

Владимирский государственный университет

Методические указания
к лабораторным работам по дисциплине
«Математическое моделирование объектов и систем управления»

Владимир 2011

Министерство образования и науки РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Кафедра управления и информатики в технических
и экономических системах

Составители:
С.И. Лиходеев

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент
кафедры вычислительной техники
Владимирского государственного университета
В.Б. Буланкин

Представлено 8 лабораторных работ, которые выполняются в среде MATLAB. Предназначены для использования в лабораторных работах студентами по дисциплине «Математическое моделирование объектов и систем управления», направление подготовки 220400 «Управление в технических системах» (магистратура).

Лабораторная работа № 1. Компьютерное моделирование при обработке опытных данных

Цель работы

Использование пакета «Curve Fitting Toolbox» для обработки экспериментальных данных.

1.1. Обзор возможностей Curve Fitting Toolbox

Curve Fitting Toolbox позволяет [3]:

- Работать с данными, заданными при помощи векторов в рабочей среде MATLAB, и, при необходимости, снабжать данные весами, так же задавая вектор их значений.
- Графически отображать исследуемые данные.
- Осуществлять предварительную обработку данных, исключая часть данных по некоторому правилу, по точкам в таблице, или при помощи мыши на графике, или наоборот оставляя часть данных для последующей обработки.
- Сглаживать и фильтровать данные различными способами.
- Приближать данные при помощи параметрических моделей, в которых искомые параметры могут входить как линейно, так и нелинейно. Модели выбираются из библиотеки моделей, или задаются пользователем. Целевая функция ошибки и методы, применяемые для ее минимизации, так же могут быть различными. Допускается задание ограничений на искомые значения параметров. Кроме параметрических моделей, возможна интерполяция данных сплайнами и приближение сглаживающими сплайнами.
- Отображать построенные приближения графически, форматировать графики и сохранять результаты в отдельных графических окнах.
- Вычислять различные критерии пригодности полученного приближения.
- Производить ряд операций с полученными приближениями (вычислять в заданных точках, дифференцировать интегрировать, проводить экстраполяцию), графически отображать результат.

1.2. Функции и приложение cftool с графическим интерфейсом

В состав Curve Fitting Toolbox входит приложение cftool с графическим интерфейсом пользователя, которое позволяет производить все вышеперечисленные действия, и функции, предназначенные для определения параметрической модели, подбора параметров, анализа пригодности приближения, операций с ним и графического отображения результата. Приложение cftool дает возможность пользователю:

- импортировать данные и веса, заданные в векторах рабочей среды MATLAB,
- экспортировать полученное приближение и анализ результатов в рабочую среду MATLAB;
- сохранять сессию в файле для продолжения работы;
- генерировать m-файл с файл-функцией, которая может быть использована для приближения других данных выбранным в cftool способом и для графического отображения результата без использования приложения cftool.

В одной сессии cftool допускается работа одновременно:

- с несколькими наборами данных;
- с различными приближениями для каждого набора;
- с подмножествами данных, полученных после исключения из основного подмножества по различным правилам.

Все функции Curve Fitting Toolbox могут быть условно разделены на несколько категорий.

Задание параметрических моделей и различных опций, подбор параметров и вычисление критериев пригодности приближения
fittype - выбор одной из стандартных параметрических и непараметрических моделей или создание произвольной параметрической модели.

`fitoptions` - задание различных опций, касающихся правил исключения, весов, допустимых границ значений искомым параметрам, начального приближения к параметрам, опций вычислительных алгоритмов, применяемых для минимизации целевой функции (ошибки приближения).
`fit` - основная функция, выполняющая подбор параметров, в которой задаются исходные данные, параметрическая модель, опции (см. выше `fitoptions`); она возвращает: полученную параметрическую модель с найденными значениями параметров, и различные критерии пригодности полученного приближения.

`cfit` - создание параметрической модели с заданными значениями параметров (без их определения при помощи функции `fit`).

Информация о моделях и объектах, создаваемых функциями Curve Fitting Toolbox

`cflibhelp` - получение информации о стандартных параметрических моделях, входящих в Curve Fitting Toolbox.

`disp` - получение информации об объектах, создаваемых функциями Curve Fitting Toolbox.

Задание и получение значений свойств объектов, создаваемых функциями Curve Fitting Toolbox

`get` - получение свойств объектов.

`set` - задание свойств объектов.

Получение статистической информации о данных и предварительная обработка данных

`excludedata` - поиск данных, которые должны быть исключены из исходного набора в соответствии с выбранным правилом.

`smooth` - сглаживание данных с использованием различных способов.

`datastats` - нахождение минимального и максимального значений, среднего, стандартного отклонения.

Работа с полученным приближением

`confint` - вычисление доверительных интервалов для вычисленных параметров модели.

`predint` - нахождение интервалов предсказаний наблюдаемых значений с заданной вероятностью.

`differentiate` - дифференцирование построенной параметрической модели.

`integrate` - интегрирование построенной параметрической модели.

`feval` - вычисление значений параметрических моделей.

`plot` - построение графиков данных, параметрических моделей, ошибок.

Мы сначала рассмотрим основные этапы работы в приложении `cftool`, а затем обратимся к использованию функций, входящих в состав Curve Fitting Toolbox.

1.3. Основные этапы работы в приложении `cftool`

Рассмотрим пример. Сгенерируем данные и запустим приложение `cftool`, для чего достаточно набрать в командной строке MATLAB его имя:

```
>> XData=0:0.15:10;
>> YData=6*sin(XData)+0.15*randn(size(XData));
>> cftool
```

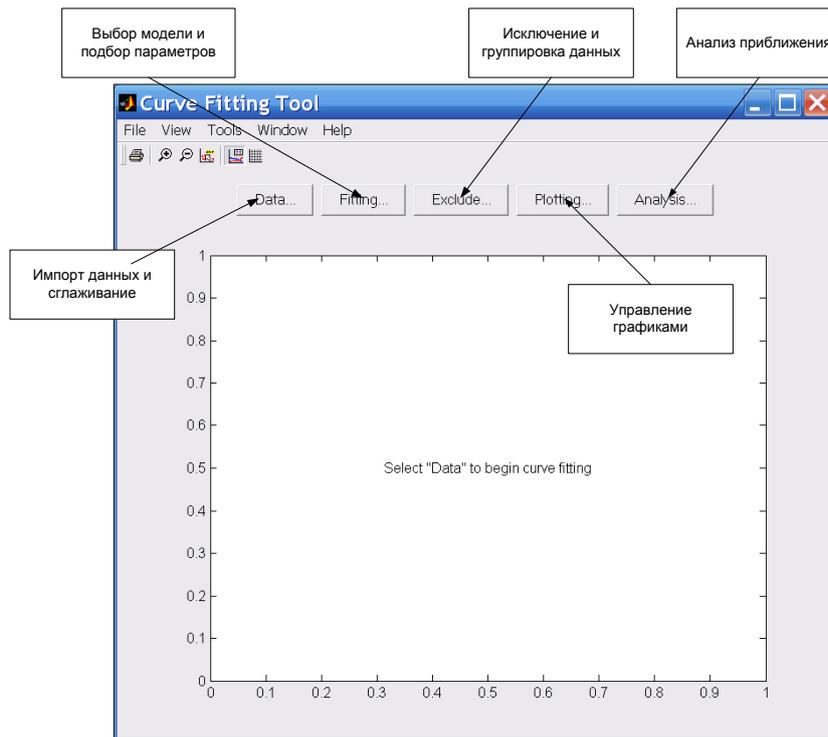


Рис.8.1

Появляется окно приложения (рис. 8.1)

Основные этапы решения задачи о подборе параметров параметрической модели, приближающей данные, в приложении cftool таковы:

- Импорт данных (кнопка Data);
- Построение, при необходимости, правил исключения некоторых значений, или исключение вручную в таблице, или группировка данных для приближения их частей различными моделями (кнопка Exclude)
- Выбор стандартной параметрической или непараметрической модели, входящей в Curve Fitting Toolbox, или создание собственной модели, подбор параметров с предварительным указанием их границ и начальных приближений, целевой функции и методов решения, а также просмотр полученных значений и информации о пригодности полученного приближения (кнопка Fitting).
- Анализ данных, включающий вычисление полученного приближения в заданных точках (включая экстраполяцию), его интегрирование и дифференцирование (кнопка Analysis).

Кроме того, возможно:

- Оставить только те графики данных и моделей, которые нужны в данный момент (кнопка Plotting).
- Форматировать графики данных и построенных параметрических моделей (контекстное меню линий графиков, инструменты окна cftool, меню Tool).
- Отобразить графически интервалы предсказаний наблюдаемых значений с заданной вероятностью (меню View, пункты Prediction Bounds, Confidence Level).
- Отобразить графически остатки (меню View, пункт Residuals).
- Экспортировать приближения и результаты их анализа в рабочую среду MATLAB (эта возможность есть в окнах, в которых строится приближение и проводится анализ).
- Проводить сглаживание и фильтрацию данных (кнопка Data). Однако, необходимо иметь ввиду, что сглаживание уничтожает стандартное предположение регрессионного анализа о том, что распределение ошибки в исходных данных подчиняется нормальному закону. Если построена достаточно хорошая модель, то остатки (разность значений данных и приближения) также должны подчиняться нормальному закону. Поэтому сглаживание следует использовать как инструмент для получения первоначального предположения о

возможной параметрической модели в случае зашумленных данных, а строить модель следует для несглаженных исходных данных.

- Сгенерировать файл-функцию, которую можно использовать впоследствии автономно от приложения cftool для получения построенного в приложении cftool приближения (меню File, пункт Generate M-file).
- Сохранить сессию и при следующих запусках приложения cftool восстановить ее (меню File, пункты Save Session, Load Session), а так же удалить все данные, и полученные результаты (меню File, пункт Clear Session).
- Вывести результаты в отдельное графическое окно (меню File, пункт Print to Figure).
- Напечатать результаты (меню File, пункт Print).

Импортируем наши сгенерированные данные, которые мы ввели выше в вектора XData и YData рабочей среды, в приложение cftool и дадим имя Exemp нашему набору данных. Для этого следует нажать кнопку Data. Появляется одноименное окно Data, назначение его элементов управления приведено на рис.8.2.

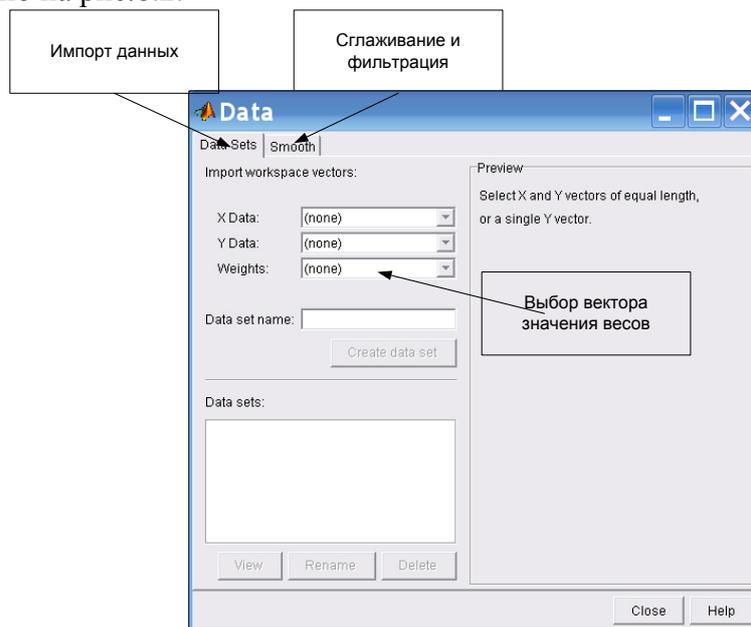


Рис.8.2

В раскрывающихся списках X Data и Y Data следует выбрать имена глобальных переменных рабочей среды MATLAB, т.е. XData и YData, соответственно. После этого на правой панели окна Data строится примерный график выбранных данных.

Раскрывающийся список Weights предназначен для выбора вектора, содержащего веса. Если это не требуется, то веса можно не указывать, по умолчанию они все равны единице.

После выбора векторов с данными следует задать имя множеству данных. Для этого следует ввести его имя Exemp в строку ввода Data set name и нажать кнопку Create data set (она становится доступной после выбора векторов, содержащих данные).

С созданным множеством данных можно проделать следующие операции (предварительно следует выделить его имя в списке Data sets):

Отобразить таблицу данных вместе с графиком в отдельном окне, для чего следует нажать кнопку View

В раскрывающемся списке Exclusion rules окна View Data Set можно выбирать правила исключения, пока он пуст, поскольку никаких правил мы не задавали.

Переименовать выделенный набор данных, нажав на кнопку Rename, после чего появится диалоговое окно, в которое нужно будет ввести новое имя (пока этого делать не нужно, мы продолжим работу с ним).

Удалить выделенный набор данных, нажав на кнопку Delete (этого, очевидно, тоже делать сейчас не нужно).

Множество данных создано, его график отображился на осях основного окна приложения cftool. В окне Data можно также осуществлять сглаживание данных (вкладка Smooth), выбирая различные способы сглаживания.

После того, как создано множество данных, можно переходить к приближению данных одной из стандартных параметрических моделей, если не требуется создание правил исключения или применение процедуры сглаживания для получения представления о возможной параметрической модели в случае сильно зашумленных данных.

