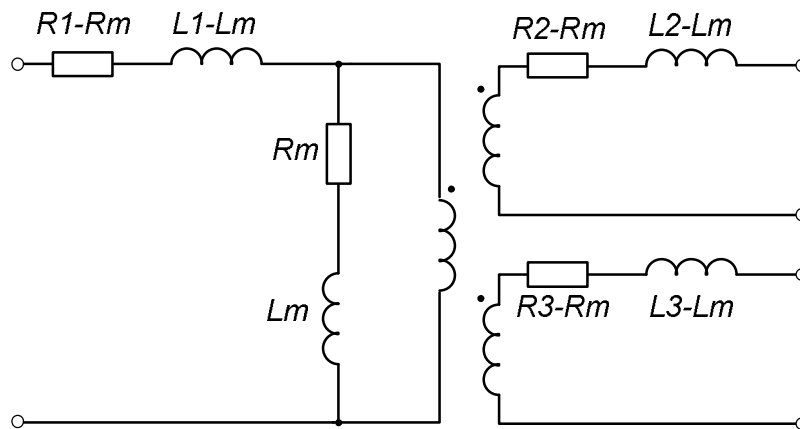


Рисунок 2.37 – Эквивалентная схема взаимной блока индуктивности
Mutual Inductance

Номера выводов обмоток на пиктограмме начинаются сверху. Обмотка 1 (рисунок 2.37) – первая сверху на пиктограмме. Обмотки 2 и 3 (рисунок 2.37), на пиктограмме блока соответственно расположены последовательно ниже.

Окно задания параметров изображено на рисунке 2.38.

Параметры блока:

Winding 1 self impedance [R1(Ohm) L1(H)] [Собственное сопротивление и индуктивность первой обмотки];

Three windings Mutual Inductance [Трехобмоточная взаимная индуктивность] - Снятие флажка позволяет убирать из модели третью обмотку, при этом меняется вид пиктограммы;

Winding 2 self impedance [R2(Ohm) L2(H)] [Собственное сопротивление и индуктивность второй обмотки];

Winding 3 self impedance [R3(Ohm) L3(H)] [Собственное сопротивление и индуктивность третьей обмотки];

Mutual impedance [Rm(Ohm) Lm(H)] [Взаимное сопротивление и индуктивность обмоток];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Winding voltages** - напряжения обмоток,
- **Winding currents** - токи обмоток,
- **Winding voltages and currents** - напряжения и токи обмоток.

Задаваемые параметры обмоток должны удовлетворять следующим ограничениям (см. рис 2.37):

$$R1, R2, R3 \neq R_m \text{ и}$$

$$L1, L2, L3 \neq L_m.$$

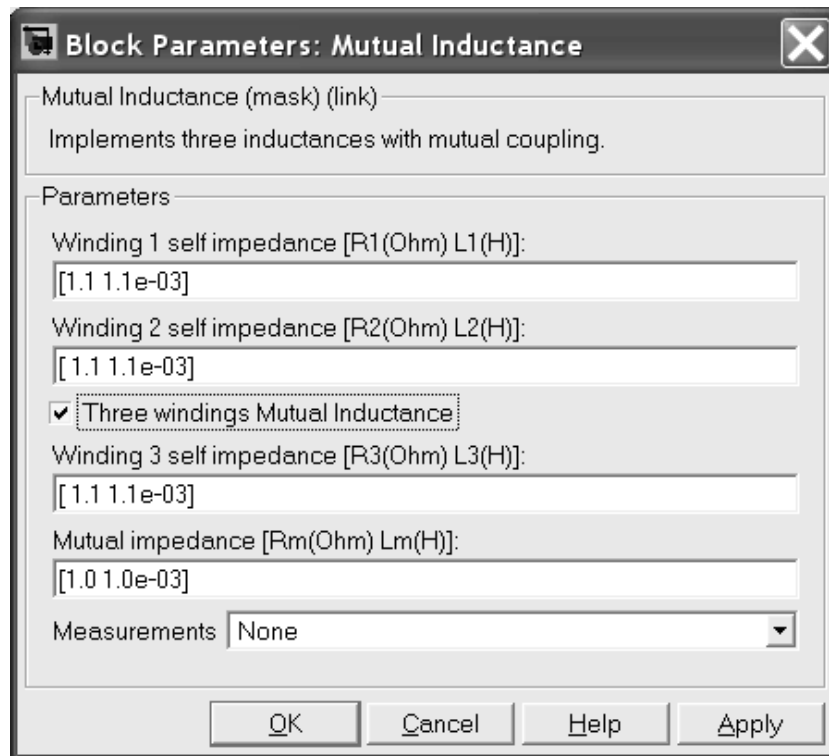


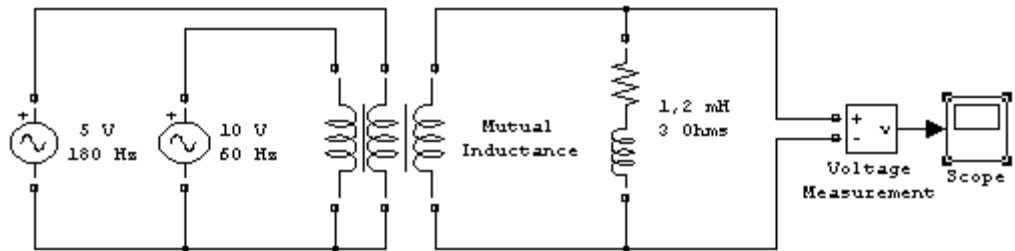
Рисунок 2.38 – Окно настройки параметров блока **Mutual Inductance**

При моделировании схем с использованием взаимной индуктивности (так же как и трансформаторов) следует иметь в виду, что, не смотря на отсутствие видимой потенциальной связи между обмотками, такая связь (через резистор) все же имеется. Она необходима для расчета потенциалов в узлах всей схемы. Наличие такой связи не оказывает влияние на измеряемые величины токов и напряжений обмоток взаимной индуктивности.

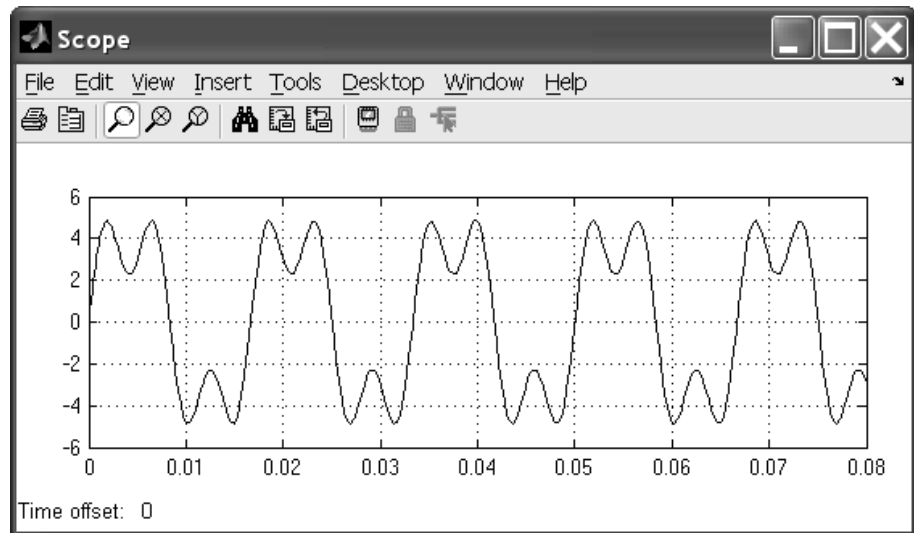
Пример:

На рисунке 2.39,а показана схема, в которой третья гармоника напряжения на нагрузке вводится с помощью блока взаимной индуктивности.

Два источника переменного тока через блок взаимной индуктивности подключены к последовательной RL цепи. Кривая полученного напряжения показана на рисунке 2.39,б.



а



б

а – схема; б – осциллограмма напряжения на нагрузке

Рисунок 2.39 – Пример применения блока взаимной индуктивности
Mutual Inductance

 <p>Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0</p>	Трехфазная взаимная индуктивность
Назначение:	Блок трехфазной взаимной индуктивности предназначен для моделирования трехфазной цепи с индуктивной связью между фазами

В качестве основы модели трехфазной взаимной индуктивности используется блок **Mutual Inductance** с тремя обмотками. Параметры схемы замещения блока взаимной индуктивности пересчитываются исходя из задаваемых для трехфазной взаимной индуктивности параметров прямой и обратной последовательности по следующим выражениям:

$$R_m = (R_o - R_1)/3,$$

$$L_m = (L_o - L_1)/3,$$

$$R_3 = (2 \cdot R_1 + R_o)/3,$$

$$L3 = (2 \cdot L1 + L0) / 3, \quad (2.16)$$

где R_0 и $R1$ - сопротивления нулевой и прямой последовательности блока трехфазной взаимной индуктивности;

L_0 и $L1$ - индуктивности нулевой и прямой последовательности блока трехфазной взаимной индуктивности;

$R1$, $R2$, $R3$ и Rm - собственное сопротивление каждой из трех обмоток блока взаимной индуктивности, их взаимное сопротивление;

$L1$, $L2$, $L3$ и Lm - собственная индуктивность каждой из трех обмоток блока взаимной индуктивности, их взаимная индуктивность.

Окно задания параметров показано на рисунке 2.40.

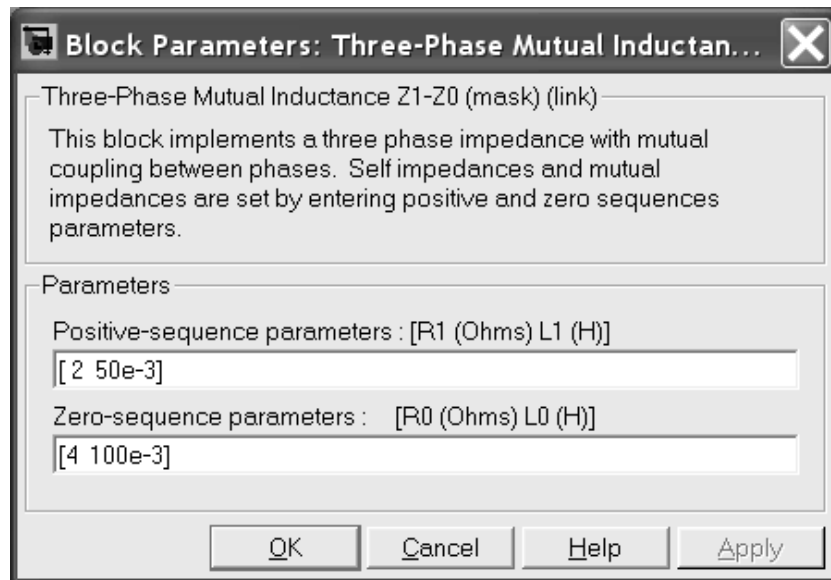


Рисунок 2.40 – Окно задание параметров блока **Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0**

Параметры блока:

Positive-sequence parameters [R1 (Ohms) L1 (H)] [Параметры прямой последовательности] - Сопротивление и индуктивность прямой последовательности;

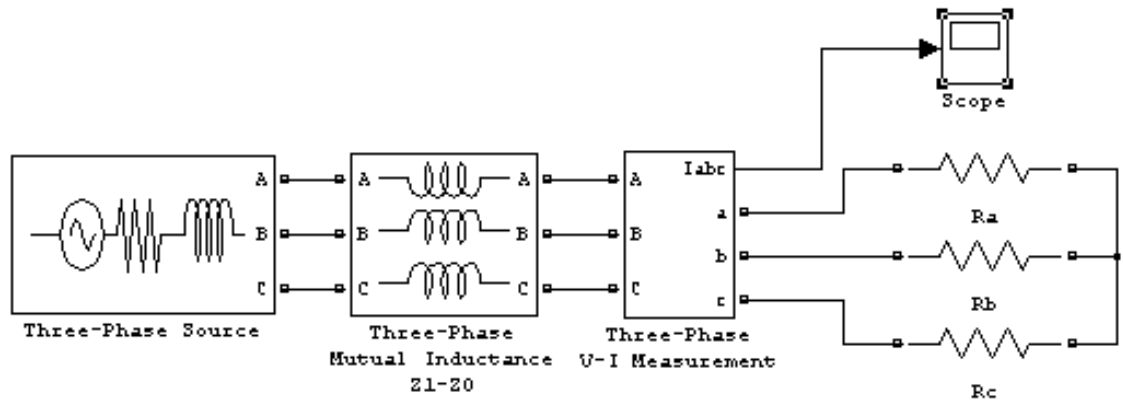
Zero-sequence parameters [R0 (Ohms) L0 (H)] [Параметры нулевой последовательности] - Сопротивление и индуктивность нулевой последовательности.

Пример:

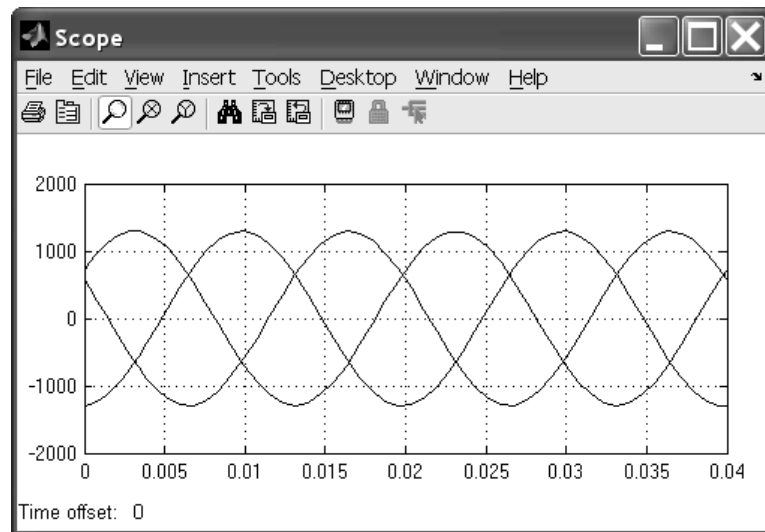
На рисунок 2.41,а показана схема с использованием блока трехфазной взаимной индуктивности.

В схеме, трехфазный источник с линейным напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц соединенный в звезду, через цепь взаимоиндукции подключен к трехфазной активной нагрузке (сопротивлением фазы 1 Ом), тоже соединенной в звезду.

Цепь симметрична, нейтральные точки генератора и нагрузки не связаны между собой. Осциллограммы токов в фазах нагрузки приведены на рисунке 2.41,б.



а



б

а – схема цепи; б – осциллограммы фазных токов

Рисунок 2.41 – Схема применения блока
Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0

	Выключатель переменного тока
Назначение:	Моделирует устройство включения и выключения переменного тока

Выключатель может управляться внешним входным сигналом или от встроенного таймера.

При управлении извне, включение устройства выполняется единичным управляющим сигналом. Команда на выключение дается нулевым уровнем сигнала, при этом выключение устройства осуществляется при уменьшении тока до нуля. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.

При управлении от встроенного таймера, время включения и отключения задается в окне параметров блока.

Окно параметров блока приведено на рисунке 2.42.

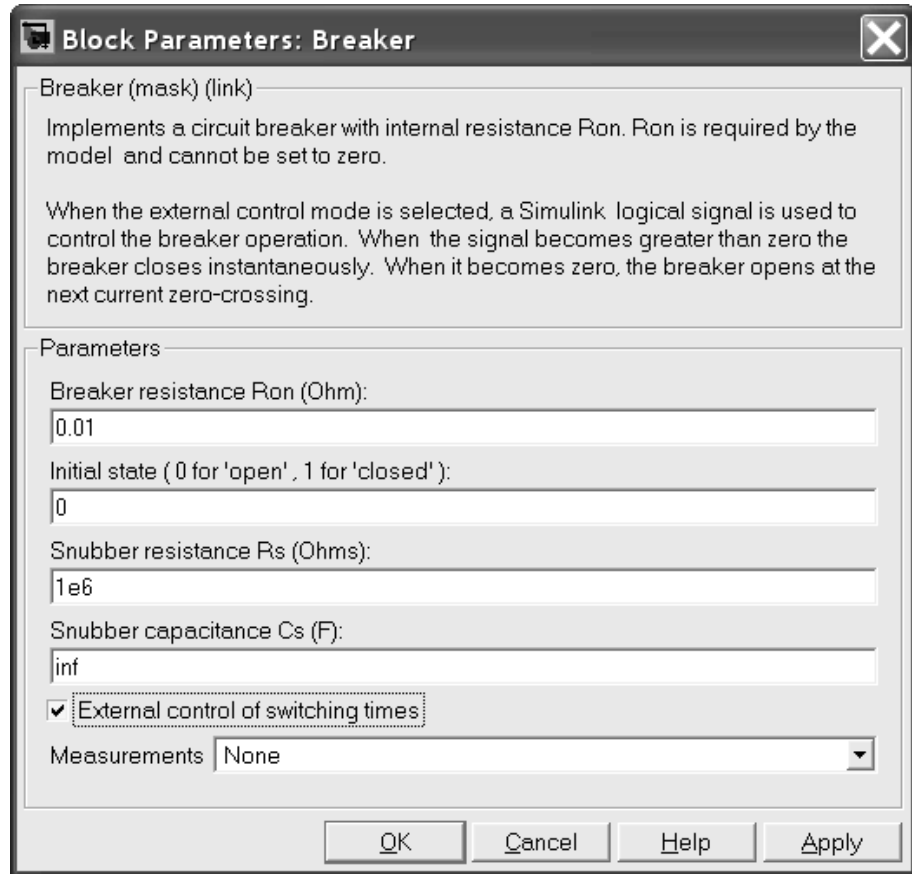


Рисунок 2.42 – Окно настройки параметров блока **Breaker**

Параметры блока:

Breaker resistance Ron(Ohm) [Сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом)];

Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed') [Начальное состояние выключателя (0 - разомкнут, 1 - замкнут)];

Snubber resistance Rs(Ohm) [Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)];

Snubber capacitance Cs(F) [Емкость искрогасящей цепи (Ф)];

Switching times (s) [Время срабатывания выключателя] - Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя. Например, при разомкнутом начальном состоянии ключа значение параметра заданное вектором [0.005 0.01 0.02 0.03] означает, что замыкание ключа будет выполняться в моменты времени 0.005 с и 0.02 с, а размыкание - в моменты времени 0.01 с и 0.03 с.

Sample time of the internal timer Ts (s) [Шаг дискретизации встроенного таймера];

External control of switching times [Внешнее управление временем срабатывания] - При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт, а строка **Sample time of the internal timer Ts (s)** исчезает;

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage** - напряжение на зажимах элемента,
- **Branch current** - ток элемента,
- **Branch voltage and current** - напряжение и ток элемента.

Пример:

На рисунке 2.43 показана схема, в которой элемент **Breaker** осуществляет подключение и отключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного тока. На диаграмме хорошо видно, что отключение источника от нагрузки происходит только тогда, когда ток в цепи упадет до нуля.

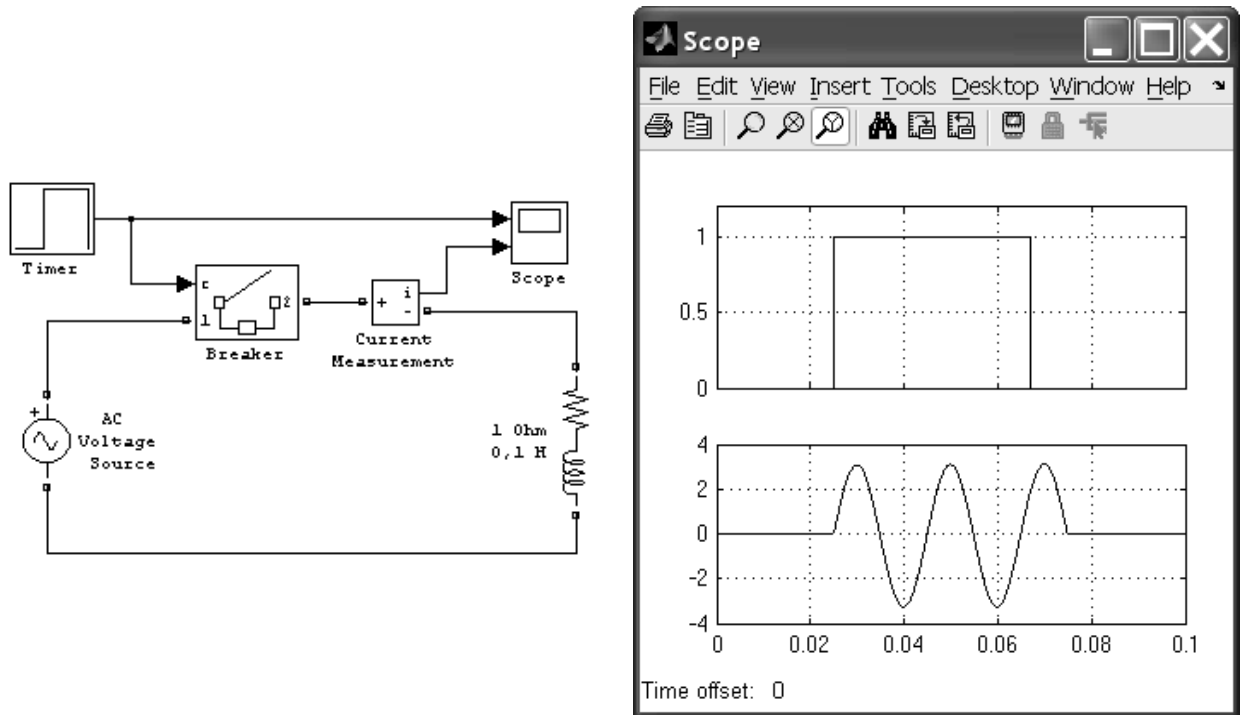


Рисунок 2.43 – Применение блока **Breaker**

Аналогичные примеры применения данного блока мы уже встречали ранее, при рассмотрении других элементов пакета **SimPowerSystems** (на рисунках 2.5, 2.7, 2.20, 2.22, 2.24, 2.27).

Описание работы данного блока для версии **Simulink 5**, приведено в первой части настоящей работы. Здесь следует отметить, что блок **Breaker**, является одним из наиболее употребительных блоков по причине того, что он моделирует основное коммутационное устройство цепи переменного тока.

Поэтому следует отметить, часто встречающуюся ошибку при использовании данного блока. Начинаящий пользователь для коммутации напряжения в моделях с источниками постоянного напряжения использует блок **Breaker**. Однако, при этом не учитывается тот факт, что **Breaker** предназначен для коммутации переменного тока. Его особенностью является то, что при снятии управляющего сигнала разрыв цепи происходит лишь при дости-

жении током нулевого уровня. В цепях постоянного тока такого не *наблюдается*, и ключ остается замкнутым при снятии управляющего сигнала.

Рисунок 2.44 иллюстрирует эту ситуацию. На рисунке показаны электрические цепи, коммутируемые с помощью блока **Breaker**. При этом в одной из цепей используется источник переменного напряжения, а в другой - постоянного. На рисунке хорошо видно, что в первой цепи отключение нагрузки от источника происходит в момент спада тока цепи до нуля, в то время как во второй цепи нагрузка остается подключенной к источнику, несмотря на отсутствие управляющего сигнала на ключе.

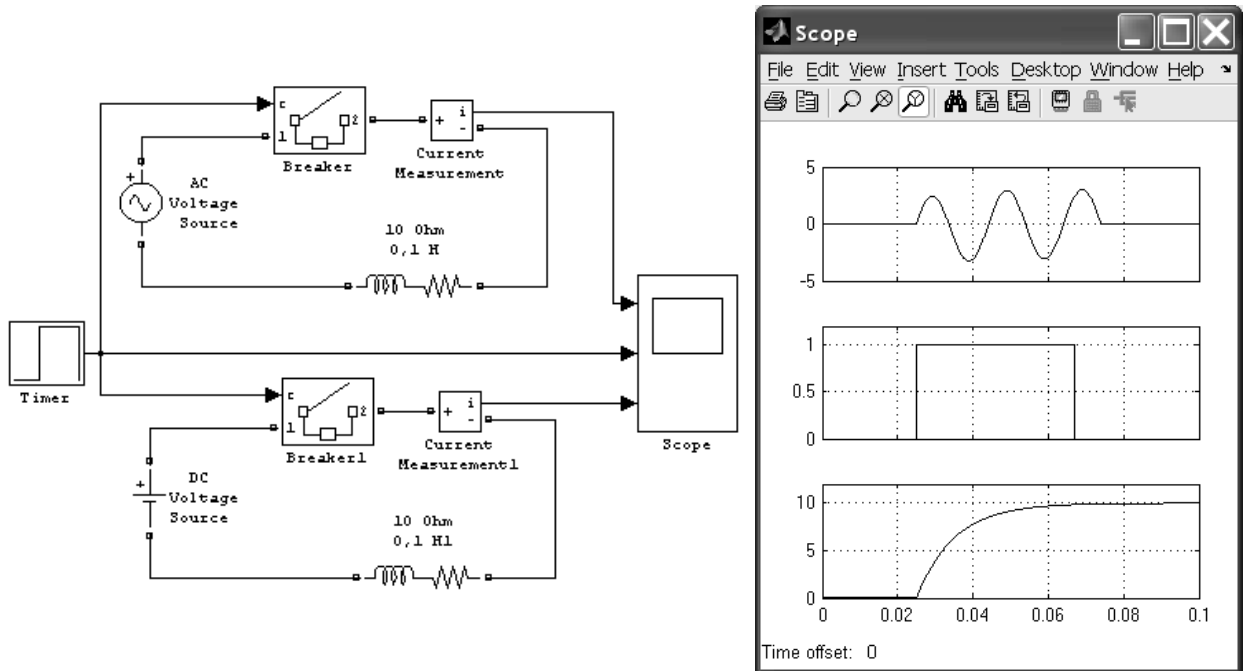
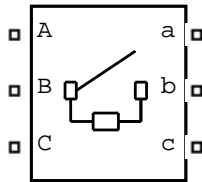


Рисунок 2.44 - Работа блока **Breaker** в цепях постоянного и переменного тока

Для коммутации в цепях постоянного тока необходимо использовать блок **Ideal Switch**, который мы рассмотрим далее.

 <p>Three-Phase Breaker</p>	Трехфазный выключатель переменного тока
Назначение:	Моделирует трехфазное устройство включения и выключения переменного тока. Состоит из трех блоков Breaker , управляемых одним сигналом

Окно параметров блока изображено на рисунке 2.45.

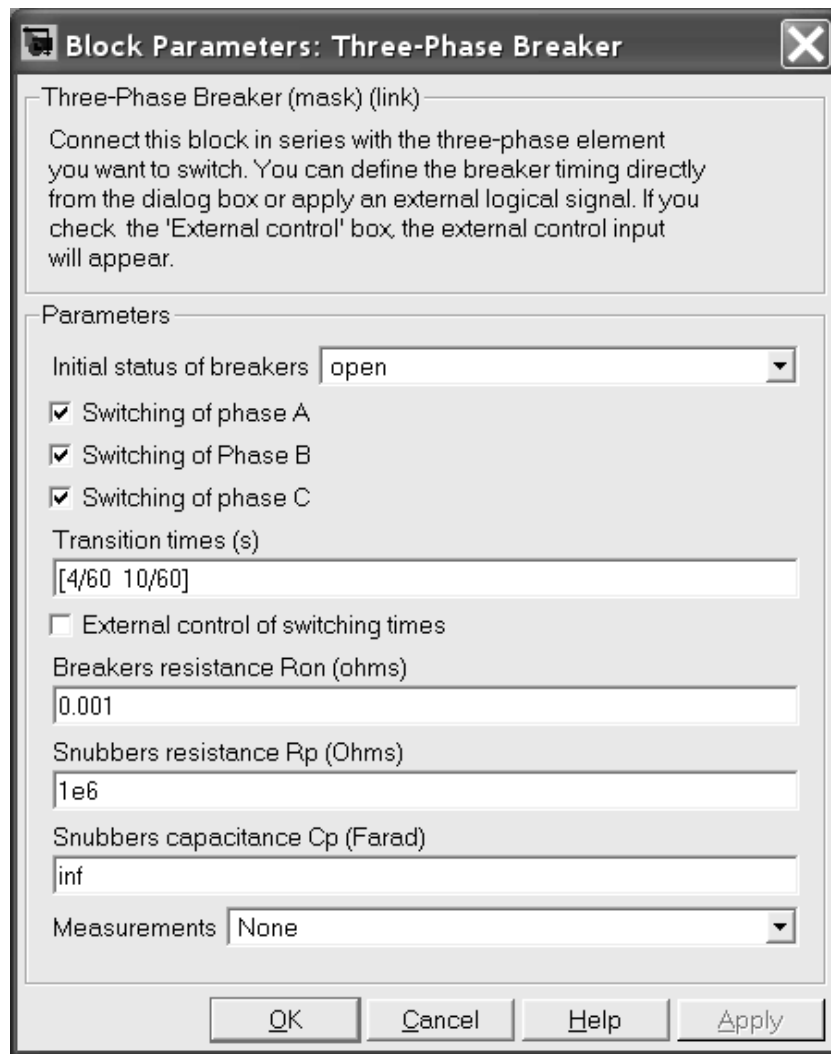


Рисунок 2.45 – Окно настройки параметров блока *Three-Phase Breaker*

Параметры блока:

Initial status of breakers [Начальное состояние ключей] - Значение параметра выбирается из списка:

- **open** - все ключи открыты,
- **closed** - все ключи закрыты.

Switching of phase A [Управление ключом фазы A] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Initial status of breakers**;

Switching of phase B [Управление ключом фазы B] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Initial status of breakers**;

Switching of phase C [Управление ключом фазы C] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Initial status of breakers**;

Transition times (s) [Время срабатывания выключателя] - Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя;

External control of switching times [Внешнее управление временем срабатывания] - При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей, при этом разрыв цепи в каждой фазе выполняется при достижении током этой фазы нулевого уровня;

Breaker resistance $R_{on}(Ohm)$ [Сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом)];

Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed') [Начальное состояние выключателя (0 - разомкнут, 1 - замкнут)];

Snubber resistance $R_s(Ohm)$ [Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)];

Snubber capacitance $C_s(F)$ [Емкость искрогасящей цепи (Ф)];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage-** напряжение на зажимах элемента,
- **Branch current** - ток элемента,
- **Branch voltage and current** - напряжение и ток элемента.

Пример:

На рисунке 2.46 показана схема, с использованием трехфазного выключателя. Управление выключателем осуществляется с помощью блока **Timer**. Измерение фазных токов выполняется блоком **Multimetr**.

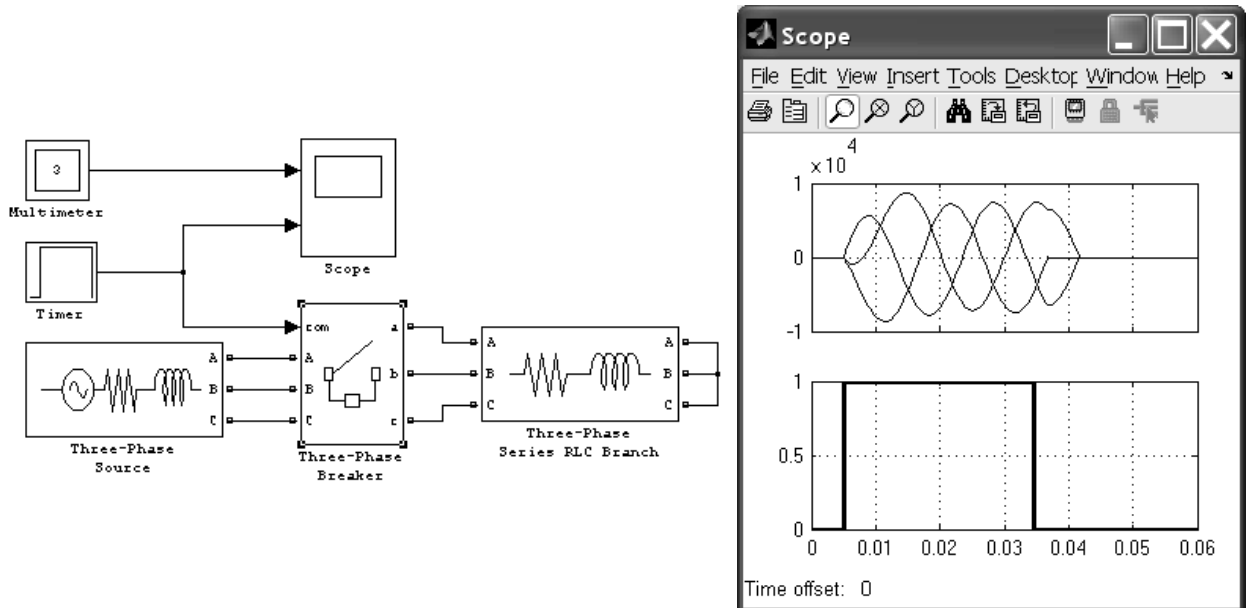


Рисунок 2.46 – Подключение трехфазной нагрузки трехфазным выключателем **Three-Phase Breaker**

На нижней осциллограмме изображен сигнал управляющий включением блока, а на верхней линейные токи цепи.

 <p>Three-Phase Fault</p>	Трехфазный короткозамыкатель
Назначение:	Моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю

Схема устройства показана на рисунке 2.47. Величина сопротивления заземления R_g устанавливается равной 10^6 Ом, если замыкание на землю не задано в окне параметров блока.

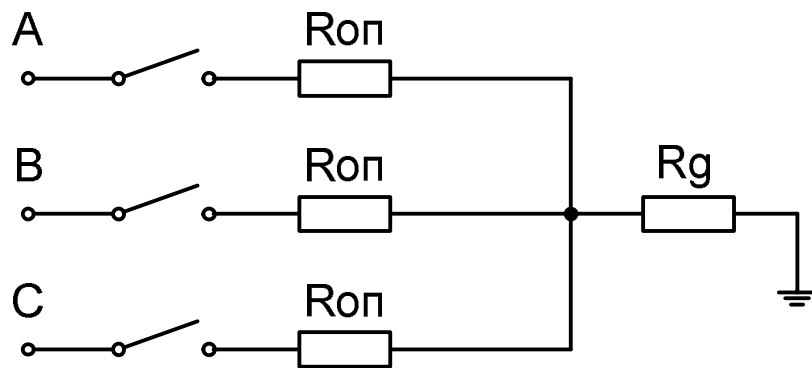


Рисунок 2.47 – Эквивалентная схема блока трехфазного короткозамыкателя

Окно параметров блока изображено на рисунке 2.48.

Параметры блока следующие:

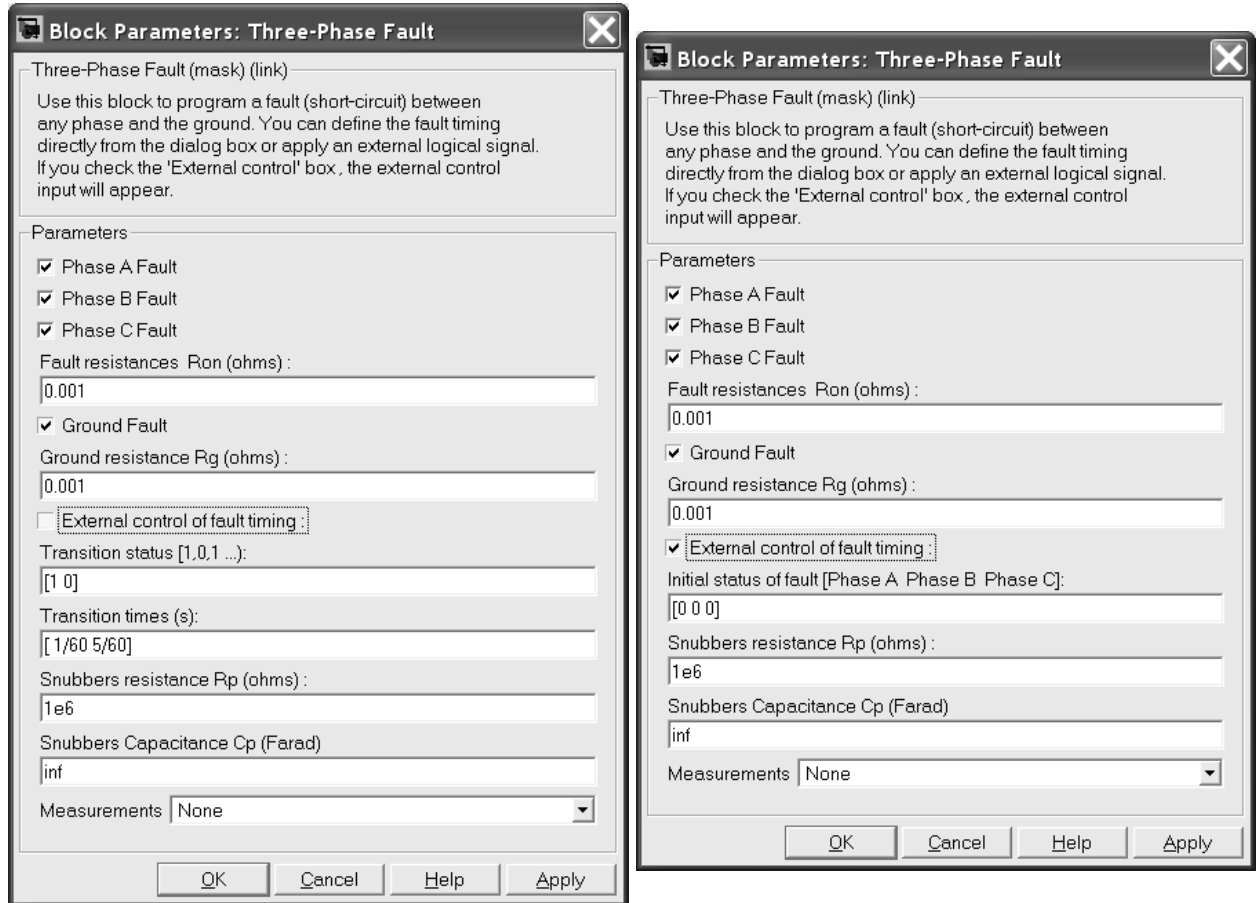
Phase A Fault [Управление ключом фазы A] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

Phase B Fault [Управление ключом фазы B] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

Phase C Fault [Управление ключом фазы C] - При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

Fault resistance Ron(Ohm) [Сопротивление выключателей в замкнутом состоянии (Ом)];

Ground Fault [Замыкание на землю] - При установленном флажке производится замыкание на землю;



а

б

*а – вариант с внутренним таймером, б – вариант с внешним таймером
Рисунок 2.48 – Окно настройки параметров блока **Three-Phase Fault***

Ground resistance $R_g(\text{Ohm})$ [Соппротивление заземления (Ом)] - Величина сопротивления заземления не может задаваться равной нулю;

External control of switching times [Внешнее управление временем срабатывания] - При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей;

Transition status [1 0 1...] [Состояние ключей] - Состояние ключей, которое соответствует моменту времени, заданному вектором **Transition times** (0 - разомкнутый ключ, 1 -замкнутый ключ). Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера;

Transition times (s) [Время срабатывания ключа] - Параметр задается в виде вектора значений времени, определяющих моменты срабатывания ключей. Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера;

Initial status of fault [Phase A Phase B Phase C] [Начальное состояние ключей] - Параметр задается в виде вектора из трех элементов, определяющих состояние ключей в начальный момент времени. Значение элемента

равное 0 соответствует разомкнутому начальному состоянию, 1 - замкнутому. Параметр доступен при внешнем управлении устройством;

Snubbers resistance $R_s(\text{Ohm})$ [Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)];

Snubbers capacitance $C_s(\text{F})$ [Емкость искрогасящей цепи (Ф)];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Fault voltages** - напряжения на входных зажимах короткозамыкателя,
- **Fault currents** - токи короткозамыкателя,
- **Fault voltages and currents** - напряжения и токи короткозамыкателя.