Для перехода к диалоговому окну, предназначенному для выбора модели и подбора параметров, следует нажать кнопку Fitting в основном окне приложения cftool. Появляется диалоговое окно Fitting, в котором следует нажать кнопку New fit, после чего все элементы управления данного окна становятся доступными и оно приобретает вид, приведенный ниже на рисунке 8.3

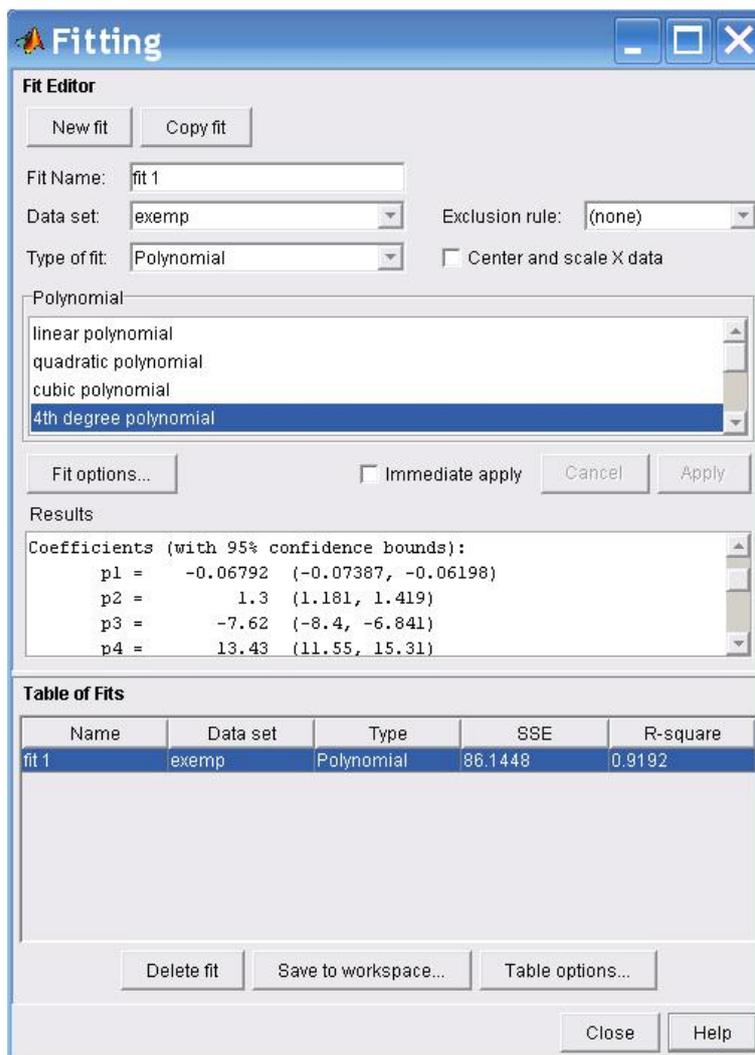


Рис.8.3

Вместо предлагаемого по умолчанию имени приближения fit1, можно задать другое имя.

Выберем в списке первую модель и нажмем кнопку Apply. После вычисления коэффициентов приближения в окне Results выводится следующая информация: информация о модели; найденные значения коэффициентов вместе с доверительными интервалами, соответствующими уровню вероятности 95%; вычисленные критерии пригодности приближения. На оси основного окна приложения cftool вывелся график приближения при найденном значении параметров, а в таблицу Table of Fits выводится имя приближения, имя набора данных, тип параметрической модели Sum of Sin Function и найденные значения критериев пригодности приближения.

Перед началом подбора параметров можно устанавливать разные начальные приближения. Для этого следует нажать кнопку Fit Options и изменить параметры.

Для удаления приближения достаточно выбрать его в таблице Table of Fits и нажать кнопку Delete.

Curve Fitting Toolbox содержит ряд стандартных параметрических и непараметрических моделей, которые выбираются в диалоговом окне Fitting. Для перехода в это окно следует нажать кнопку Fitting в основном окне приложения cftool.

Всего имеется 10 стандартных типов для параметрического и непараметрического приближения

Пользователь приложения cftool имеет возможность создавать собственные модели, в которые искомые параметры входят как линейно, так и нелинейно. Для создания собственной модели следует в диалоговом окне Fitting в раскрывающемся списке Type of fit выбрать пункт Custom Equations и нажать на кнопку New equation. После этого появляется диалоговое окно Create Custom Equation, содержащее две вкладки:

- Linear Equation - для задания параметрической модели, линейно зависящей от искомых параметров
- General Equation - для задания произвольной параметрической модели, в которую параметры могут входить нелинейно.

Для задания линейной параметрической модели следует выбрать независимую переменную в строке ввода Independent variable (можно оставить переменную x , предлагаемую по умолчанию) и последовательно добавлять функции при искомым коэффициентах. Для добавления каждой следующей функции требуется нажать кнопку Add a term.

После приближения данных стандартной параметрической моделью или моделью, заданной пользователем, оценка качества приближения может быть проведена как графически, так и с использованием различных критериев пригодности приближения: SSE (сумма квадратов ошибок), R-square (критерий R-квадрат), Adjusted R-square (уточненный R-квадрат), RSME (корень из среднего для квадрата ошибки). Кроме того, можно вычислить доверительные интервалы для найденных значений параметров модели, соответствующие различным уровням вероятности, и доверительные полосы для приближения и данных, так же соответствующие различным уровням вероятности.

Задание

1. Выбрать объект и загрузить в рабочую среду MATLAB его массивов данных.
2. Построить модель объекта на основе его экспериментальных данных для двух стандартных моделей.
3. Осуществить приближение данных моделью заданной пользователем.
4. Провести оценку качества приближения моделей.
5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое идентификация объекта?
2. Как получить аналитическое выражение передаточной функции исследуемого объекта?
3. С какой целью используются критерии пригодности?

Лабораторная работа 2. «Исследование статических и динамических характеристик асинхронного двигателя»

Цель работы: исследование статических и динамических характеристик АД с короткозамкнутым ротором.

Указание к выполнению работы:

1. Снять механические и рабочие характеристики машины в двигательном режиме.
2. Снять динамические характеристики машины в двигательном режиме.

На рисунке 1.1 представлен стенд для проведения лабораторной работы.

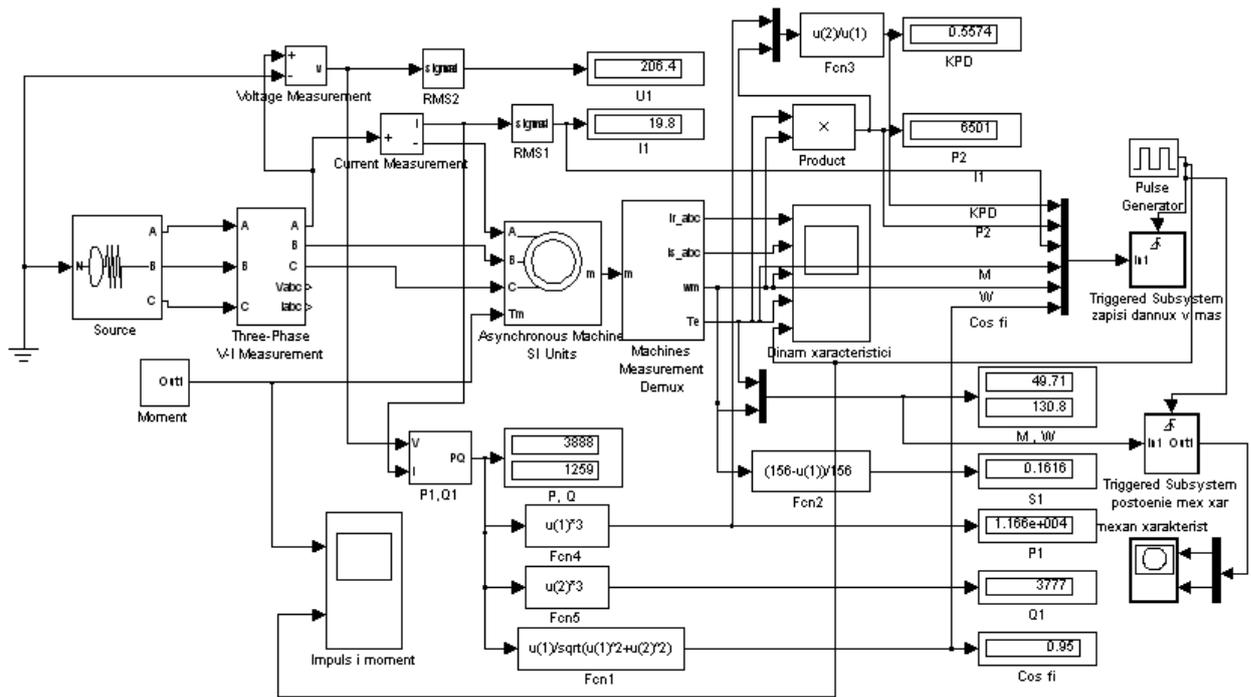


Рисунок 1.1 - Модель для исследования асинхронной машины

Данная модель содержит следующие блоки:

- 1) источник переменного трехфазного напряжения Source из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/Three-Phase Library/Inductive source with neutral;
- 2) измеритель трехфазного напряжения и тока Three-Phase V-I Measurement из библиотеки SimPowerSystems/Measurements/ Three-Phase V-I Measurement
- 3) исследуемая трехфазная асинхронная машина Asynchronous Machine SI Units из библиотеки SimPowerSystems/Machines/ Asynchronous Machine SI Units;
- 4) измеритель активной реактивной мощности P1, Q1 из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/ Measurements/ Active & Reactive Power;
- 5) блок Display для количественного представления измеряемых параметров
И блок Scope для наблюдения тока ротора и статора, а также скорости и момента асинхронной машины , которые находятся в библиотеке Simulink\Sinks;
- 6) блок Step для задания нагрузочного момента из библиотеки Simulink\Source;
- 7) блок Machines Measurement Demux из библиотеки SimPowerSystems/Machines;
- 8) блок Product для умножения двух сигналов из библиотеки Simulink\Math Operations;
- 9) блок Fcn для задания математических формул из библиотеки Simulink\User-Defined Functions;
- 10) блоки Voltage Measurement и Current Measurement для измерения тока и напряжения из библиотеки SimPowerSystems/Measurements;
- 11) блок RMS для перевода тока и напряжения RMS формат из библиотеки SimPowerSystems/Extra Library/ Measurements;
- 12) блок ground для заземления из библиотеки SimPowerSystems/connectors;
- 13) блок Mux объединяющий два сигнала в один векторный из библиотеки Simulink\Signal Routing.

14) Блок для генерирования импульсов Pulse Generator, необходим для выработки импульсов, во время заднего фронта которых происходит запись данных в массив и передача их в рабочую область MATLAB. Расположен в библиотеке Simulink\Source;

15) Графо построитель XY Graph (mechan charakterist) который служит для построения механической характеристики. Расположен в библиотеке Simulink\sinks;

16) Сумматор sum из подсистемы Moment, служащий для суммирования сигналов, из библиотеки Simulink\Math Operations;

17) Блок записи данных в массив To Workspace из подсистемы Triggered Subsystem записи данных в массив, из библиотеки Simulink\Source;

18) Блоки входа выхода в подсистему in и out а также триггеры Trigger необходимые для нормального функционирования подсистемы из библиотеки Simulink\Ports & Subsystems.

Рисунок. 1.2 - Окно параметров асинхронного двигателя

Окно с параметрами асинхронной машины рисунок. 1.2 содержит следующие данные:

- 1) тип ротора (Rotor type), в выпадающем меню этого поля можно задать либо короткозамкнутый, либо фазный ротор;
- 2) система отчета при анализе (Reference frame);
- 3) мощность, номинальное действующее линейное напряжение и частота;
- 4) параметры схемы замещения статора;
- 5) параметры схемы замещения ротора;
- 6) параметры ветви намагничивания;
- 7) момент инерции, коэффициент вязкого трения, число пар полюсов;
- 8) начальные условия для моделирования (скольжение, положение ротора, токи статора и их начальные фазы).

Окно настройки параметров универсального блока измерения переменных машин показано на рисунке. 1.3. В выпадающем меню поля Machine type задается тип машины. Флажками выбираются переменные для измерения.

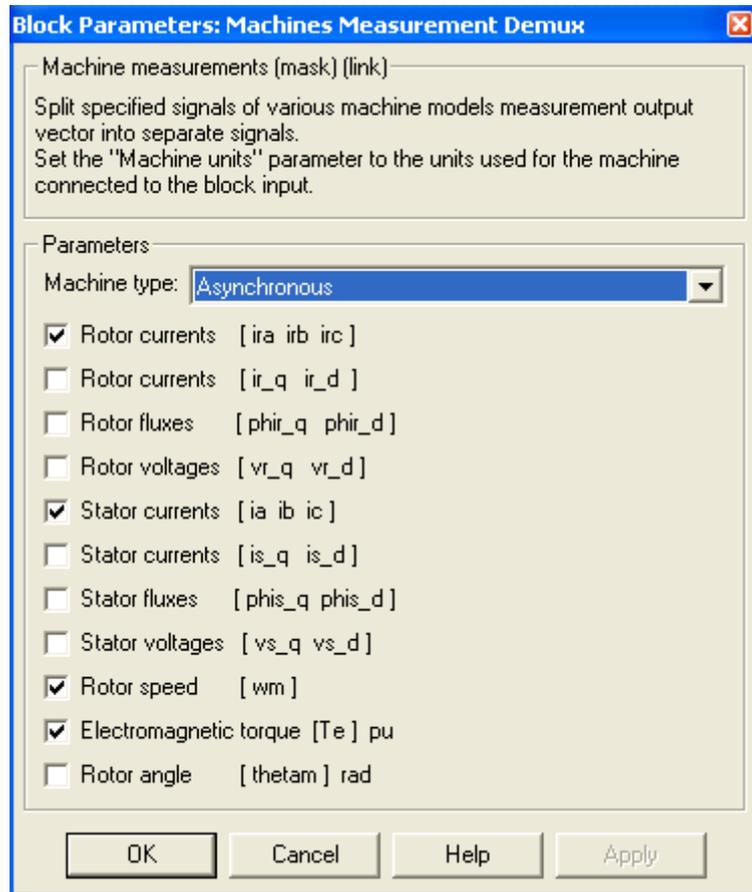


Рисунок. 1.3 - Окно настройки параметров блока измерения

Окно настройки параметров источника питания представлено на рис. 1.4. В полях окна задаются:

- 1) амплитуда фазного напряжения источника (В);
- 2) начальная фаза в градусах;
- 3) частота (Гц);
- 4) внутреннее сопротивление (Ом) и индуктивность источника (Гн).