Пример:

На рисунке 2.49 показана схема, с использованием трехфазного короткозамыкателя. В момент времени 0.02 с производится межфазное короткое замыкание. Управление устройством осуществляется с помощью блока **Step**. Измерение фазных токов выполняется блоком **Multimetr**.

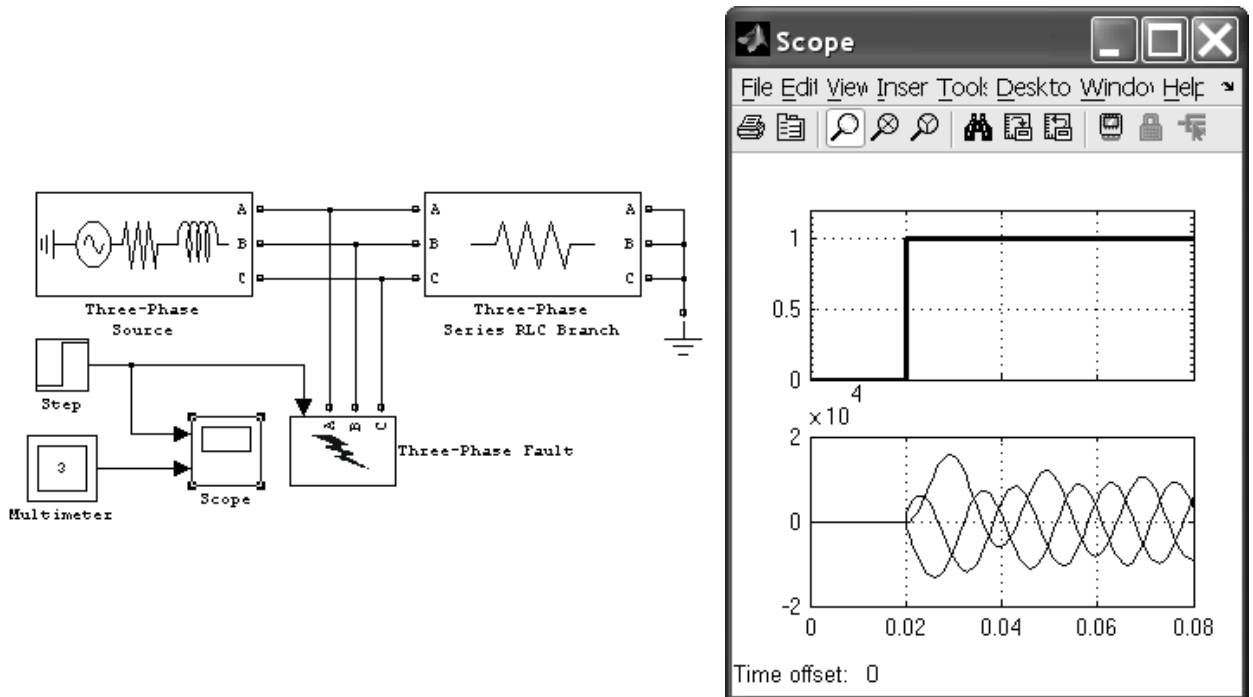
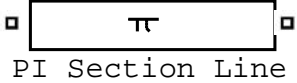


Рисунок 2.49 – Схема для моделирования межфазного короткого замыкания блоком **Three-Phase Fault**

Безусловно, моделирование короткого замыкания можно произвести и без использования данного блока. Для этого можно применить рассмотренный выше блок **Three-Phase Breaker**. Но к нему необходимо будет добавить блоки, моделирующие сопротивления короткого замыкания и таймер (при внутреннем управлении). В результате, схема всего замыкающего устройства получится весьма громоздкой. Блок **Three-Phase Fault** упрощает данную задачу и позволяет весьма гибко строить модели для исследования аварийных режимов в трехфазных сетях.

	Линия электропередачи с сосредоточенными параметрами
Назначение:	Моделирует однофазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами

В реальной линии электропередачи сопротивление, индуктивность, и емкость равномерно распределены вдоль линии. Приближенная модель линии (рисунок 2.50) может содержать от одной до нескольких идентичных секций с сосредоточенными параметрами. Число секций зависит от частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании. Приближенно число секций можно определить из выражения:

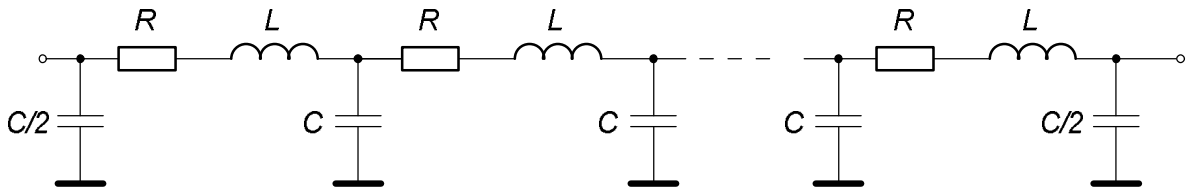


Рисунок 2.50 – Схема замещения линии типа *PI Section Line*

$$f_{\max} = \frac{N \cdot v}{8l} [\text{Гц}], \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (2.17)$$

где N – число секций линии;

v – скорость распространения волны в км/с, при измерении индуктивности в Гн/км и емкости в Ф/км;

L – длина линии, км.

Окно задания параметров показано на рисунке 2.51.

Параметры блока:

Frequency used for R L C specification (Hz) [Частота работы линии (Гц)];

Resistance per unit length (Ohm/km) [Сопротивление линии на 1 км длины (Ом/км)];

Inductance per unit length (H/km) [Индуктивность линии на 1 км длины (Гн/км)];

Capacitance per unit length (F/km) [Емкость линии на 1 км длины (Ф/км)];

Length (km) [Длина линии (км)];

Number of pi sections [Число секций линии];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для измерения,
- **Input and output voltages** - входные и выходные напряжения,
- **Input and output currents** - входные и выходные токи,
- **All voltages and currents** - все напряжения и токи.

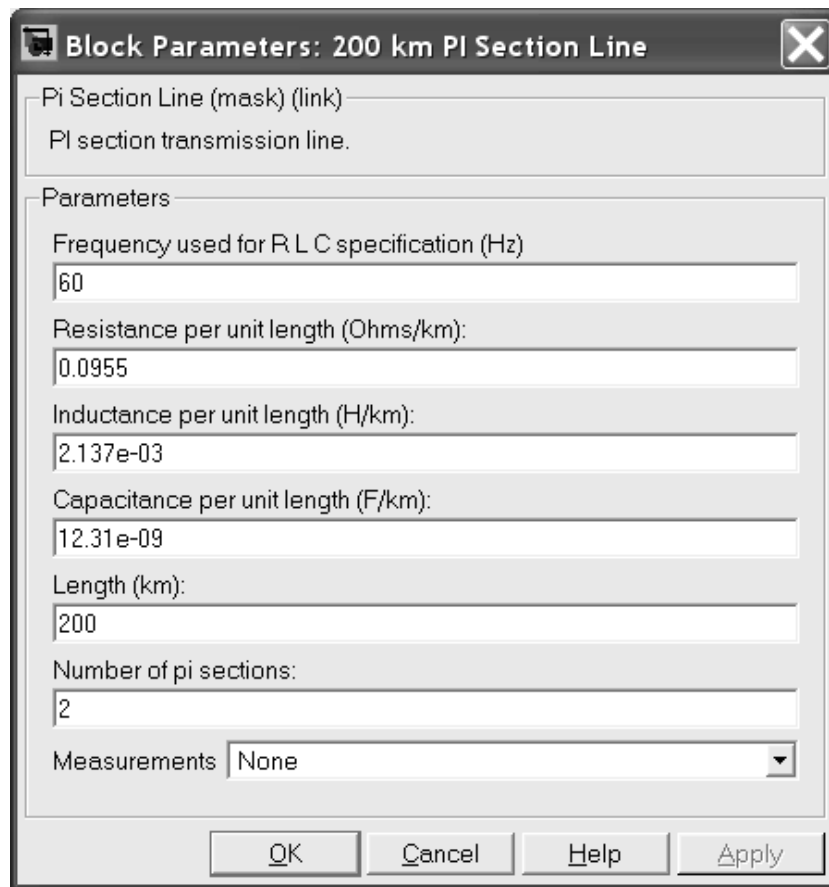


Рисунок 2.51 – Окно настроек параметров блока **PI Section Line**

Пример:

На рисунке 2.52 показана схема, моделирующая процессы подключения к источнику и отключения от него линии электропередачи длиной 200 км. Модель линии имеет две секции.

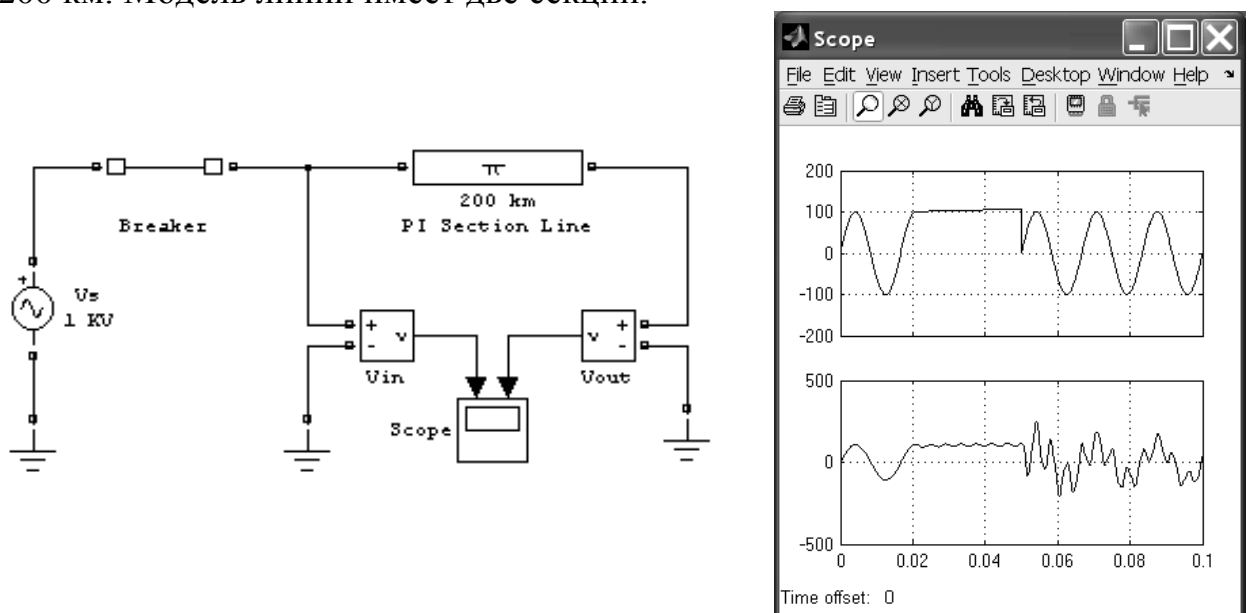
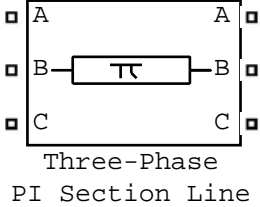


Рисунок 2.52 – Схема модели линии с сосредоточенными параметрами на основе блока **PI Section Line**

На осциллограмме вверху показано напряжение на входе линии, а на нижнем графике – на ее выходе.

Исследование переходных процессов в линиях электропередач ранее являлось весьма сложной задачей. Применение моделирование переходных процессов в среде **MATLAB** и **Simulink** позволяет резко упростить такие расчеты.

	Трехфазная линия электропередачи с сосредоточенными параметрами
Назначение:	Моделирует трехфазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами с учетом взаимной индуктивности фаз линии. Модель состоит из одной секции. Для создания модели из нескольких секций необходимо последовательно включить нужное количество блоков

Окно задания параметров показано на рисунке 2.53.

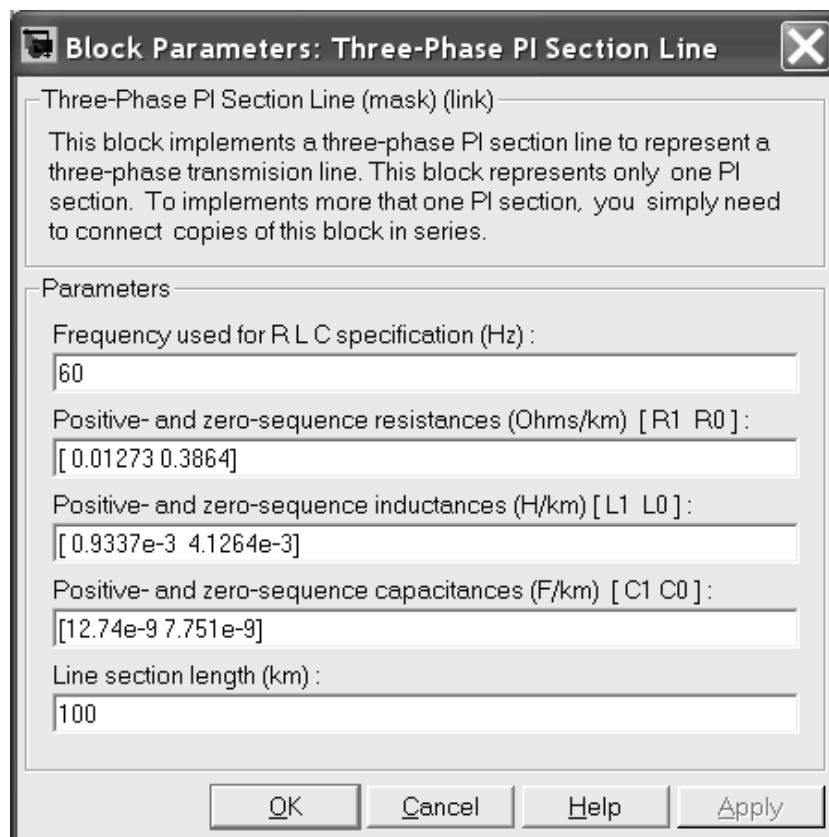


Рисунок 2.53 – Окно настроек параметров блока *Three-Phase PI Section Line*

Параметры блока:

Frequency used for R L C specification (Hz) [Частота работы линии (Гц)];

Positive- and zero-sequence resistances [R1 (Ohms/km) R0 (Ohms/km)]
 [Сопротивление прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Ом/км)] - Параметр задается в виде вектора;

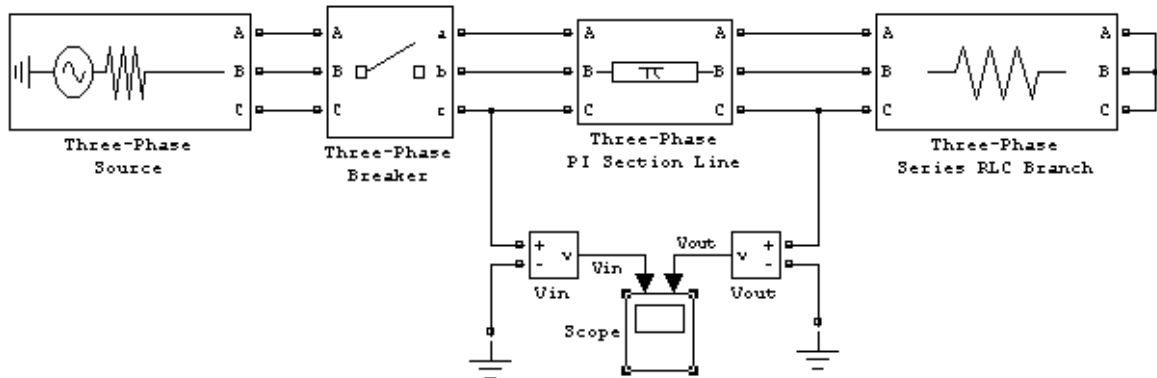
Positive- and zero-sequence inductances [L1(Н/км) L0 (Н/км)] [Индуктивность прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Гн/км)] - Параметр задается в виде вектора;

Positive- and zero-sequence capacitances [C1(F/км) C0(F/км)] [Емкость прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Ф/км)] - Параметр задается в виде вектора;

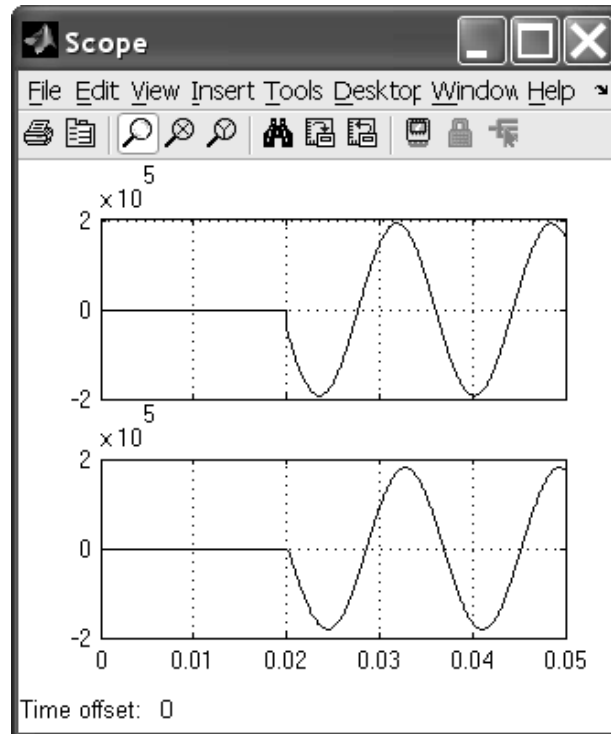
Line section length (km) [Длина линии (км)].

Пример:

На рисунке 2.54 показана схема, моделирующая процессы подключения к источнику линии электропередачи длиной 100 км.

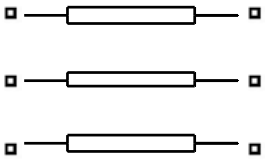


a



б

a – схема; б – входное (вверху) и выходное (внизу) напряжения
 Рисунок 2.54 – Модель трехфазной линии длиной 100 км

<p>Distributed Parameters Line</p> 	<p>Линия электропередачи с распределенными параметрами</p>
<p>Назначение:</p>	<p>Моделирует многофазную линию электропередачи с распределенными параметрами</p>

Если размеры линии соизмеримы с длиной волны тока в ней, представление ее в виде цепи с сосредоточенными параметрами неправомерно. Это справедливо для длинных линий электропередачи, высокочастотных цепей: антенных кабелей; фидеров и т.п.

Для описания таких устройств в пакете **SimPowerSystems 3.1** служит блок **Distributed Parameters Line**. С его математическим описанием можно ознакомиться в части III нашего курса лекций по электротехнике [12], либо в учебниках [13, 14].

Окно задания параметров показано на рисунке 2.55.

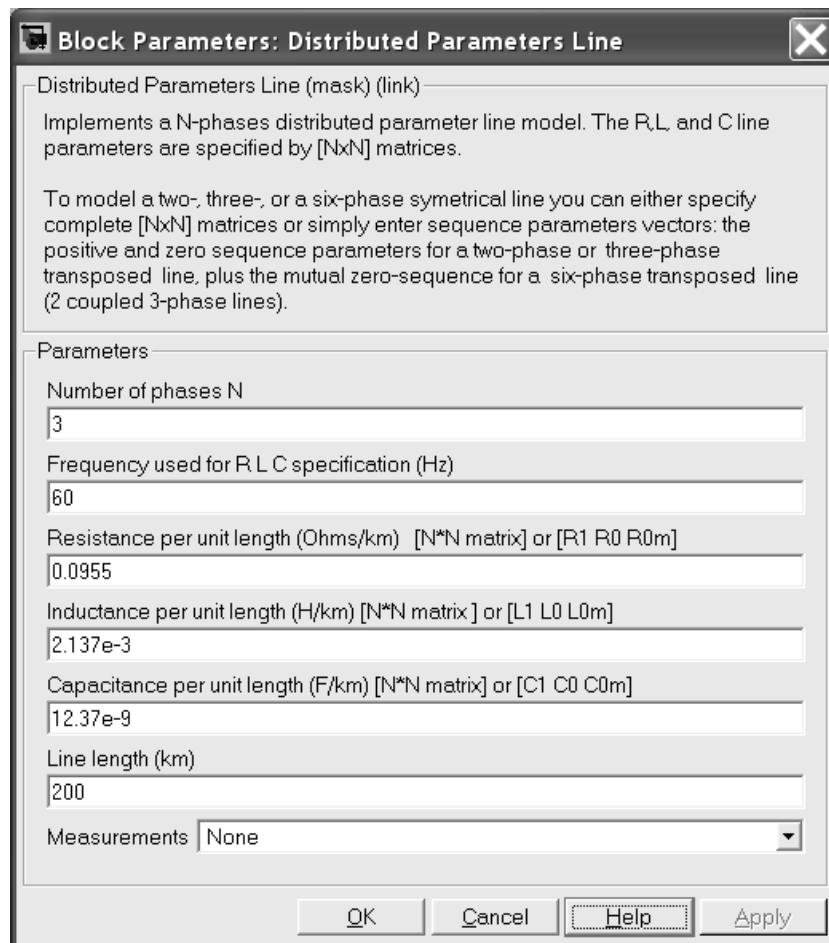


Рисунок 2.55 – Окно настроек параметров блока **Distributed Parameters Line**

Параметры блока:

Number of phases N [Число фаз];

Frequency used for R L C specification (Hz) [Частота работы линии (Гц)];

[Resistance per unit length (Ohms/km) [N*N matrix] or [R1 R R0m] [Сопротивление линии на 1 км длины (Ом/км)];

Inductance per unit length (H/km) [N*N matrix] or [L1 L0 L0m] [Индуктивность линии на 1 км длины (Гн/км)];

Capacitance per unit length (F/km) [N*N matrix] or [C1 C0 C0m] [Емкость линии на 1 км длины (Ф/км)];

Line length (km) [Длина линии (км)];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для измерения,
- **Phase-to-ground voltages** - напряжения относительно земли на входе и на выходе линии.

Для моделирования двух-, трех- или шестифазной симметричной линии можно задать параметры линии в виде матриц размерностью $N \cdot N$ (N - число фаз) или задать параметры прямой последовательности. Для двух- или трехфазной транспонированной линии можно ввести параметры прямой и нулевой последовательности. Для шестифазной транспонированной линии нужно дополнительно задать параметры нулевой последовательности взаимного сопротивления, индуктивности и емкости. Для моделирования несимметричной линии требуется задать матрицы параметров размерностью $N \cdot N$.

Пример:

На рисунке 2.56 показана схема, моделирующая процессы подключения к источнику и отключения от него линии электропередачи длиной 200 км.

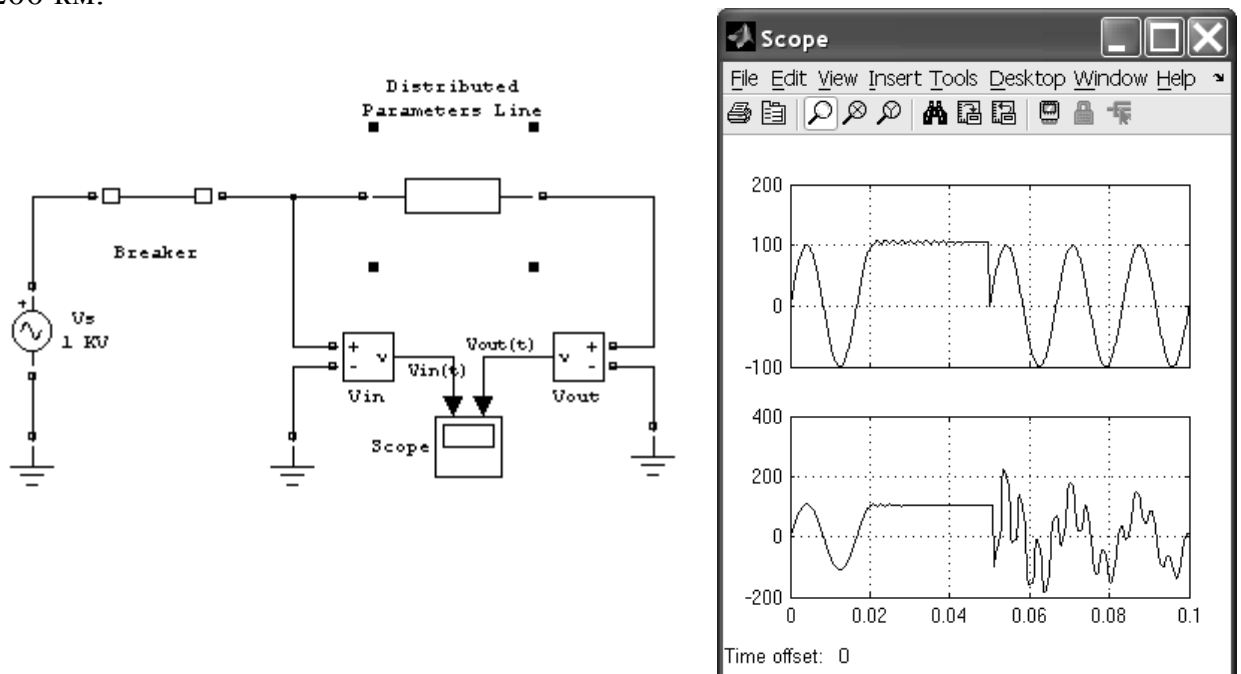
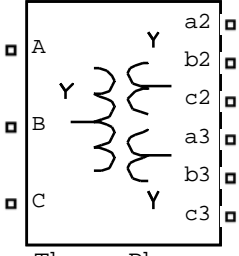


Рисунок 2.56 – Модель однофазной линии с распределенными параметрами

В схеме использованы те же параметры линии и источника, что и в примере для однофазной линии с сосредоточенными параметрами (рисунок 2.52). Как и ранее, на верхней осциллограмме приведено входное напряжение линии, а на нижней – выходное.

 <p>Three-Phase Transformer (Three Windings)</p>	Трехфазный трехобмоточный трансформатор
Назначение:	Моделирует трехобмоточный трехфазный трансформатор

Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

Окно задания параметров показано на рисунке 2.57.

Параметры блока:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора];

Winding 1 (ABC) connection [Схема соединения первой обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** - звезда,
- **Yn** - звезда с нейтралью,
- **Yg** - звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой группы,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы;

Winding parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] [Параметры первой обмотки] - Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Winding 2 (abc-2) connection [Схема соединения второй обмотки] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** – звезда,
- **Yn** – звезда с нейтралью,
- **Yg** – звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой группы,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы;

Winding parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] [Параметры второй обмотки] - Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

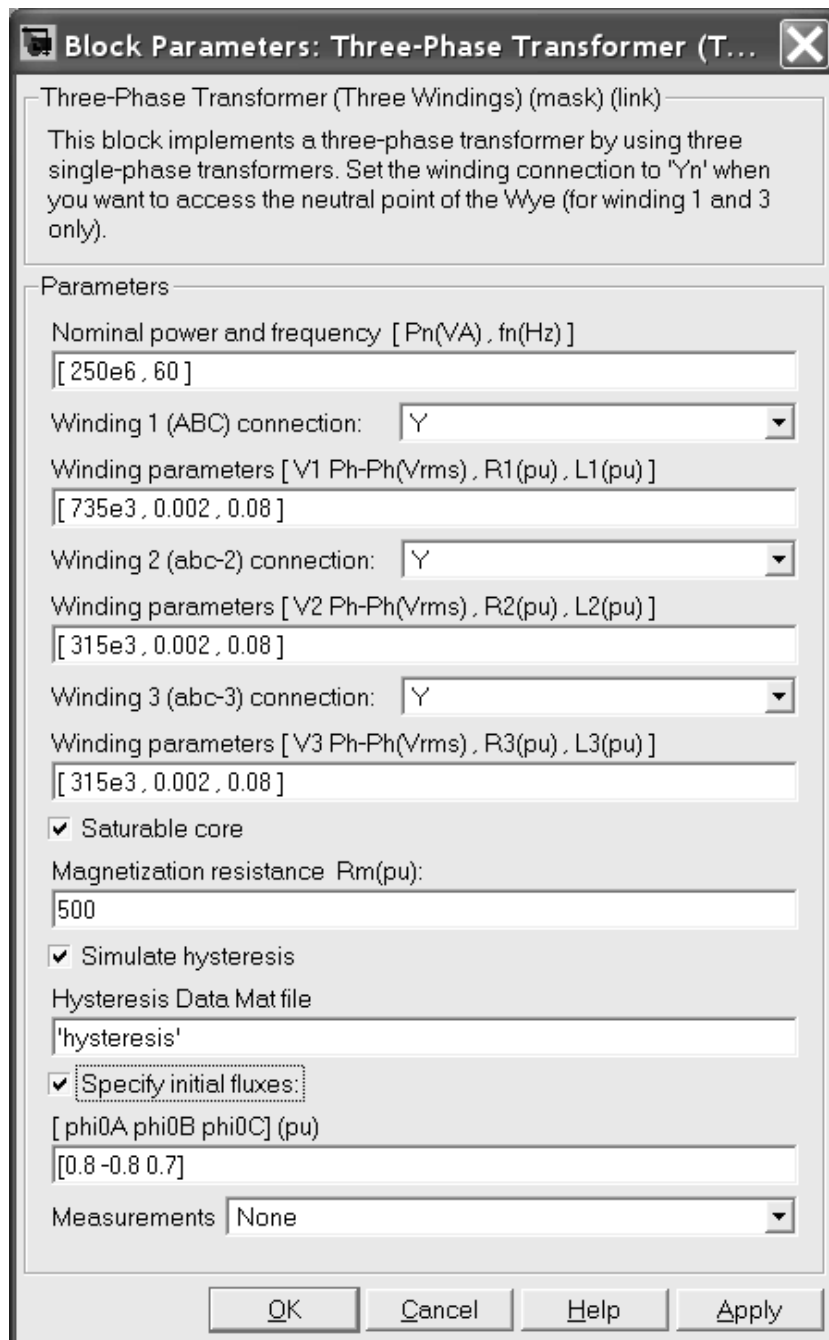


Рисунок 2.57– Окно настроек параметров блока **Three-Phase Transformer (Three Windings)**

Winding 3 (abc-3) connection [Схема соединения третьей обмотки] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** – звезда,
- **Yn** – звезда с нейтралью,
- **Yg** – звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой группы,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы;

Winding parameters [U3 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] [Параметры третьей обмотки] - Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Saturable core [Насыщающийся сердечник] - При установленном флажке используется нелинейная модель трансформатора;

Magnetization resistance Rm(pu) [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)];

Magnetization reactance Lm(pu) [Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)] - Параметр доступен при моделировании линейного трансформатора (флажок **Saturable core** не установлен);

Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...] [Характеристика насыщения сердечника] - Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Simulate hysteresis [Моделировать гистерезис] - При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Data Mat file [Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику]. Файл данных может быть создан с помощью блока **Powergui**. Параметр доступен при установленном флажке **Simulate hysteresis**;

Specify initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C] [Начальные потоки для фаз А В С] - Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

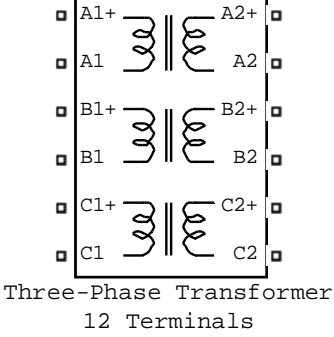
- **None** - нет переменных для измерения,
- **Winding voltages** - напряжения обмоток,
- **Winding currents** - токи обмоток,
- **Flux and excitation current (Imag_IRm)** - поток и ток холостого хода,
- **Flux and magnetization current (Imag)** - поток и ток намагничивания,
- **All Measurements (V, I, Flux)** - все напряжения, токи и поток.

*Примечание. В англоязычной литературе треугольниками первой группы (**Delta(DI)**) называют такое соединение в треугольник у которого имеется сдвиг напряжений на 300 эл. градусов в сторону опережения, по сравнению с соединением в звезду), а, соответственно треугольниками одиннадцатой группы (**Delta(D11)**) – называют такие у которых сдвиг напряжений на 300 эл. градусов в сторону отставания, по сравнению с соединением в звезду.*

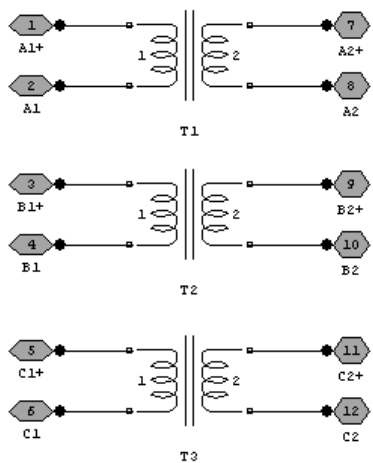
Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора. Характеристика намагничивания задается аналогично модели нелинейного трансформатора.

Использования блока **Powergui**, мы рассмотрим далее, отметим только, что его подключение к модели происходит просто при размещении его в окне модели в произвольном месте. Блок является инструментом графического интерфейса пользователя. Данный блок обеспечивает проведение специфици-

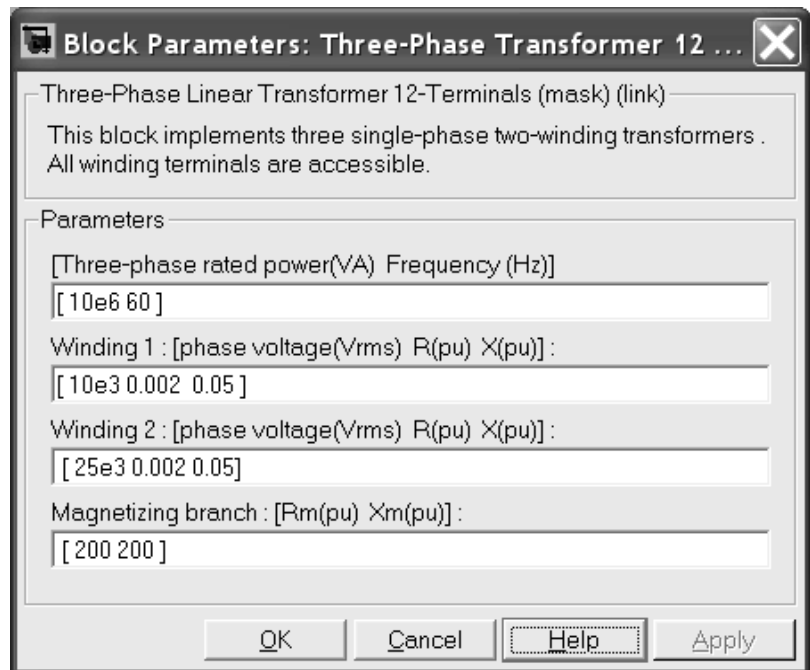
ческих исследований модели, таких как расчет схемы крмплексным методом, расчет установившегося режима, линейный анализ; Фурье-анализ; введение в модель нелинейных элементов (например, кривой намагничивания) и т.п.

	<p style="text-align: center;">Трехфазный линейный трансформатор (12-выводов)</p>
Назначение:	Моделирует трехфазный линейный трансформатор

Модель построена на основе трех однофазных линейных трансформаторов. Блок имеет отдельные зажимы для всех выводов обмоток трансформатора. Эквивалентная схема блока представлена на рисунке 2.58.



a



Block Parameters: Three-Phase Transformer 12 ...

Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals (mask) (link)

This block implements three single-phase two-winding transformers . All winding terminals are accessible.

Parameters

[Three-phase rated power(VA) Frequency (Hz)]
[10e6 60]

Winding 1 : [phase voltage(Vrms) R(pu) X(pu)] :
[10e3 0.002 0.05]

Winding 2 : [phase voltage(Vrms) R(pu) X(pu)] :
[25e3 0.002 0.05]

Magnetizing branch : [Rm(pu) Xm(pu)] :
[200 200]

OK Cancel Help Apply

б

Рисунок 2.58 – Эквивалентная схема (а) и окно настроек параметров блока (б) **Three-Phase Transformer 12 Terminals**

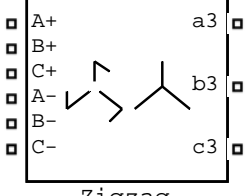
Параметры блока:

Three-phase rated power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Трехфазная номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)];

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] [Параметры первичной обмотки [Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки]];

Winding 2 parameters [Параметры вторичной обмотки [Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки]];

Magnetization branch [Rm(pu) Lm(pu)] [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.) и индуктивность цепи намагничивания (о.е.)].

 <p>Zigzag Phase-Shifting Transformer</p>	Трехфазный трансформатор с первичной обмоткой соединенной в зигзаг
Назначение:	Моделирует трехфазный трансформатор, первичные обмотки которого соединены в зигзаг

Модель построена на основе трех однофазных трехобмоточных трансформаторов. Все зажимы первичных обмоток доступны. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Окно настроек блока приведено на рисунке 2.59.