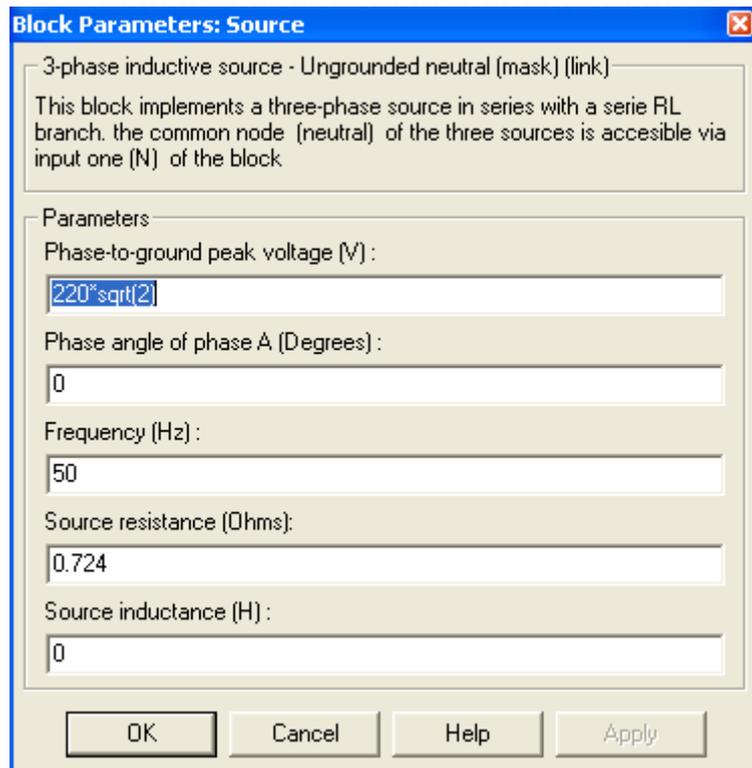


Рисунок. 1.4 - Окно настройки параметров трехфазного источника питания

Напряжения и частота источника должны соответствовать параметрам асинхронной машины.

Окно настройки параметров блока измерения активной и реактивной мощности показано на рисунке. 1.5.

Здесь задается только один параметр частота, которая должна быть равна частоте источника питания.

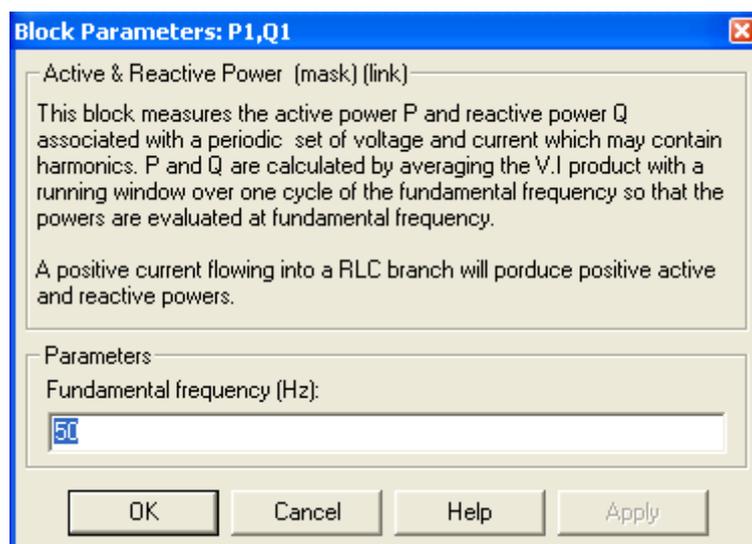


Рисунок 1.5 - Окно настройки блока измерения мощности

Блоки Fun1,2,3,4,5 реализуют следующие формулы:

а) Fun1 - блок необходим для автоматического вычисления $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (1.1)$$

где, P_1 и Q_1 активная и реактивная мощность

б) Fun2 - блок необходим для нахождения скольжения S

$$S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad (1.2)$$

где, ω_1 - частота вращения магнитного поля статора, а ω - частота вращения ротора.

в) Fun3 - служит для нахождения к.п.д.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.3)$$

г) Fun4 – функция необходима для вычисления активной мощности P_1

д) Fun5 - функция необходима для вычисления реактивной мощности Q_1

Настройка дисплея показана на рисунке 1.6. В полях окна настройки указывается формат представления числовых результатов, поле Decimation (разбивка) задается число шагов вычисления, через которое значение выводится на дисплей. Установка в поле Sample time значения -1 синхронизирует работу блока с шагом вычисления.

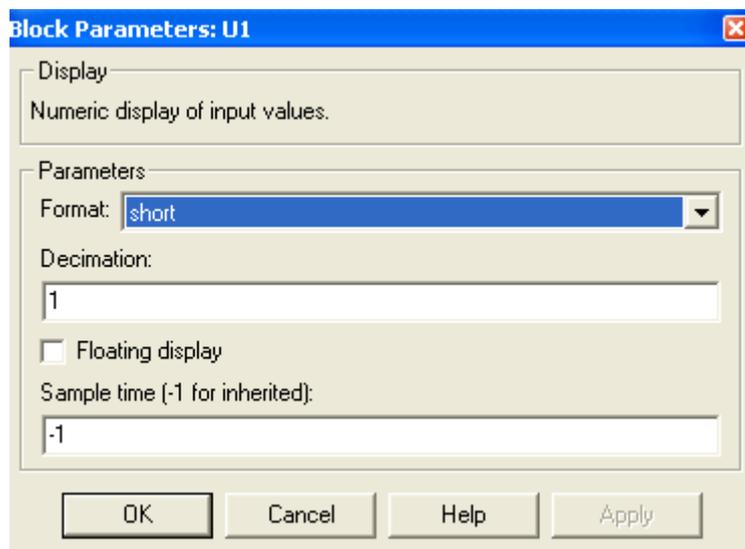


Рисунок 1.6 - Окно настройки параметров дисплея

Окно настройки блока Mux, объединяющего два сигнала в один векторный, показано на рисунке 1.7. В полях окна настройки задаются число входов и внешний вид представления блока.

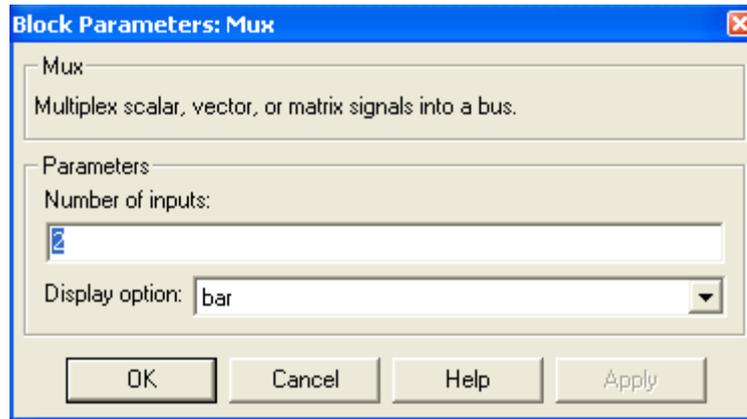


Рисунок 1.7 - Окно настройки блока Mux

Окно с настройками блока Three-Phase V-I Measurement представлено на рисунке 1.8.

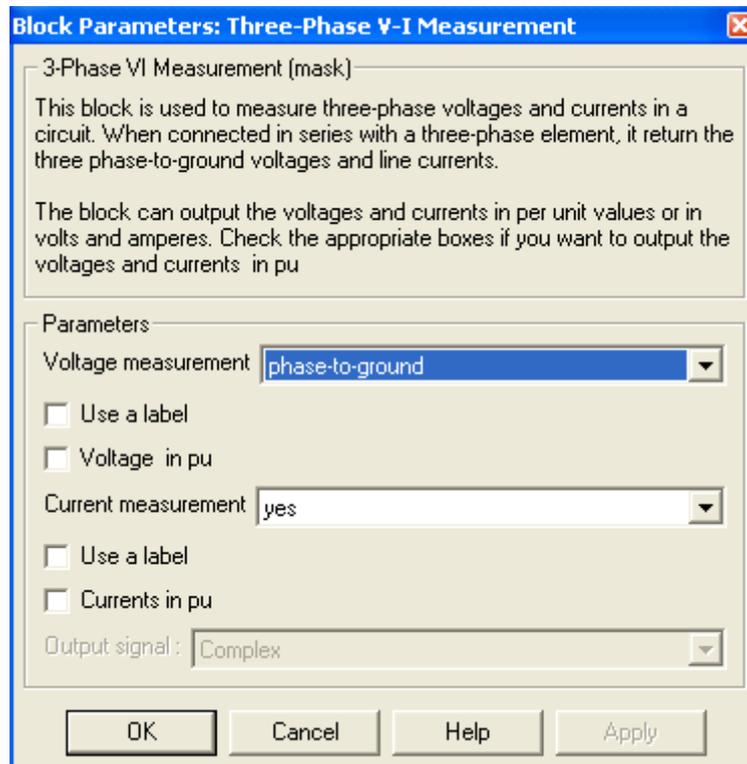


Рисунок 1.8 - Окно с настройками блока Three-Phase V-I Measurement

Настройки блока Step который служит для ручного задания нагрузочного момента, показан на рисунке 1.9.

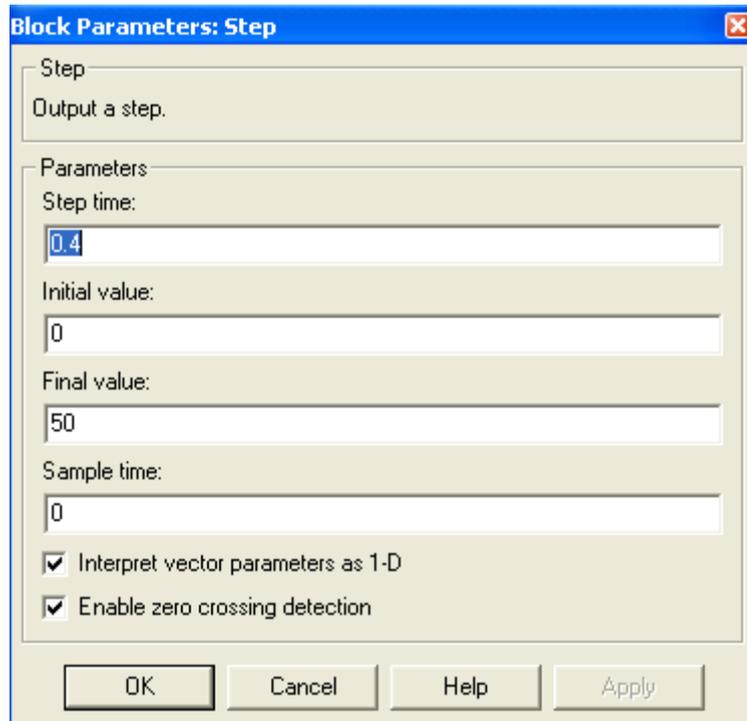


Рисунок 1.9 - Параметры блока Step

Окно настройки блока Pulse Generator представлено на рисунке 1.10. Каждые 0.4 секунды Pulse Generator вырабатывает импульс единичной амплитуды необходимые для записи данных в массив.

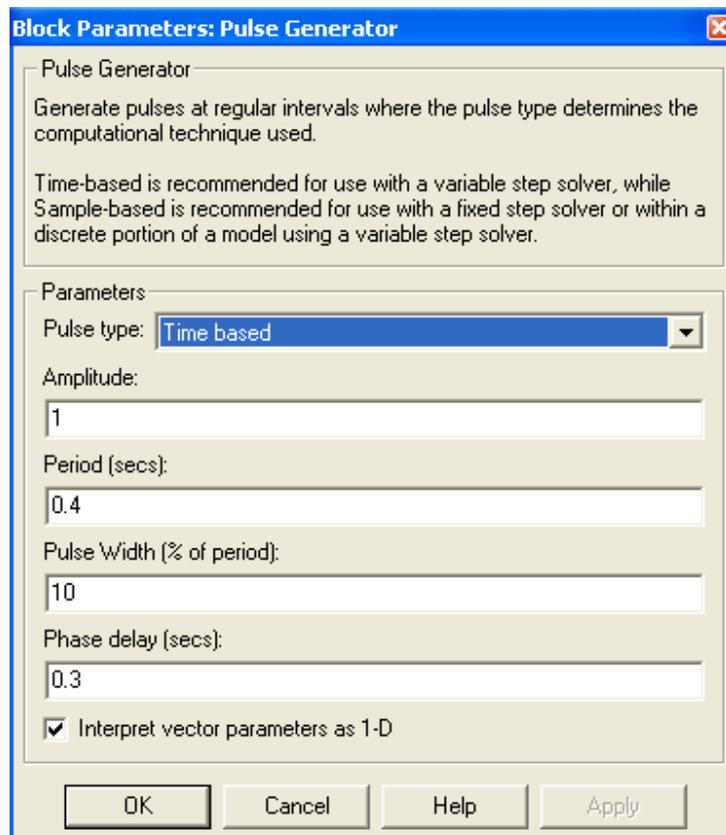


Рисунок 1.10 - Окно настройки блока Pulse Generator

На рисунке 1.11 показаны настройки блока XY Graph (mexan charakterist).

Благодаря ему на экран выводится график механической характеристики, представленный на рисунке 1.12.

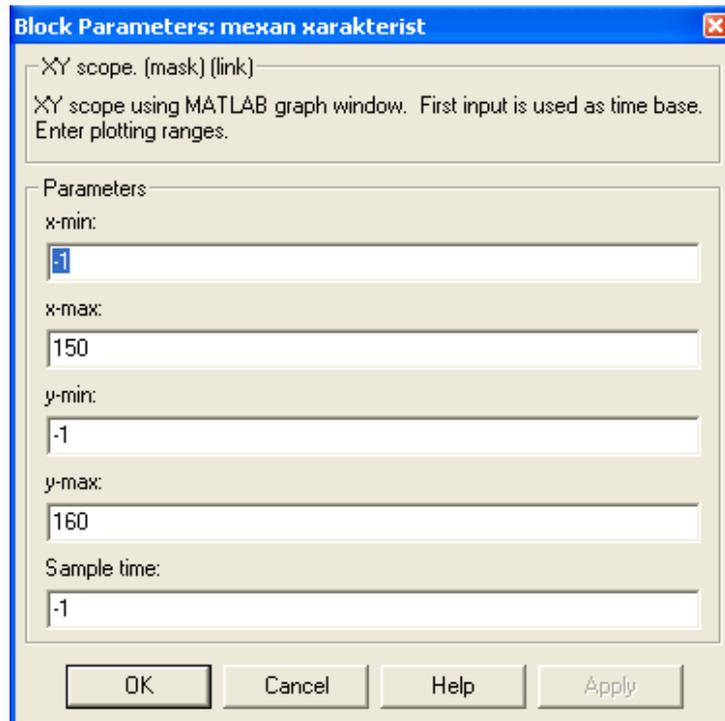


Рисунок 1.11 - Настройки блока XY Graph

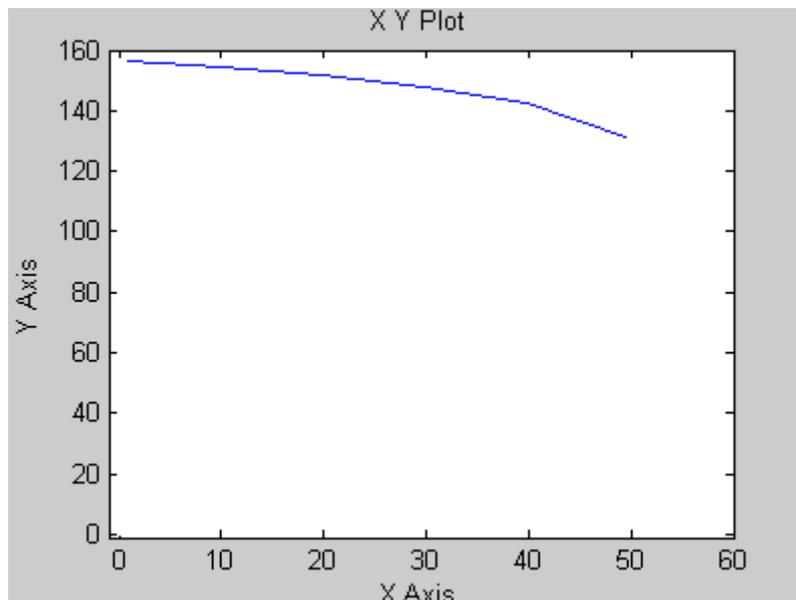


Рисунок 1.12 - График механической характеристики

Для автоматизации процесса измерений в схему были добавлены три subsystemы:

1) Subsystem Moment служит для задания диапазона нагрузочного момента от (1..50Нм), было использовано семь значений нагрузочного момента чтобы по ним можно было построить график механической характеристики представленной на рисунке 1.12. Subsystem Moment показана на рисунке. 1.14.

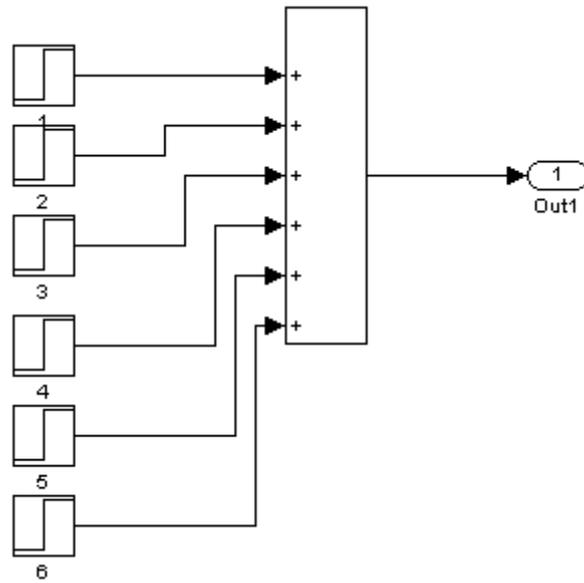


Рисунок 1.14 - Субсистема Moment

Работа subsystemы Moment представлены на рисунке 1.15

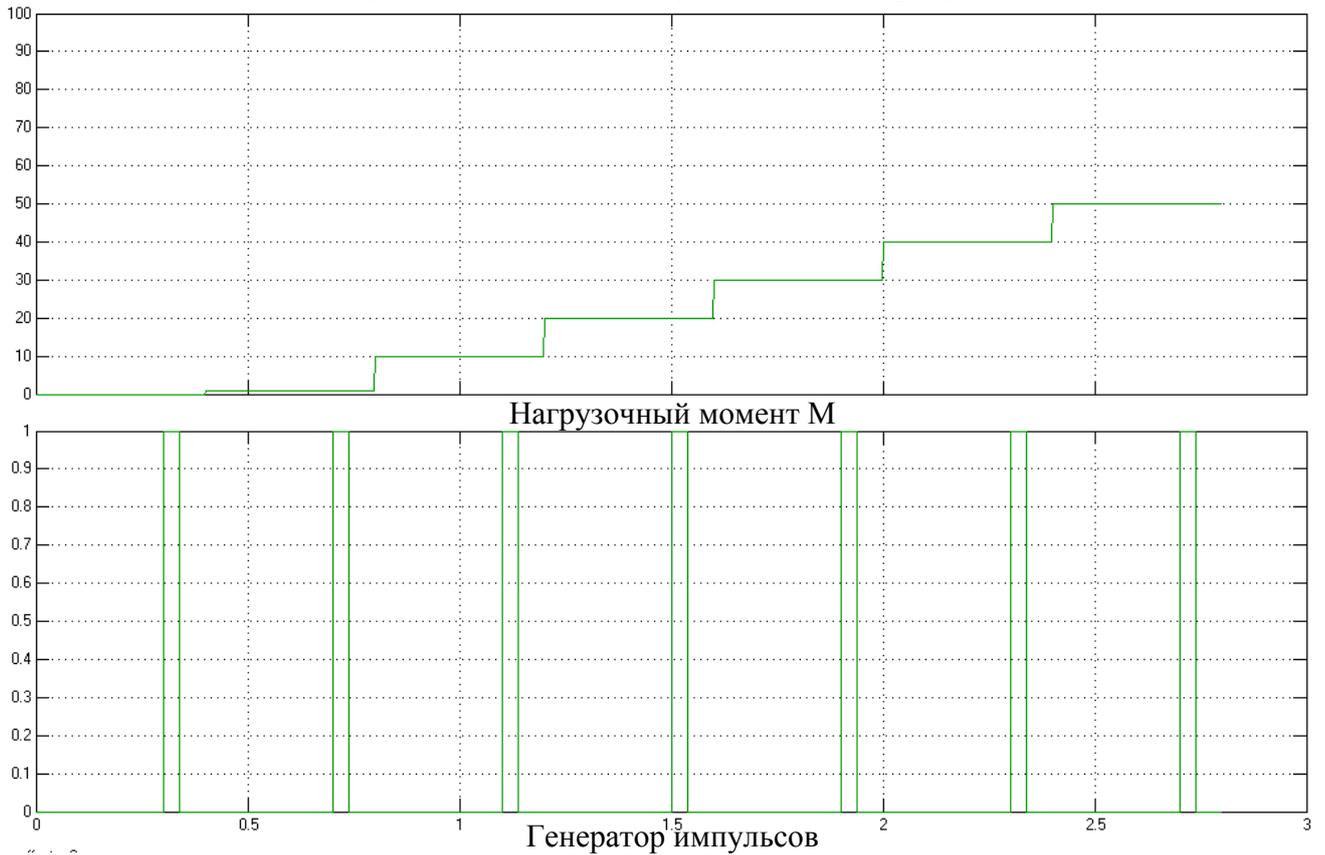


Рисунок 1.15 - Работа subsystemы Moment

Параметры блока Sum для суммирования сигналов нагрузочного момента показано на рисунке 1.16.

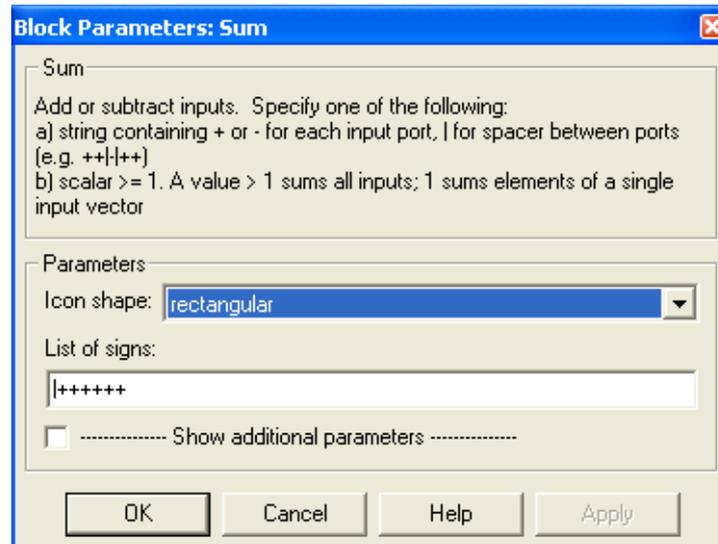


Рисунок 1.16 - Параметры блока Sum

2) Субсистема Triggered Subsystem запись данных в мас служит для записи основных данных по которым строятся все характеристики в массив это очень удобно так как эти данные не придется снимать и записывать вручную. Эта субсистема показана на рисунке 1.17.

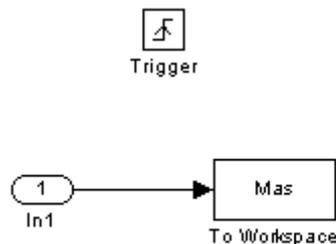


Рисунок 1.17 - Субсистема Triggered Subsystem запись данных в мас

Параметры блока To Workspace представлены на рисунке 1.18.

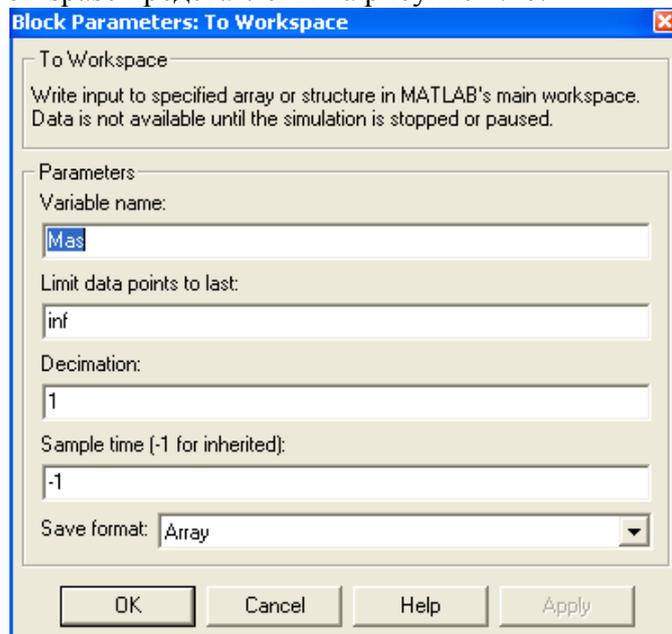


Рисунок 1.18 - Параметры блока To Workspace

3) Субсистема Triggered Subsystem положение мех хар служит для передачи данных момента и частоты на графо построитель в определенный момент когда подается импульс. Субсистема представлена на рисунке 1.19.