Параметры блока:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора];

Primary (zigzag) nominal voltage Vp [Vrms Ph-Ph] [Действующее значение номинального линейного напряжения первичной обмотки трансформатора];

Secondary nominal voltage and phase shift [V3(Vrms Ph-Ph) Phi(Deg)] [Действующее значение номинального линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора и фазовый сдвиг напряжения вторичной обмотки (эл. град)];

Secondary winding (abc) connection [Схема соединения вторичной обмотки] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** – звезда,
- **Yn** – звезда с нейтралью,
- **Yg** – звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой группы,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы;

Winding 1 (zig-zag) : [R1(pu) L1(pu)] [Параметры первой обмотки] - Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) первой обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора;

Winding 2 (zig-zag) : [R2(pu) L2(pu)] [Параметры второй обмотки] - Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) второй обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора;

Winding 3 (secondary): [R3(pu) L3(pu)] [Параметры третьей обмотки] - Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) третьей (вторичной) обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора;

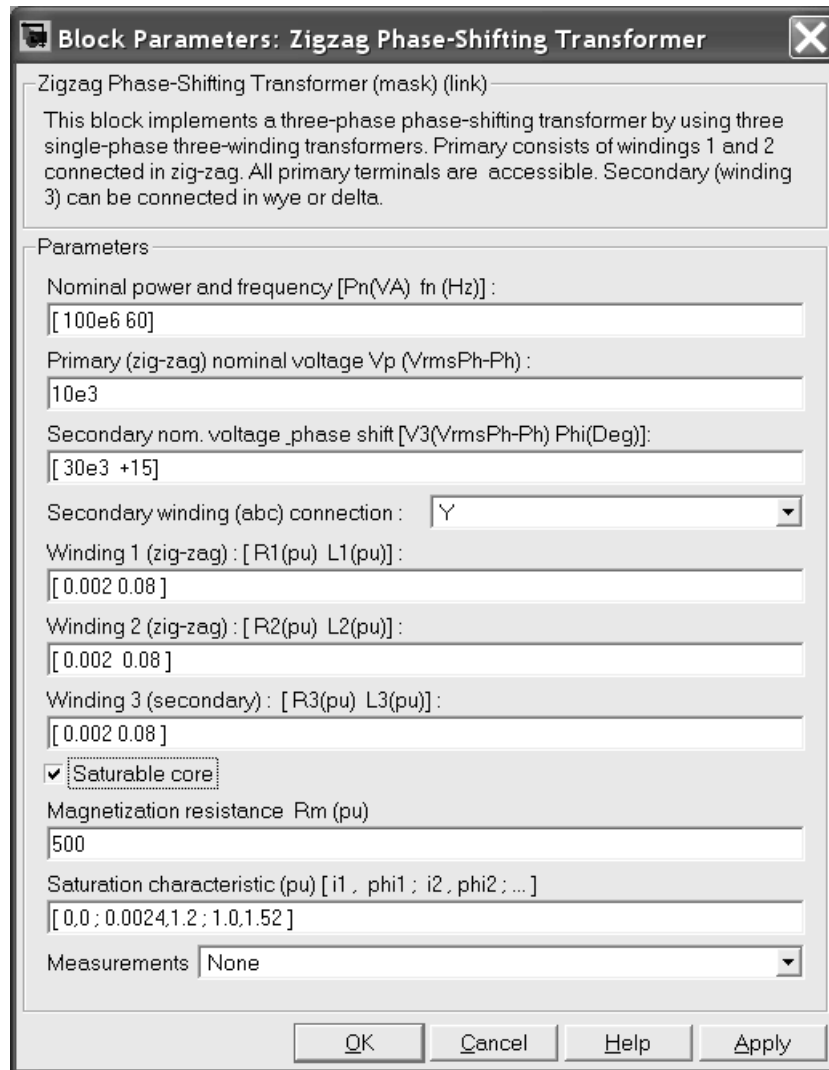


Рисунок 2.59 –Окно настроек параметров блока **Zigzag Phase-Shifting Transformer**

Saturable core [Насыщающийся сердечник] - При установленном флажке используется нелинейная модель трансформатора;

Magnetizing branch: [Rm(pu) Lm(pu)] [Параметры цепи намагничивания] - Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) цепи намагничивания. Параметр доступен, если флажок **Saturable core** не установлен (моделируется линейный трансформатор);

Magnetization resistance Rm(pu) [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)] - Параметр доступен, если установлен флажок **Saturable core**;

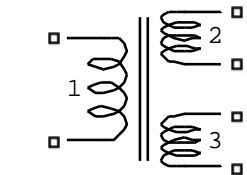
Saturation characteristic (pu) [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] [Характеристика насыщения сердечника] - Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Measurements : [Измеряемые переменные] – Выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для измерения,
- **Phase voltages** - фазные напряжения обмоток,
- **Phase currents** - фазные токи обмоток,

- **Fluxes and excitation currents (Imag + IRm)** - потоки и токи холостого хода,
- **Fluxes and magnetization currents (Imag)** - поток и ток намагничивания,
- **All measurements (V I Fluxes)** - все напряжения, токи и поток.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора

	Линейный трансформатор
Назначение:	Моделирует трех или двух обмоточный однофазный трансформатор

Нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника не учитывается. Схема замещения трансформатора показана на рисунке 2.60.

Окно задания параметров блока приведено на рисунке 2.61.

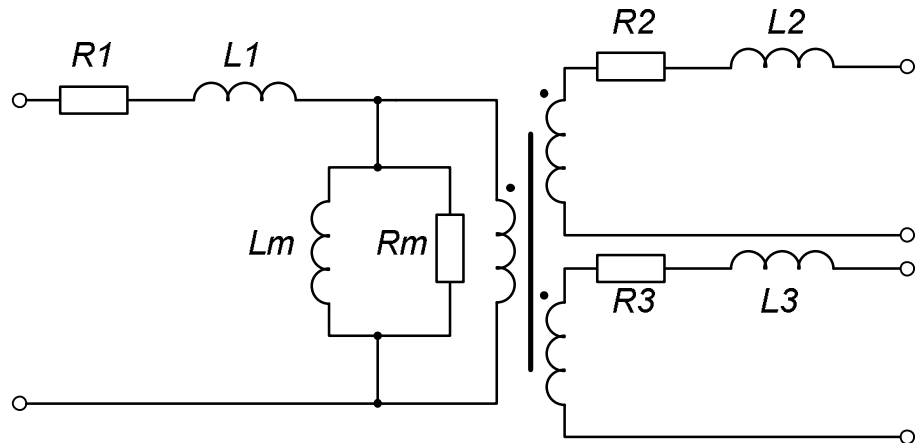


Рисунок 2.60 – Схема замещения трансформатора моделируемого блоком **Linear Transformer**

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также цепи намагничивания задаются в относительных единицах. Для каждой обмотки относительные значения сопротивления и индуктивности вычисляются по выражениям:

$$R^* = \frac{R}{R_{\delta}}, \quad L^* = \frac{L}{L_{\delta}}, \quad R_{\delta} = \frac{U_n^2}{P_n}, \quad L_{\delta} = \frac{R_{\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_n}, \quad (2.18)$$

где R^* и L^* - относительные значения сопротивления и индуктивности;
 R и L - абсолютные значения сопротивления и индуктивности;

R_{δ} - базисное сопротивление;

L_{δ} - базисная индуктивность;

U_H - номинальное напряжение обмотки;

f_H - номинальная частота.

Рассчитанные относительные параметры обмоток оказываются одинаковыми.

Параметры цепи намагничивания можно найти, используя величину тока намагничивания, задаваемую в процентах (%) относительно номинального тока. Так, например, при величине тока намагничивания равном 2%, сопротивление и индуктивность цепи намагничивания будут равны $1/(0.02) = 50$ о.е.

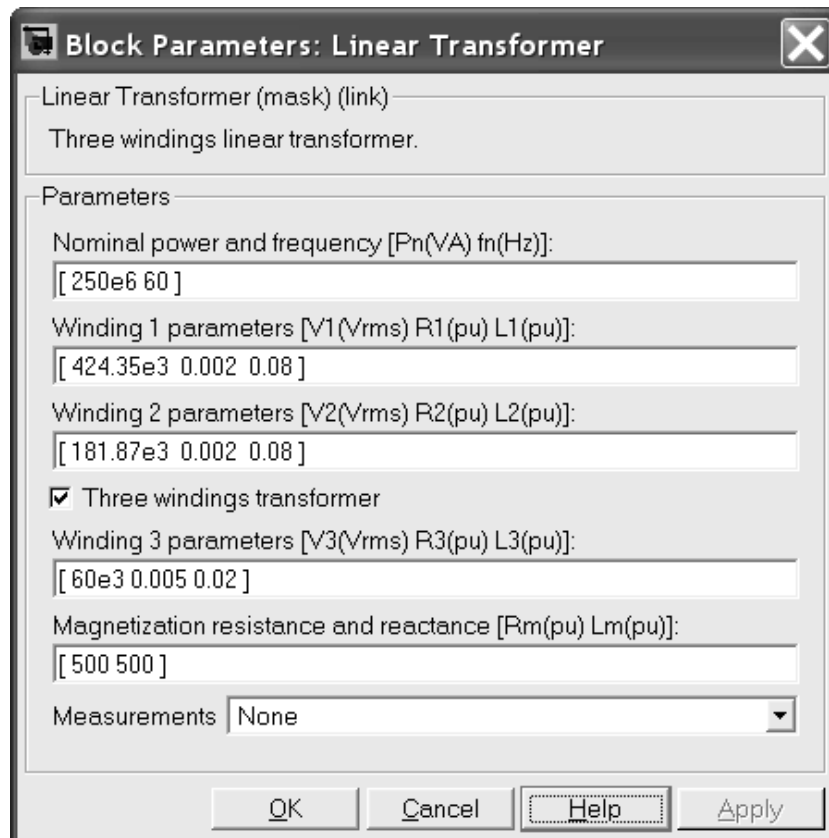


Рисунок 2.61 –Окно настроек параметров блока **Linear Transformer**

Параметры блока:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)];

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] [Параметры первой обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)] [Параметры второй обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Three windings transformer [Трехобмоточный трансформатор] - При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, если флажок снят, то одну (соответственно изменяется и пиктограмма блока);

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)] [Параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Magnetization resistance and reactance [Rm(pu) Lm(pu)] [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.) и индуктивность цепи намагничивания (о.е.)];

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для измерения,
- **Winding voltages** - напряжения обмоток,
- **Winding currents** - токи обмоток,
- **Magnetization current** - ток намагничивания,
- **All voltages and currents** - все напряжения и токи.

Пример:

На рисунке 2.62 показана схема, в которой двухобмоточный линейный трансформатор используется для питания активной нагрузки.

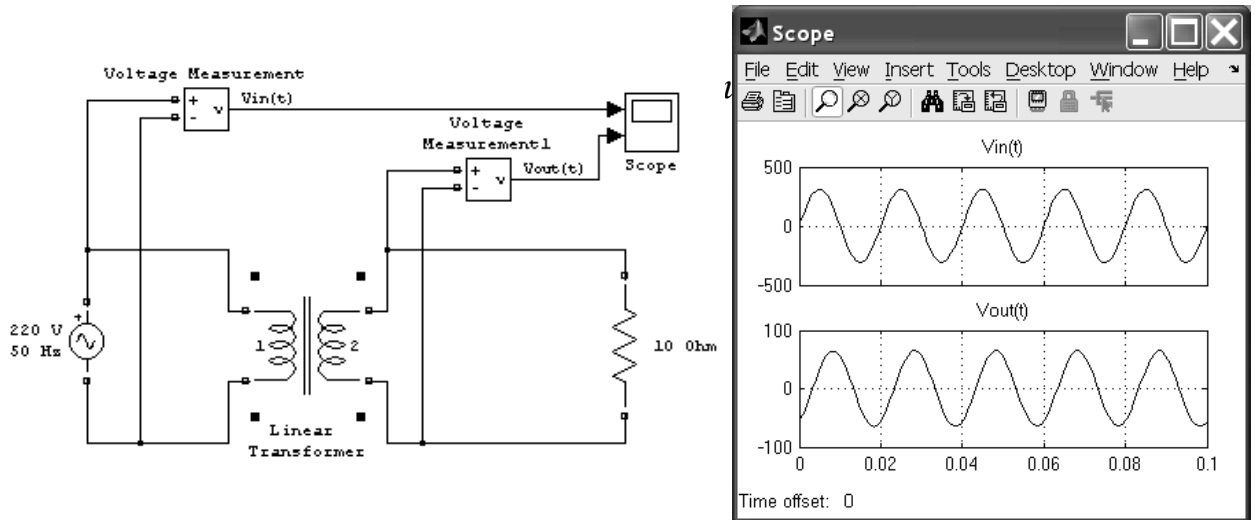


Рисунок 2.62 – Схема питания линейной нагрузки от линейного трансформатора **Linear Transformer**

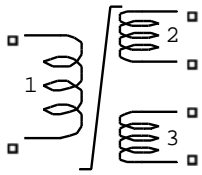
 <p>Saturable Transformer</p>	<p>Нелинейный трансформатор</p>
<p>Назначение:</p>	<p>Моделирует трех или двух обмоточный однофазный трансформатор. В модели учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.</p>

Схема замещения трансформатора показана на рисунке 2.63, а окно настроек параметров на рисунке 2.64.

В модели сопротивление цепи намагничивания R_m учитывает активные потери в сердечнике. Нелинейная индуктивность L_{sat} учитывает насыщение сердечника трансформатора.

Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно-линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания (рисунок 2.64,а). В модели имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике. В этом случае вторая точка нелинейной характеристики должна соответствовать нулевому току (рисунок 2.64,б).

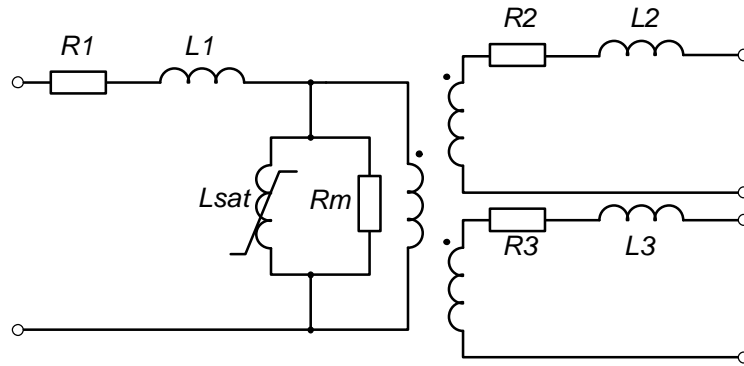


Рисунок 2.65 – Схема замещения трансформатора моделируемого блоком *Saturable Transformer*

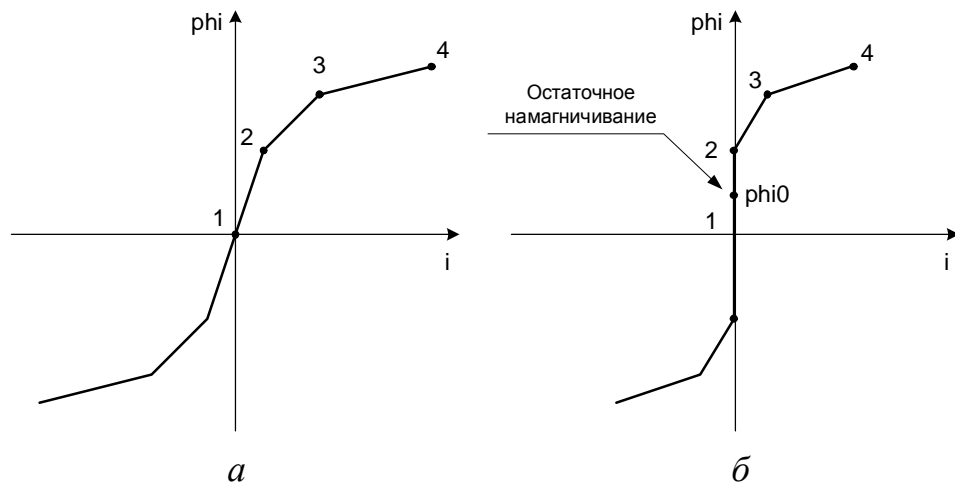


Рисунок 2.64 – Характеристика насыщения трансформатора, моделируемого блоком *Saturable Transformer*

Параметры блока:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)];

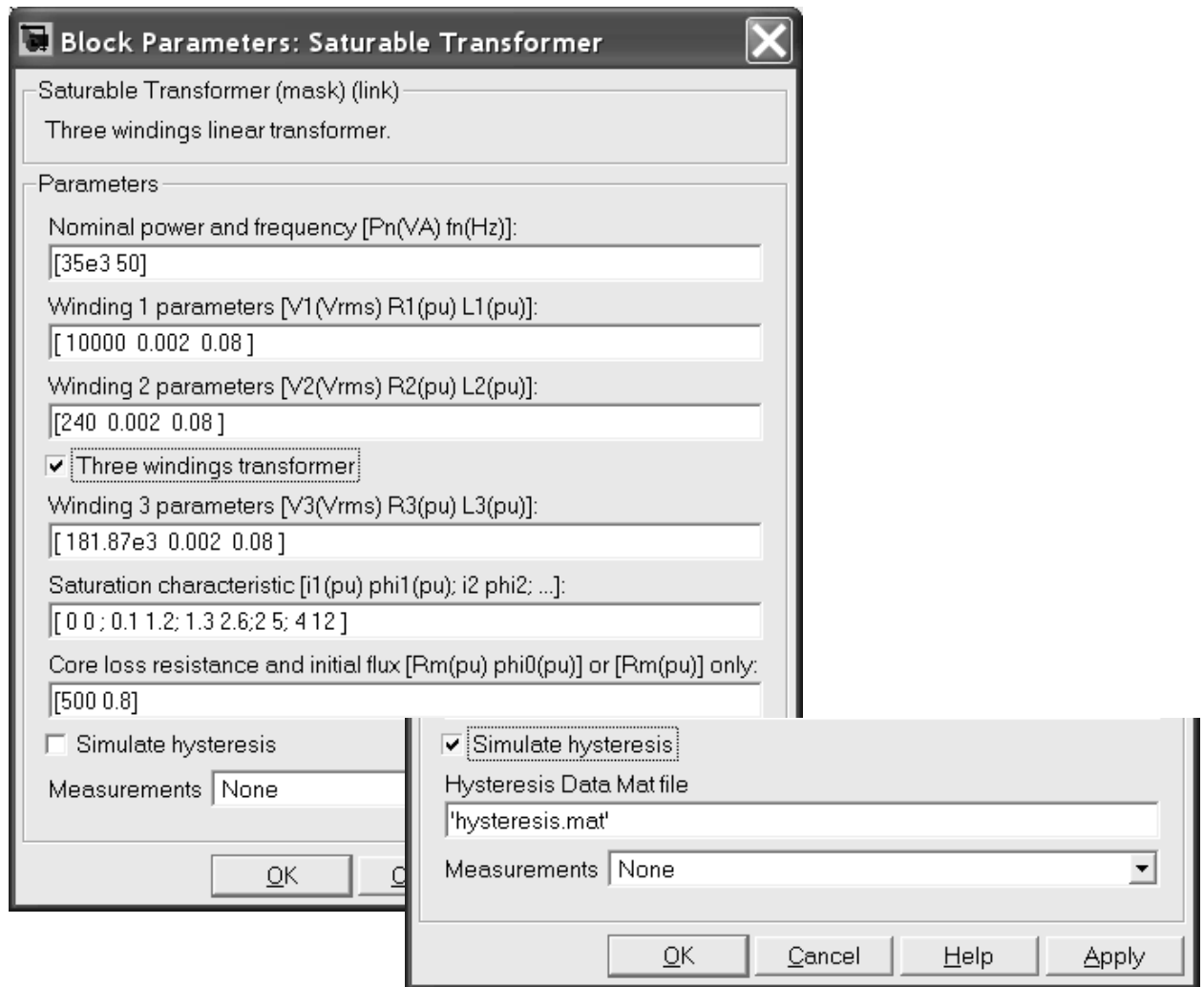
Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] [Параметры первой обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)] [Параметры второй обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Three windings transformer [Трехобмоточный трансформатор] - При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, если флажок снят, то одну;

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)] [Параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки];

Saturation characteristic [i1(pu) phi1(pu); i2 phi2; ...] [Характеристика насыщения сердечника];



а

б

а – окно без учета гистерезиса, б – часть окна при учете гистерезиса
Рисунок 2.65 - Окно настроек параметров блока *Saturable Transformer*

Core loss resistance and initial flux [Rm(pu) phi(pu)] or [Rm(pu)] only [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.) и остаточный поток (о.е.) или только сопротивление цепи намагничивания (о.е.)];

Simulate hysteresis [Моделировать гистерезис] - При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Data Mat file [Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику] - Файл данных может быть создан с помощью блока **Powergui**.

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для измерения,
- **Winding voltages** - напряжения обмоток,
- **Winding currents** - токи обмоток,
- **Flux and excitation current (Imag_IRm)** - поток и ток холостого хода,
- **Flux and magnetization current (Imag)** - намагничивания,
- **All Measurements (V, I, Flux)** - все напряжения, токи и поток.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также сопротивления цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

Характеристика намагничивания задается парами значений намагничивающего тока и потока в относительных единицах, начиная с точки (0, 0). Относительные значения тока и потока определяются по выражениям:

$$I^* = \frac{I}{I_{\phi}}, \quad \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{\phi}}, \quad I_{\phi} = \frac{P_n}{U_1} \sqrt{2}, \quad \Phi_{\phi} = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \sqrt{2}, \quad (2.19)$$

где I^* и Φ^* - относительные значения сопротивления и индуктивности;
 I и Φ - абсолютные значения сопротивления и индуктивности;

I_{ϕ} - базисный ток;

Φ_{ϕ} - базисный поток;

U_1 - номинальное напряжение первичной обмотки;

f_n - номинальная частота.

Пример:

На рисунке 2.66 показана схема, показана схема, в которой двухобмоточный нелинейный трансформатор используется для питания активной нагрузки.

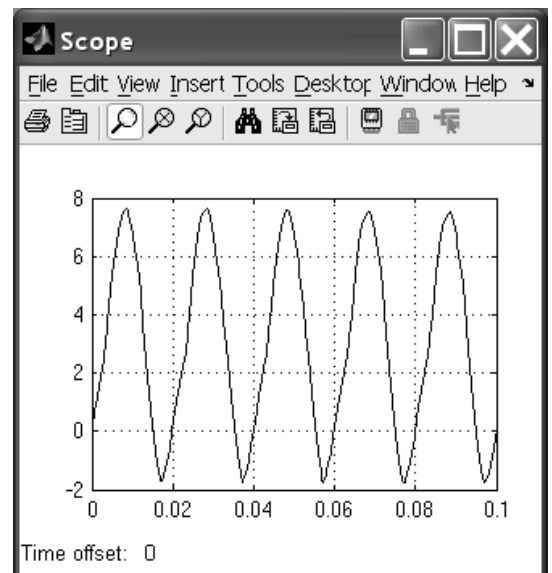
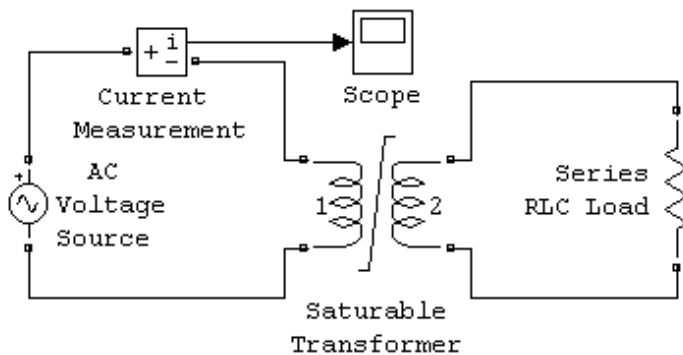
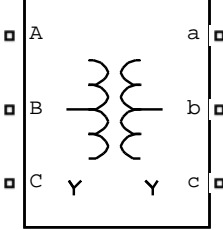
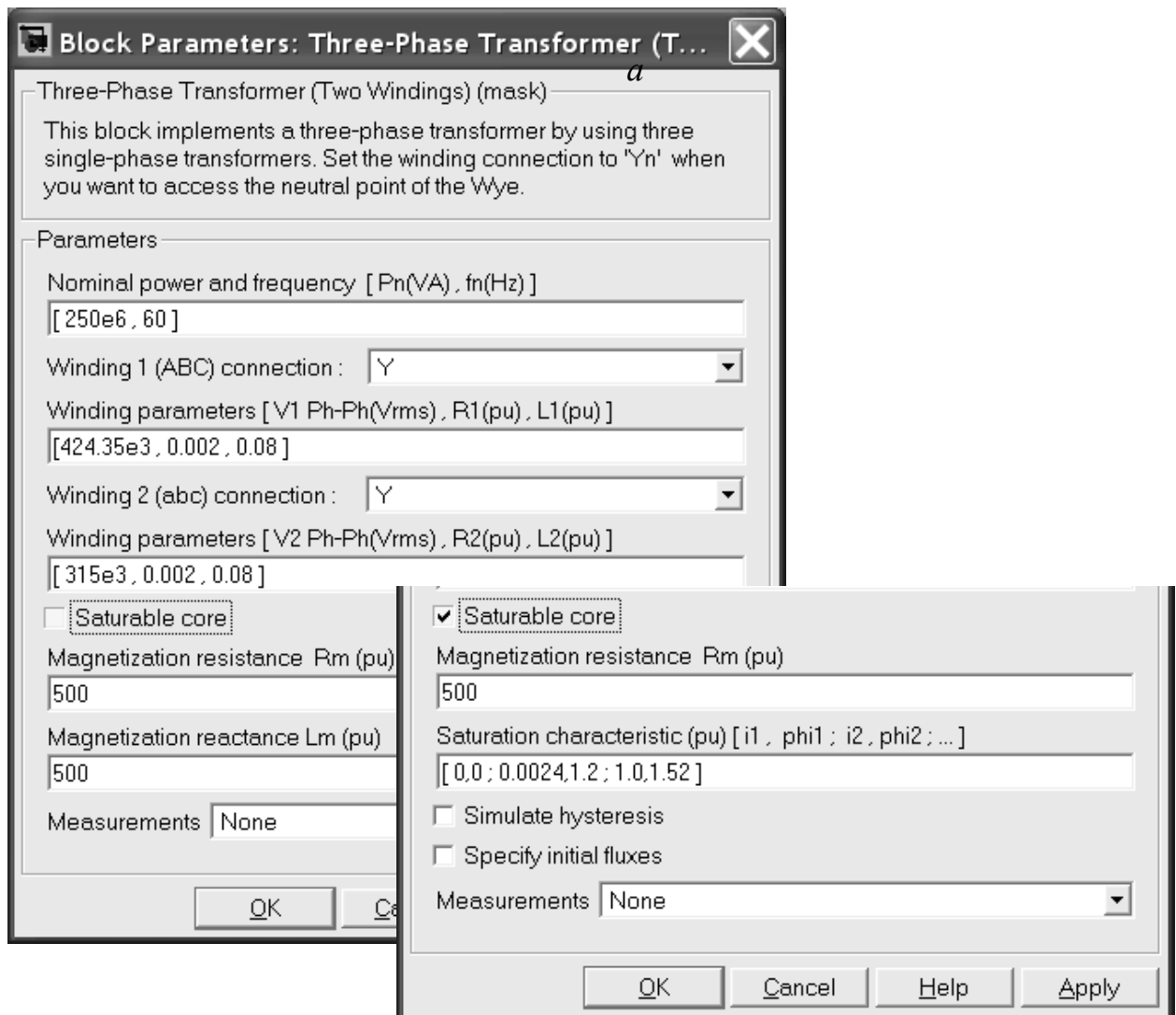


Рисунок 2.66 – Схема питания активной нагрузки от нелинейного трансформатора *Saturable Transformer*

На осциллограмме хорошо виден несинусоидальный характер тока первичной обмотки, обусловленный нелинейной характеристикой трансформатора.

 <p>Three-Phase Transformer (Two Windings)</p>	Трехфазный двухобмоточный трансформатор
Назначение:	Моделирует двухобмоточный трехфазный трансформатор.

Окно задания параметров блока приведено на рисунке 2.67.



а – окно без учета нелинейности, б – часть окна с учетом нелинейности
Рисунок 2.67 – Окно настроек параметров блока *Three-Phase Transformer (Two Winding)*

Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника

Параметры блока:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] [Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора];

Winding 1 (ABC) connection [Y, Yn, Yg, Delta(D1), Delta(D11)] [Схема соединения первичной обмотки] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** - звезда,
- **Yn** - звезда с нейтралью,
- **Yg** - звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы.

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] [Параметры первичной обмотки] - Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Winding 2 (abc) connection [Y, Yn, Yg, Delta(D1), Delta(D11)] [Схема соединения вторичной обмотки] - Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** - звезда,
- **Yn** - звезда с нейтралью,
- **Yg** - звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** - треугольник первой,
- **Delta(D11)** - треугольник одиннадцатой группы.

Winding 2 parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] [Параметры вторичной обмотки] - Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Saturable core [Насыщающийся сердечник] - При установленном флажке используется нелинейная модель трансформатора;

Magnetization resistance Rm(pu) [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)];

Magnetization inductance Lm(pu) [Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)] - Параметр доступен при моделировании линейного трансформатора (флажок **Saturable core** не установлен);

Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...] [Характеристика насыщения сердечника] - Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Simulate hysteresis [Моделировать гистерезис] - При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Data Mat file [Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику] - Файл данных может быть создан с помощью блока **Powergui**;

Specify initial fluxes [ϕ_{i0A} , ϕ_{i0B} , ϕ_{i0C}] [Начальные потоки для фаз ABC] - Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Measurements [Измеряемые переменные] - Значения параметра выбираются из списка:

- **Winding voltages** - напряжения обмоток,
- **Winding currents** - токи обмоток,
- **Flux and excitation current (I_{mag} , I_{Rm})** - поток и ток холостого хода,
- **Flux and magnetization current (I_{mag})** - намагничивания,
- **All Measurements (V, I, Flux)** - все напряжения, токи и поток.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

Характеристика намагничивания задается аналогично модели нелинейного трансформатора.

Пример:

На рисунке 2.68 показана схема, в которой двухобмоточный трехфазный трансформатор используется для питания трехфазной активной нагрузки. В примере использован линейный вариант трансформатора.

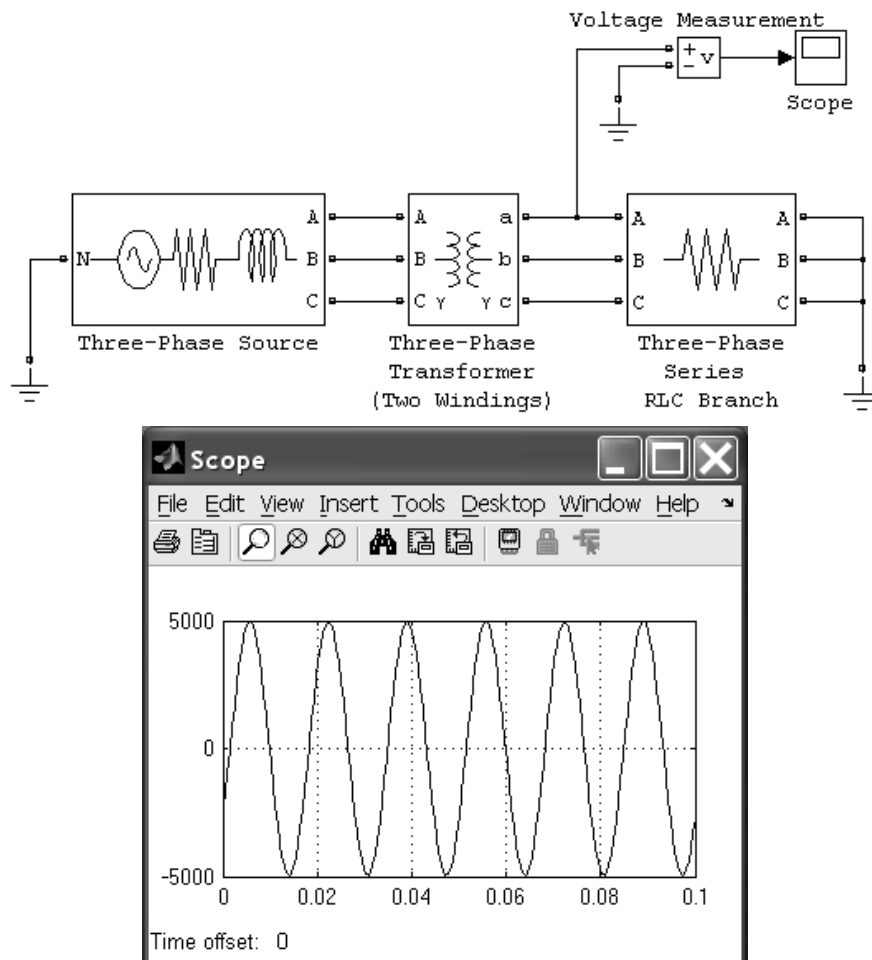


Рисунок 2.68 – Применение трехфазного трансформатора (схема (а) и осциллограмма напряжения фазы А (б))

 Ground	Заземление
Назначение:	Обеспечивает соединение с землей

Окно задания параметров блока показано на рисунке 2.69.

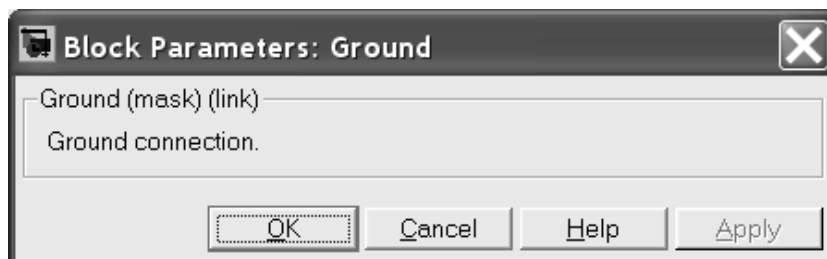



Рисунок 2.69 – Окно настроек блока **Ground**

Параметров блок не имеет. Данный блок был использован практически в каждой схеме указанных выше примеров.

На схеме может располагаться любое количество блоков. Они удобны для сокращения числа проводов схемы, позволяя не объединять общие точки заземления элементов проводами, а подсоединять к ним блок **Ground**.

 Neutral node 10	Нейтраль
Назначение:	Обеспечивает электрическое соединение между блоками с одинаковыми номерами узлов

Окно задания параметров показано на рисунке 2.70.

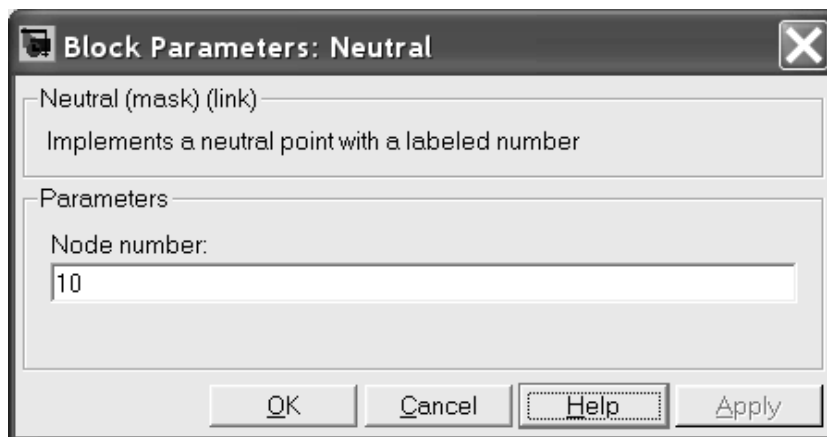


Рисунок 2.70 – Окно задания настроек блока **Neutral**

Параметры блока:

Node number [Номер узла].

Блок позволяет соединить между собой далеко отстоящие на схеме электрические узлы без видимых линий связи (проводов). Блок с номером узла равным нулю обеспечивает соединение с землей.

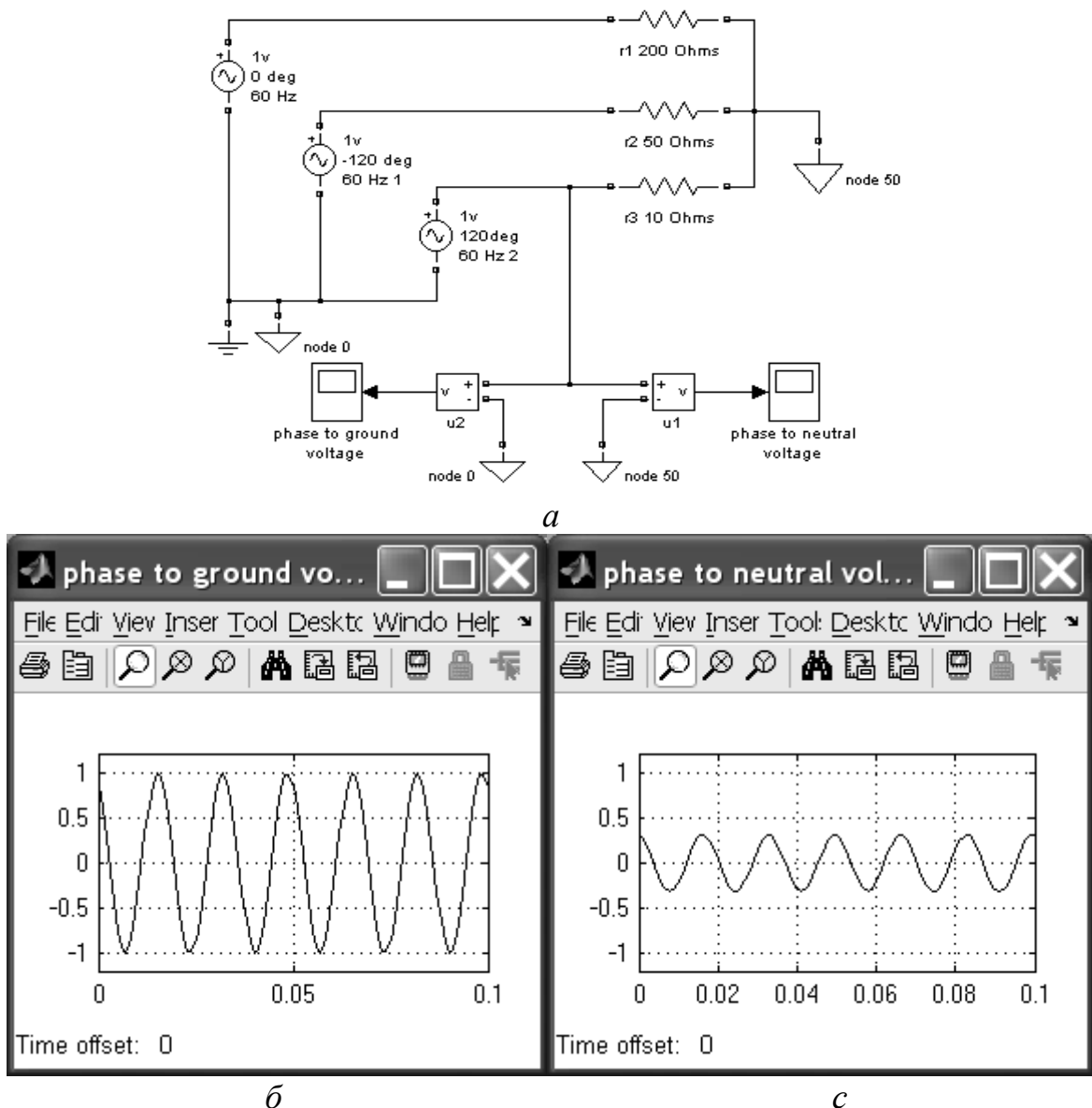
В предыдущей версии (Simulink 5), существовало два вида данного блока: со входным портом - **Neutral (input)** и с выходным - **Neutral (output)**.

Это усложняло выполнение схем, так как требовало применения различных типов блоков.

В рассматриваемой версии программы существует только один универсальный блок **Neutral**, который может применяться в любой точке цепи, без учета направления текущего через него тока.

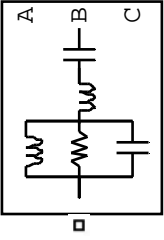
Пример:

На рисунке 2.71 – приведен пример использования блока **Neutral**. Источник трехфазного напряжения выполненный из трех однофазных (со сдвигом каждого напряжения на соответствующий угол 120 эл. градусов) соединенный в звезду питает несимметричную активную нагрузку с изолированной от земли нейтралью. Общие точки генератора и нагрузки обозначены на схеме блоками **Neutral node 0** и **node 50**, соответственно. Это дало возможность измерять как фазное напряжение генератора, так и фазное напряжение нагрузки (условно фазы С в данном примере).

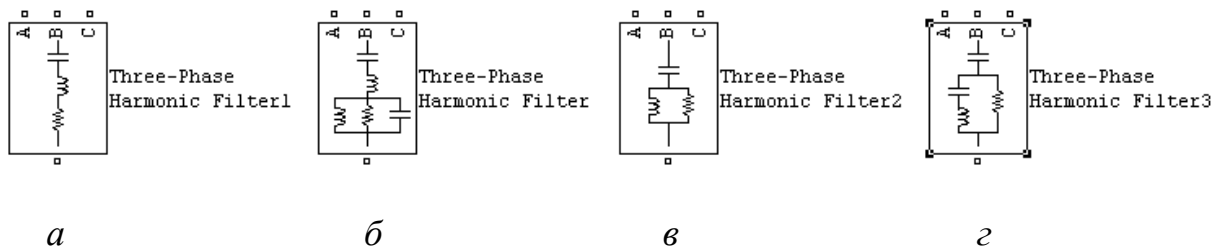


а – схема; б – напряжение генератора; с – напряжение нагрузки

Рисунок 2.71 – Применение блока **Neutral**

 <p>Three-Phase Harmonic Filter</p>	Трехфазный гармонический фильтр
Назначение:	Модель фильтров для снижения гармоник в напряжении мощных преобразовательных систем и повышения коэффициента мощности трехфазных нагрузок

Блок моделирует четыре наиболее часто применяющихся в силовых цепях разновидности фильтров. В зависимости от включенных опций блок может принимать виды, показанные на рисунке 2.72.



а – одиночный фильтр, б - сдвоенный фильтр, в - фильтр верхних частот, г - фильтр верхних частот типа С

Рисунок 2.72 – Разновидности моделируемых фильтров блоком **Three-Phase Harmonic Filter**

Фильтры выполняются на пассивных элементах. Величины сопротивлений, индуктивностей и емкостей фильтров определяются по заданным в окне настройки параметрам, которыми являются: номинальное напряжение U_n и реактивная мощность фильтра Q_c ; частота настройки f_n и требуемая добротность фильтра Q .

Основные выражения для расчета параметров данных фильтров следующие:

номер фильтруемой гармоники

$$n = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad (2.20)$$

добротность фильтра

$$Q = \frac{n \cdot X_L}{R} = \frac{X_C}{n \cdot R}, \quad (2.21)$$

ширина полосы пропускания

$$B = \frac{f_n}{Q}, \quad (2.22)$$

реактивная мощность на основной частоте (первой гармонике)

$$Q_C = \frac{U_n^2}{X_C} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)}, \quad (2.23)$$

активная мощность, выделяемая в фильтре на первой гармонике

$$P \cong Q_C \cdot \frac{n}{(n^2 - 1)} \cdot \frac{1}{Q}, \quad (2.24)$$

где f_1 и f_n - частоты первой и фильтруемой гармоник, соответственно;

n - номер фильтруемой гармоник;

U_n - номинальное напряжение сети;

X_L и X_C - индуктивное и емкостное реактивные сопротивления фильтра на частоте первой гармоник, соответственно.

Добротность фильтра может быть выражена через его параметры таким образом:

для сдвоенного фильтра, который имеет две частоты f_{r1} и f_{r2}

$$Q = \frac{R}{L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m}, \quad f_m = \sqrt{f_{r1} \cdot f_{r2}}, \quad (2.25)$$

для остальных типов фильтров

$$Q = \frac{R}{L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}. \quad (2.26)$$

Окно настроек показано ниже, на рисунке 2.73.

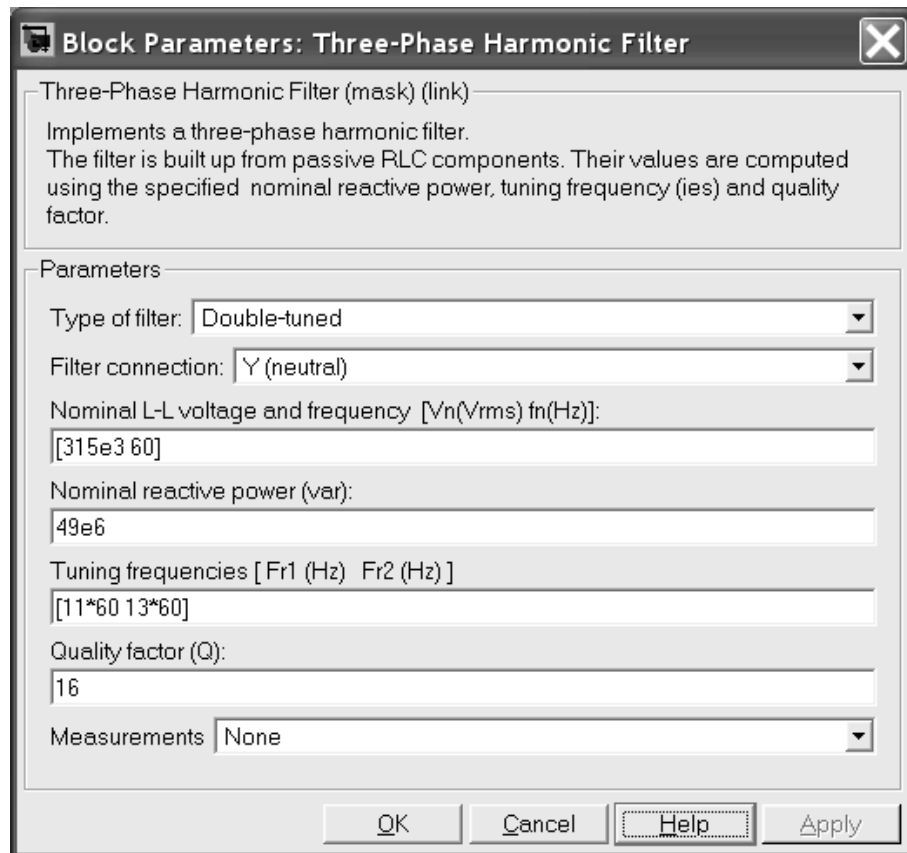


Рисунок 2.73 – Окно настроек блока **Three-Phase Harmonic Filter**

Параметры блока:

Type of filter [Тип фильтра] – Выбирается из списка:

- **Single-tuned** – одиночный фильтр,
- **Double-tuned** – сдвоенный фильтр,
- **High-pass** – фильтр верхних частот,
- **C-type High pass** – фильтр верхних частот типа C;

Filter connection [Схема соединения элементов фильтра] – Выбирается из списка:

- **Y** - звезда,
- **Yn** - звезда с нейтралью,
- **Yg** - звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta** – треугольник;

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)] [Номинальное линейное напряжение и частота [Действующее значение напряжения (В), частота (Гц)]];

Nominal reactive power (var) [Номинальная реактивная мощность (Вар)];

Tuning frequencies (Hz) [Частота настройки (Гц)] – Доступно для всех фильтров, кроме **Double-tuned**;

Tuning frequencies [Fr1(Hz) Fr2(Hz)] [Частота настройки Fr1(Гц) Fr2(Гц)] – Частоты двух соседних гармоник на которые может быть настроен фильтр. Доступно только для сдвоенного фильтра **Double-tuned**;

Quality factor (Q) [Добротность фильтра];

Measurements [Измеряемые переменные] - Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter**, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** - нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage** - напряжение на зажимах цепи,
- **Branch current** - ток цепи,
- **Branch voltage and current** - напряжение и ток цепи;

Пример:

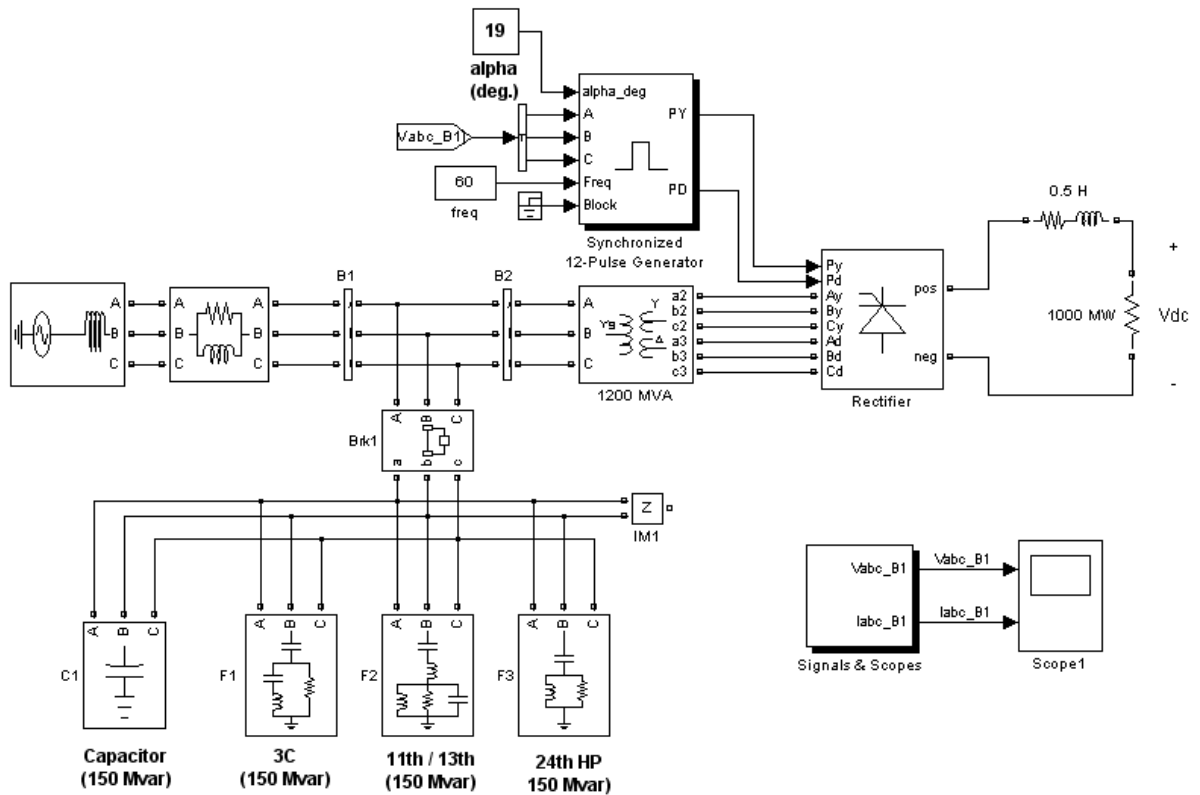
На рисунке 2.74 показан пример применения трех фильтров разного типа настроенных на 3-ю, 11-ю и 13-ю, а так же 24-ю гармоники сети.

На схеме к источнику трехфазного тока через трансформатор мощностью 1200 МВт подсоединен управляемый выпрямитель, работающий на активную нагрузку мощностью 1000 МВт.

При отсутствии фильтров (блок **Breaker (Brk1)** - разомкнут) работа выпрямителя вызывает существенные искажение кривых тока и напряжения в питающей сети. Это видно на рисунке 2.75, где приведены осциллограммы линейного напряжения и тока фазы В.

После подключения фильтров (блок **Breaker (Brk1)** – замкнут, как показано на рисунке 2.74) напряжения и токи становятся практически синусоидальными, что видно из осциллограмм приведенных на рисунке 2.76.

Данный пример еще раз иллюстрирует возможность совмещения в моделях блоков из пакета SimPowerSystem и общих библиотек программы Simulink.



Three-Phase Harmonic Filters used on a 12-pulse AC/DC Converter

Рисунок 2.74 – Пример использования блоков *Three-Phase Harmonic Filter*

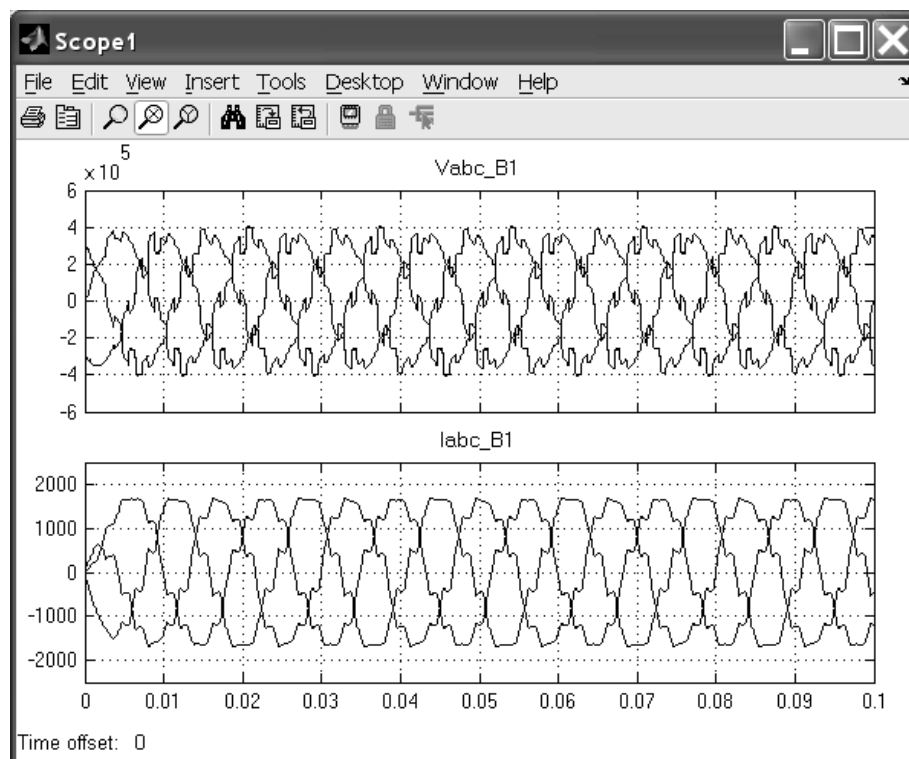


Рисунок 2.75 – Линейное напряжение и ток фазы В в схеме без фильтров

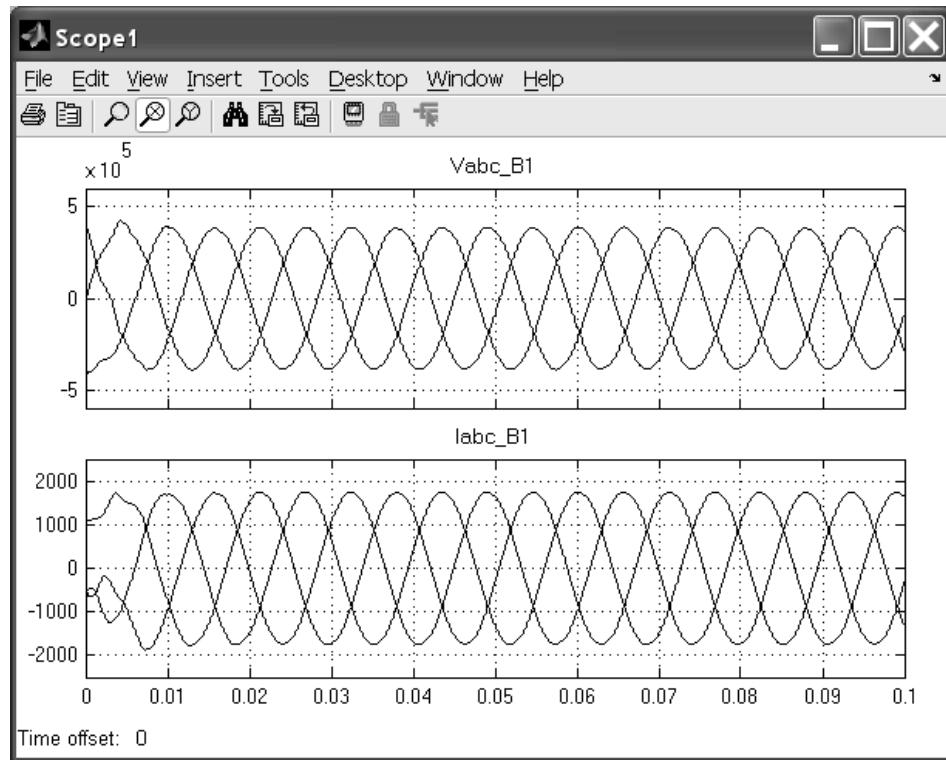


Рисунок 2.76 – Линейное напряжение и ток фазы В в схеме с фильтрами

2.3 Электрические машины в SimPowerSystems 3.1

Блоки для моделирования электрических машин собраны в библиотеку Machines. Ее состав показан на рисунке 2.77.

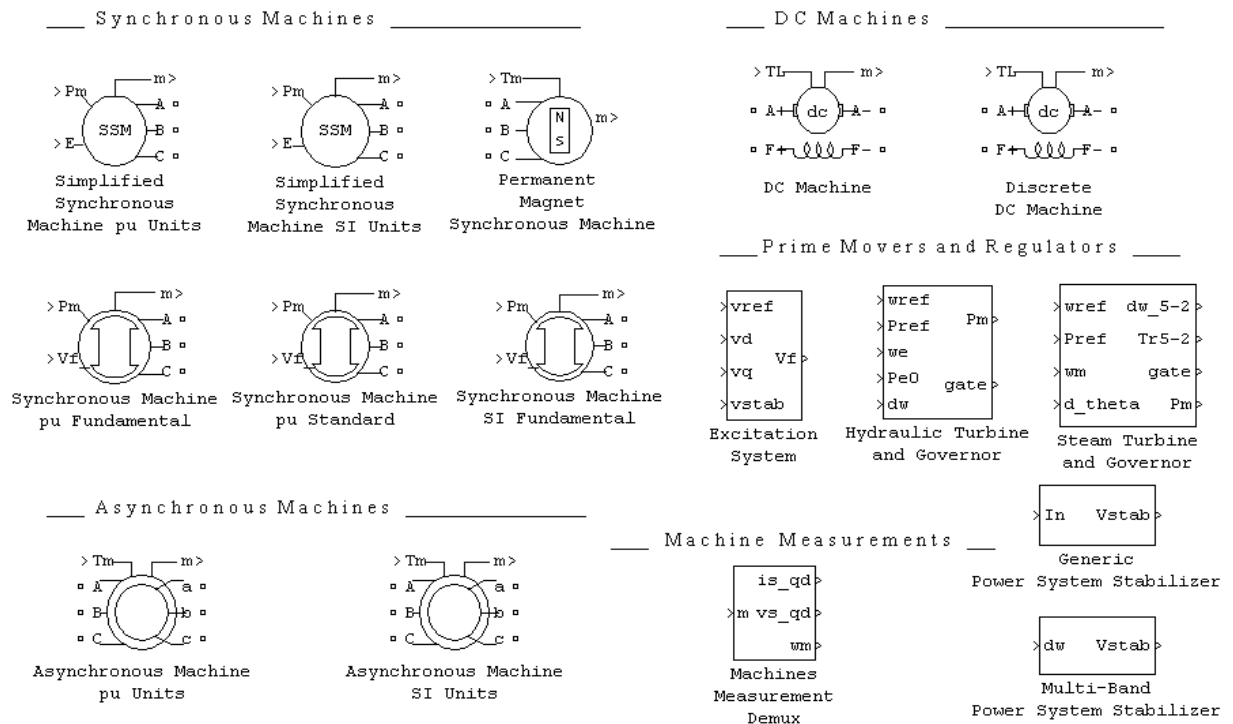


Рисунок 2.77 – Состав библиотеки Machines

В библиотеку входят 16 блоков: 6 блоков для моделирования синхронных машин, по два блока для моделирования асинхронной машины и машины постоянного тока, 5 блоков моделей приводов и регуляторов и один специализированный блок для измерений. Перечень блоков дан ниже.

Блоки библиотеки **Machines** данной версии MATLAB принципиально не отличаются от блоков предыдущей версии программы, кроме внешнего вида пиктограмм, которые несколько ближе к принятым в электротехнике обозначениям. Ранее в работе [15], мы подробно рассмотрели наиболее употребительные из них.

Блоки приводов и регуляторов, как будет видно далее, весьма специфичны и представляют интерес только для достаточно узкого круга специалистов энергетиков. Поэтому ниже, после краткого обзора библиотеки, мы подробно рассмотрим только один блок **Machines Measurement Demux** – измерительный блок, без которого невозможно моделирование ни одной из электрических машин переменного тока данной библиотеки.

Многообразие моделей библиотеки обусловлено наличием, как правило, двух вариантов исполнения блоков: с заданием параметров в системе единиц СИ или в системе относительных единиц.

Модели синхронных машин:

- **Simplified Synchronous Machine** - упрощенная модель синхронной машины с неявнополюсным ротором. Модель выполнена в двух вариантах:
 - **Simplified Synchronous Machine SI Units** (параметры машины задаются в системе единиц Си);
 - **Simplified Synchronous Machine pu Units** (параметры машины задаются в системе относительных единиц).
- **Synchronous Machine** - модель классической синхронной машины с демпферной обмоткой. Модель выполнена в трех вариантах:
 - **Synchronous Machine SI Fundamental** (параметры машины задаются в системе единиц Си);
 - **Synchronous Machine pu Fundamental** (параметры машины задаются в системе относительных единиц);
 - **Synchronous Machine pu Standard** (используются параметры схемы замещения машины в относительных единицах).
- **Permanent Magnet Synchronous Machine** - модель классической синхронной машины с постоянными магнитами. В модели не учитывается насыщение магнитной цепи, поскольку такие машины имеют, как правило, повышенный воздушный зазор.

Модели асинхронных машин:

- **Asynchronous Machine** - модель асинхронной электрической машины позволяющая исследовать ее как в двигательном, так и в генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины. Модель выполнена в двух вариантах:

- **Asynchronous Machine SI Units** (параметры машины задаются в системе единиц Си);
- **Asynchronous Machine pu Units** (параметры машины задаются в системе относительных единиц).

Модели машины постоянного тока:

• **DC Machine** - модель электрической машины постоянного тока. Модель выполнена в двух вариантах:

- **DC Machine** – классическая линейная модель машины постоянного тока. Она не учитывает нелинейность характеристик магнитопровода машины.

- **Discrete DC_Machine** - дискретная модель машины постоянного тока. Модель отличается от рассмотренной выше использованием блоков дискретных передаточных функций. В окне диалога блока также присутствует параметр **Sample time (s)** - шаг дискретизации.

Последняя модель удобна для моделирования схем электропривода содержащих управляемые выпрямители, импульсные регуляторы и преобразователи.

Модели приводов и регуляторов:

- **Excitation System** - блок является моделью системы возбуждения синхронной машины. Позволяет регулировать напряжение на зажимах машины работающей в генераторном режиме. В модели блока не учитывается насыщение магнитной цепи возбудителя. Все входные и выходные величины блока измеряются в относительных величинах.

- **Hydraulic Turbine and Governor** - блок является моделью гидравлической турбины с системой регулирования. Система регулирования включает пропорционально-дифференциальный (ПИД) регулятор и управляющий сервомотор, регулирующий поток воды в турбину. Все входные и выходные величины измеряются в относительных единицах.

- **Steam Turbine and Governor** - модель паровой турбины с системой регулирования. Система регулирования включает пропорционально-дифференциальный (ПИД) регулятор, реле скорости и управляющий сервомотор. Паровая турбина имеет четыре каскада, каждый из которых смоделированый передаточной функцией первого порядка. Первый каскад представляет паросборник, в то время как три других каскада представляют или трубопровод или вторичный подогреватель. Котел не смоделирован. Давление котла задается постоянным и равным 1.0 о.е. Модель вала турбины представляет собой четырехмассовую. Все входные и выходные величины измеряются в относительных единицах.

- **Generic Power System Stabilizer** - блок универсального стабилизатора энергосистемы может использоваться для улучшения демпфирующих свойств ротора синхронного генератора путем управления его возбуждением. Нарушения в работе энергосистемы могут приводить к возникновению колебаний скорости ротора генератора. Эти колебания должны подавляться для

сохранения устойчивости энергосистемы. Выходной сигнал блока является входным для системы возбуждения генератора. Входным сигналом блока может быть ошибка по скорости ротора или сигнал пропорциональный разности между механической мощностью и электрической мощностью генератора.

• **Multiband Power System Stabilizer** - многополосный стабилизатор энергосистемы. Неполадки, случающиеся в энергетической системе, приводят к электромеханическим колебаниям электрических генераторов. Эти колебания должны быть эффективно подавлены, чтобы сохранить стабильность системы.

Электромеханические колебания могут быть классифицированы по четырем главным категориям:

- Локальные колебания: между генератором и остальной частью электростанции, а также между электростанцией и остальной частью энергетической системы. Частоты таких колебаний обычно находятся в диапазоне 0.8 до 4.0 Гц.
- Межстанционные колебания: между двумя электрически близкими электрическими станциями генерации. Частоты колебаний могут изменяться от 1 до 2 Гц.
- Групповые колебания: между двумя большими группами электростанций. Частоты - обычно в пределах от 0.2 до 0.8 Гц.
- Глобальные колебания: характеризуются общими, совпадающими по фазе колебаниями всех генераторов в изолированной системе. Частота таких глобальных колебаний - обычно около 0.2 Гц.

Задачей блока **Multiband Power System Stabilizer** является подавление электромеханических колебаний генераторов электроэнергии в широком (почти две декады) диапазоне частот.

Блок измерения переменных электрической машины

• **Machines Measurement Demux** - блок предназначен для извлечения переменных состояния из вектора измеряемых переменных электрической машины. Блок работает совместно с моделями синхронных и асинхронных машин.

Окно параметров блока приведено на рисунке 2.78.

Параметры блока:

Machine type [Тип машины] - Выбирается из списка:

- **Simplified synchronous** - упрощенная синхронная машина,
- **Synchronous** - синхронная машина,
- **Asynchronous** - асинхронная машина,
- **Permanent magnet synchronous** - синхронная машина с постоянными магнитами,

В зависимости от выбранного типа машины в окне параметров будет отображаться разный набор выходных переменных машины. Ниже приведены доступные для измерения переменные машин различных типов.

Синхронная машина:

Stator currents [isa isb isc] - токи обмотки статора;
Stator currents [iq id] - проекции токов статора на оси **q** и **d**;
Field current [ifd] - ток возбуждения синхронной машины;
Damper winding currents [ikq1 ikq2 ikd] - проекции токов демпферной обмотки синхронной машины;
Mutual fluxes [phim_q phim_d] - проекции намагничивающего потока на оси **q** и **d**;
Stator voltages [vs_q vs_d] - проекции напряжений статора на оси **q** и **d**;
Rotor angle deviation [d_theta] rad - отклонение угла ротора $\Delta\theta$ синхронной машины (угол нагрузки θ), (рад.);
Rotor speed [wm] – угловая скорость ротора;
Electrical power [Pe] - электромагнитная мощность;
Rotor speed deviation [dw] - отклонение скорости ротора;
Rotor mechanical angle [theta] deg - угла поворота ротора (град.),
Electromagnetic torque [Te] - электромагнитный момент;
Load angle [Delta] deg - угол нагрузки синхронной машины, (град.);
Output active power [Peo] - выходная активная мощность;
Output reactive power [Qeo] - выходная реактивная мощность.

Упрощенная модель синхронной машины:

Line currents [isa isb isc] - фазные токи статора,
Terminal voltages [va vb vc] - напряжения на зажимах обмотки статора (фазные напряжения),
Internal voltages [ea eb ec] - фазные ЭДС статора,
Rotor angle [thetam] rad - угол поворота ротора, (рад.),
Rotor speed [wm] – угловая скорость ротора,
Electrical power [Pe] - электромагнитная мощность

Синхронная машина с постоянными магнитами:

Stator currents [ia ib ic] - токи статора,
Stator currents [is_q is_d] - проекции токов статора на оси **q** и **d**,
Stator voltages [vs_q vs_d] - проекции напряжений статора на оси **q** и **d**,
Rotor speed [wm] – угловая скорость ротора,
Rotor angle [thetam] rad - угол поворота ротора (рад.),
Electromagnetic torque [Te] N.m - электромагнитный момент (Н·м).

Асинхронная машина:

Rotor currents [ira irb irc] - токи обмотки ротора,
Rotor currents [ir_q ir_d] - проекции токов ротора на оси **q** и **d**,
Rotor fluxes [phir_q phir_d] - проекции потоков ротора на оси **q** и **d**,
Rotor voltages [vr_q vr_d] - проекции напряжений статора на оси **q** и **d**,
Stator currents [ia, ib, ic] A - токи статора,
Stator currents [is_q is_d] A - проекции токов статора на оси **q** и **d**,
Stator fluxes [phis_q phis_d] - проекции потоков статора на оси **q** и **d**,
Stator voltages [vs_q vs_d] V - проекции напряжений статора на оси **q** и **d**,
Rotor speed [wm] rad/s - скорость ротора,

Electromagnetic torque [Te] N.m - электромагнитный момент,
Rotor angle [thetam] rad - угол поворота ротора (рад.).

Для извлечения требуемой переменной из вектора измеряемых переменных необходимо отметить ее флажком.

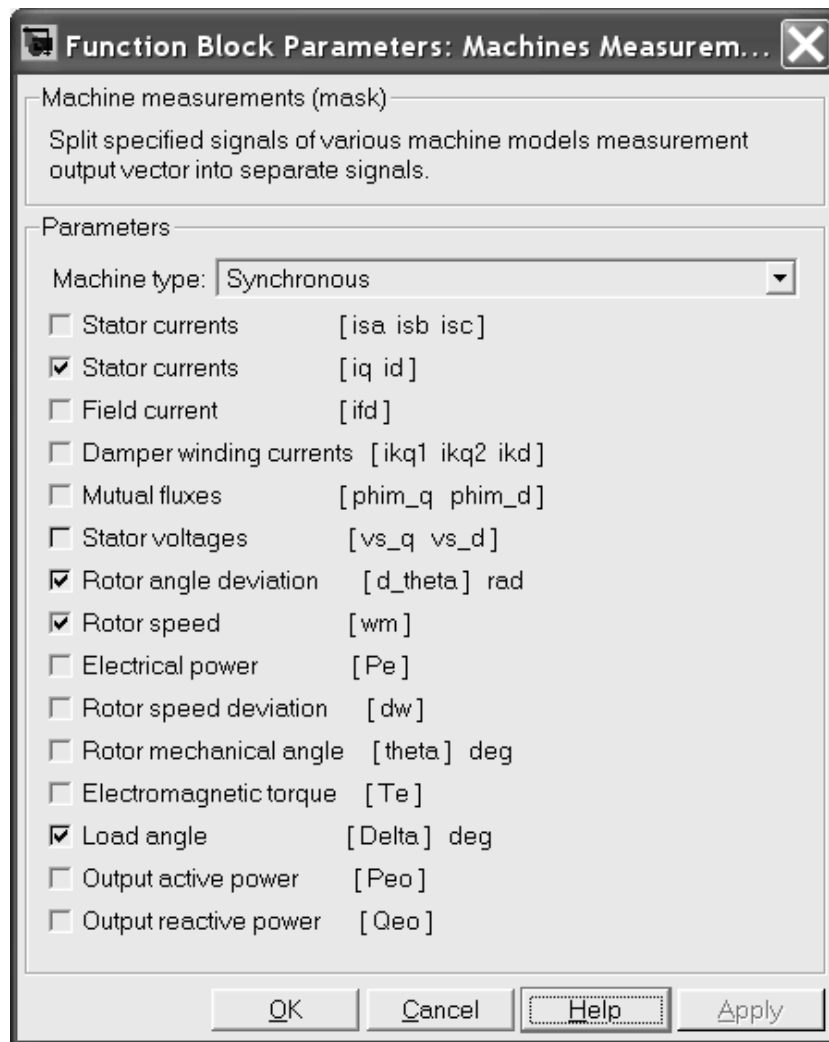


Рисунок 2.78 – Окно настроек измерительного блока *Machines Measurement Demux* (вариант для синхронной машины)

Многочисленные примеры применения данного блока рассмотрены нами в работе [15], поэтому здесь таких примеров мы не приводим.

2.4 Измерительные и контрольные устройства библиотек *Measurements* и *Extra Library*

При моделировании электротехнических устройств одной из важнейших задач, является организация правильного измерения моделируемых величин. Для решения этой задачи в пакете SimPowerSystems 3.1 предусмотрена специальная библиотека Measurements (инструменты). Кроме того, в аналогичном разделе библиотеки Extra Library собраны ряд дополнительных блоков расширяющие возможности исследователя. В первой части данной работы [15] некоторые из блоков были рассмотрены, ниже мы остановимся

на других полезных элементах этих библиотек, хотя рассмотреть все блоки, из-за ограниченности объема настоящего издания, мы не сможем.

2.4.1 Блоки библиотеки Measurements

Основной состав библиотеки представлен на рисунке 2.79.

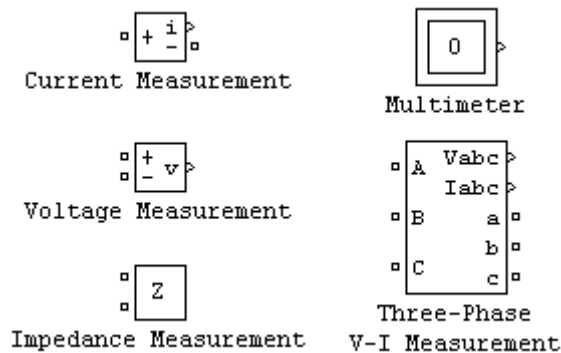


Рисунок 2.79 – Основные блоки библиотеки Measurements

Current Measurement – идеальный амперметр. Выполняет измерение мгновенного значения тока, протекающего через соединительную линию (провод). Выходным сигналом блока является обычный сигнал Simulink, который может использоваться любым Simulink-блоком.

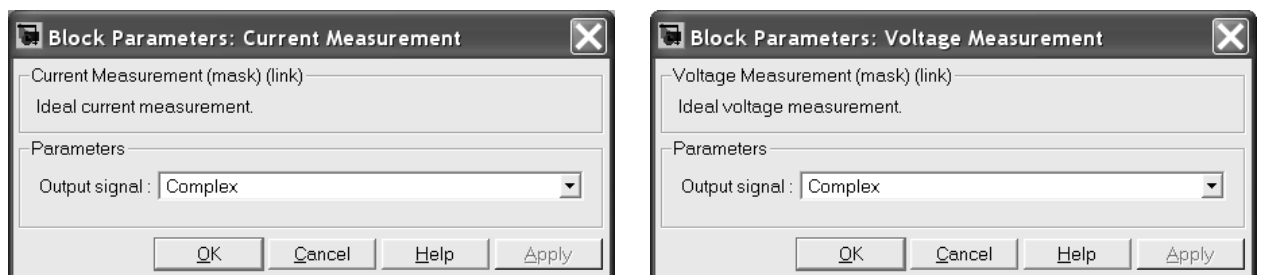
Voltage Measurement – идеальный вольтметр. Выполняет измерение мгновенного значения напряжения между двумя узлами схемы. Выходным сигналом блока является обычный сигнал Simulink, который может использоваться любым Simulink-блоком.

Impedance Measurement - измеритель полного сопротивления. Выполняет измерение зависимости полного сопротивления (импеданса) участка электрической цепи от частоты.

Multimeter – мультиметр. Выполняет измерение токов и напряжений блоков библиотеки SimPowerSystem для которых в их окне диалога установлен параметр **Measurements** (измеряемые переменные).

Three-Phase V-I Measurement – трехфазный измеритель. Выполняет измерение токов и напряжений в трехфазных цепях.

Окна блоков **Current Measurement** и **Voltage Measurement** показаны на рисунке 2.80.



а

б

Рисунок 2.80 – Окна настроек параметров блоков **Current Measurement** (а) и **Voltage Measurement** (б)

Блоки имеют один параметр настройки:

Output signal [Выходной сигнал] - Вид выходного сигнала блока.

Выбор значения параметра возможен только, если с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- **Complex** - комплексный сигнал;
- **Magnitude** - амплитуда (скалярный сигнал);
- **Real-Imag** - вектор, состоящий из двух элементов - действительная и мнимая составляющие сигнала;
- **Magnitude-Angle** - вектор, состоящий из двух элементов - амплитуда и аргумент сигнала.

Варианты использования данных блоков можно видеть в приведенных выше примерах.

Окно задания параметров блока **Multimeter** приведено на рисунке 2.81.

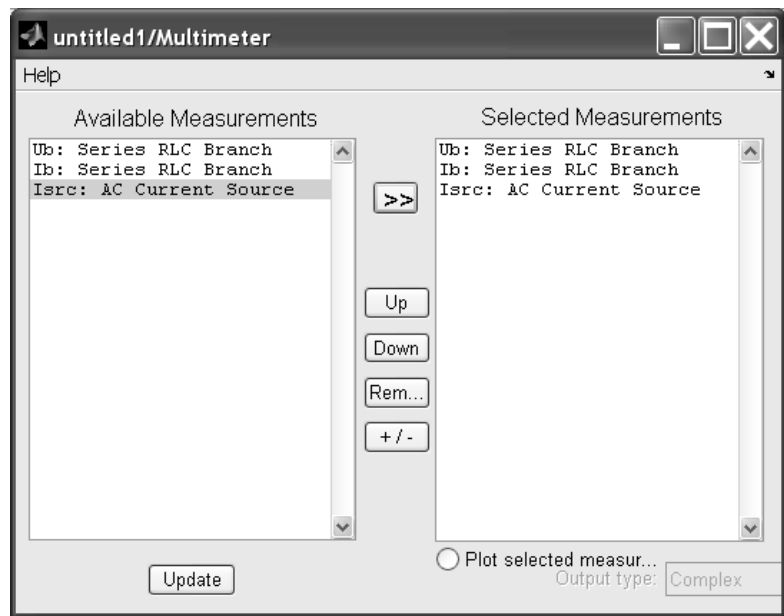


Рисунок 2.81 – Окно настроек блока **Multimeter**

Параметры блока:

Available Measurements [Переменные, доступные для измерения] - В данной графе отображаются переменные (токи и напряжения) блоков схемы для которых в их окне диалога установлен параметр **Measurements** (измеряемые переменные). Обновление списка переменных можно выполнить с помощью клавиши **Update**;

Selected Measurements [Измеряемые переменные] - В данной графе указываются переменные, которые будут передаваться на выход блока **Multimeter**. Для управления списком измеряемых переменных можно использовать следующие клавиши:

- **>>** - Добавить выделенную переменную в список измеряемых,
- **Up** - Передвинуть вверх выделенную переменную в список измеряемых,
- **Down** - Передвинуть вниз выделенную переменную в список измеряемых,
- **Remove** - Удалить выделенную переменную из списка измеряемых,

- + / - - Изменить знак выделенной переменной;

Output signal [Выходной сигнал] - Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только, если с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- **Magnitude** - Амплитуда (скалярный сигнал),
- **Complex** - Комплексный сигнал,
- **Real-Imag** - Вектор, состоящий из двух элементов - действительная и мнимая составляющие сигнала,
- **Magnitude-Angle** - Вектор, состоящий из двух элементов - амплитуда и аргумент сигнала.

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей - **Current Measurement** и **Voltage Measurement**. Выходным сигналом блока является вектор сигналов измеряемых переменных.

Пример:

На рисунке 2.82 показана схема однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. С помощью блока **Multimeter** измеряются напряжение и ток одного из вентилей (sw1), напряжение на нагрузке и ток нагрузки (U_d и I_d).