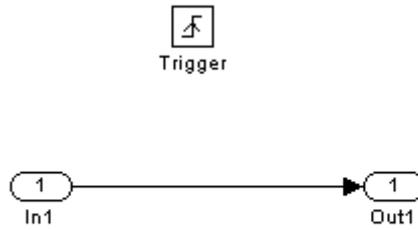


Рисунок 1.19 - Субсистема Triggered Subsystem postoenie mex har

Параметры асинхронной машины для выполнения работы задаются преподавателем. В результате выполнения работы стенда в рабочей области MATLAB появляется массив данных (Рис 1.20).

	η	P_2	I_1	M	ω	$\cos\varphi$
	1	2	3	4	5	6
1	0.46506	513.75	3.9925	3.2575	157.71	0.42595
2	0.37897	143.04	3.8185	0.91286	156.69	0.15223
3	0.82704	1525.1	4.5539	9.8627	154.64	0.62524
4	0.83744	3005.7	6.5539	19.805	151.76	0.84776
5	0.791	4412.3	9.4412	29.809	148.02	0.92358
6	0.70697	5676.5	13.389	39.836	142.5	0.94849
7	0.56327	6498	19.568	49.494	131.29	0.95147

Рисунок 1.20 - Массив данных основных параметров схемы

Где, I_1 – тока статора, ω - скорость вращения ротора, M – нагрузочный момент, $\cos\varphi$ - коэффициент мощности двигателя, P_2 – мощность нагрузки на валу, КПД – коэффициент полезного действия.

По данным из этого массива необходимо построить рабочие и механические характеристики АД (пример рисунок 1.22 и рисунок 1.23). Это удобно сделать в программе Excel.

$n_2; M_2; I_1; \cos\varphi_1$

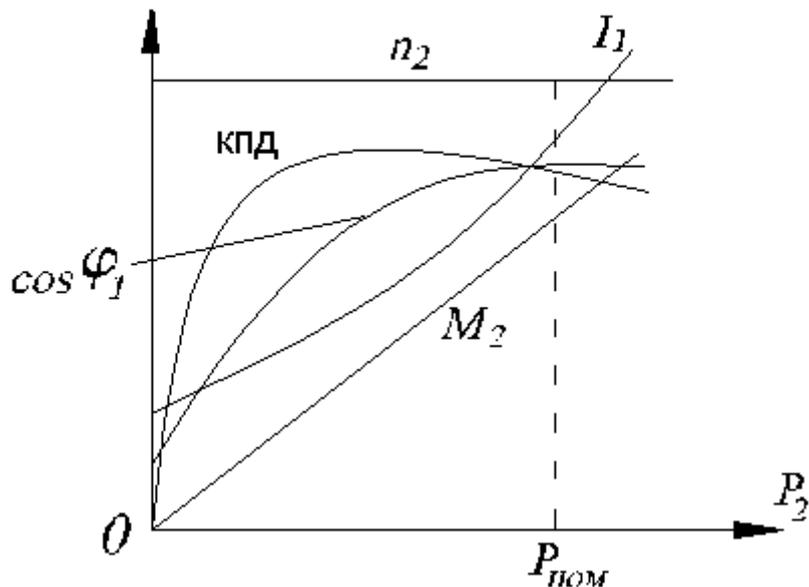


Рисунок 1.21 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя

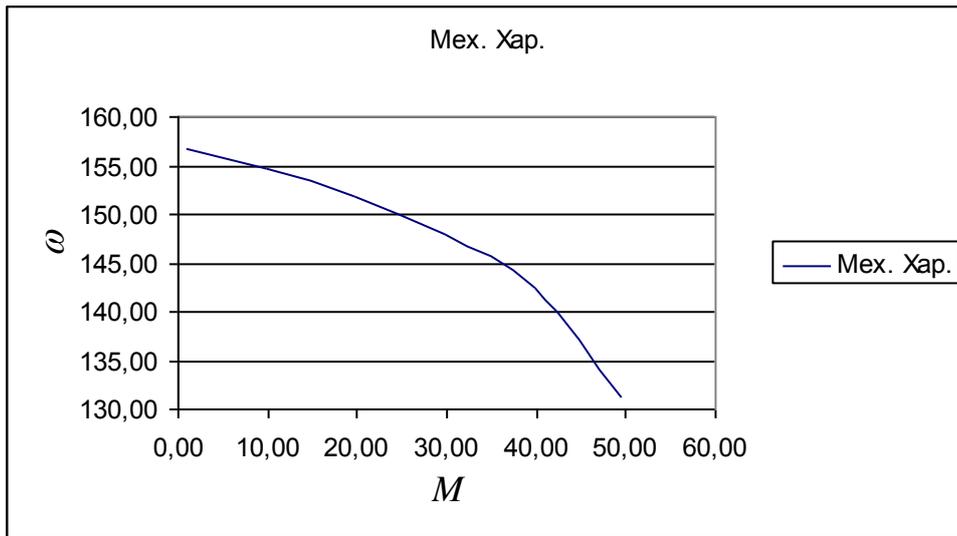


Рисунок 1.22 - Механическая характеристика асинхронного двигателя

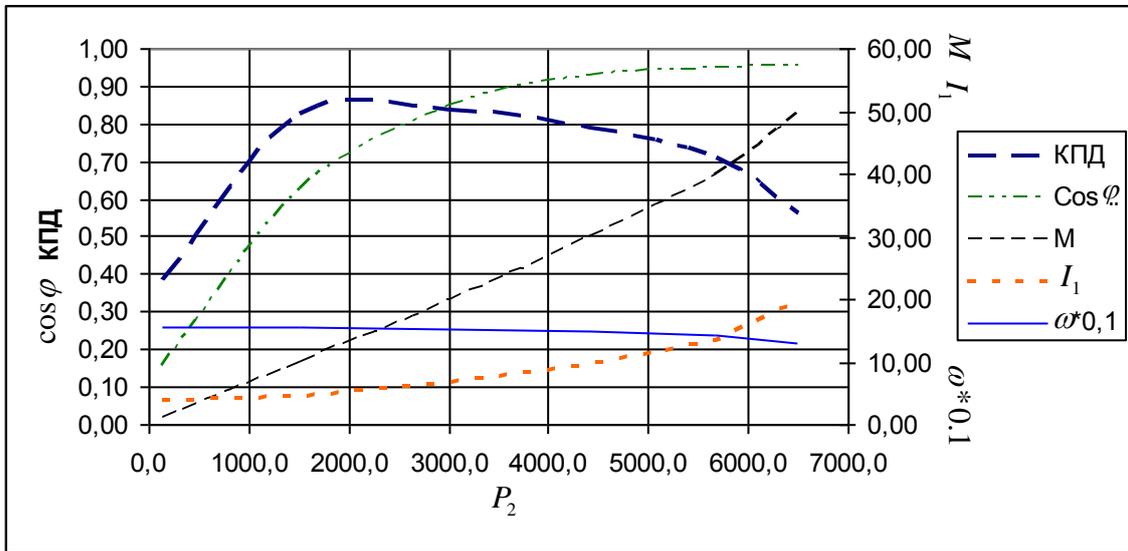


Рисунок 1.23 - Рабочая характеристика асинхронного двигателя

Динамические характеристики снимаются со Score рисунок 1.24.

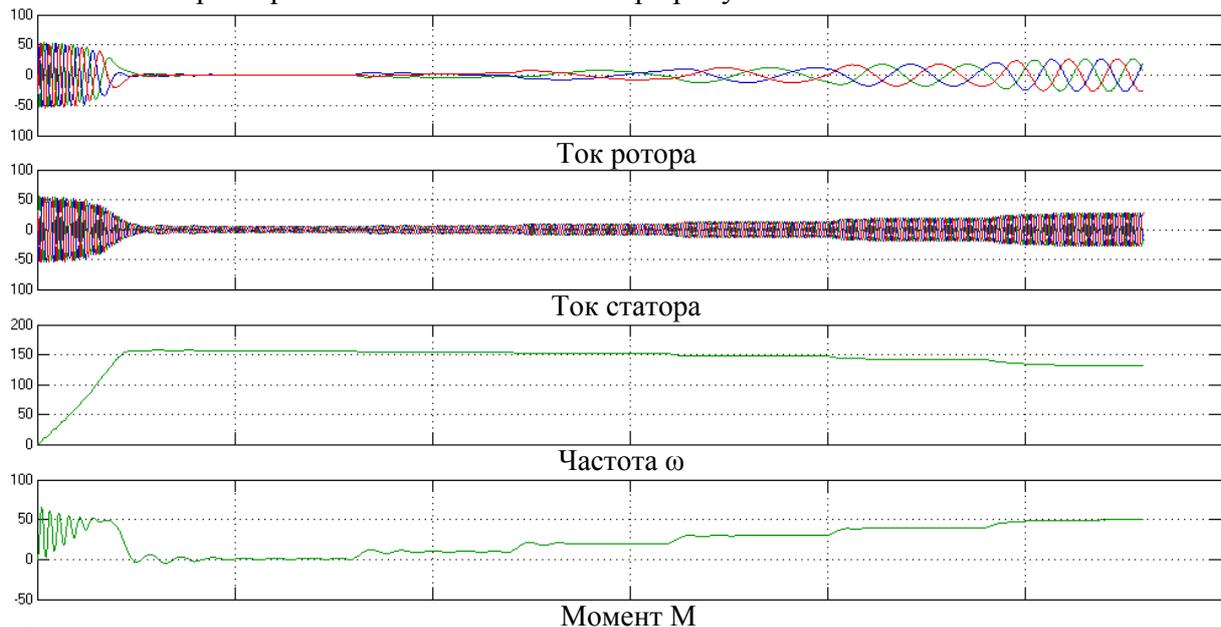


Рисунок 1.24 - Динамических характеристик асинхронного двигателя

Задание

1. Рассчитать и построить графики механических и рабочих характеристик АД.
2. Рассчитать и построить графики динамических характеристик АД.

Контрольные вопросы

1. Предложите несколько моделей для изменения нагрузки АД.
2. С какой целью строятся рабочие характеристики АД?
3. Каким образом можно учесть насыщение в исследуемой модели АД?
4. Какие выводы можно сделать по динамическим характеристикам АД?

Лабораторная работа 3. «Исследование статических и динамических характеристик двигателя постоянного тока»

Цель работы: исследование статических и динамических характеристик двигателя постоянного тока.

Указание к выполнению работы:

1. Снятие статических характеристик при изменении напряжения питания.
2. Снятие статических характеристик при изменении при изменении сопротивления в цепи якоря.
3. Снятие статических характеристик при изменении при изменении потока возбуждения.
4. Снятие рабочих характеристик.
5. Снятие динамических характеристик при изменении момента сопротивления.
6. Снятие динамических характеристик при изменении напряжения питания.
7. Снятие динамических и пусковых характеристик при прямом и реостатном пуске электродвигателя.

Описание виртуальной лабораторной установки

Модель двигателя в среде MATLAB включает в себя источники постоянного напряжения (DC Voltage Source для питания якоря машины, DC Voltage Source 1 для питания обмотки возбуждения из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources), подсистему Moment для задания момента нагрузки, саму машину постоянного тока и осциллографы Scope для визуального наблюдения процессов из библиотеки Simulink/Sinks. Добавляем блок Pulse Generator, который находится в библиотеке Simulink/Sources. Также добавляем уже готовую подсистему Enabled and Triggered Subsystem, которая фиксирует снимаемые значения с системы, формирует матрицу Mas со снятыми параметрами, эта матрица находится в окне Workspace главного окна MathLab. На вход подсистемы Enabled and Triggered Subsystem заводим параметры частоты и момента с двигателя.

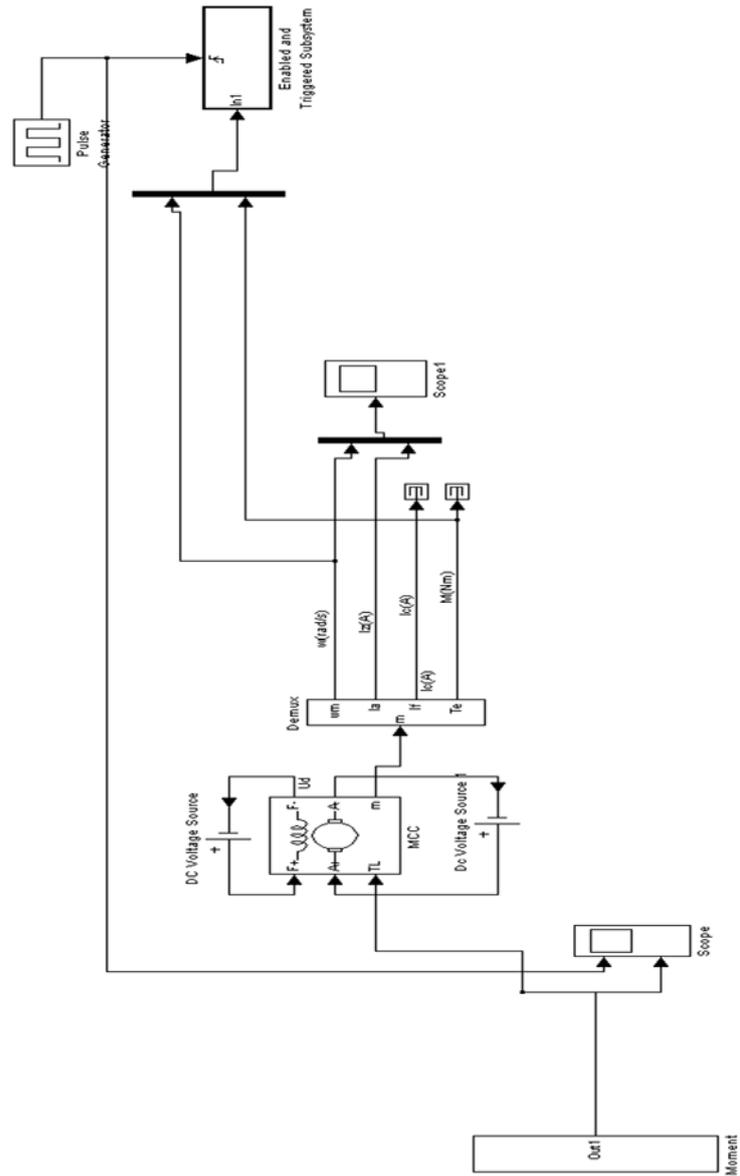


Рис. 1 – Виртуальный стенд для снятия статических характеристик двигателя постоянного тока
 Субсистема Moment приведена на рис. 2.