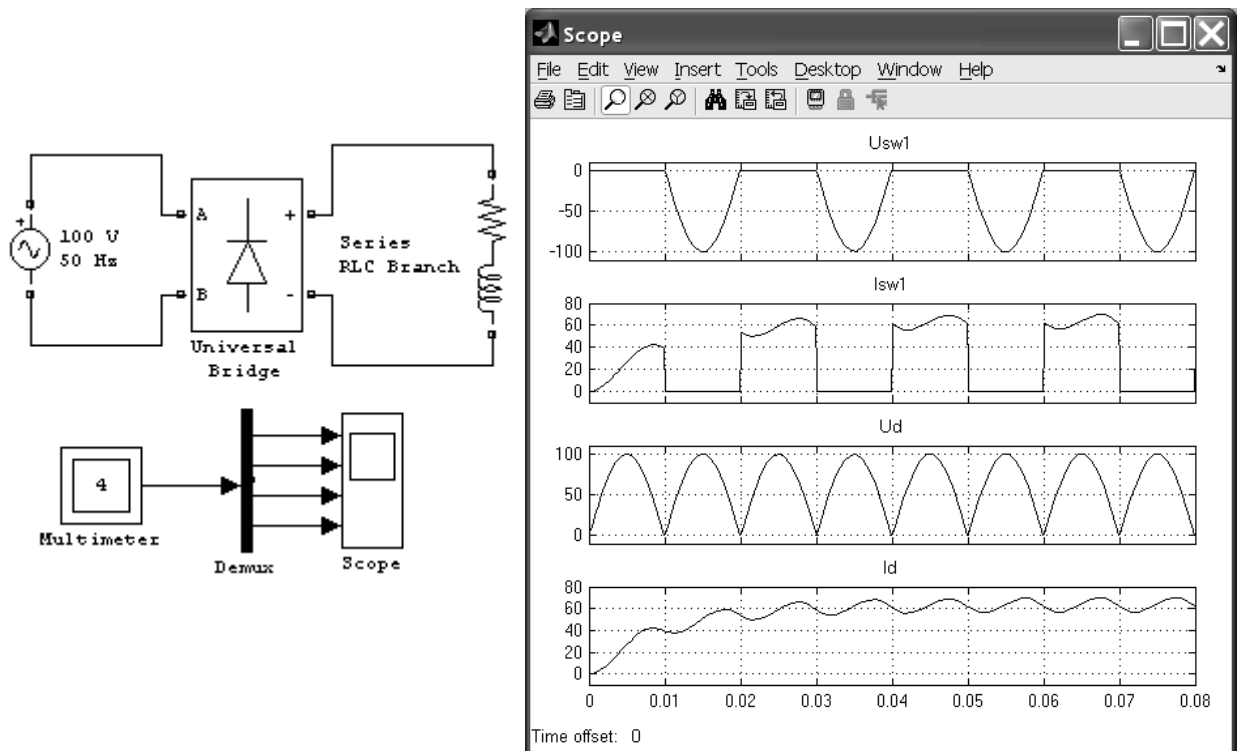


Рисунок 2.82 – Применение блока **Multimeter**

Блок **Three-Phase V-I Measurement** незаменим при моделировании трехфазных цепей.

Окно блока **Three-Phase V-I Measurement** дано на рисунке 2.83.

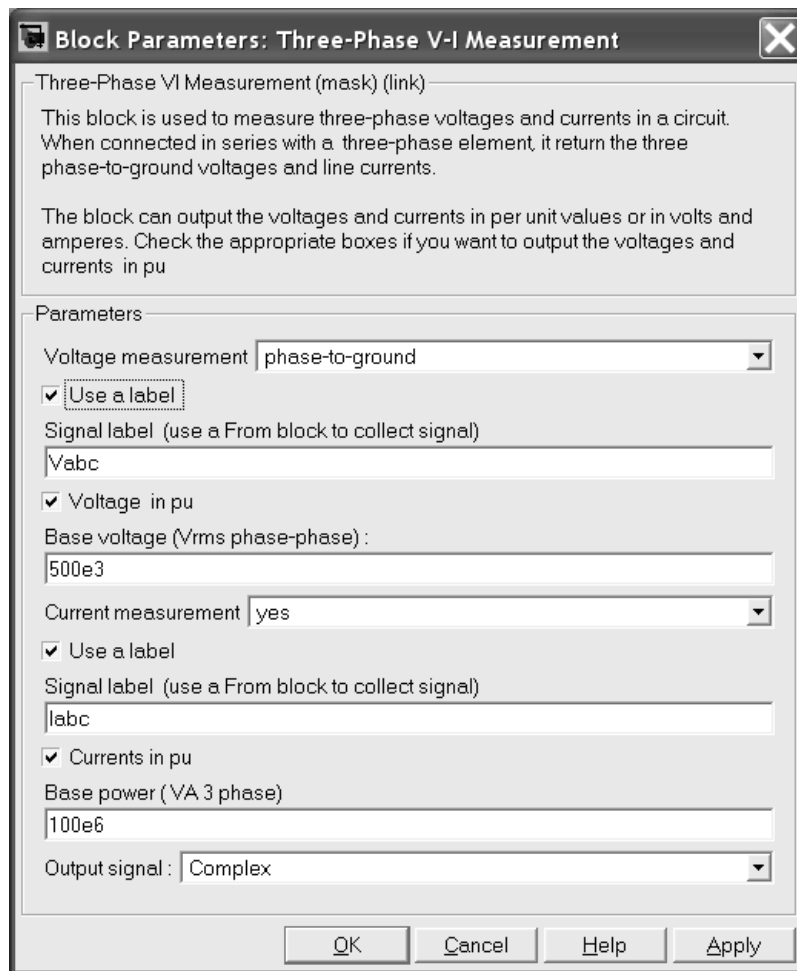


Рисунок 2.83 – Окно настроек блока **Three-Phase V-I Measurement**

Параметры блока:

Voltage Measurement [Измерение напряжений] - В данной графе производится выбор измеряемого напряжения;

- **no** - Напряжения не измеряются,
- **phase-to-ground** - Измерение фазного напряжения,
- **phase-to-phase** - Измерение линейного напряжения;

Use a label [Использовать метку] - При установке флажка сигнал будет передаваться к блоку **From**. Параметр **Goto tag** блока **From** должен соответствовать имени метки, заданной в графе **Signal label**.

*Примечание: Блоки **Goto** и **From** используют для того, чтобы сократить количество соединительных линий на схеме. Сигнал передается между блоками с соответствующими метками, при этом на схеме линии между блоками отсутствуют.*

Signal label [Метка сигнала];

Voltages in p.u. [Измерение напряжений в относительных единицах] - При установке флажка измеренные напряжения будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$U^* = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{U_o \cdot \sqrt{2}}, \quad (2.27)$$

где U_{ϕ} - базисное напряжение, задаваемое в графе **Base voltage**;

Base voltage (Vrms phase-phase) [Базисное напряжение (действующее значение линейного напряжения)];

Current measurement [Измерение токов] - В данной графе производится выбор измерения токов:

- **no** - Токи не измеряются,
- **yes** - Токи измеряются;

Use a label [Использовать метку] - При установке флажка сигнал будет передаваться к блоку **From**. Параметр **Goto tag** блока From должен соответствовать имени метки, заданной в графе **Signal label**;

Signal label [Метка сигнала];

Currents in p.u. [Измерение токов в относительных единицах] - При установке флажка измеренные токи будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$I^* = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot U_{\phi}}{P_{\phi} \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.28)$$

где P_{ϕ} - базисная мощность, задаваемая в графе **Base power**.

Base power (VA 3 phase) [Базисная мощность];

Output signal [Выходной сигнал] - Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только, если с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

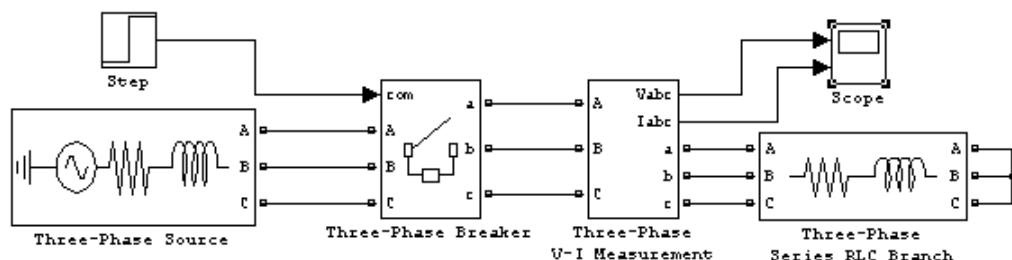
- **Magnitude** - Амплитуда (скалярный сигнал),
- **Complex** - Комплексный сигнал,
- **Real-Imag** - Вектор, состоящий из двух элементов - действительная и мнимая составляющие сигнала,
- **Magnitude-Angle** - Вектор, состоящий из двух элементов - амплитуда и аргумент сигнала.

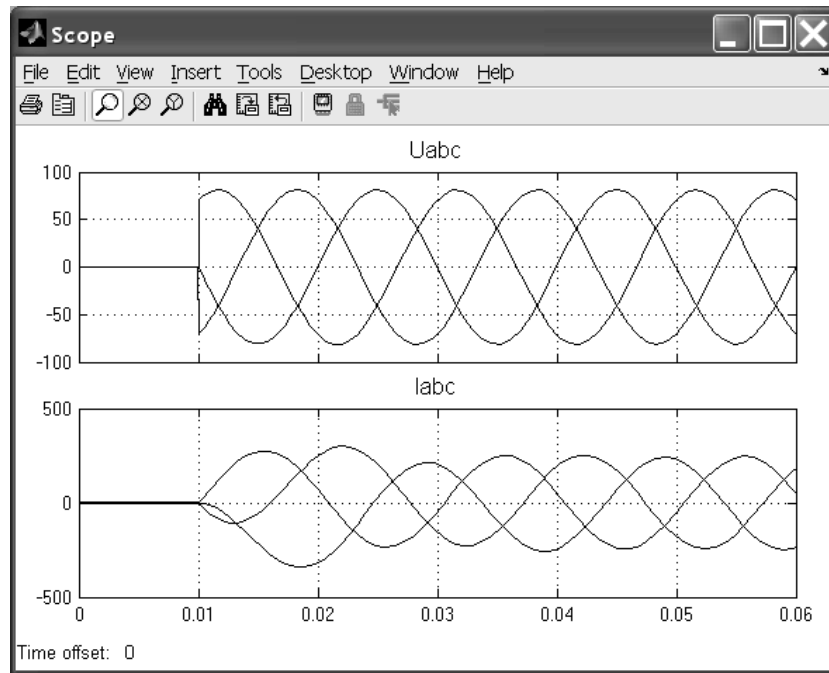
Выходными сигналами блока являются векторы сигналов измеряемых переменных.

Пример:

На рисунке 2.84 показана схема включения трехфазного источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку.

С помощью блока **Three - Phase V - I Measurement** измеряются фазные токи и напряжения нагрузки.





б

Рисунок 2.84 – Схема использования блока **Three - Phase V - I Measurement** (а) и осциллограммы линейных напряжения и ток нагрузки (б)

В библиотеке **Measurements** имеется блок **Impedance Measurement**, который весьма полезен для анализа цепей переменного тока.

Окно задания параметров блока изображено на рисунке 2.85.

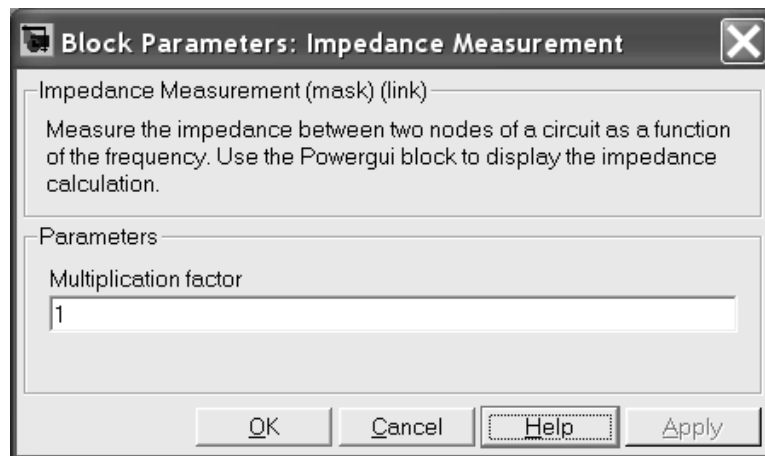


Рисунок 2.85 – Окно настроек блока **Impedance Measurement**

Блок имеет один настраиваемый параметр:

Multiplication factor [Масштабный коэффициент] - Значение параметра отличающееся от 1 может использоваться для соответствующего увеличения или уменьшения измеряемого значения. Например, при измерении полного сопротивления между двумя фазами значение параметра можно установить равным 0.5. В результате будет получено значение полного сопротивления только для одной фазы.

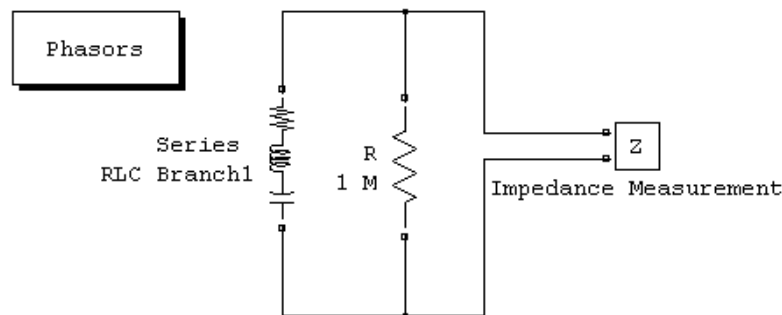
Для отображения зависимости импеданса от частоты необходимо установить в схему блок **Powergui**, в режиме **Phasors**. Открыв окно диалога блока, следует нажать кнопку **Impedance vs Frequency Measurements** и, в новом

открывшемся окне нажать кнопку **Display**. В итоге, в окне будут отображены зависимости модуля и аргумента полного сопротивления от частоты.

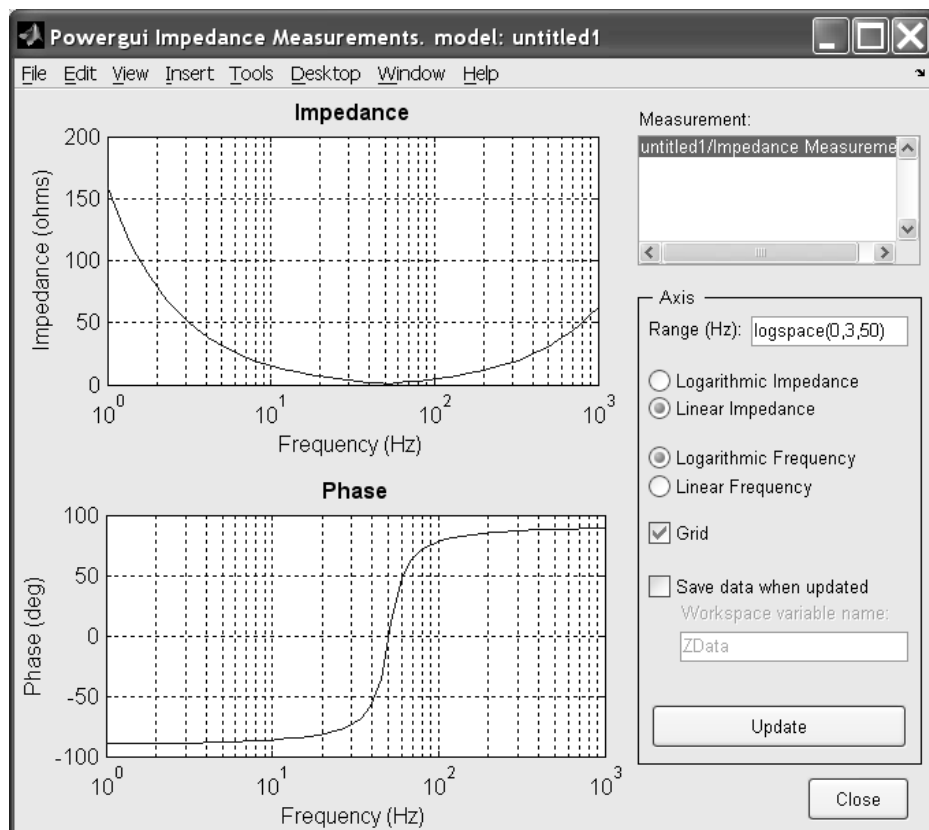
При использовании измерителя полного сопротивления следует иметь в виду, что этот блок выполнен на основе источника тока и не может быть включен последовательно с индуктивными элементами. Для устранения этого ограничения следует шунтировать блок резистором с достаточно большим сопротивлением. Величину сопротивления следует выбирать такой, чтобы свойства схемы значительно не изменялись.

Пример:

На рисунке 2.86 показана схема подключения блока **Impedance vs Frequency Measurements** к последовательному колебательному контуру для измерения его полного сопротивления.



a



б

Рисунок 2.86 – Применение блока **Impedance Measurement**, схема включения (а), графики в окне (б)

Параметры контура:

$R=1 \text{ Ом}$, $L=0,01 \text{ Гн}$, $C=0,001 \text{ Ф}$.

Параллельно контуру включено сопротивление величиной 1 МОм , по причине, указанной выше.

Там же показано окно блока **Powergui** с графиками.

Еще раз отметим, что часто в предыдущих примерах мы используем возможности блока **Powergui**, без каких либо комментариев. Далее работе с данным блоком мы посвятим отдельный раздел.

2.4.2 Блоки Measurements библиотеки Extra Library

Основной состав библиотеки представлен на рисунке 2.87.

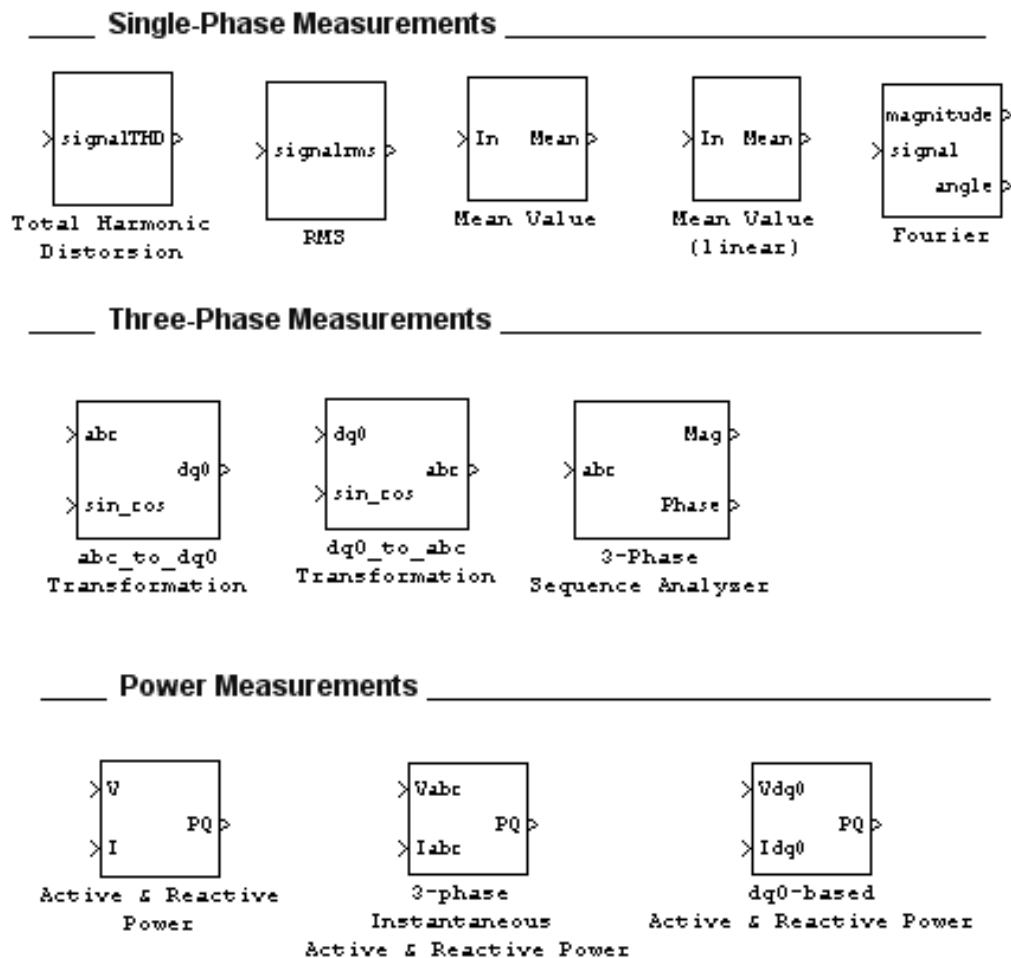


Рисунок 2.87 – Основные блоки **Measurements** библиотеки **Extra Library**

Все блоки данного отдела разделены на три группы:

Single-Phase Measurements – блоки для измерений в однофазных цепях переменного тока;

Three-Phase Measurements – дополнительные блоки для измерений в трехфазных цепях переменного тока;

Power Measurements – блоки для измерения мощности.

Кратко рассмотрим их основные функции.

Подраздел Single-Phase Measurements.

Total Harmonic Distortion – блок вычисления отношения действующего значения высших гармоник к действующему значению первой гармоники несинусоидальной цепи. На выходе блока формируется величина равная:

$$TND = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}. \quad (2.29)$$

где I_1 - действующее значение первой гармоники тока;

I_2, \dots, I_n - действующие значения второй и высших гармоник, до n -й включительно.

В окно настроек блока вводят только значение основной частоты (первой гармоники), в соответствии с рисунком 2.88.

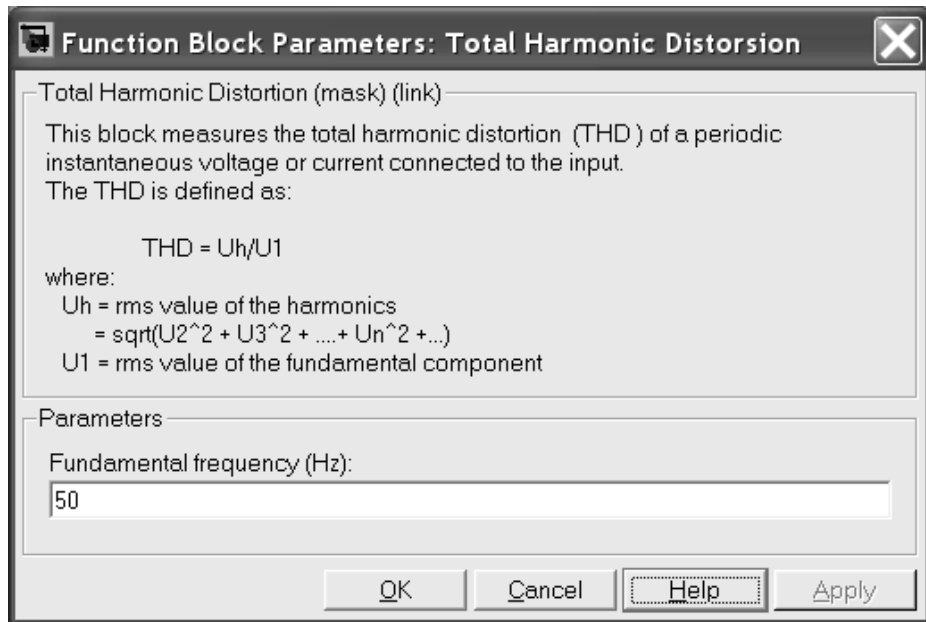


Рисунок 2.88 – Окно настроек блока **Total Harmonic Distortion**

Блок **RMS** – вычисляет действующее значение тока или напряжения, которое поступает на его вход. Сигнал на вход блока должен подаваться через блок **Current Measurement** или **Voltage Measurement**, соответственно.

Вычисления проводятся по формуле:

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t)^2 dt}, \quad (2.30)$$

где $f(t)$ - входной сигнал тока или напряжения;

T - период основной гармоники сигнала.

В окне настроек (рисунок 2.89), как и для предыдущего блока вводится только значение основной частоты (первой гармоники) сигнала.

Почти аналогичное назначение имеет блок **Mean Value (linear)**, который вычисляет действующее значение входной величины за время одного периода входного сигнала. Здесь он не рассматривается.

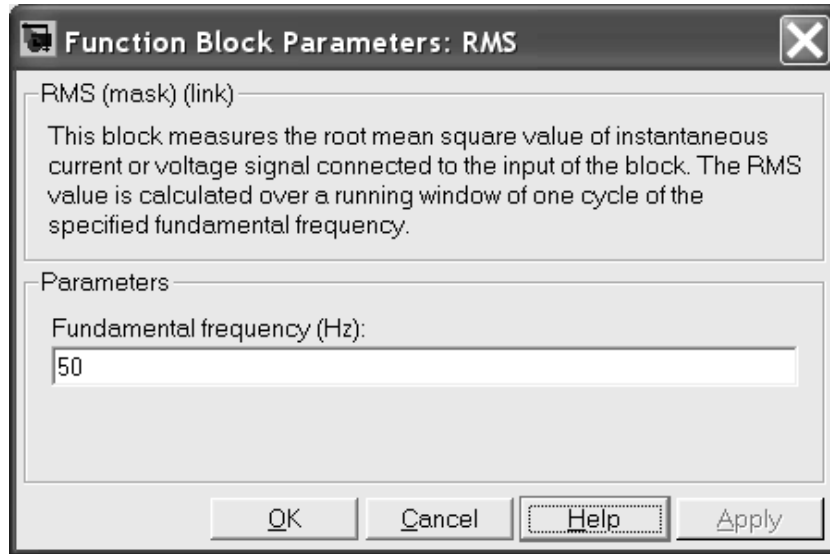


Рисунок 2.89 – Окно настроек блока **RMS**

Блок **Fourier** – производит Фурье-анализ входного сигнала в течении времени моделирования на наличие в его спектре гармоники с заданным номером. На выходе блока **magnitude** формируется значение амплитуды искомой гармоники, а на выходе **phase** - фаза.

При этом считается, что входной сигнал является рядом Фурье вида:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad (2.31)$$

где n - номер гармоники.

Тогда амплитуда (**magnitude**) заданной гармоники H_n определяется так:

$$|H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (2.32)$$

А, фаза (**phase**) будет:

$$\phi = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right), \quad (2.33)$$

при этом

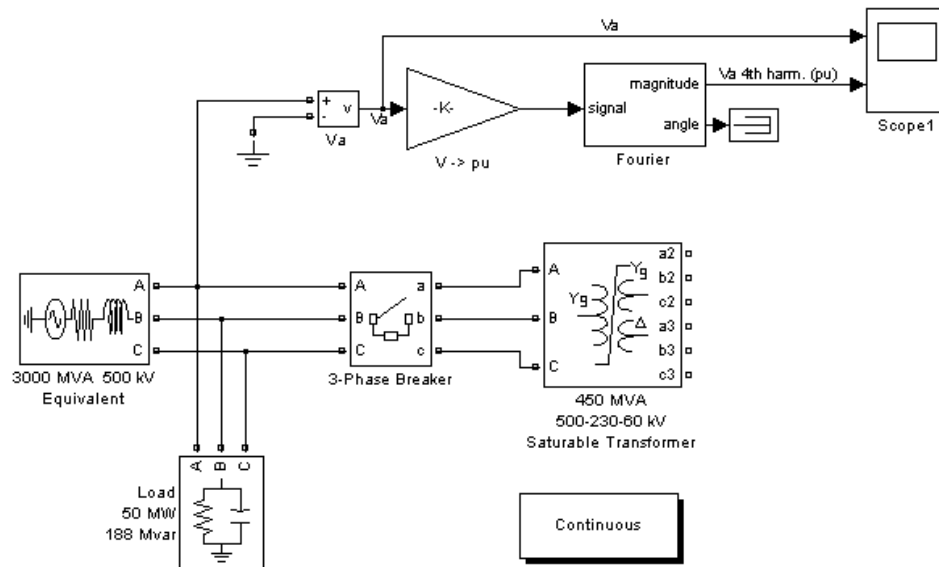
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \sin(n\omega t) dt, \quad (2.34)$$

где T - период первой гармоники сигнала.

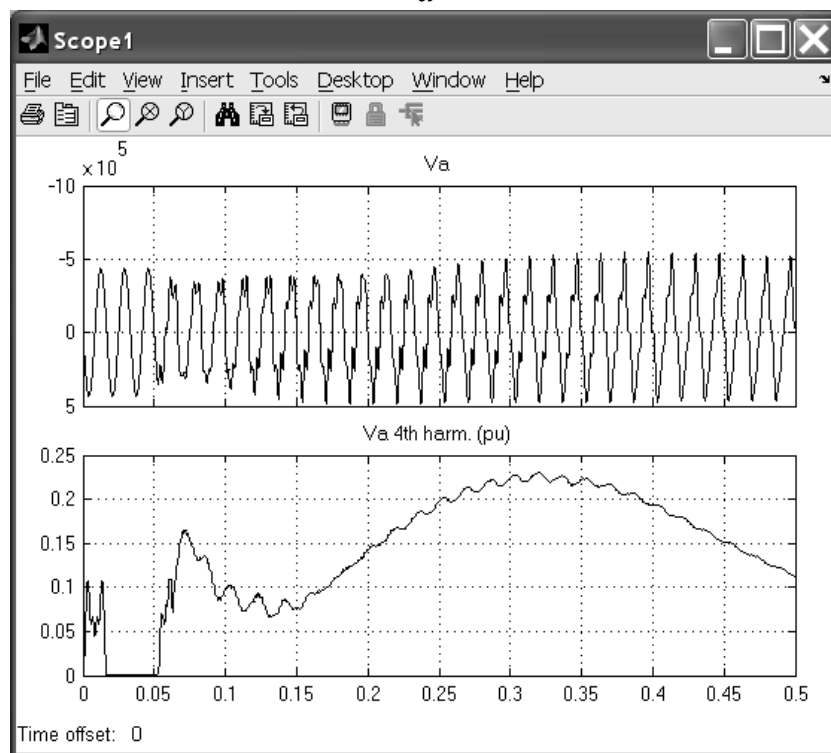
В окне настроек блока (рисунок 2.90) вводится частота основной гармоники входного сигнала и номер искомой гармоники. При этом считают, что 0 – номер нулевой гармоники, 1 – номер основной гармоники, 2 – номер второй гармоники и т.д.

Пример:

На рисунке 2.90 показана схема, где к трехфазному трансформатору мощностью 3000 МВА (3000 кВА) работающему на трехфазную нагрузку мощностью 50 МВт и 188 МВАр (195 кВА) внезапно подключается нелинейный трансформатор на 450 МВА без нагрузки.



a



б

Рисунок 2.90 – Схема (а) и осциллограммы процессов (б) в цепи

Возникающие при этом искажения напряжения наглядно видны на первой осциллограмме. На второй осциллограмме показана амплитуда 4-й гармоники выходного напряжения первого трансформатора измеренная в относительных единицах.

Ведение блока **Powergui**, который виден на схеме и обозначен как **Continuous**, позволяет расширить возможности анализа схемы. Например если в его окне нажать кнопку **FFT Analysis** (Фурье-анализ), откроется окно (рисунок 2.91).

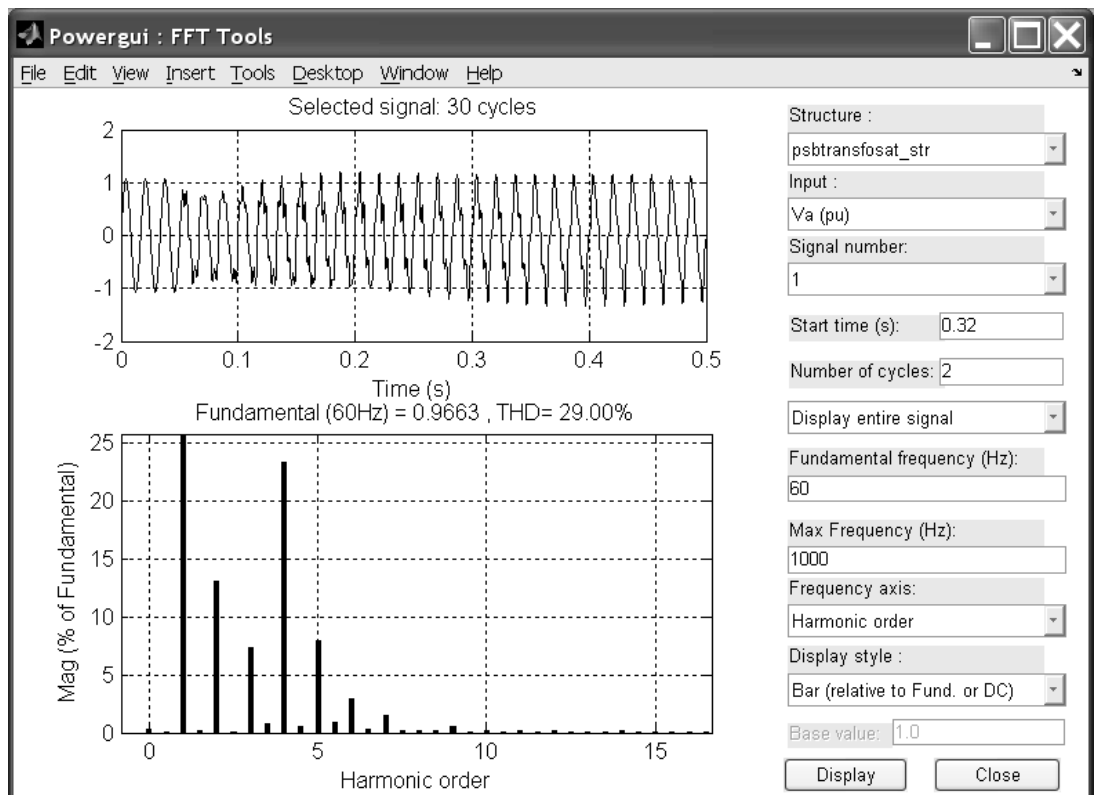


Рисунок 2.91 – Окно Фурье-анализатора блока **Powergui**

В нем показана исходная кривая анализируемого сигнала (напряжения) и приведена его спектрограмма. По горизонтальной оси на ней отложен номер гармоники, а по вертикальной – амплитуда в процентах относительно первой гармоники. Здесь наглядно представлен весь спектр сигнала.

Подраздел **Three-Phase Measurements.**

В данном подразделе собраны три блока, которые применяются для специального анализа трехфазных цепей. Два из них представляют преобразователи координат для анализа, в основном, трехфазных машин. Это блоки: **dq0_to_abc Transformation** и **abc_to_dq0 Transformation**. Третий блок - **3-Phase Sequence Analyser** (3-х фазный анализатор). Он предназначен для углубленного анализа трехфазных токов и напряжений и здесь не рассматривается.

Подраздел **Power Measurements.**

Включает три блока, из которых мы рассмотрим два, это блок для вычисления активной и реактивной мощности в однофазной цепи **Active & Reactive Power** и блок для аналогичных вычислений в трехфазных цепях **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power**.

Блок **Active & Reactive Power** предназначен для вычисления текущего значения активной и реактивной мощности в однофазных цепях по величине тока и напряжения подаваемых на его вход. Входы блока подключаются к цепи через блоки **Current Measurement** и **Voltage Measurement**. В составе тока или напряжения на входе блока могут находиться и гармоники, поэтому в окне настроек блока (рисунок 2.92) указывают частоту первой гармоники.

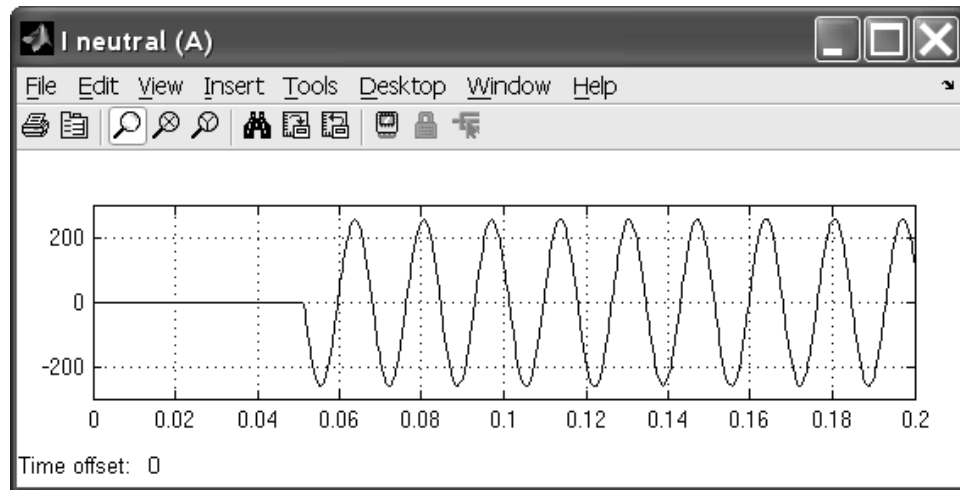


Рисунок 2.94 – Ток в нейтральном проводе схемы

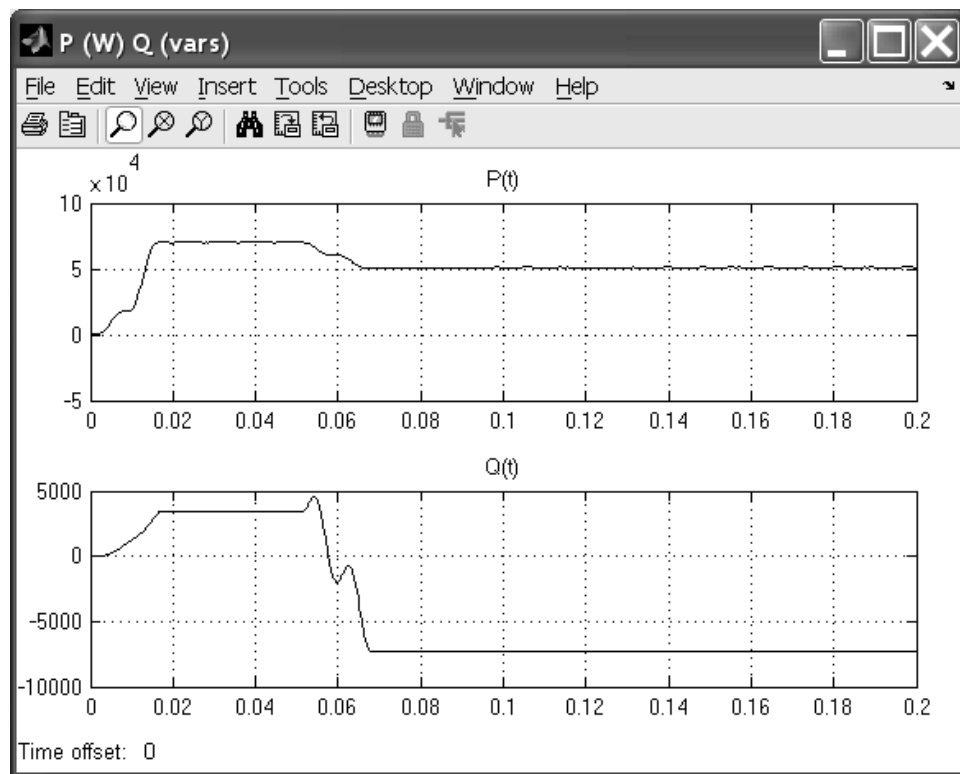


Рисунок 2.95 – Активная $P(t)$ и реактивная $Q(t)$ мощности в цепи

Блок **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power** позволяет вычислять текущие значения активной и реактивной мощности в трехфазных цепях по величине токов и напряжений подаваемых на его вход. Входы блока подключаются к цепи через блок **Tree-Phase V-I Measurement**. При этом на входы блока **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power** подаются вектора линейных напряжений и токов. На выходе блока формируется вектор первая составляющая которого – активная мощность, потребляемая нагрузкой, а вторая – реактивная. Окно настроек блока не имеет параметров.