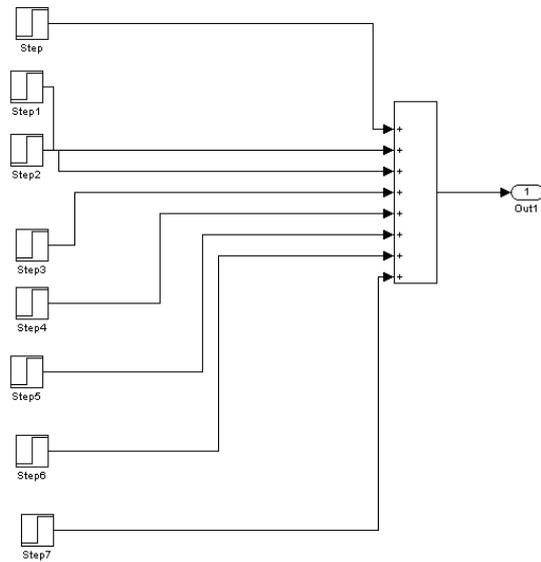


Рис. 2 – Субсистема Moment

Субсистема состоит из блоков Step, находящихся в библиотеке Simulink/Sources и блока Sum из библиотеке Simulink/Sum.

Готовая модель двигателя находится в Simulink в библиотеке SimPowerSystems/Machines и называется DC Machine (рис. 3).

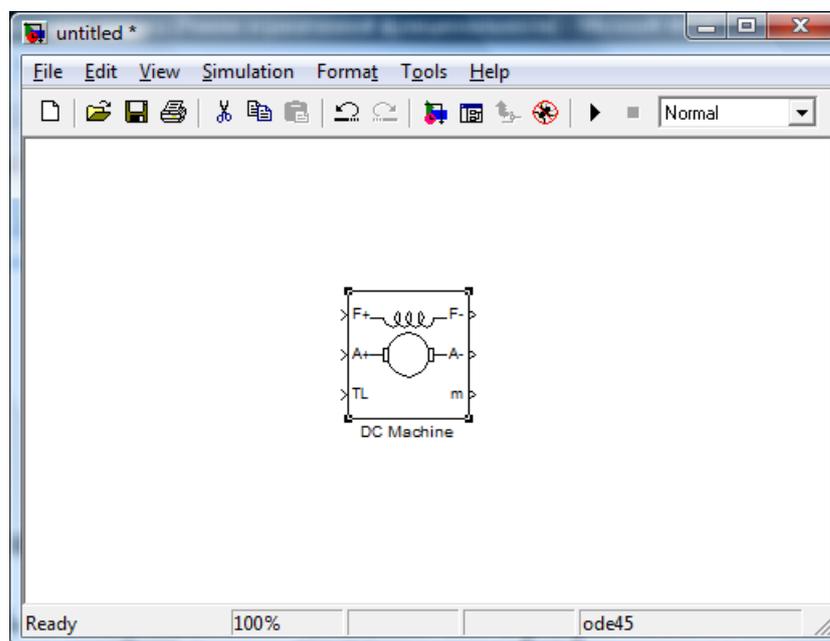


Рис. 3 – Модель машины постоянного тока с независимым возбуждением

Цепь якоря и цепь возбуждения видны из графического начертания блока, на вход TL подаётся момент нагрузки, выход m предназначен для измерения и наблюдения переменных состояний машины в следующей последовательности: угловая скорость (рад/сек), ток якоря (А), ток возбуждения (А), электромагнитный момент (Нм). В полях настройки машины (рис. 2.4) задаются:

- параметры обмотки якоря – R_a (Ом), L_a (Гн);
- параметры обмотки возбуждения - R_f (Ом), L_f (Гн);
- коэффициент L_{af} ,
- суммарный момент инерции машины и нагрузки – J (кгм²). Следует подчеркнуть, что параметры (L_{af} , J) важны при исследовании переходных процессов. На установившиеся режимы они не влияют;
- коэффициент вязкого трения - B_t (Нм*с);
- коэффициент сухого трения - T_f (Нм);
- начальная скорость.

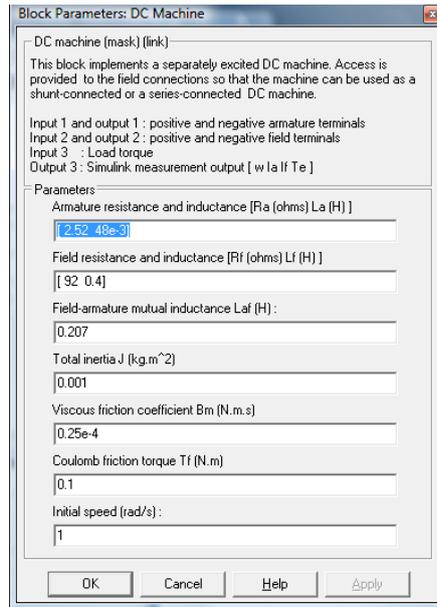


Рис. 4 – Окно настройки параметров машины постоянного тока

Выход m предназначен для измерения и наблюдения переменных состояний машины в следующей последовательности: угловая скорость (рад/с), ток якоря (А), ток возбуждения (А), электромагнитный момент (Нм).

Параметры машины, вводимые в окно настройки, определяются из паспортных данных.

В каталоги на электрические машины постоянного тока приводятся следующие данные:

- мощность P_H (кВт);
- напряжение питания якоря U_A (В);
- напряжение питания возбуждения U_B (В);
- КПД η_H (%);
- сопротивление обмотки якоря R_A (Ом);
- сопротивление обмотки возбуждения R_B (Ом);
- индуктивность обмотки якоря L_A (Гн).

Для машины с независимым возбуждением её величина определяется последовательным расчётом, используя следующие выражения:

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi\eta_H}, I_{A.H.} = \frac{P_H}{U_{A.H.}\eta_H} - I_B, L_{af} = \frac{M_H}{I_{A.H.}I_B}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения при исследовании установившихся процессов может быть принята близкой к нулю. При исследовании переходных процессов значение L_B для машин обычного исполнения выбирается из неравенства

$$L_B \geq (2 - 5) \frac{L_A R_B}{R_A}.$$

Момент инерции для двигателей обычного исполнения определяется из неравенства

$$J \geq \frac{(5-10)L_A P_H^2}{R_A^2 \omega_H^2 I_{A.H.}^2}.$$

Момент сухого трения и коэффициент вязкого трения определяются из следующих соображений. Общие механические потери для машин обычного исполнения составляют $\Pi_{\text{мех}} = (0,5 - 2\%)P_H$. Кроме того эти потери равны $\Pi_{\text{мех}} = T_f \omega_H + B_T \omega_H^2$. Если считать, что потери на трение и вентиляционные потери приблизительно равны, то

$$T_f \approx \frac{\Pi_{\text{мех}}}{2\omega_H}; B_T \approx \frac{\Pi_{\text{мех}}}{2\omega_H^2}.$$

Паспортные параметры двигателей постоянного тока для исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Паспортные параметры двигателей постоянного тока

Тип двигателя	P_n (кВт)	U_n (В)	n_n (об/мин)	КПД (%)	$R_{я}$ (Ом)	$R_{в}$ (Ом)	$L_{я}$ (мГн)
2ПН-0,17	0,17	220	750	48,5	27,2	162	514
2ПН-0,25	0,25	220	1120	57	15,47	612	297
2ПН-0,37	0,37	220	1500	61,5	10,61	612	190
2ПН-0,71	0,71	220	2360	70	3,99	123	70
2ПН-1.0	1,0	220	3000	72,5	2,52	92	48

Порядок проведения работы:

Для заданного преподавателем двигателя рассчитать параметры и провести следующие исследования.

1. Исследование статических характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении сопротивления в цепи якоря.

Снятие статических характеристик при изменении сопротивления якоря следует провести для трёх значений $R_{я}$.

2. Исследование статических характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении напряжения подведенного к якорю.

Снятие механических характеристик при различных напряжениях в цепи якоря следует провести для трёх значений напряжения на якоре.

3. Снятие статических характеристик при различных потоках возбуждения.

Измерения следует провести для трёх значений потока: Φ_n , $0,7\Phi_n$ и $0,5\Phi_n$.

Модифицируем систему снятия статических характеристик для снятия рабочих характеристик двигателя. Для этого преобразуем систему, показанную на рис. 1 в систему, показанную на рис. 5.

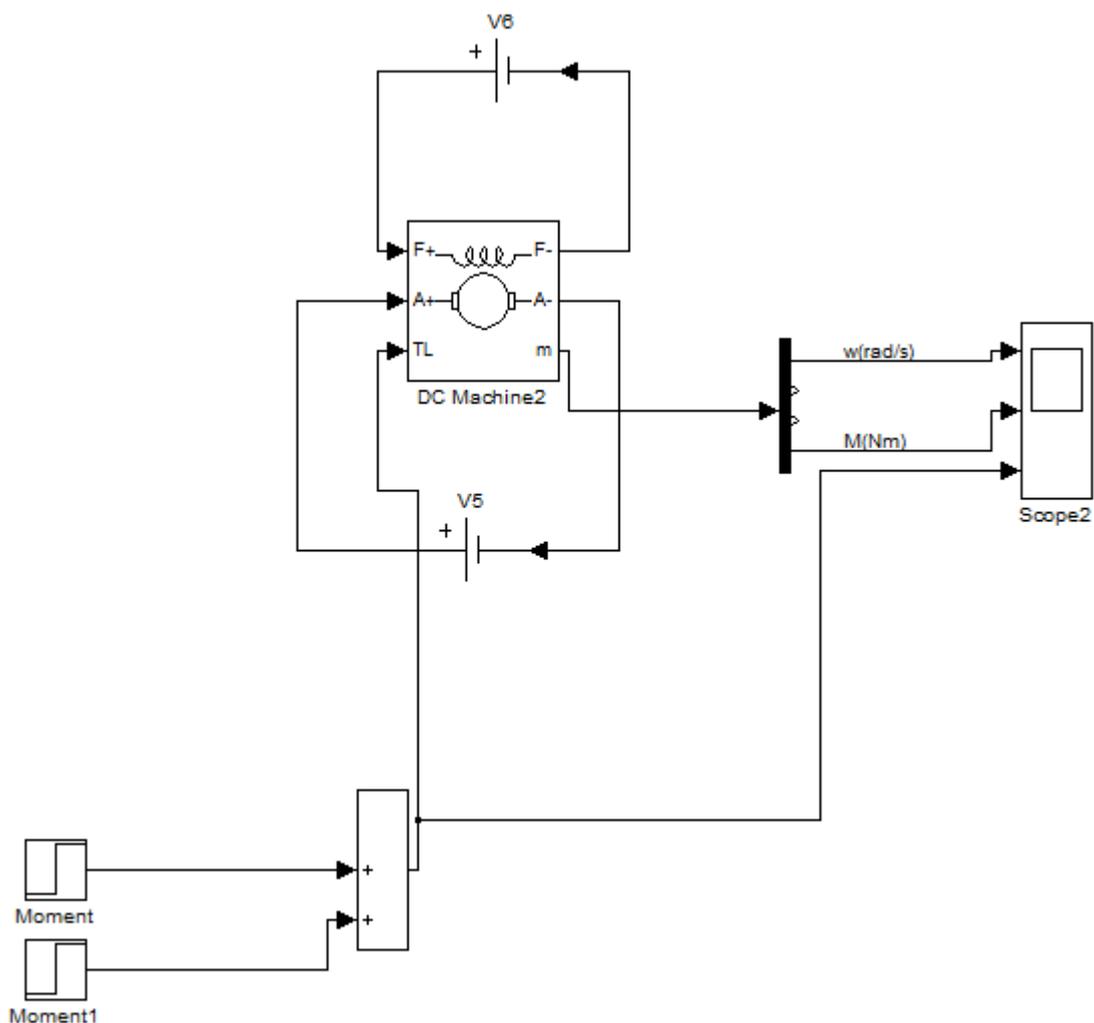


Рис. 6 – Модель для исследования динамических характеристик двигателя постоянного тока

4.1 Исследование влияния изменения момента сопротивления на валу ДПТ на динамические характеристики

Для получения семейств динамических характеристик создадим из модели subsystem, сделаем ещё две её копии и через элемент Mux будем снимать характеристики с элемента Measurement. Будут выводиться следующие характеристики: частота вращения, момент и нагрузка на двигатель.