Вычисленная реактивная мощность верна только для случая симметричной нагрузки и отсутствия гармоник в кривых тока и напряжения.

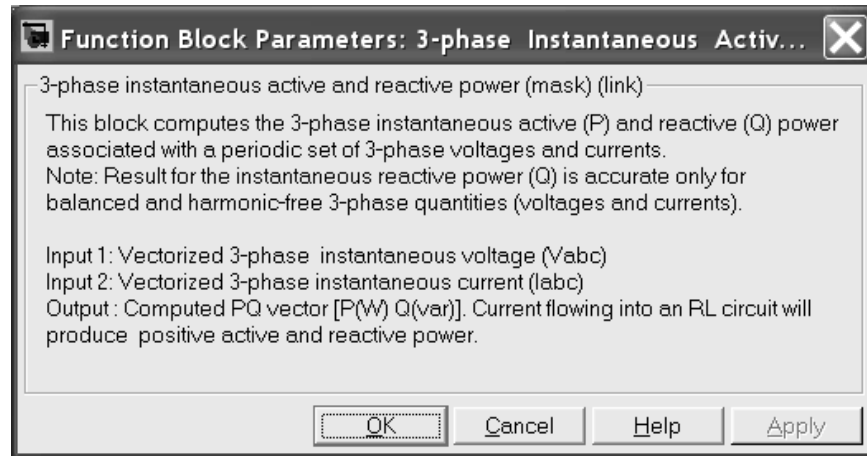


Рисунок 2.96 – Окно настроек блока **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power**

Если данные условия не выполняются, то в модели следует использовать блоки **Active & Reactive Power** отдельно для каждой фазы и нулевого провода, а затем суммировать полученные величины.

Пример включения данного блока дан на рисунке 2.97.

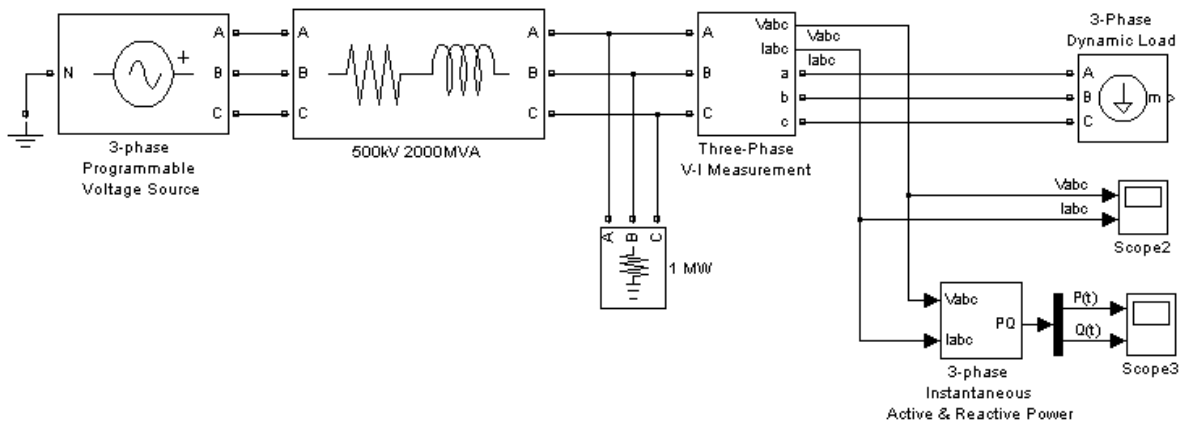


Рисунок 2.97 – Пример включения блока **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power** в схему

В данном примере, трехфазный программируемый источник вырабатывает систему трехфазных напряжений с частотой 60 Гц. Действующее значение линейного напряжения источника 500 кВ.

С частотой 1 Гц амплитуда линейных напряжений источника меняется по синусоидальному закону на величину 0,5 от номинального значения.

Через последовательно включенную RL цепь источник работает на соединенную в звезду с заземленной нейтралью нагрузку мощностью 1 МВт (1000 кВт) и динамическую нагрузку (начальные значения мощностей $P_0=50\,000$ кВт и $Q_0=25\,000$ кВА). Последняя, изменяет свою величину пропорционально входному напряжению.

Результат приведен на рисунке 2.98. Вверху дана осциллограмма активной мощности потребляемой динамической нагрузкой, внизу – осциллограмма реактивной мощности.

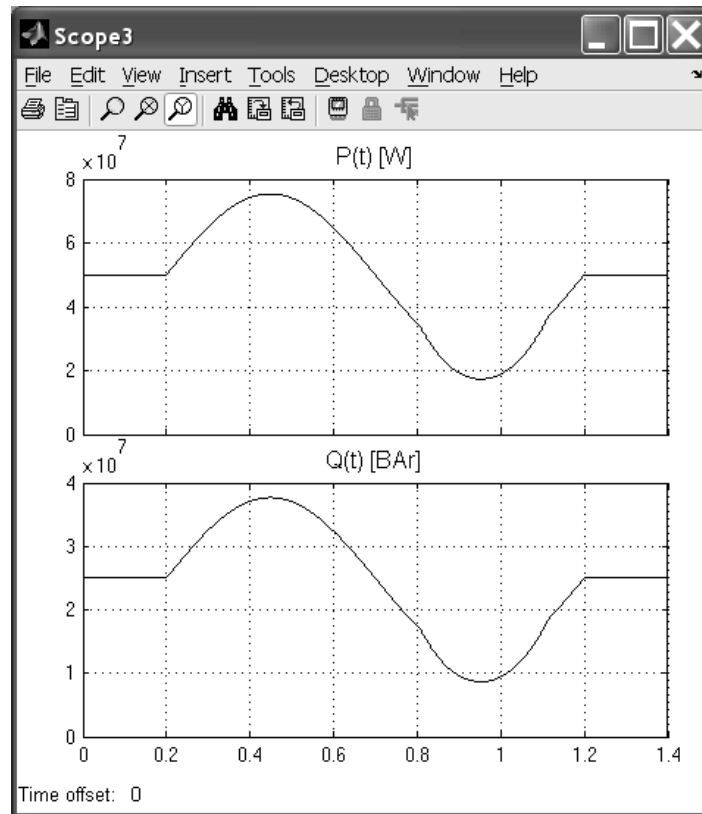


Рисунок 2.98 – Кривые активной и реактивной мощности

Остальные блоки пакета SimPowerSystems 3.1 в данной работе мы не рассматриваем, поскольку их применение специфично и достаточно редко, кроме библиотеки **Power Electronics**. Данная библиотека предназначена для моделирования схем содержащих устройства преобразовательной техники: выпрямители, инверторы, широтно-импульсные преобразователи и т.д.

Входящие в библиотеку элементы **Power Electronics** настолько важны и интересны, что им следует посвятить отдельную книгу.

3 Создание собственных блоков для пакета SimPowerSystems 3.1

3.1 Принцип создания электротехнических блоков пользователя

Библиотека блоков SimPowerSystems достаточно обширна, однако, иногда требуемая пользователю модель устройства может в ней отсутствовать. Это касается, например, нелинейных резисторов, насыщающихся реакторов, новых типов электродвигателей и т.п. В этом случае пользователь может сам создать нужную модель на основе блоков Simulink и блоков SPS. Общая структура модели показана на рисунке 3.1.

На схеме к управляемому источнику тока параллельно подключен измеритель напряжения. Между выходом измерителя напряжения и входом источника тока включена Simulink-модель, реализующая нужную вольт-амперную характеристику устройства. Параллельно источнику также подключен развязывающий резистор R . Его наличие обусловлено, тем, что

большое число блоков SPS выполнено на базе источников тока. При последовательном соединении таких блоков источники тока оказываются включенными последовательно, что недопустимо.

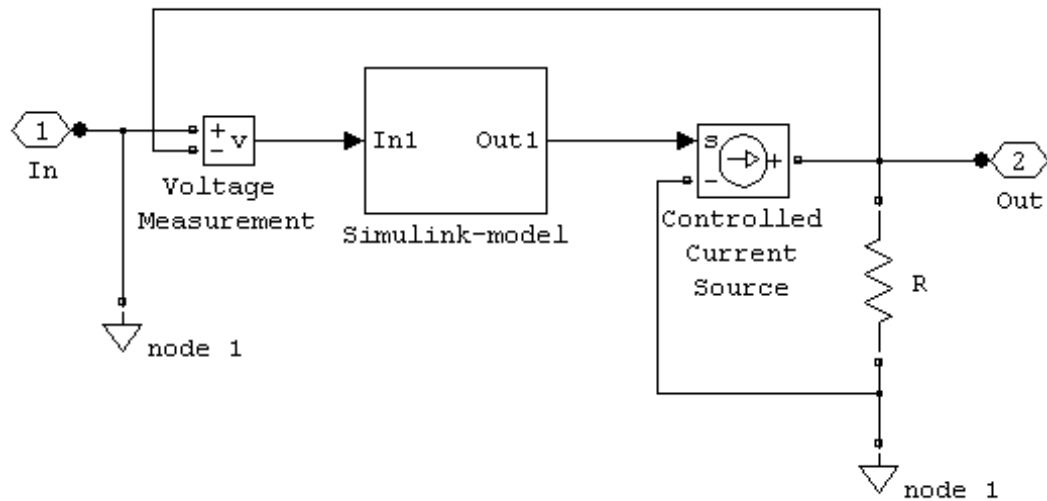


Рисунок 3.1 – Общая структура блока SimPowerSystems

Наличие же развязывающего резистора позволяет включать такие блоки последовательно. Величина сопротивления резистора должна выбираться достаточно большой, чтобы его влияние на характеристики создаваемого блока было минимально (обычно его величина для силовых электротехнических блоков выбирается в пределах 500 - 1000 Ом).

Зажимами блока являются входной и выходной порты.

Таким образом, для создания электротехнического блока пользователь, прежде всего, должен создать обычную Simulink-модель, входом которой является сигнал пропорциональный напряжению на зажимах устройства, а выходом сигнал пропорциональный току устройства, а затем использовать эту модель в схеме представленной на рисунке 3.1.

При создании многофазных устройств, как правило, требуется создать модели отдельных фаз, а затем уже включить их по нужной схеме.

3.2 Модель нелинейного резистора

Рассмотрим пример создания нового блока, например, блок нелинейного резистора.

Для создания такого блока должна быть задана его вольт-амперная характеристика. Пусть она задана выражением:

$$i = I_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^\alpha, \quad (3.1)$$

где i и U - мгновенные значения тока и напряжения;

U_0 - пороговое значение напряжения;

I_0 - величина тока устройства при значении напряжения равном пороговому;

α - показатель степени, определяющий нелинейность вольт-амперной характеристики резистора (обычно лежит в пределах от 0 до 50).

Схема блока нелинейного резистора показана на рисунке 3.2. Модель Simulink резистора реализована с помощью блока **Fcn**. Численные значения параметров приняты следующими:

$$U_0 = 110 \text{ кВ}; I_0 = 500 \text{ А}; \alpha = 25.$$

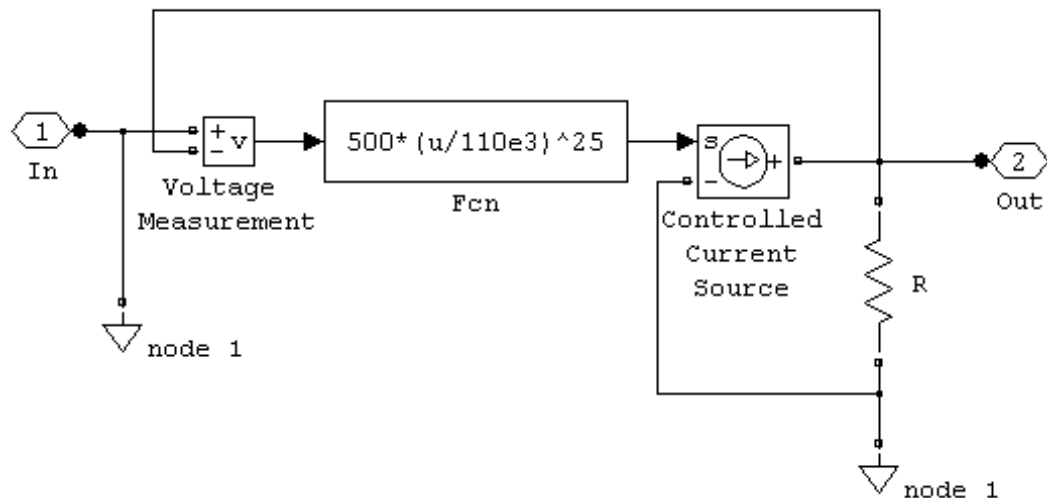


Рисунок 3.2 – Модель блока нелинейного резистора

Схема включения блока модели нелинейного резистора в цепь переменного тока и диаграммы ее работы показаны на рисунке 3.3.

Разрабатывая данные схемы, следует учитывать, что они являются комбинированными. В них объединяются общие блоки пакета Simulink и блоки библиотеки SimPowerSystems. Это вынуждает внимательно следить, чтобы соединение между ними было правильно выполнено.

Следует помнить, что любые сигналы от общих блоков Simulink могут подаваться в структуры на основе блоков библиотеки SimPowerSystems только через блоки управляемых источников тока или напряжения. Соответственно, любые сигналы из схемы на основе блоков SimPowerSystems могут подаваться на вход общих блоков Simulink только через измерительные блоки библиотеки **Measurements**.

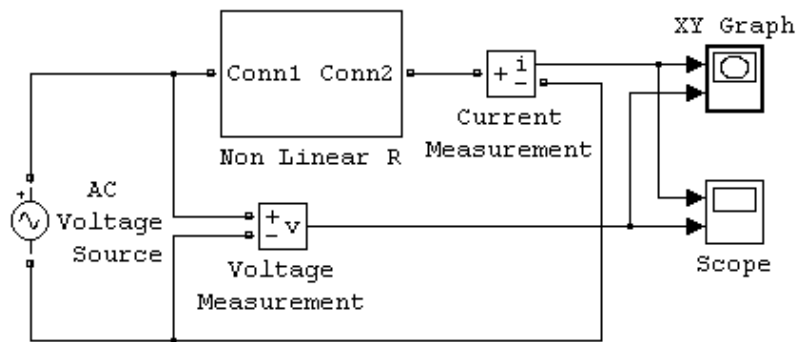
Кроме того, нужно правильно выбирать порты для передачи сигналов между общими блоками Simulink и блоками SimPowerSystems.

В схемотехнике основанной на общих блоках Simulink применяют блоки **In** (вход) и **Out** (выход) из библиотек **Sources** и **Sinks**, соответственно. Они являются однонаправленными устройствами.

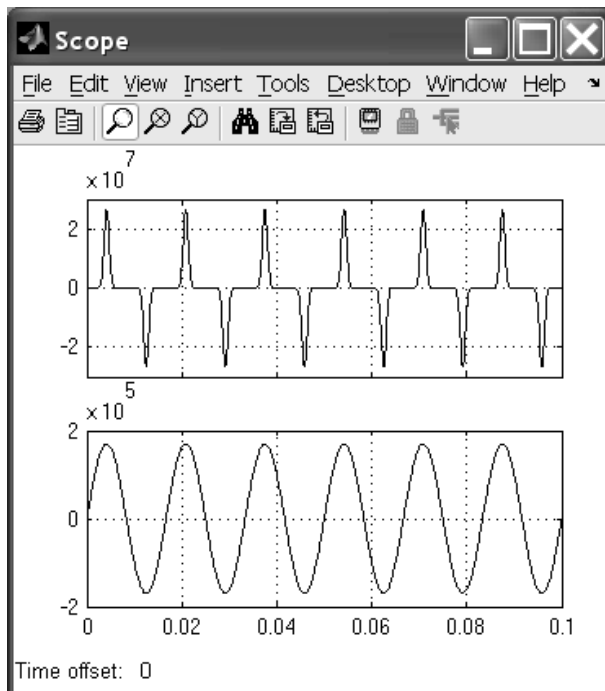
В пакете SimPowerSystems, моделируются электрические соединения, которые по своей сути двунаправленные, поскольку ток может, как втекать во вход элемента, так и вытекать из него. Поэтому, для соединения между собой, как существующих элементов пакета SimPowerSystems, так и вновь разрабатываемых должны применяться специальные порты из библиотеки **Elements**, которые называются **Connection Port** (соединительные порты).

Ввиду того, что это двунаправленные элементы, в библиотеке **Elements** представлен только один тип такого соединителя. Единственным требовани-

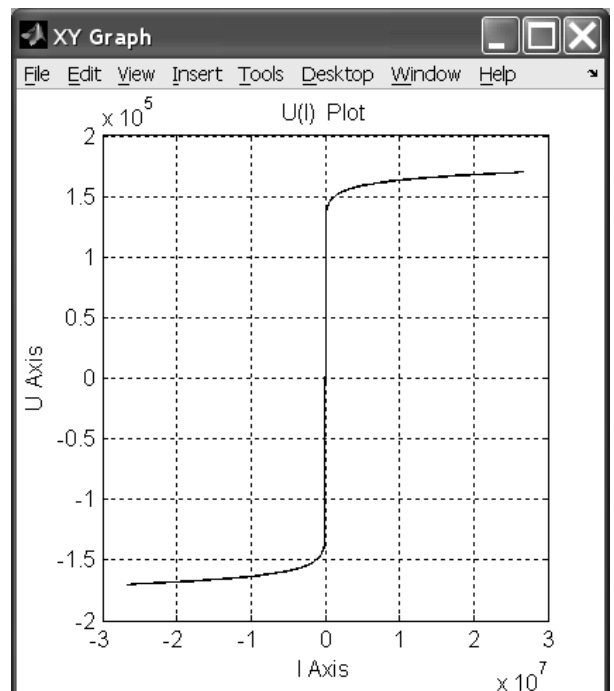
ем к его использованию в схеме, является неповторяющееся имя (или номер) блока.



a



б



в

Рисунок 3.3 – Схема (а) включающая модель нелинейного резистора, осциллограммы (б) тока (вверху) и напряжения (внизу), вольт-амперная характеристика нелинейного резистора (в)

На схеме показаны датчики тока и напряжения, снимающие сигналы пропорциональные этим переменным. Графопостроитель **XY-Grraph** по этим сигналам строит вольт-амперную характеристику резистора. Временные диаграммы тока и напряжения также иллюстрируют нелинейность характеристики резистора.

Конечно, при разработке новых блоков важно хорошо знать не только возможности существующих блоков, но и особенности работы самой программы Simulink.

Так, например, некоторым недостатком разработанной выше модели нелинейного резистора является наличие безинерционного замкнутого контура образованного датчиком напряжения, блоком **Fcn** и управляемым источником тока (рисунок 3.1). Simulink выполняет расчет замкнутых безинер-

ционных контуров, используя итерационную процедуру, что несколько снижает скорость расчета.

Также при наличии замкнутых алгебраических контуров становится невозможным расчет модели в ускоренном режиме (**Acceleration mode**). Чтобы разорвать безинерционный контур достаточно включить в линию между датчиком напряжения и источником тока фильтр с малой постоянной времени, которая не будет влиять на работу схемы. Величина постоянной времени должна выбираться таким образом, чтобы изменение динамических свойств модели было минимальным (обычно величина постоянной времени фильтра выбирается в пределах от $10^{-8} - 10^{-6}$, т.е. она больше периода питающего резистор переменного напряжения в $10^4 - 10^5$ раз.). Схема модели нелинейного резистора с использованием фильтра показана на рисунке 3.4.

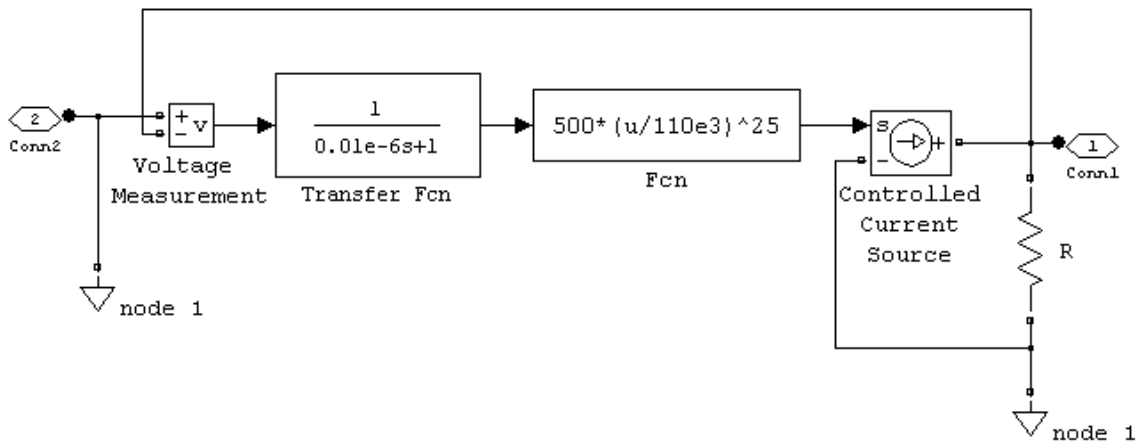


Рисунок 3.4 – Схема модели фильтра с малоинерционным фильтром в замкнутом контуре

Временные диаграммы работы такой модели ничем не отличаются от представленных ранее на рисунке 3.3.

3.2 Модель насыщающегося реактора

Рассмотрим еще один пример. Создадим блок, моделирующий насыщающийся реактор, т.е. блок нелинейной индуктивности. Такой элемент часто встречается в электрических цепях, например в феррорезонансных стабилизаторах тока и напряжения.

Методика создания модели нелинейной индуктивности ничем не отличается от аналогичной методики для нелинейного резистора.

Уравнения, описывающие насыщающийся реактор выглядят следующим образом:

$$U = R \cdot i + \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (3.2)$$

$$i = a \cdot \Psi + b \cdot \Psi^3,$$

где i , U , Ψ - мгновенные значения тока, напряжения и потокосцепления;

a , b - коэффициенты нелинейной зависимости между потокосцеплением и током.

Первое из уравнений есть дифференциальное уравнение для напряжения на реакторе, а второе - алгебраическая зависимость между потокосцеп-

лением и током реактора. Последнее уравнение может быть и другим, в зависимости от требований к точности аппроксимации нелинейности реактора.

Для создания Simulink-модели реактора требуется сначала перейти к операторной форме записи дифференциального уравнения для напряжения реактора:

$$U(p) = R \cdot i(p) + p \cdot \Psi(p), \quad (3.3)$$

а затем, получить передаточную функцию (ПФ), связывающую потокосцепление и напряжение:

$$\Psi(p) = [U(p) - R \cdot i(p)] \frac{1}{p}, \quad (3.4)$$

Полученные выражения для передаточной функции и нелинейной зависимости между током и потокосцеплением дают возможность создать Simulink-модель реактора. Схема Simulink-модели показана на рисунке 3.5.

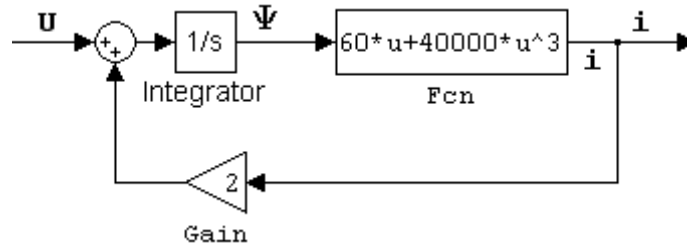
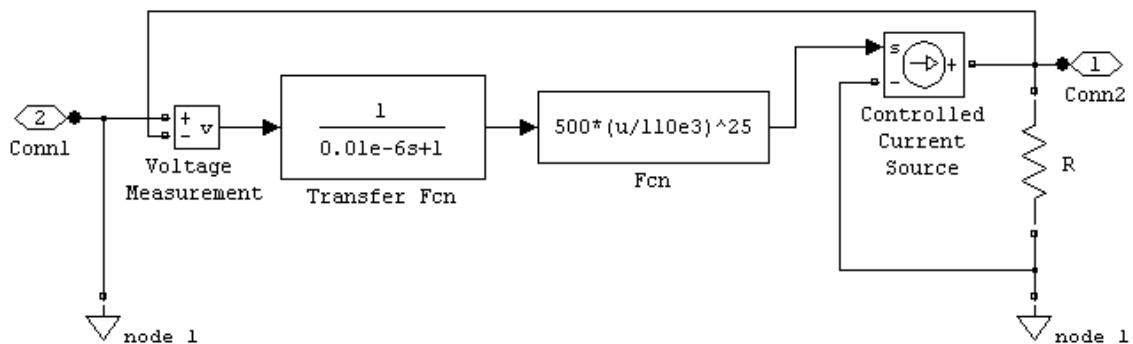


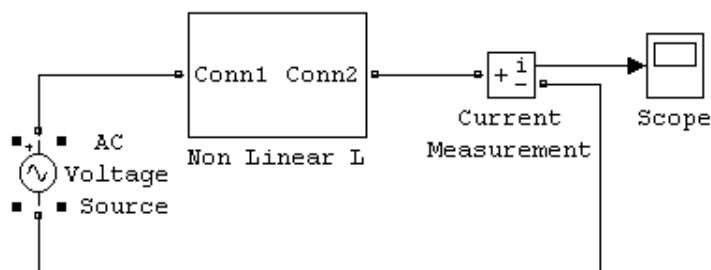
Рисунок 3.5 – Simulink-модель реактора

На схеме величина активного сопротивления реактора принята равной $R = 2$ Ом, а коэффициенты $a = 60$ и $b = 40\,000$.

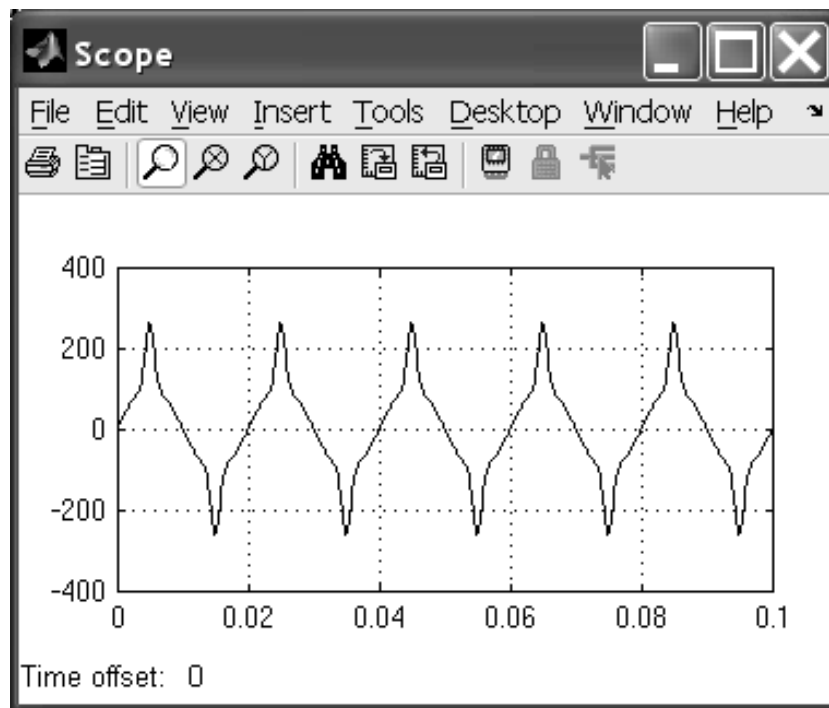
Далее, используя шаблон SPS-модели (рисунок 3.1) не трудно создать модель насыщающегося реактора полностью. Схема всей модели, SPS-модель реактора и временные диаграммы работы модели показаны на рисунке 3.6.



a



б



в

Рисунок 3.6 - Схема блока насыщающегося реактора (а), Схема его включения в цепь переменного тока (б), осциллограмма тока в реакторе (в)

Несинусоидальный характер тока реактора иллюстрирует его нелинейные свойства.

3.3 Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Рассмотрим более сложный пример создания модели нового блока. Создадим модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (в дальнейшем - ДПТ НВ). Хотя для моделирования данного двигателя можно использовать имеющийся библиотечный блок **DC Machine**, но, представляет интерес создание специализированного блока для моделирования данного оборудования.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (рисунок 3.7), описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах:

$$U = E + R \cdot i + L \frac{di}{dt}, \quad (3.5)$$

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.6)$$

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot i, \quad (3.7)$$

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.8)$$

где U - напряжение на якорной обмотке двигателя;

E - электродвижущая сила (ЭДС) якоря;

i - ток якоря;

Φ - поток, создаваемый обмоткой возбуждения;

M - электромагнитный момент двигателя;

M_C - момент сопротивления движению;
 ω - скорость вращения вала двигателя;
 R - активное сопротивление якорной цепи;
 L - индуктивность якорной цепи;
 J - суммарный момент инерции якоря и нагрузки;
 C_E - коэффициент связи между скоростью и ЭДС;
 C_M - коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом.

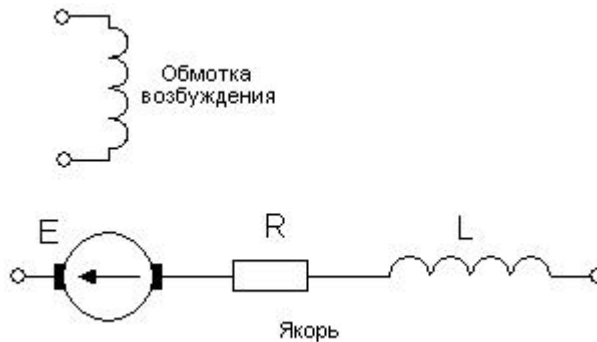


Рисунок 3.7 – Схема двигателя с независимым возбуждением

С точки зрения будущей модели, входными воздействиями являются напряжения якоря U и момент сопротивления движению M_C .

Выходными переменными - электромагнитный момент двигателя M и скорость вращения вала двигателя ω .

Переменными состояния – переменные, стоящие под знаком производной (ток якоря i и скорость вращения вала двигателя ω).

Остальные переменные, входящие в состав уравнений (3.5) - (3.8) являются параметрами, численные значения которых, необходимо будет задавать при проведении расчетов.

Для создания модели, так же как и в случае насыщающегося реактора, сначала необходимо получить передаточные функции, применив к дифференциальным уравнениям, преобразование Лапласа. Дифференциальное уравнение (3.5) даст ПФ, которое связывает ток якоря и падение напряжения на якоре:

$$i(p) = [U(p) - E(p)] \frac{1}{R + Lp}. \quad (3.9)$$

Уравнение (3.6) дает передаточную функцию, связывающую динамический момент и скорость вращения вала двигателя:

$$\omega(p) = [M(p) - M_C(p)] \frac{1}{Jp}. \quad (3.10)$$

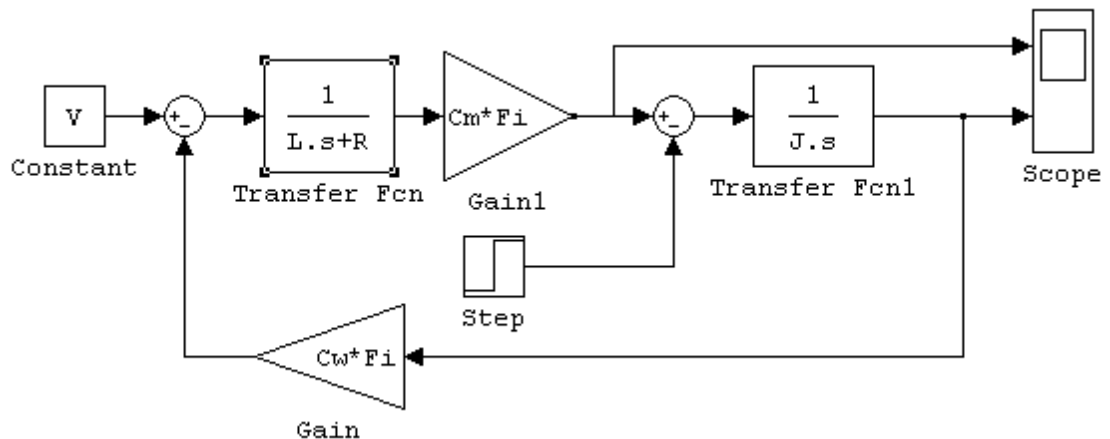
Уравнения (3.7) и (3.8) остаются без изменений.

В итоге, не трудно составить Simulink-модель двигателя. Схема модели, а также графики электромагнитного момента и скорости при прямом пуске двигателя показаны на рисунке 3.8.

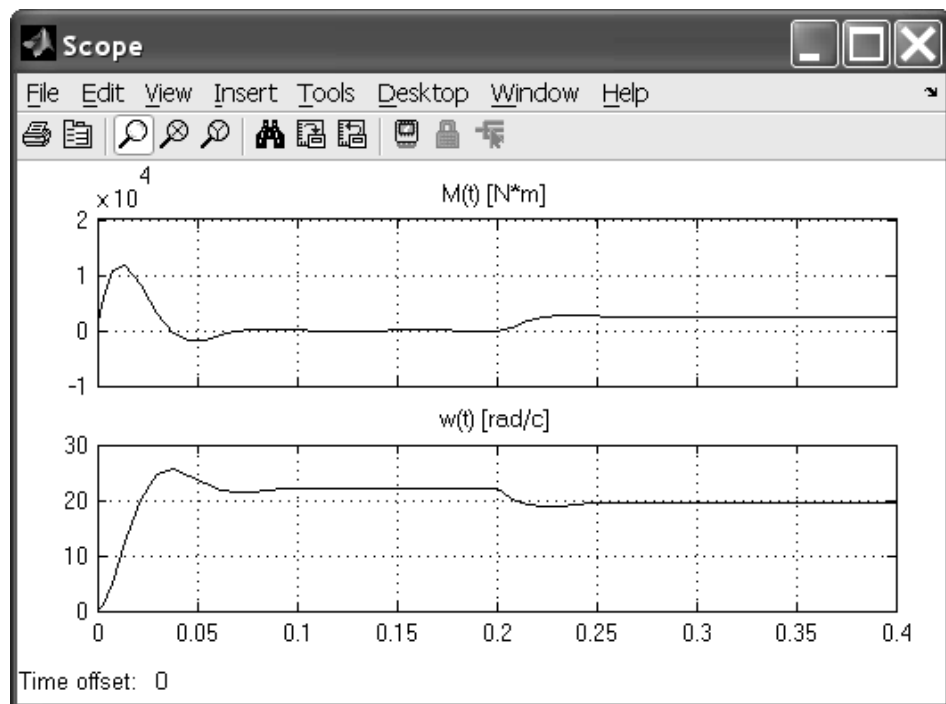
В примере приняты следующие значения параметров двигателя (в единицах СИ):

$$L=0.001, R=0.1, J=10, C_m=10, C_w=10, U=220, F_i=1.$$

Скачок нагрузки производится в момент времени 0,2 с. Величина момента нагрузки равна 2500 Нм.



a



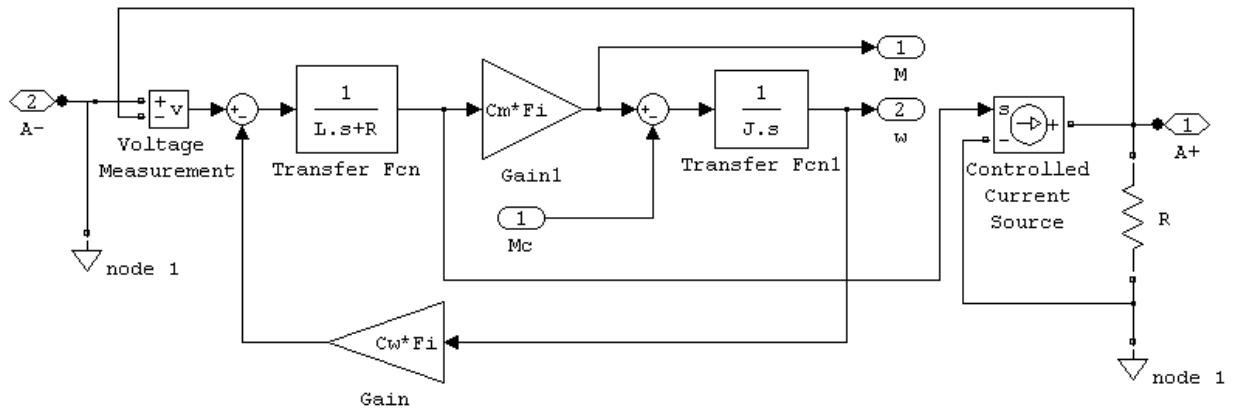
б

Рисунок 3.8 – Модель двигателя (а) и осциллограммы (б): электромагнитного момента (сверху) и скорости вращения (внизу)

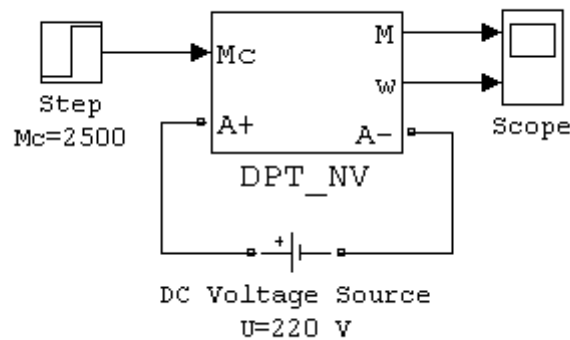
3.3.1 SPS модель двигателя на базе источника тока

Для создания SPS модели двигателя на базе управляемого источника тока также можно воспользоваться общей схемой, приведенной на рисунке 3.1. Выход датчика напряжения должен быть подключен к первому входу сумматора, а на управляющий вход источника тока должен быть подан сигнал пропорциональный току якоря двигателя (выходной сигнал блока **Transfer Fcn** на рисунке 3.8).

Схема блока SPS-модели двигателя, полная схема модели, а также графики тока якоря и скорости вращения вала полностью аналогичны показанным на рисунке 3.8.



a



б

Рисунок 3.9 – Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением на базе источника тока (а), ее включение в сеть (б)

При работе с моделью двигателя следует иметь в виду, что она не является электротехнической в чистом виде, поскольку выходные сигналы электромагнитного момента и скорости являются обычными однонаправленными безразмерными сигналами Simulink.

Графики переменных, представленные на рисунке 3.9 полностью повторяют соответствующие графики обычной Simulink модели двигателя, показанные на рисунке 3.8.

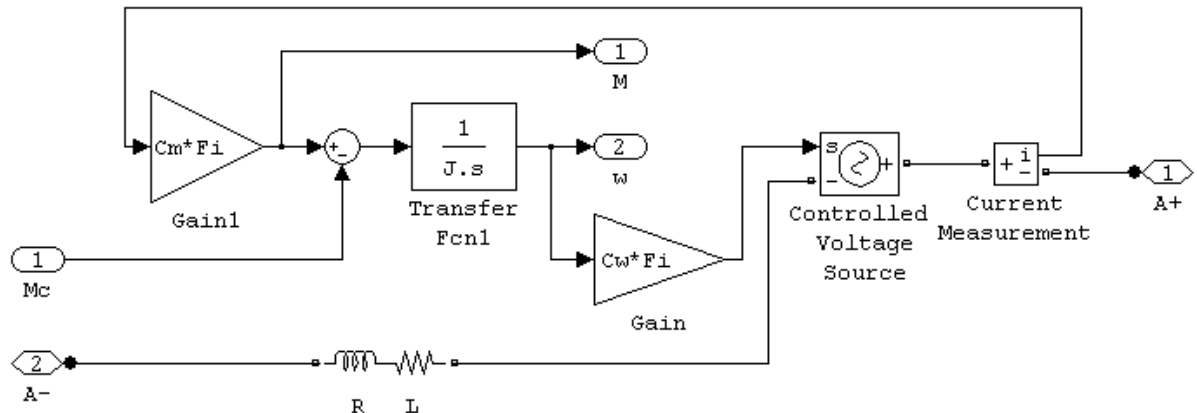
3.3.2 SPS модель двигателя на базе источника напряжения

Модель двигателя постоянного тока можно создать также и на базе управляемого источника напряжения и датчика тока.

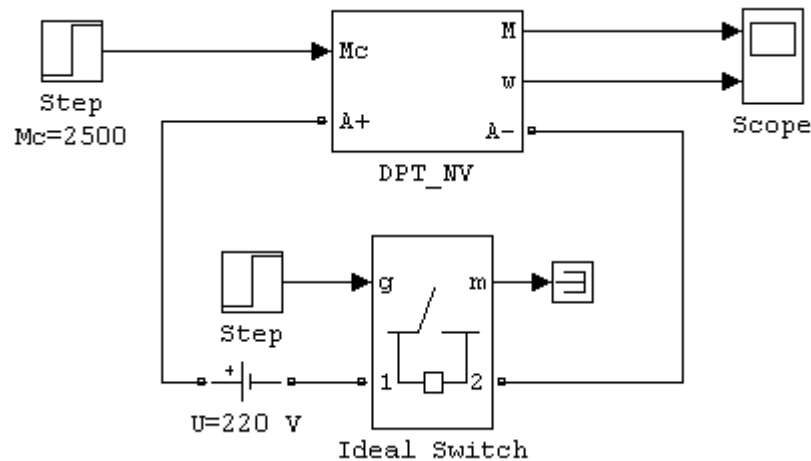
Поскольку на схеме замещения цепи якоря двигателя (рисунок 3.7) присутствуют индуктивность и резистор, то эти элементы можно исключить из Simulink-модели, исключив соответственно и уравнение (3.1), а также передаточную функцию (3.9). Сами резистор и индуктивность можно добавить к модели с помощью стандартного блока **Series RLC Branch** (элементы R и L на схеме). В результате, будет получена комбинированная модель двигателя (рисунок 3.10). На рисунке 3.10 показана и полная схема модели с подключенным источником питания двигателя (**DC Voltage Source**).

Источник питания подключен через ключ **Ideal Switch**, который замыкается через небольшой промежуток времени с начала расчета. Наличие такого ключа обусловлено особенностями расчета начальных условий в моделях SimPowerSystem, а именно начальные условия для элемента **Series RLC Branch** (ток в элементе) задаются как для установившегося режима. Наличие же первоначально разомкнутого ключа обеспечивает нулевые (точнее близкие к нулевым) начальные условия.

Графики переменных двигателя на рисунке 3.10 не приведены, поскольку они полностью совпадают с представленными на рисунках 3.8 и 3.9.



a



б

Рисунок 3.10 – Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением на базе источника напряжения (а) и схема ее включения (б)

Таким образом, используя изложенную выше методику, студент может создавать модели электротехнических устройств различной сложности.

4 Powergui - графический интерфейс пользователя пакета моделирования энергетических систем

В состав пакета **SimPowerSystems** входит блок **Powergui**. Он часто встречался в примерах приводимых ранее. Его графическое обозначение выглядит таким образом:



Рисунок 4.1 – Пиктограмма блока **Powergui**

Его вид зависит от введенных в окно настроек параметров.

Данный блок является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы комплексным методом;
- расчет установившегося режима;
- дискретизация модели;
- задание начальных условий;
- инициализация трехфазных схем содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
- выполнение гармонического анализа;
- создание отчета;
- создание файла характеристик намагничивания для модели нелинейного трансформатора;
- вычисление параметров линий электропередач по их геометрическим характеристикам.

Окно задания параметров блока показано на рисунке 4.2.

Параметры блока:

Hide messages during analysis [Скрывать сообщения при проведении анализа] - Если флажок установлен, то подавляется вывод сообщений в командном окне MATLAB при выполнении расчетов;

Phasor simulation [Расчет схемы комплексным методом] - При установленном флажке выполняется расчет схемы комплексным методом. При этом необходимо задать частоту источников в графе **Frequency**;

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] - Частота источников при расчете схемы комплексным методом. При других видах анализа параметр является недоступным;

Discretize electrical model [Выполнить дискретизацию модели] - При установленном флажке выполняется дискретизация модели. При этом необходимо задать шаг дискретизации в графе **Sample time**;

Sample time (s) [Шаг дискретизации] - Параметр является доступным, если задан режим дискретизации модели. При этом на пиктограмме блока будет показана величина этого параметра;

Steady State Voltages and Currents [Установившиеся значения напряжений и токов] - Расчет установившихся значений переменных. При нажатии на кнопку открывается окно в котором будут показаны соответствующие значения;

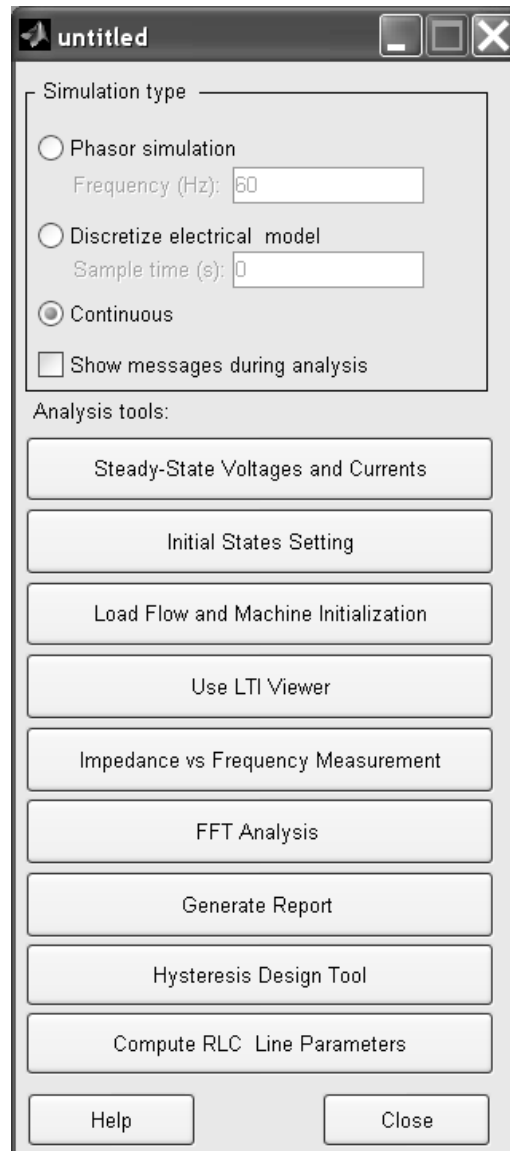


Рисунок 4.2 – Окно настроек блока *Powergui*

Initial states Setting [Установка начальных значений] - При нажатии на кнопку открывается окно, в котором отображаются начальные значения переменных. Эти значения можно изменять. Новые значения используются при расчете переходных процессов;

Load Flow and Machine Initializations [Инициализация схем содержащих электрические машины];

Use LTI Viewer [Использование **LTI Viewer**] - Применение инструмента **Simulink LTI Viewer** для анализа схемы;

Impedance vs Frequency Measurements [Определение импеданса цепи];

FFT Analysis [Гармонический анализ];

Generate Report [Создание отчета];

Hysteresis Design Tool [Инструмент расчета характеристики намагничивания];

Compute RLC Line Parameters [Вычисление параметров линий электропередач] – При нажатии на кнопку открывается окно, куда можно ввести геометрические характеристики линии электропередач. После производства вычислений параметров линии они передаются выбранному в модели блоку линии (например, **Distributed Parameters Line**, **Three-Phase PI Section Line** или **Pi Section Line**). Данную возможность мы здесь не рассматриваем, так как она является достаточно специфичной и представляет интерес только узкому кругу специалистов.

Рассмотрим возможности блока более подробно.

4.1 Расчет схемы комплексным методом

Расчет электрической схемы переменного тока комплексным методом производится для определения установившихся значений токов и напряжений.

Для электрической схемы имеющей ключевые элементы, расчет схемы комплексным методом (**Phasor simulation**) производится в тех случаях, когда пользователя интересуют только установившиеся значения переменных схемы. Вид расчета установившегося режима **Steady-State** в этом случае не очень удобен, поскольку он выполняется только для начального состояния ключей схемы.

Для проведения расчета комплексным методом необходимо в окне **Powergui** выбрать режим расчета **Phasor simulation** и задать частоту источников в графе **Frequency**. В режиме **Phasor simulation** пользователь может проследить, как меняются установившиеся значения переменных при различных коммутациях в схеме.

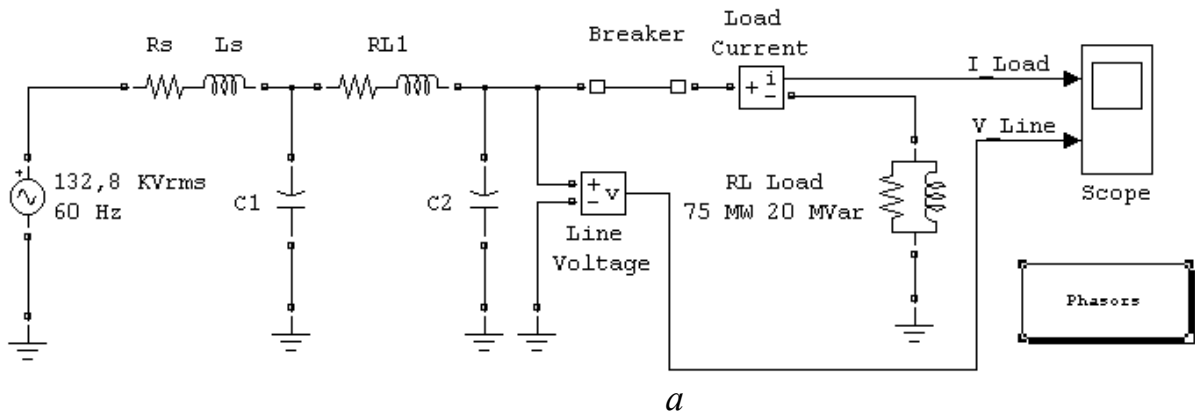
Пример:

На рисунке 4.3 показан пример схемы и результаты расчета схемы комплексным методом.

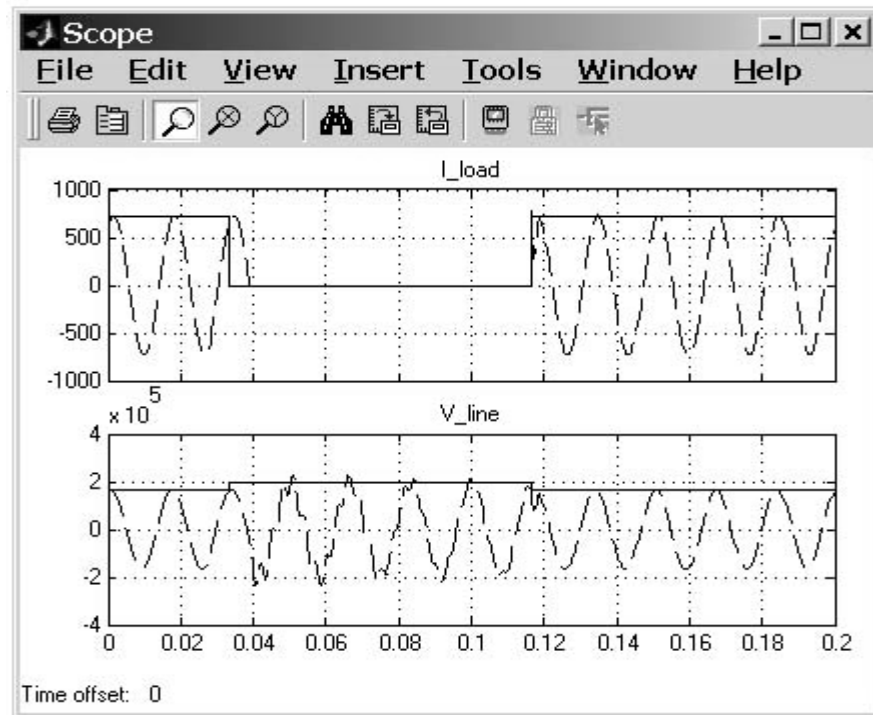
В качестве измеряемых переменных выбраны амплитудные значения тока и напряжения. На графики, для сравнения, наложены графики расчета переходных процессов схемы. Из графиков видно, что расчет комплексным методом дает, по сути, огибающие графиков переходных процессов.

Данный вид расчета может быть использован и для очень сложных схем, когда расчет переходных процессов не дает устойчивого решения.

Следует отметить, что форма вывода результата может быть выбрана не в виде графика, а, в виде списка. В некоторых случаях, такая форма представления результатов более удобна, так, как соответствует общепринятой в инженерной практике форме представления результатов расчетов электрических цепей.



a



б

Рисунок 4.3 – Электрическая схема (а) и результаты ее расчета комплексным методом (б)

4.2 Дискретизация модели

Дискретизация электрической модели позволяет, как правило, существенно увеличить скорость ее расчета. Величина шага дискретизации задается в окне параметров блока **Powergui**. Дискретизация выполняется с использованием метода Тастина (интегрирование методом трапеций с фиксированным шагом). Для того, чтобы устранить замкнутые алгебраические контуры при дискретизации моделей электрических машин применяется прямой метод Эйлера. Точность расчета определяется величиной шага дискретизации. При большом шаге дискретизации точность может быть не высока. Для выбора нужного значения шага требуется выполнить несколько расчетов с разными значениями величины шага дискретизации и сравнить результаты с расчетом по непрерывной модели. После сравнения следует выбрать наибольшее значение шага, при котором разницу с расчетом по непрерывной модели можно считать несущественной. Обычно, для расчета систем работающих на частоте

тах 50-60 Гц шаг дискретизации может быть выбран равным 20-50 мкс. Для систем содержащих полностью управляемые ключи (IGBT транзисторы, GTO тиристоры, схемы с искусственной коммутацией и т.п.) шаг дискретизации должен быть существенно снижен. Так, например, для расчета инвертора с широтно-импульсной модуляцией работающего на частоте 8 кГц шаг дискретизации должен быть задан не менее чем 1 мкс. При расчете дискретных схем системы управления могут быть как непрерывными, так и дискретными, но наибольшая скорость расчета может быть достигнута только в последнем случае.

Примечание: При выполнении дискретизации существуют некоторые ограничения:

*1. Дискретизация полностью управляемых полупроводниковых устройств (IGBT, GTO, или MOSFET) может выполняться только в том случае, если они входят в состав блока **Universal Bridge**. Если же такие устройства используются по отдельности, то дискретизация выполнена не будет, а появится окно с сообщением об ошибке при попытке запуска модели на расчет.*

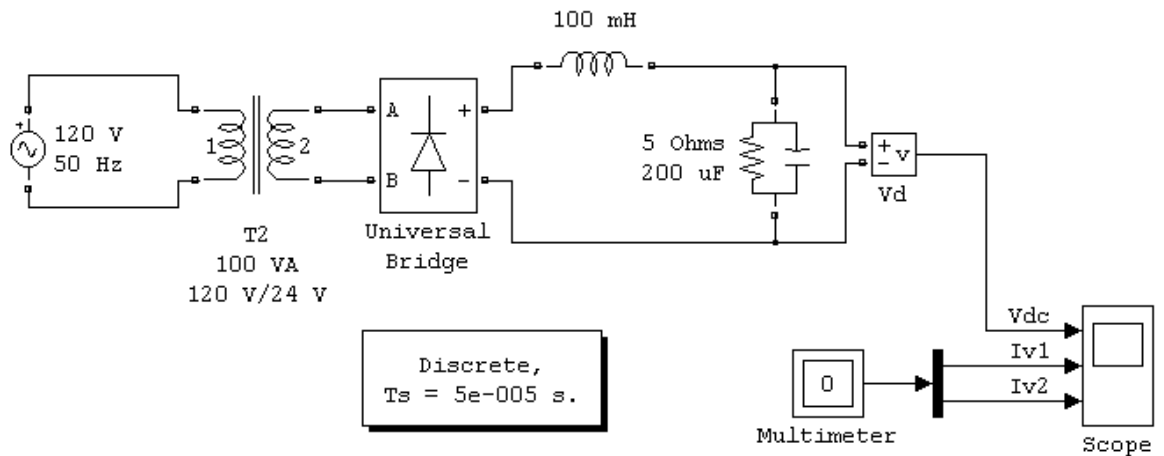
2. При моделировании электрических машин в дискретном режиме возможно возникновение колебаний решения. Для устранения этого источники питания к зажимам машины необходимо подключать через резистор с малым сопротивлением. Величина сопротивления определяется мощностью машины и величиной шага дискретизации. При шаге дискретизации 25 мкс для системы работающей на частоте 60 Гц выделяемая активная мощность на резисторе должна составлять примерно 2,5% от номинальной мощности машины. При увеличении шага дискретизации мощность резистора должна быть увеличена. Например, для синхронной машины мощностью 200 МВА и шагом дискретизации модели 50 мкс требуется, чтобы на дополнительном резисторе выделялось 5% от номинальной мощности машины или 10 МВт. При уменьшении шага дискретизации до 20 мкс мощность резистора может быть уменьшена до 4 МВт.

*3. Индуктивность диодов и тириستоров во включенном состоянии (**Lon**) должна быть задана равной нулю. Если параметр **Lon** задан не равным нулю, то этот параметр будет обнулен принудительно и **SimPowerSystem** выдаст предупреждающее сообщение об этом.*

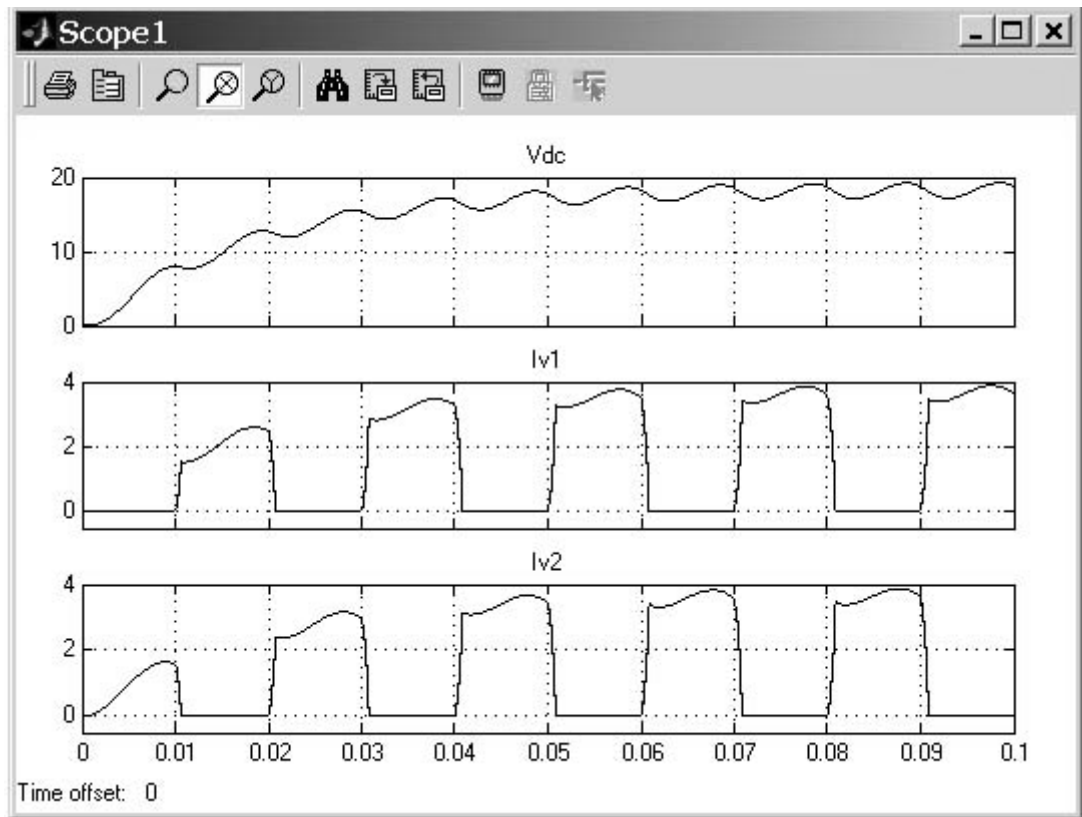
Пример:

На рисунке 4.4,а показана модель однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку без фильтра.

На рисунке 4.4,б приведены также осциллограммы напряжения на нагрузке и токи вентилей моста.



а



б

Рисунок 4.4 – Пример расчета при дискретизации модели

4.3 Расчет установившегося режима

Режим **Steady-State** позволяет выполнить расчет схемы на постоянном токе. Расчет производится для состояния схемы в момент времени $t=0$. В этом режиме расчета в окне блока **Powergui** отображаются значения переменных состояния модели, а также измеряемых переменных источников и нелинейных элементов. Расчет проводится для одной фиксированной частоты равной частоте источников схемы, либо для нулевой частоты, если в схеме присутствуют только источники постоянного напряжения. Результаты могут быть представлены как в виде действующих, так и в виде амплитудных значений. При расчете на переменном напряжении будут показаны также фазовые сдвиги соответствующих переменных. При наличии в схеме ключевых

элементов следует иметь в виду, что расчет будет выполнен для начального состояния ключей.

Для отображения результатов возможно использование следующих настроек:

Units [Система измерения]. Выбор системы измерения:

- **Peak values** - амплитудные значения,
- **RMS values** - действующие значения;

Frequency [Частота] - Частота источников Гц;

Display [Отображаемые переменные] - При установке флажков отображаются следующие расчетные переменные:

- **States** - переменные состояния (токи в индуктивностях и напряжения на конденсаторах),
- **Measurements** - измеряемые переменные, т.е. переменные для измерения которых в модели установлены датчики тока или напряжения.
- **Sources** - напряжения источников,
- **Nonlinear** - токи и напряжения нелинейных элементов.

Пример:

На рисунке 4.5 показан пример схемы рассмотренного ранее примера формирования блока нелинейного сопротивления (раздел 3.2, рисунок 3.3) и результаты ее расчета для установившегося режима.

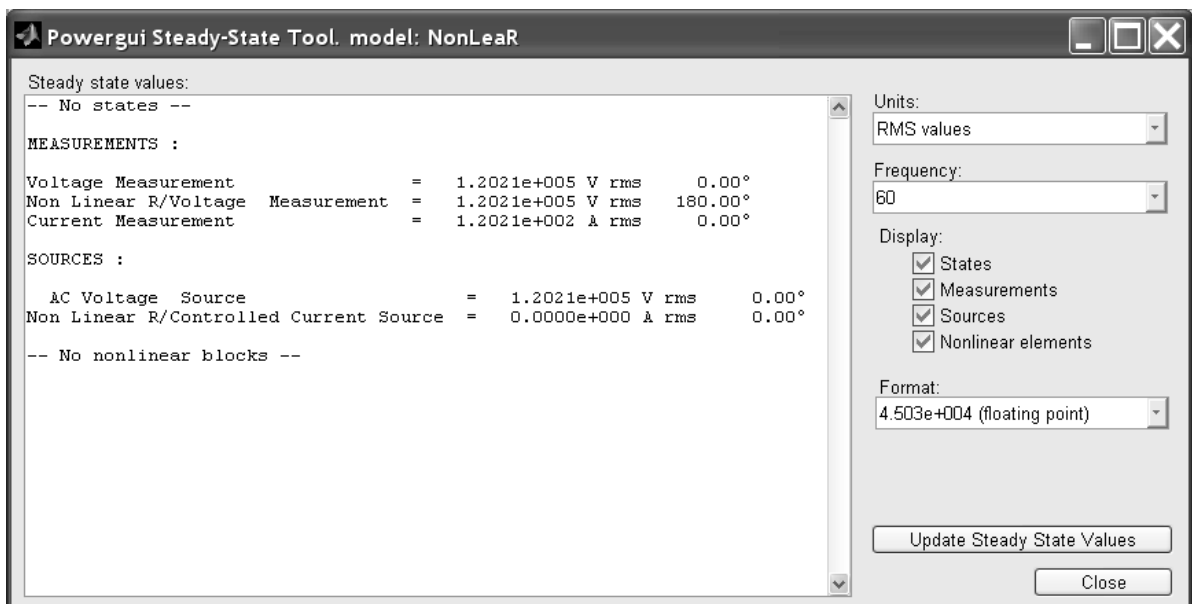
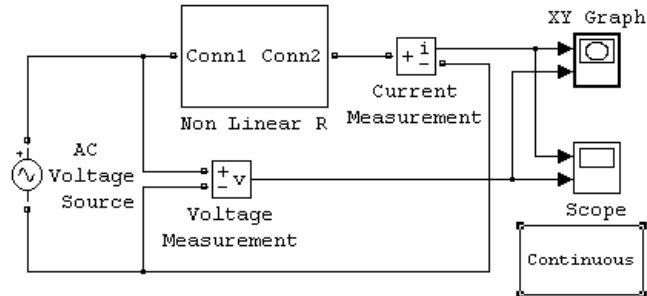


Рисунок 4.5 – Расчет установившегося режима электрической схемы

4.4 Задание начальных условий расчета

При выполнении расчета электрической схемы начинающий пользователь может получить довольно неожиданный результат, обусловленный не заданными специально начальными условиями. Дело в том, что перед началом расчета Simulink выполняет расчет установившегося режима и результаты этого расчета принимает в качестве начальных условий для расчета на заданном интервале времени. На рисунке 4.6 показана схема, в которой источник постоянного напряжения подключен к активно индуктивной нагрузке. Как видно из графика, величина тока равна 100 А и не меняется на всем протяжении расчета, что не соответствует представлениям о переходных процессах в цепях содержащих реактивные элементы.

Это происходит потому, что вначале, программа автоматически производит расчет установившегося процесса в цепи, который и принимается за начальные условия расчета (если конечно не введены другие их значения, например рассматриваемым инструментом **Initial State Setting**).

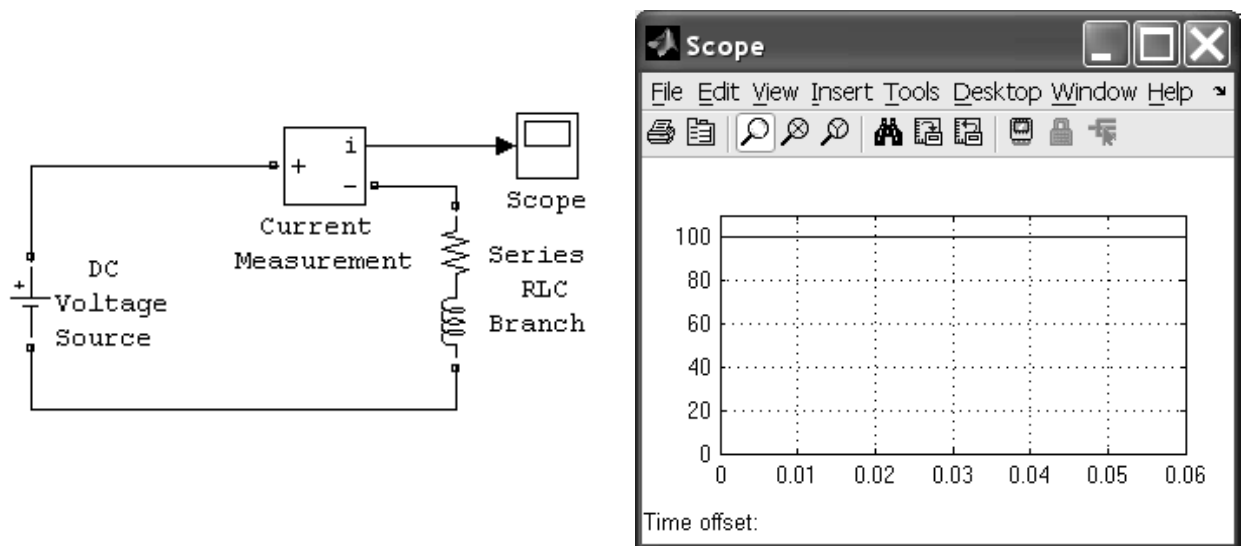


Рисунок 4.6 – Схема расчета переходного процесса с неверно установленными начальными условиями

Для того, чтобы принудительно задать нулевые начальные условия требуется установить на схему блок **Powergui**, открыть его и нажать кнопку **Initial State Setting** (Установка начальных состояний).

В результате на экран компьютера будет выведено окно установки начальных состояний модели. В нем, требуется нажать кнопку **To zero** для установки нулевых начальных условий.

Таким образом, начальные значения переменных модели будут установлены равными нулю. Схема модели с блоком **Powergui** и график тока при нулевых начальных условиях показан на рисунке 4.8.

Напоминаем, что здесь, ранее и в дальнейшем, окно осциллографа подвергалось некоторому редактированию, перед перенесением в текст работы. Редактирование заключалось в замене черного цвета фона на белый цвет.

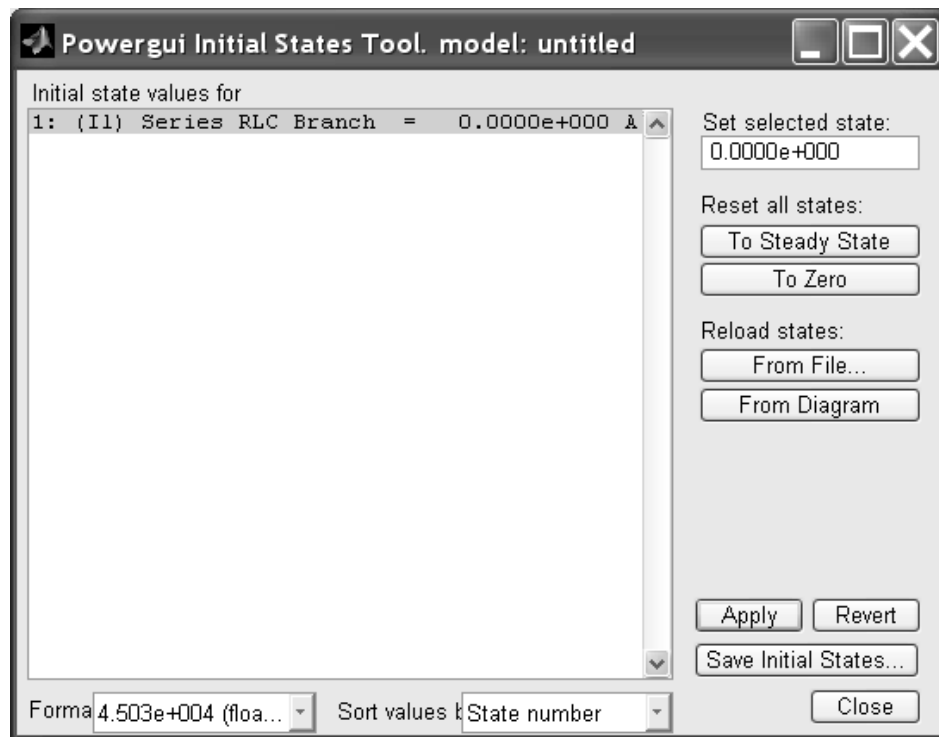


Рисунок 4.7 – Окно установки начальных условий открытое для схемы показанной на рисунке 4.6

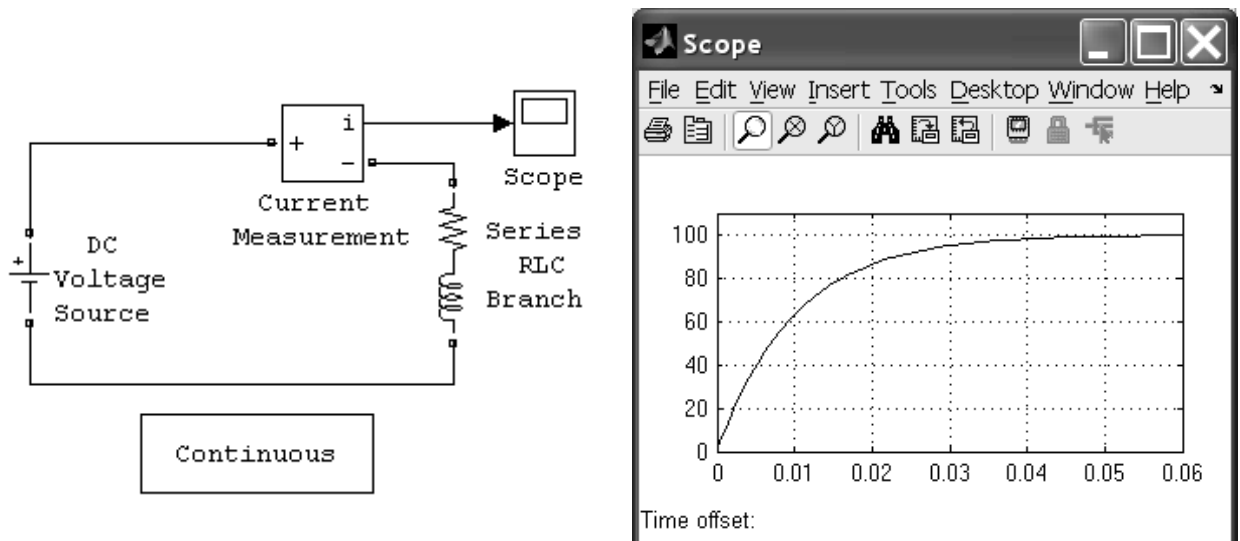


Рисунок 4.8 – Схема с блоком **Powergui** и переходный процесс в цепи при нулевых начальных условиях

4.5 Инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины

Для того, чтобы начать расчет схемы содержащей электрические машины с установившегося режима (при синусоидальных токах и постоянных скоростях) предварительно необходимо инициализировать схему должным образом. Такая инициализация осуществляется инструментом **Load Flow and Machine Initialization**. Инициализация выполняется для схем содержащих синхронные и асинхронные машины, а также блоки **3-Phase Dynamic Load**.

Для выполнения инициализации необходимо ввести исходные данные в левой части окна инструмента (рисунок 4.9).

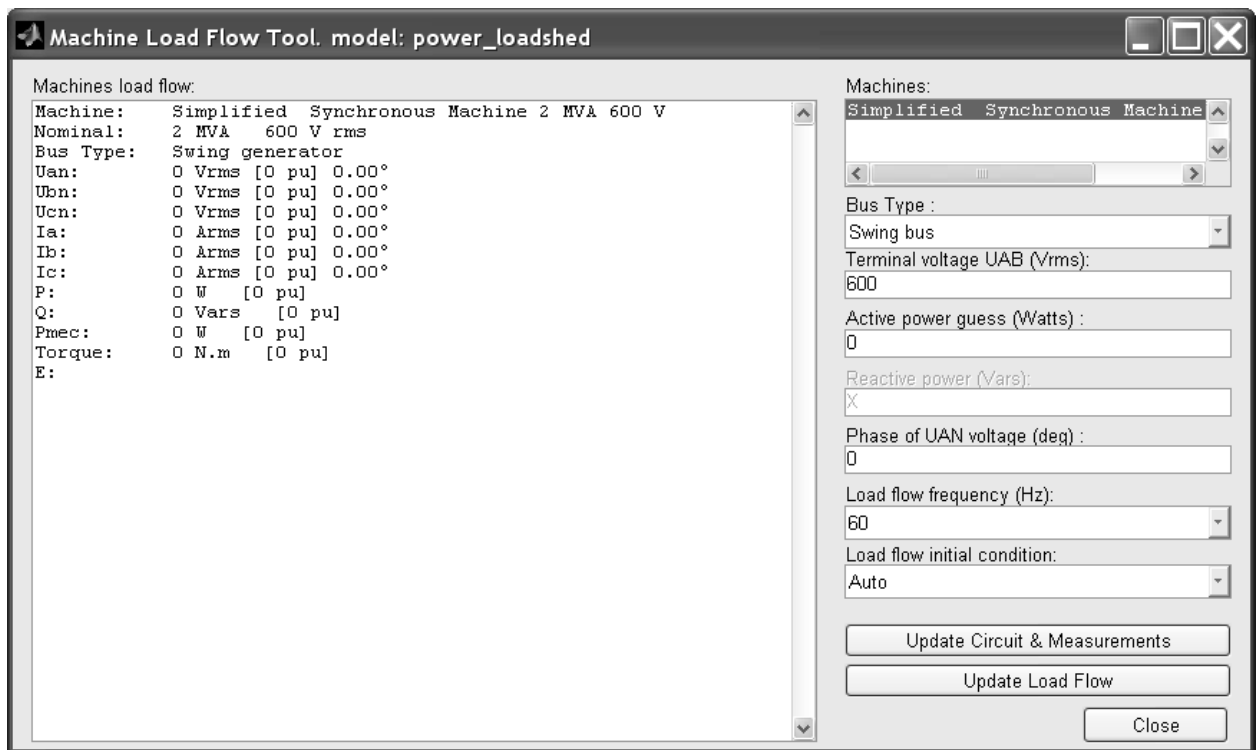


Рисунок 4.9 – Вид окна вкладки **Load Flow and Machine Initialization**

В зависимости от вида электрической машины состав исходных данных может меняться:

Machines [Машины] - Список электрических машин, имеющих в модели;

Bus type [Тип шины] - Параметр определяет перечень задаваемых параметров машины. Значение выбирается из списка:

- **P&V Generator** - задаются активная мощность и номинальное линейное напряжение (действующее значение),
- **P&Q Generator** - задаются активная и реактивная мощности мощность,
- **Swing Bus** - задаются линейное напряжение (действующее значение), предполагаемая активная мощность и начальная фаза напряжения UAN (эл. град). Данный тип шины предполагает двунаправленную передачу мощности, поэтому данный тип шины должен быть установлен хотя бы для одной синхронной машины в схеме;

Terminal voltage UAB (Vrms) [Напряжение UAB (действующее значение)];

Active power (Watts) [Активная мощность (Вт)];

Reactive power (Vars) [Реактивная мощность (ВАр)];

Phase of UAN voltage (deg) [Начальная фаза напряжения UAN (эл. град).];

Mechanical power (Watts) [Механическая мощность (Вт)] - Параметр задается для асинхронной машины;

Load flow frequency [Частота];

Load Flow initial condition [Начальные условия] - Значение параметра выбираются из списка:

- **Auto** - расчет выполняется для найденных начальных условий,
- **Start from previous solution** - результаты предыдущего расчета являются начальными условиями для следующего.

При внесении изменений в схему пересчет начальных условий необходимо выполнить кнопкой **Update circuit & measurements**.

После нажатия кнопки **Update Load Flow** произойдет автоматическая запись рассчитанных начальных условий в параметры блоков электрических машин. Кроме того, если потребуются изменения и во входных сигналах блоков (момент нагрузки, входная мощность и т.п.), то будут выведены сообщения с нужными значениями. Эти значения необходимо задать с помощью блоков **IC**.

Пример:

На рисунке 4.10 показана схема, в которой синхронный генератор, работающий на активную нагрузку, приводится во вращение асинхронным двигателем. На осциллограмме показано напряжение фазы С генератора. Как видно на осциллограмме, начальное значение напряжения не равно нулю, как это имело бы место при нулевых начальных условиях.