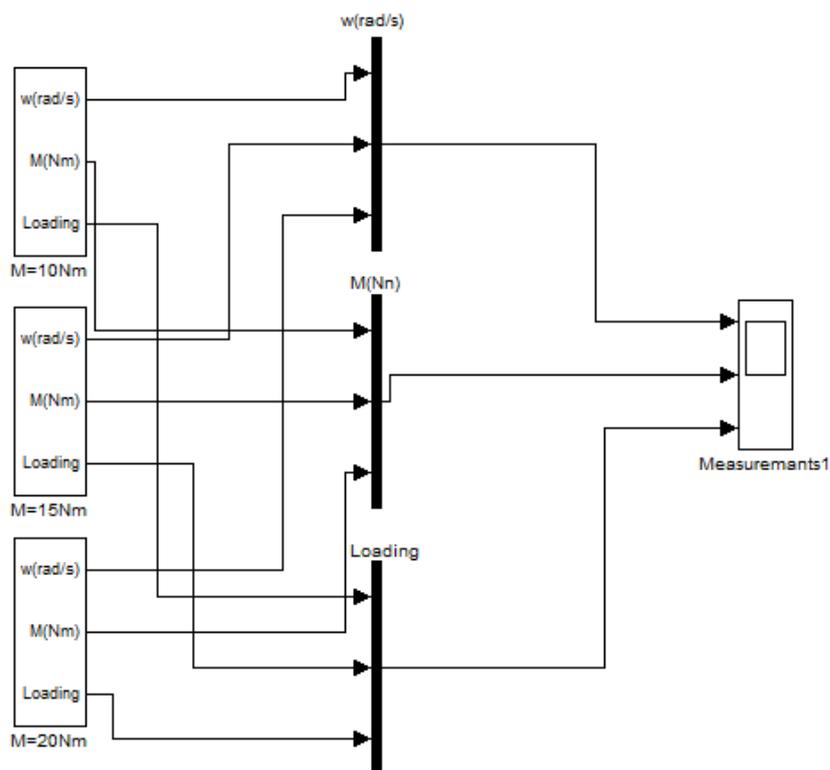


Рис. 7 – Модель для исследования влияния изменения момента сопротивления на валу ДПТ на динамические характеристики

Снимем динамические характеристики при трёх значениях момента сопротивления: 10, 15 и 20 Нм.

4.2 Исследование влияния изменения напряжения питающей сети на динамические характеристики двигателя постоянного тока

Для снятия динамических характеристик при изменении напряжения питающей сети воспользуемся моделью из предыдущего опыта, момент сопротивления поставим равным 20 Нм, а напряжение на источнике питания V6 будет равно 110 В, 160 В и 220 В для первой, второй и третьей подсистемы соответственно.

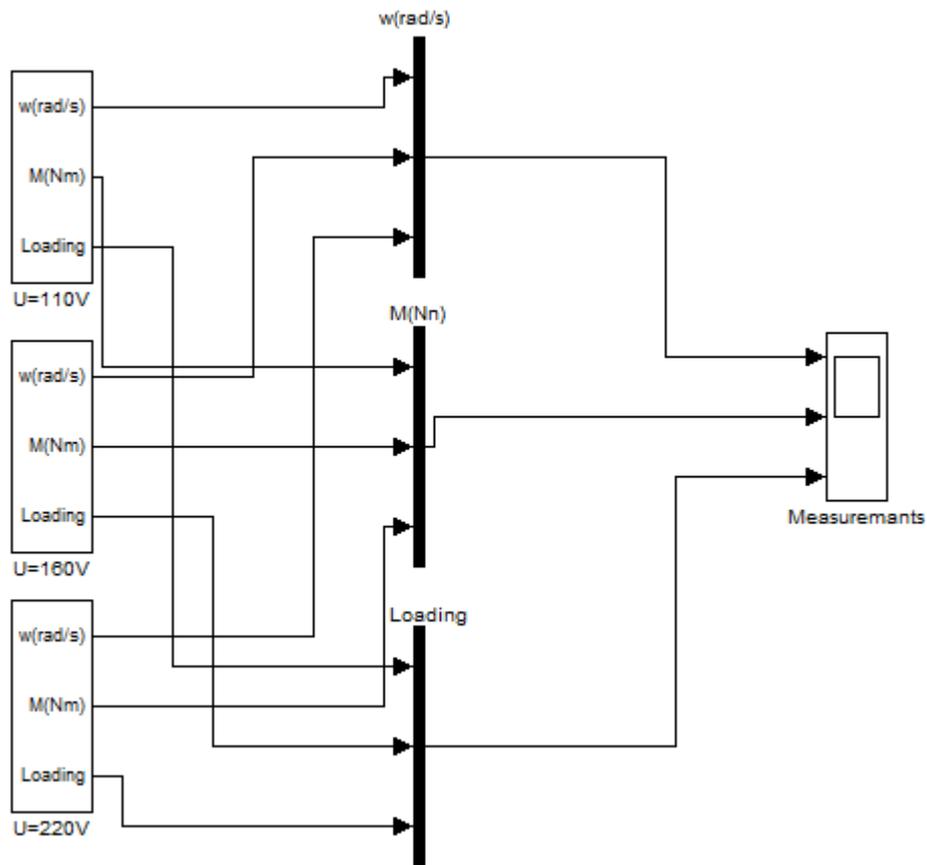


Рис. 8 – Модель для исследования влияния изменения напряжения питающей сети на динамические характеристики двигателя

4.3 Моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока

Для моделирования реостатного пуска двигателя соберём схему, показанную на рис. 9.

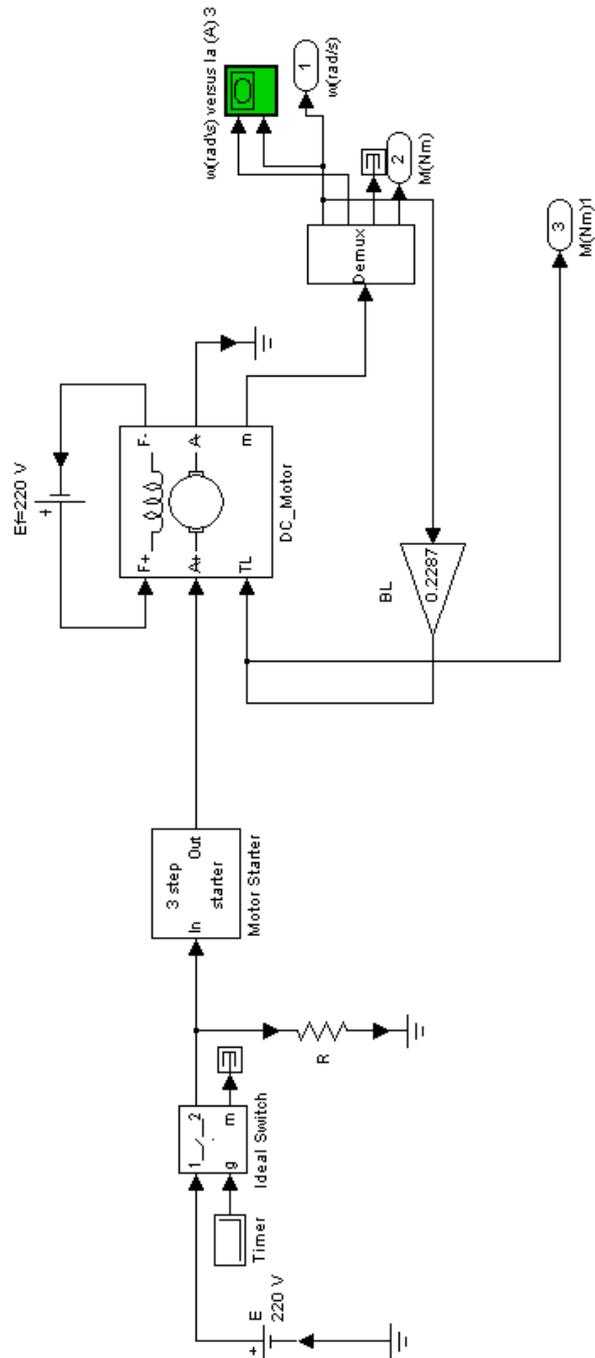


Рис. 9 – Модель для исследования реостатного пуска двигателя постоянного тока
 Субсистема Motor Starter моделирует пусковой реостат представленный на рис. 10.

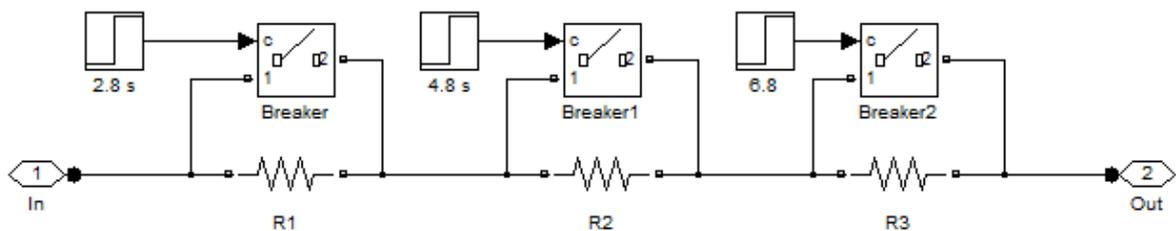


Рис. 10 – Субсистема Motor Starter

Задание

1. Рассчитать и построить графики механических и рабочих характеристик.

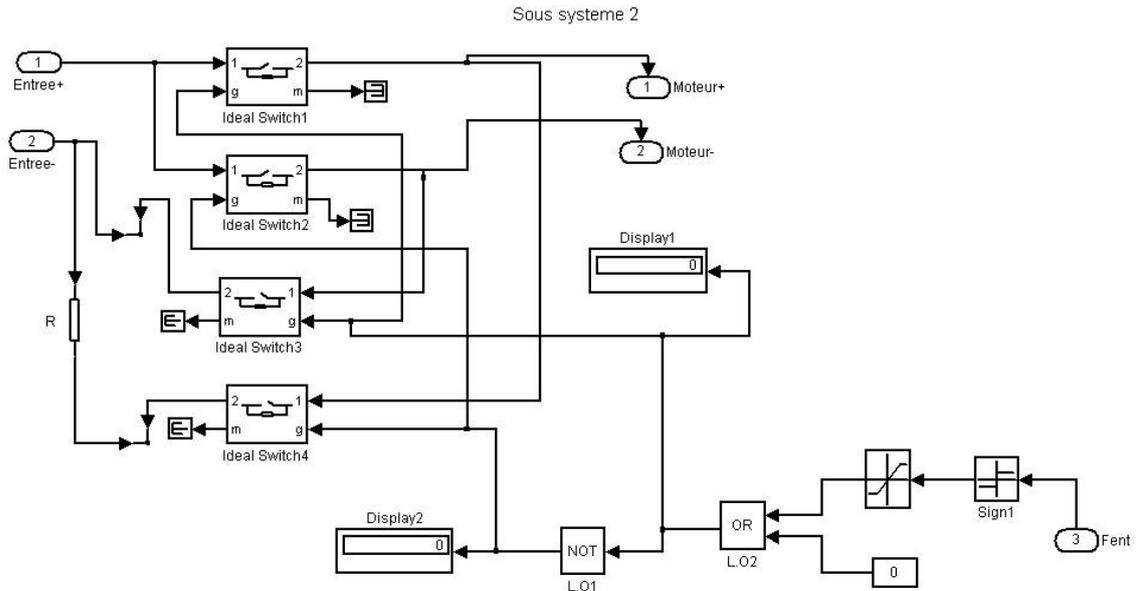


Рис 3.1а

Система включает двигатель постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением. Параметры двигателя и программируемого источника напряжения даны на рисунок 3.2. В качестве регулятора частоты вращения ДПТ используется пропорциональный регулятор П - регулятор, схема и параметры которого даны на рисунок 3.3а.