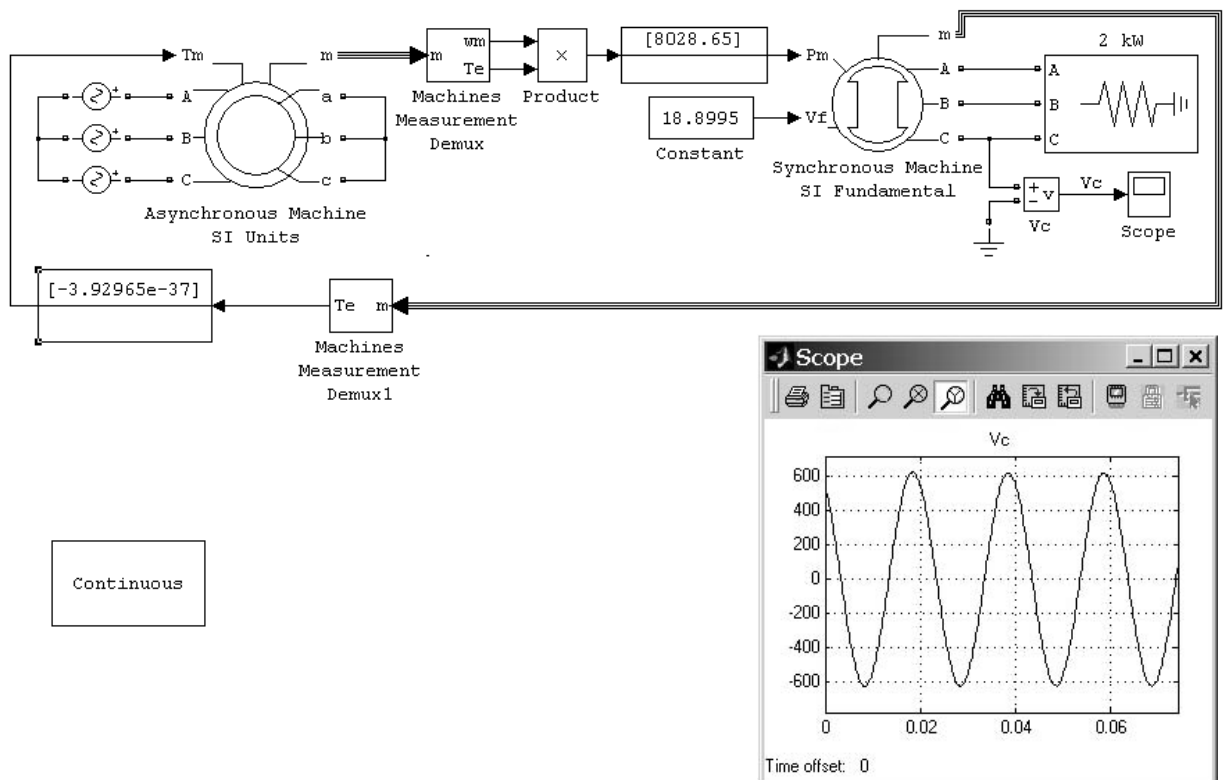


Рисунок 4.10 – Пример применения инструмента **Load Flow and Machine Initialization** при моделировании схем с электрическими машинами

4.6 Использование Simulink LTI-Viewer для анализа электрических схем

Simulink LTI-Viewer, входящий в состав инструмента **Control System Toolbox**, является очень удобным инструментом для анализа линейных систем в Simulink. С помощью него можно определить реакцию системы на единичное импульсное и ступенчатое воздействия, построить частотные характеристики, найти нули и полюса общей передаточной функции системы, построить годограф Найквиста и т.д. Все эти возможности доступны и при анализе электрических схем.

Вызов **Simulink LTI-Viewer** для анализа электрической схемы выполняется из среды **Powergui** с помощью кнопки **Use LTI Viewer**. При запуске **LTI-Viewer** пользователю предоставляется возможность указать входные (**System inputs**) и выходные переменные (**System outputs**) для выполнения анализа (рисунок 4.11).

Для просмотра результатов линейного анализа необходимо нажать кнопку **Open new LTI Viewer** и выбрать вид графика в окне **LTI Viewer**, который появляется при нажатии на правую кнопку мыши, рисунок 4.12.

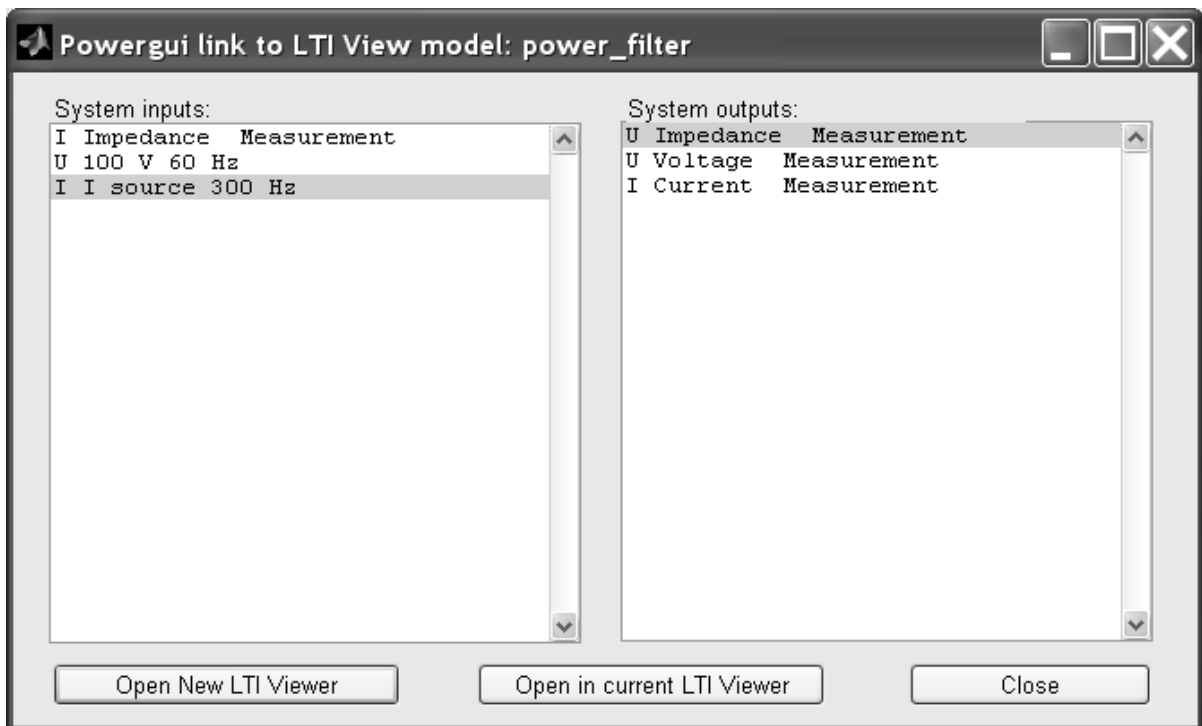


Рисунок 4.11 – Окно вкладки **LTI-Viewer**

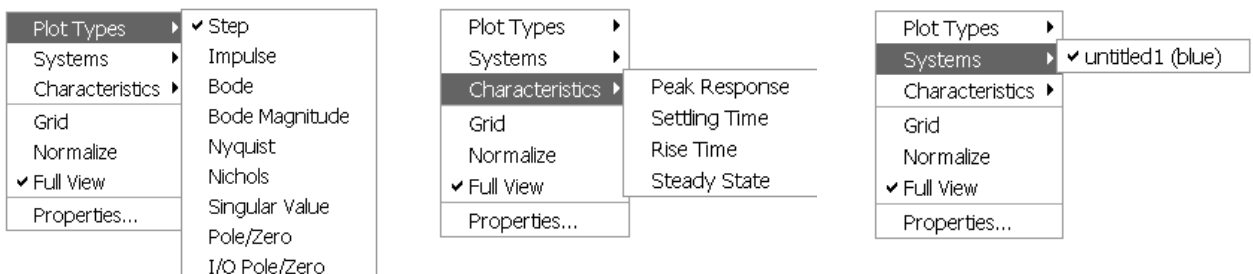
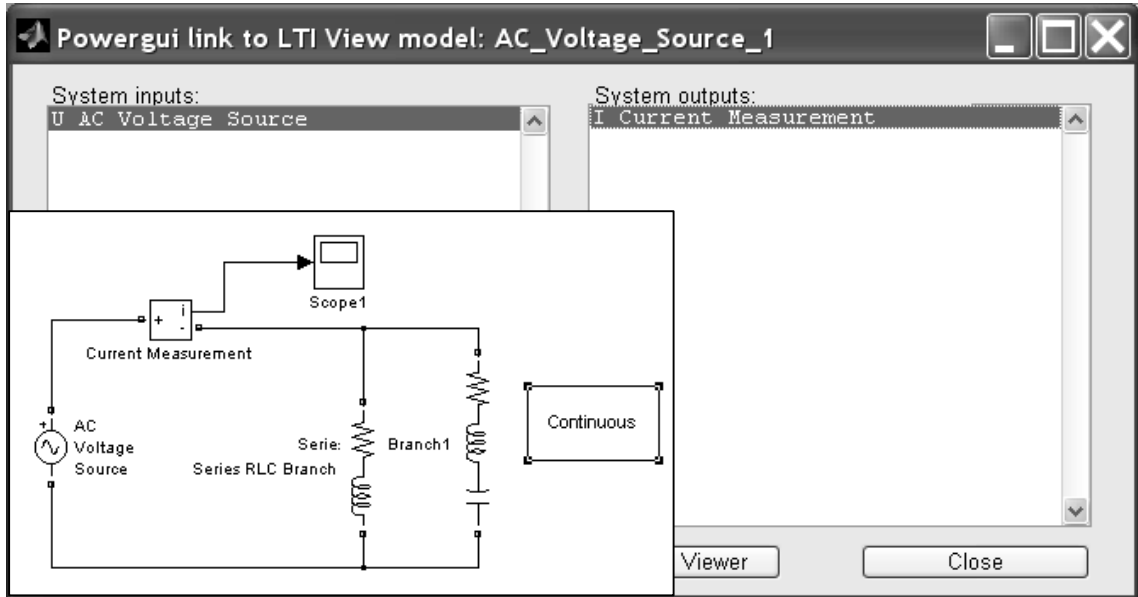


Рисунок 4.12 – Меню выбора вида исследуемой зависимости (а), типа характеристики (б), системы по цвету (б)

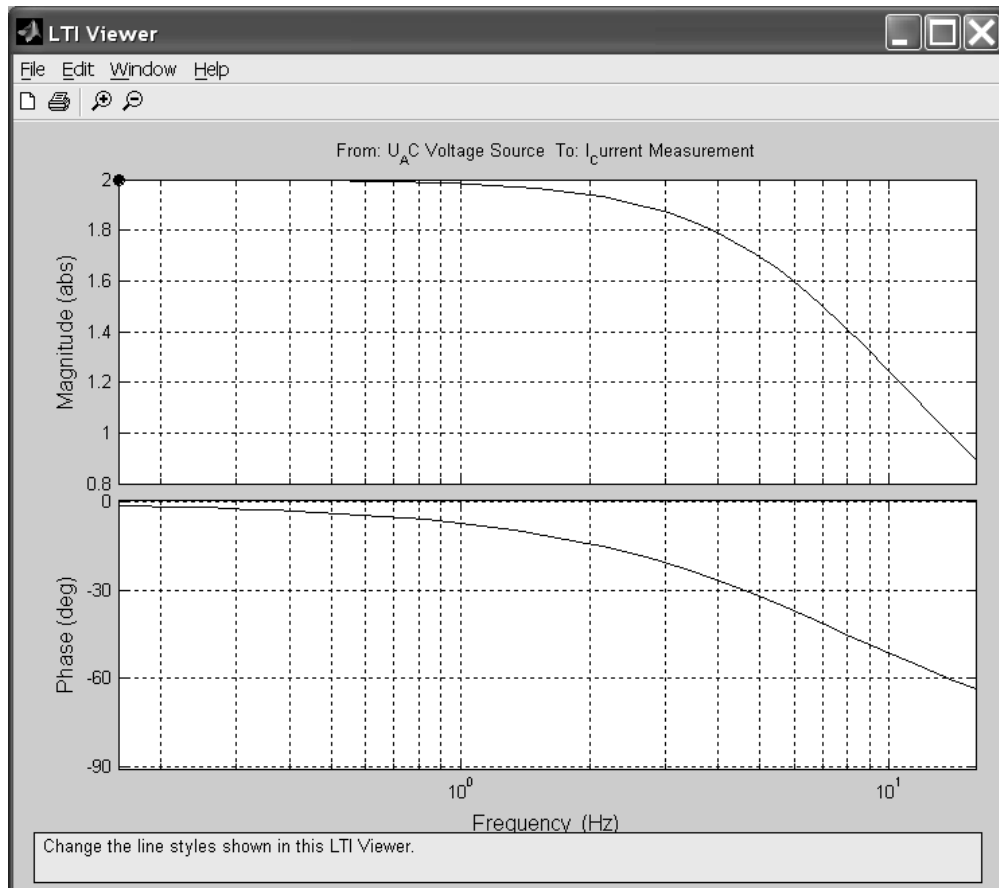
Пример:

На рисунке 4.12 показан пример электрической схемы и результаты ее анализа.

На графиках представлены графики изменения амплитуды и фазы тока источника при изменении частоты источника питания.



а



б

Рисунок 4.12 – Схема и окно **LTI-Viewer** (а), результаты анализа (б)

4.7 Определение импеданса цепи

Для проведения расчета полного сопротивления электрической цепи на схеме модели должен быть установлен блок **Impedance Measurements**. Электрическая цепь обязательно должна быть замкнута. Если же требуется измерить импеданс отдельного (разомкнутого) участка цепи, то его следует шунтировать резистором с достаточно большим сопротивлением, не изменяющим существенно общее сопротивление цепи. Для просмотра результатов необходимо нажать кнопку **Impedance vs Frequency Measurements**. После чего будет открыто окно **Powergui Impedance Measurement**.

Для отображения результатов возможно использование следующих настроек:

Axis [Оси] - Настройка свойств осей графиков:

- **Logarithmic Impedance** - логарифмическая шкала импеданса,
- **Linear Impedance** - линейная шкала импеданса,
- **Logarithmic Frequency** - логарифмическая шкала частоты,
- **Linear Frequency** - линейная шкала частоты;

Range (Hz) [Частота (Гц)] - Диапазон по частоте для расчета импеданса. Параметр задается в виде вектора. При использовании логарифмической шкалы частоты удобно задать диапазон с помощью функции **logspace**;

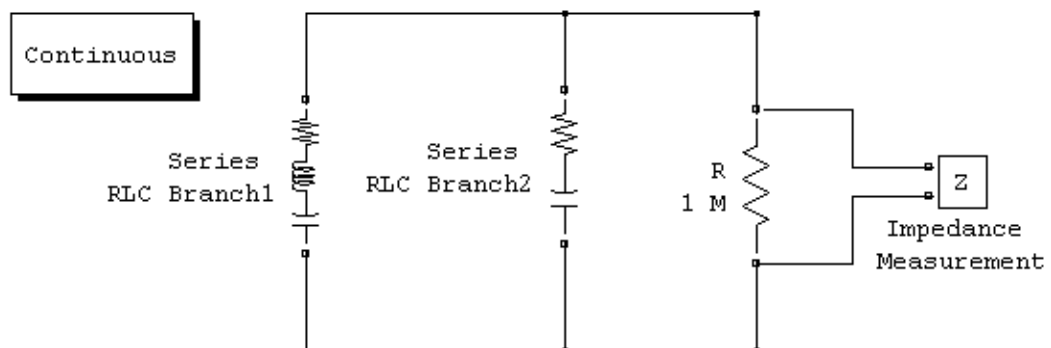
Grid [Сетка] - Нанесение масштабной сетки на графики;

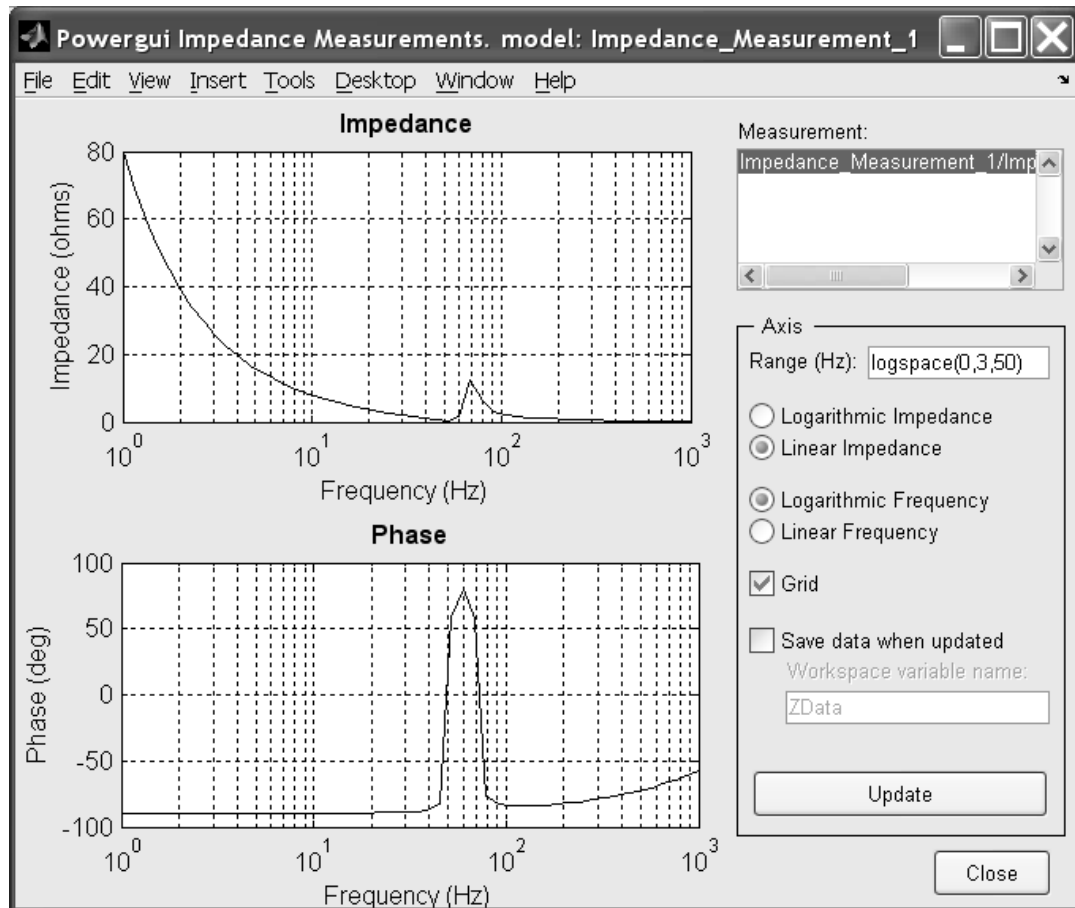
Save data to workspace [Запись данных в рабочую область MATLAB] - При установленном флажке выполняется запись результатов в область MATLAB;

Variable name [Имя переменной] - Имя переменной для записи результатов в рабочей области MATLAB. Данные будут сохранены в виде матрицы первый столбец которой - частота, а второй значение импеданса (комплексное число).

Пример:

На рисунке 4.13,а показана схема для измерения полного сопротивления цепи. Измеряемая цепь шунтирована резистором сопротивлением 1 Мом. Результаты расчета полного сопротивления участка исследуемой цепи в функции частоты показаны там же, на рисунке 4.13,б.





б

Рисунок 4.13 – Пример использования инструмента *Impedance vs Frequency Measurements* для определения полного сопротивления цепи

4.8 Гармонический анализ

Для проведения гармонического анализа необходимо предусмотреть вывод исследуемых сигналов в рабочую область MATLAB. Это можно выполнить путем соответствующей настройки осциллографа **Scope** или с помощью блока **To Workspace**. Формат выводимых данных должен быть задан как **Structure With Time** (структура с полем "время"). После того как процесс расчета модели завершен, необходимо открыть окно блока **Powergui** и нажать кнопку **FFT Analysis** - быстрое преобразование Фурье (БПФ). После этого откроется окно **Powergui FFT Tools**, в котором необходимо нажать кнопку **Display** для отображения результатов. Настройка процедуры гармонического анализа выполняется с помощью параметров задаваемых в окне **Powergui FFT Tools**:

Structure [Структура] - Имя переменной, содержащей исследуемые данные;

Input [Вход] - Метка входного сигнала (параметр **Signal name** линии связи);

Start time (s) [Начальное время (с)] - Время начала временного интервала, для которого проводится гармонический анализ;

Number of cycles [Число периодов] - Число периодов исследуемого сигнала, для которого выполняется анализ;

Variable name [Имя переменной] - Имя переменной в рабочей области MATLAB, содержащей данные для проведения гармонического анализа;

Display FFT window [Показывать окно БПФ] - Показывать сигнал на временном интервале, для которого выполняется гармонический анализ. Если выбран данный параметр, то на верхнем графике окна будет отображаться входной сигнал только для заданного временного интервала;

Display entire signal [Показывать весь сигнал] - При выборе данного параметра на верхнем графике окна будет показан входной сигнал для всего рассчитанного интервала;

Fundamental frequency (Hz) [Базовая частота] - Частота первой гармоники исследуемого сигнала;

Max frequency (Hz) [Максимальная частота] - Частота наивысшей гармоники, до которой необходимо выполнить расчет;

Frequency axis [Ось частот]. Градуировка оси частот:

- **Hertz** - по горизонтальной оси откладывается частота гармоник в Гц,
- **Harmonic order** - по горизонтальной оси откладываются номера гармоник.

Display style [Стиль отображения] - Параметр задает способ отображения результатов:

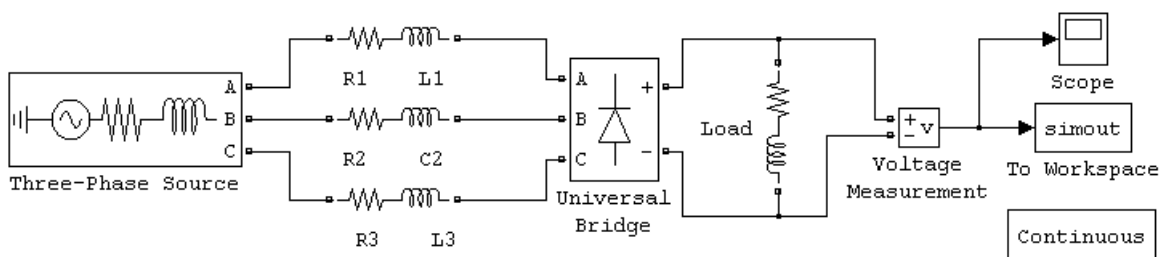
- **Bar (relative to Fund. or DC)** - гистограмма (в % относительно первой или нулевой гармоник),
- **List (relative to Fund. or DC)** - список (в % относительно первой или нулевой гармоник),
- **Bar (relative to specified base)** - гистограмма (в о.е. по отношению к заданному базовому значению),
- **List (relative to specified base)** - список (в о.е. по отношению к заданному базовому значению);

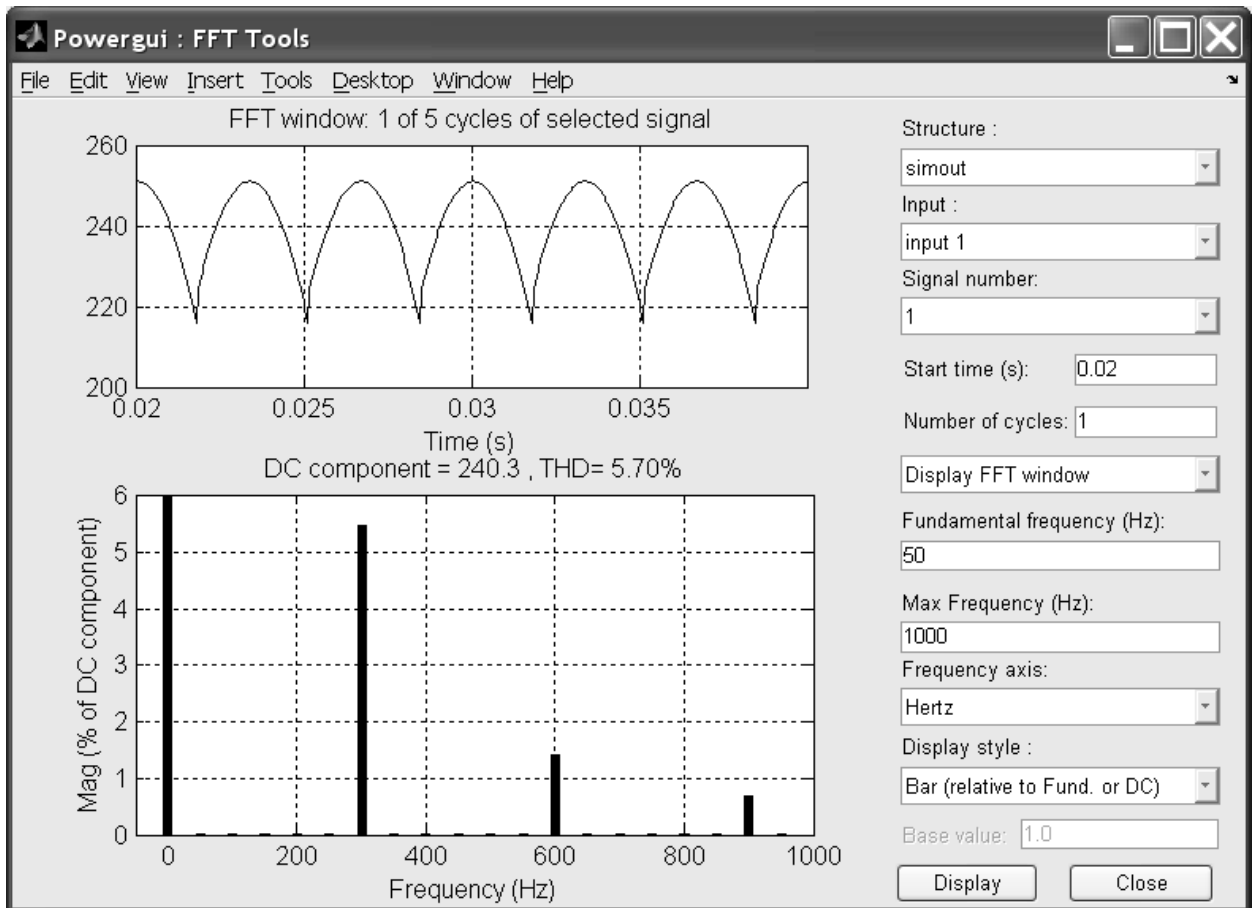
Base value [Базовое значение].

Пример:

На рисунке 4.14 приведена схема трехфазного мостового выпрямителя и окно инструмента гармонического анализа.

На верхнем графике рисунка показан один период исследуемого сигнала, а на нижнем - его гистограмма амплитуд гармоник.





б

Рисунок 4.14 – Схема трехфазного выпрямителя (а) и результаты гармонического анализа напряжения на его выходе (б)

4.9 Создание отчета

Блок **Powergui** может создавать отчет, включающий в себя значения измеряемых переменных в установившемся режиме, токов и напряжений источников, нелинейных моделей и переменных состояния схемы. Отчет сохраняется в текстовом файле с расширением **.rep**. Для создания отчета необходимо нажать кнопку **Generate report** в окне блока **Powergui**. После чего появится окно **Generate report** (рисунок 4.15) в котором можно задать разделы, включаемые в отчет.

При настройке содержания отчета можно изменять следующие параметры:

Items to include in the report [Разделы, включаемые в отчет] - В отчет можно включить следующие разделы:

- **Steady-State** - значения измеряемых переменных в установившемся режиме,
- **Initial states** - начальные значения переменных;
- **Machine load flow** - параметры нагрузки электрических машин;

Frequency used in the report [Частота, используемая в отчете] - С помощью параметра можно выбрать значения частот, для которых будут сохраняться данные;

Units [Система измерения]. Выбор системы измерения:

- **Peak values** - амплитудные значения,
- **RMS values** - действующие значения;

Format [Формат] – Назначается тип формата выводимых в отчет числовых сведений. Могут быть выбраны следующие варианты:

- **floating point** [с плавающей запятой];
- **best off** [лучший] – автоматически выбирается лучший вариант формата для данной величины,
- **2590571.12** – формат с двумя знаками после запятой.

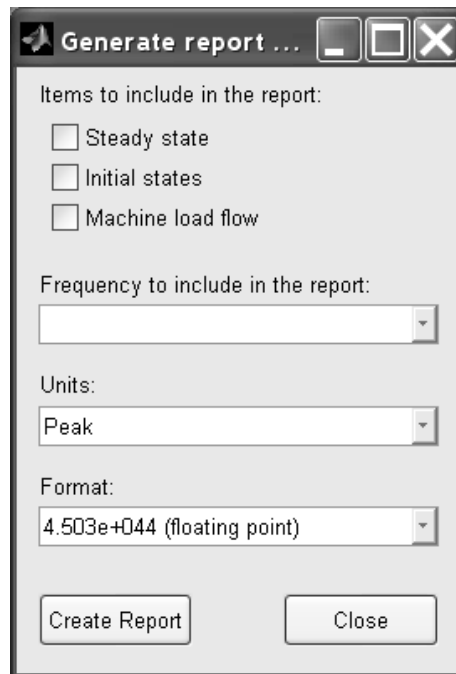


Рисунок 4.15 – Окно настройки параметров отчета

Пример:

Ниже приведен отчет для схемы показанной на рисунке 4.14. В отчет включены все разделы. Значения переменных выводятся как действующие значения (для уменьшения объема отчета в нем убраны некоторые промежуточные между блоками данных).

SimPowerSystems Report.

generated by powergui,

15-Jul-2005 11:41:39

Model : C:\Users\ILya\Mlab_6_5\Power_sys\Examples\PowerGui\Powergui_FFT.mdl.

[1] Steady-State voltages and currents:

States at 50 Hz :

Il_Series RLC Branch2	=	3.054e-016 Arms	21.25°
Il_Series RLC Branch3	=	0.01333 Arms	-150.90°
Il_Series RLC Branch6	=	0.01333 Arms	89.10°
Uc_snubber 1 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	-0.90°
Uc_snubber 2 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	-60.90°
Uc_snubber 3 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	-120.90°
Uc_snubber 4 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	179.10°
Uc_snubber 5 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	119.10°
Uc_snubber 6 ThyristorConverter	=	212.1 Vrms	59.10°

Measurements at 50 Hz :

Vd = 9.542e-013 V rms -165.79°

Sources at 50 Hz :

Va = 0 V rms 0.00°

Vb = 0 V rms 0.00°

Vc = 0 V rms 0.00°

Nonlinear elements at 50 Hz :

U_Diodes1_ThyristorConverter = 212.1 V rms -0.00°

U_Diodes2_ThyristorConverter = 212.1 V rms -60.00°

U_Diodes3_ThyristorConverter = 212.1 V rms -120.00°

U_Diodes4_ThyristorConverter = 212.1 V rms 180.00°

U_Diodes5_ThyristorConverter = 212.1 V rms 120.00°

U_Diodes6_ThyristorConverter = 212.1 V rms 60.00°

I_Diodes1_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

I_Diodes2_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

I_Diodes3_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

I_Diodes4_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

I_Diodes5_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

I_Diodes6_ThyristorConverter = 0 A rms 0.00°

[2] Initial values of States Variables:

Il_Series RLC Branch2 = 1.565e-016 A

Il_Series RLC Branch3 = -0.009166 A

Il_Series RLC Branch6 = 0.01884 A

Uc_snubber 1 ThyristorConverter = -4.711 V

Uc_snubber 2 ThyristorConverter = -262.1 V

Uc_snubber 3 ThyristorConverter = -257.4 V

Uc_snubber 4 ThyristorConverter = 4.711 V

Uc_snubber 5 ThyristorConverter = 262.1 V

Uc_snubber 6 ThyristorConverter = 257.4 V

[3] Machine Load Flow solution:

There is no machine block in the model

4.10 Инструмент расчета характеристики намагничивания

Инструмент позволяет создать mat-файл с данными кривой намагничивания. Файл может быть использован при моделировании электрических машин и трансформаторов.

Для запуска инструмента необходимо нажать кнопку **Hysteresis Design Tool** в окне **Powergui**. При этом запустится инструмент **Hysteresis Design Tool** В открывшемся окне (рисунок 4.16) необходимо задать следующие параметры:

Segments [Участки] Число линейных участков, аппроксимирующих кривую намагничивания;

Remanent flux Fr [Остаточный магнитный поток] - Значение потока в точке 1 на графике (рисунок 4.13);

Saturation Flux [Поток насыщения] - Значение потока в точке 2 на графике;

Saturation current Is [Ток насыщения] - Значение тока в точке 2 на графике;

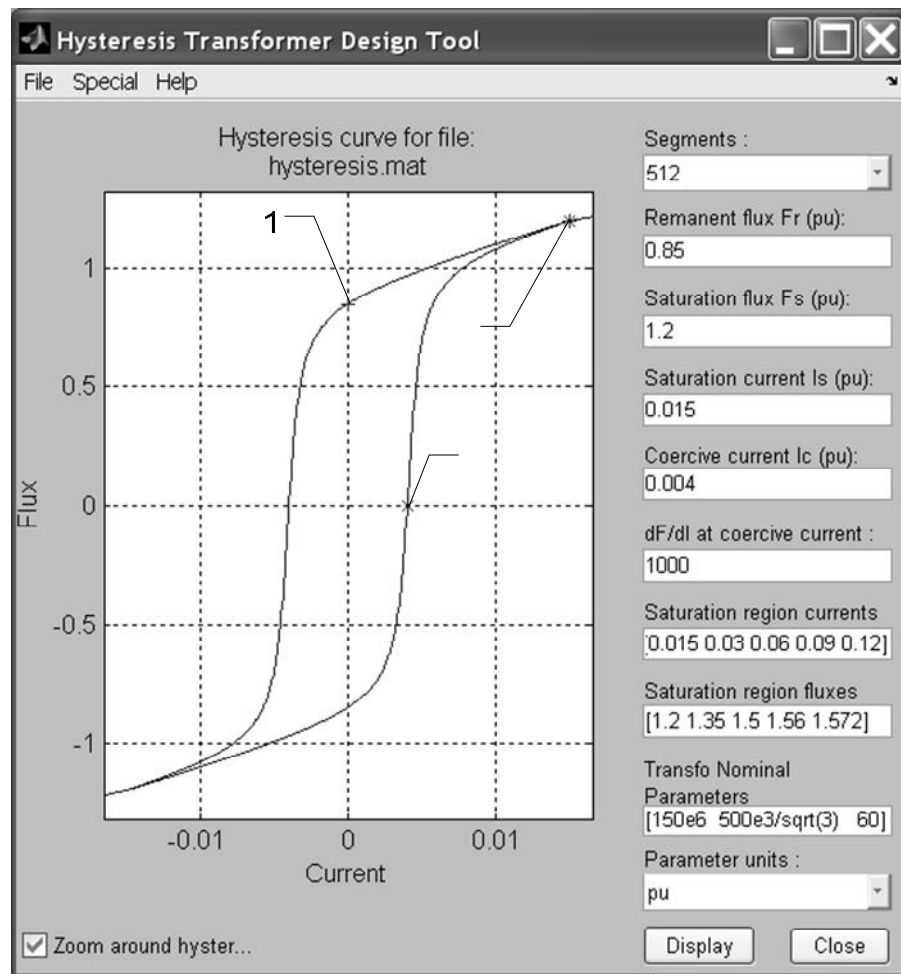


Рисунок 4.16 – Окно инструмента *Hysteresis Design Tool*

Coercive current I_c [Размагничивающий ток] - Значение тока в точке 3 на графике;

dF/dI at coercive current [Коэффициент dF/dI для значения размагничивающего тока] - Коэффициент наклона кривой для значения размагничивающего тока;

Saturation region currents [Значения токов] - Вектор значений токов для участка насыщения. Число элементов в векторе должно быть равно размерности вектора параметра **Saturation region fluxes**. Требуется задать только положительную ветвь характеристики;

Saturation region fluxes [Значения потоков] - Вектор значений потоков для участка насыщения. Число элементов в векторе должно быть равно размерности вектора параметра **Saturation region currents**. Требуется задать только положительную ветвь характеристики;

Transfo Nominal Parameters $[P(VA), V(Vrms), f(Hz)]$ [Номинальные параметры преобразования $[P(ВА), V(В), f(Гц)]$] - Данные значения используются для перехода к системе абсолютных единиц, если кривая гистерезиса задана в относительных единицах;

Parameter units [Система единиц измерения] - Значение выбирается из списка:

- **pu** - система относительных единиц,

- **SI** - международная система Си;

Zoom around hysteresis [Увеличить область гистерезиса] - При установленном флажке на графике отображается только область гистерезиса, в противном случае - вся характеристика;

Tolerances [TOL_F (% Fs) TOL_I (% Ic)] [Погрешности расчета потока (в % от Fs) и тока (в % от Ic)] - Параметр доступен, если предварительно была выполнена команда **Tools\Tolerances** из меню **Special**.

Для записи кривой намагничивания необходимо воспользоваться командой **Save this model** меню **File**. Значения кривой можно сохранить также и в текстовом файле с помощью команды **Special\EMTP\Save in EMTP format**.

Список литературы

1. Егоренков Д.Л., Фрадков А.Л., Харламов В.Ю. Основы математического моделирования. Построение и анализ моделей с примерами на языке MatLab. СПб.: БалтГТУ, 1999. 188 с.
2. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент / Под. Ред. А.А. Самарского, М.: Наука, 1988. 169 с.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирование. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
4. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: Изд-во МГУ, 1984. 264 с.
5. Мартынов Н.Н., Иванов А.П. MatLab 5.x Вычисления, визуализация, программирование. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000 348 с.
6. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MatLab. Специальный справочник. СПб.: ПИТЕР, 2001. 475 с.
7. Гульяев А. К. Визуальное моделирование в среде MatLab: Учебный курс. СПб.: ПИТЕР, 2000. 486 с.
8. Лурье М.С., Лурье О.М. Применение программы MATLAB при изучении курса электротехники. Красноярск, СибГТУ, 2005. 196 с.
9. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ - МИФИ, 2004. — 496 с.
10. Кривилев А. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB. Лекс-Книга, 2005.
11. Дьяконов В.П.. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. СОЛОН-Пресс, 2004.
12. Вайс А.А., Лурье М.С., Лурье О.М. Курс лекций по электротехнике, часть III. Красноярск, СибГТУ, 2005, 132 с.

-
13. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967, 756 с.
14. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Ч. II, М.: Высшая школа, 1988, 662 с.
15. Лурье М.С., Лурье О.М. Электротехника. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании. Ч. 1. Красноярск, СибГТУ, 2005, 103 с.

Отв. редактор профессор А.А.Вайс
Редактор РИО Л.М. Буторина
Техн. редактор Т.П. Попова

Подписано в печать 25.01.2006 г.

Формат 60x84 1/16

Печать офсетная

Уч.-изд. л. 8,6

Заказ № 786

Бумага типографская

Усл. печ. л. 8,6

Тираж 200 экз.

Изд. № 78/8

Лицензия ЛР№020346 20.01.1997.