Block Parameters: 3-Phase Programmable Voltage Source	Block Parameters: MCC
<p>3-phase Programmable Voltage Source (mask) (link)</p> <p>This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be surimposed on the fundamental.</p> <p>Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order=1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.</p> <p>Parameters</p> <p>Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [220*sqrt(2) 0 50]</p> <p>Time variation of: Amplitude</p> <p>Type of variation: Step</p> <p>Step magnitude (pu, Hz or deg.): 0.5</p> <p>Variation timing (s) : [Start End] [0.4 0.7]</p> <p><input type="checkbox"/> Fundamental and/or Harmonic generation:</p>	<p>DC machine (mask) (link)</p> <p>This block implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.</p> <p>Input 1 and output 1 : positive and negative armature terminals Input 2 and output 2 : positive and negative field terminals Input 3 : Load torque Output 3 : Simulink measurement output [w Ia If Te]</p> <p>Parameters</p> <p>Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)] [1 0.0182]</p> <p>Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)] [220 0]</p> <p>Field-armature mutual inductance Laf (H) : 1.254</p> <p>Total inertia J (kg.m^2) 0.04</p> <p>Viscous friction coefficient Bm (N.m.s) 0</p> <p>Coulomb friction torque Tf (N.m) 0</p> <p>Initial speed (rad/s) : 1e-1</p>

Рис. 3.2

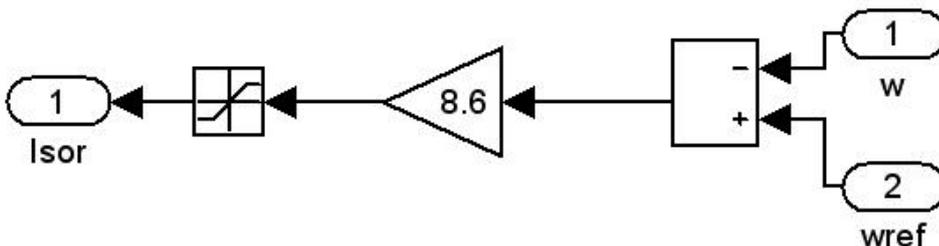


Рис. 3.3а

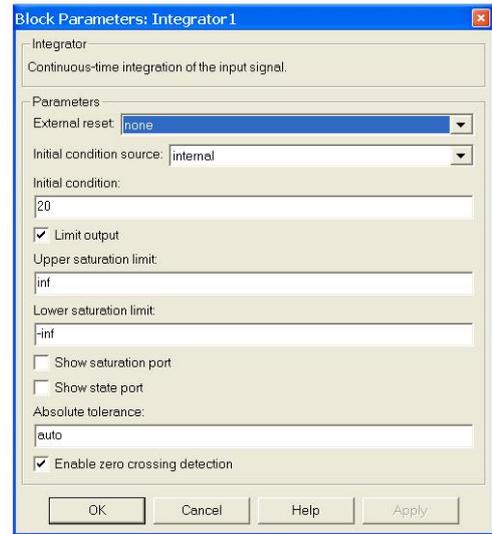
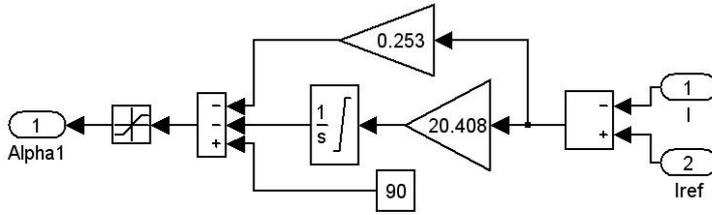


Рис. 3.3б

Регулятор тока - ПИ - регулятор, параметры которого следующие: $K_p = 0,253$ и $K_i = 20.408$ (рис 3.3б).

Параметры тиристорного преобразователя и его системы управления представлены на рисунке 3.4.

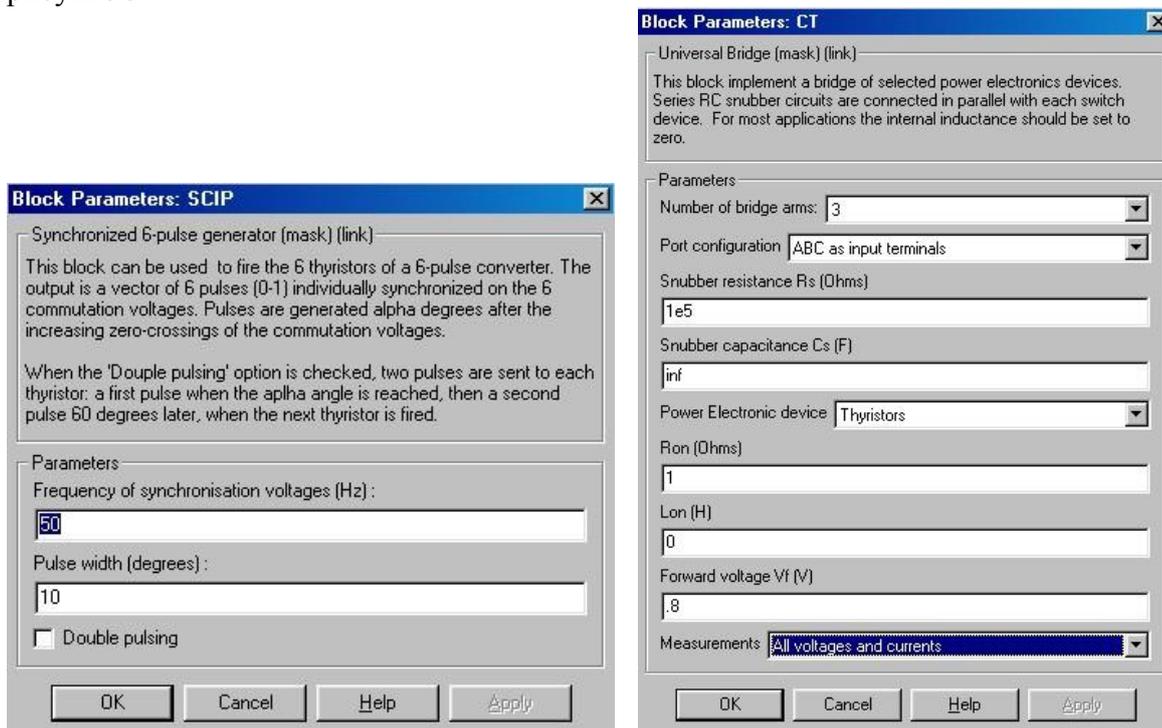


Рис. 3.4

Для исследования переходных процессов, которые имеют место в электроприводе, используются два осциллографа («U и I_d », « I_{ind} , w »).

Для осуществления линейного анализа системы электропривода постоянного тока с помощью MATLAB необходимо составить структурную схему, используя библиотеку «Simulink». Структурная схема, которая соответствует электроприводе представленному на рис.3.,1 представлена на рис.3.5.

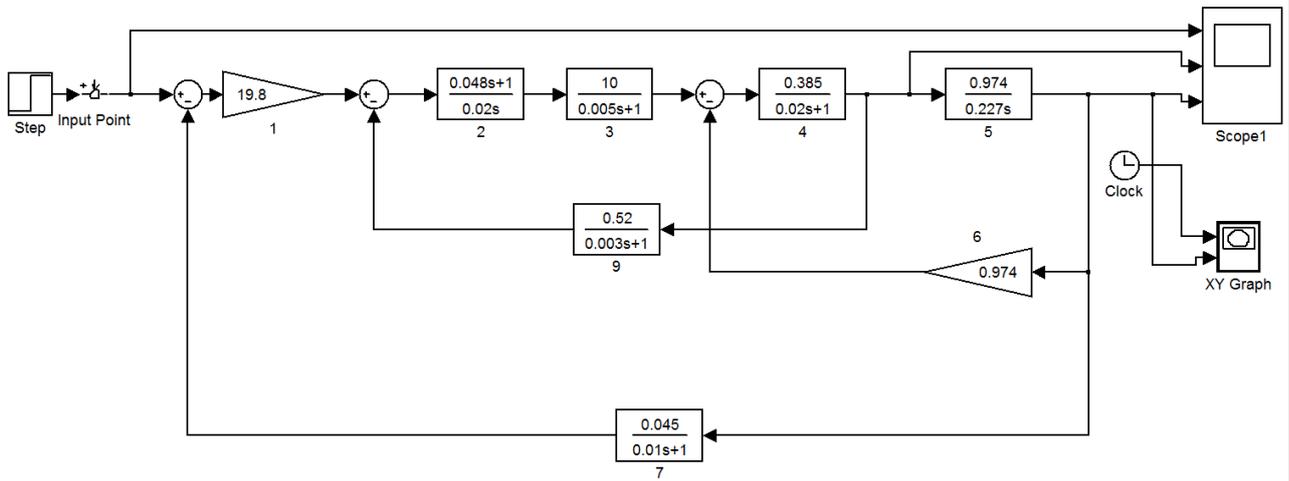


рис.3.5.

3.2 Результаты моделирования.

Результаты моделирования пуска двигателя в системе электропривода (Рис.3.1) даны на рис.3.6. Зависимости тока якоря и частоты вращения ротора ДПТ (I_{ind}, ω) получены с помощью осциллографа. Необходимо отметить, что частота вращения ротора, ток якоря ДПТ и время измеряются соответственно в рад/с, амперах и секундах.

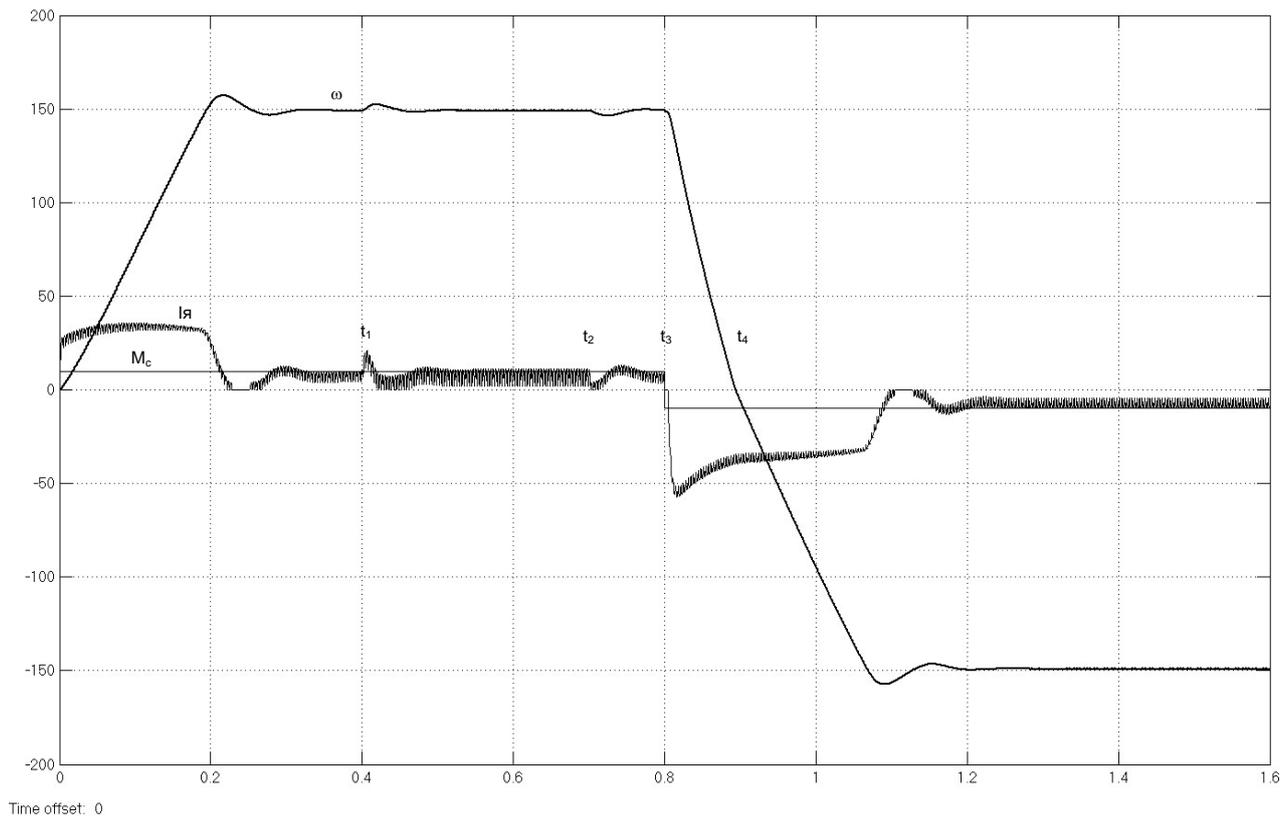
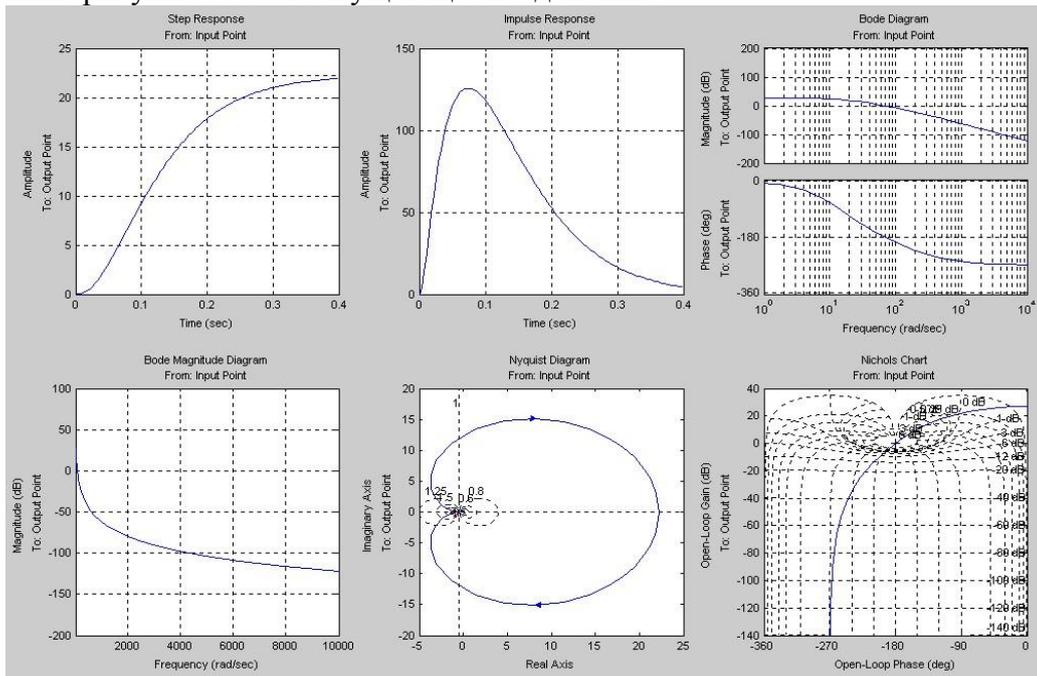


Рис.3.6

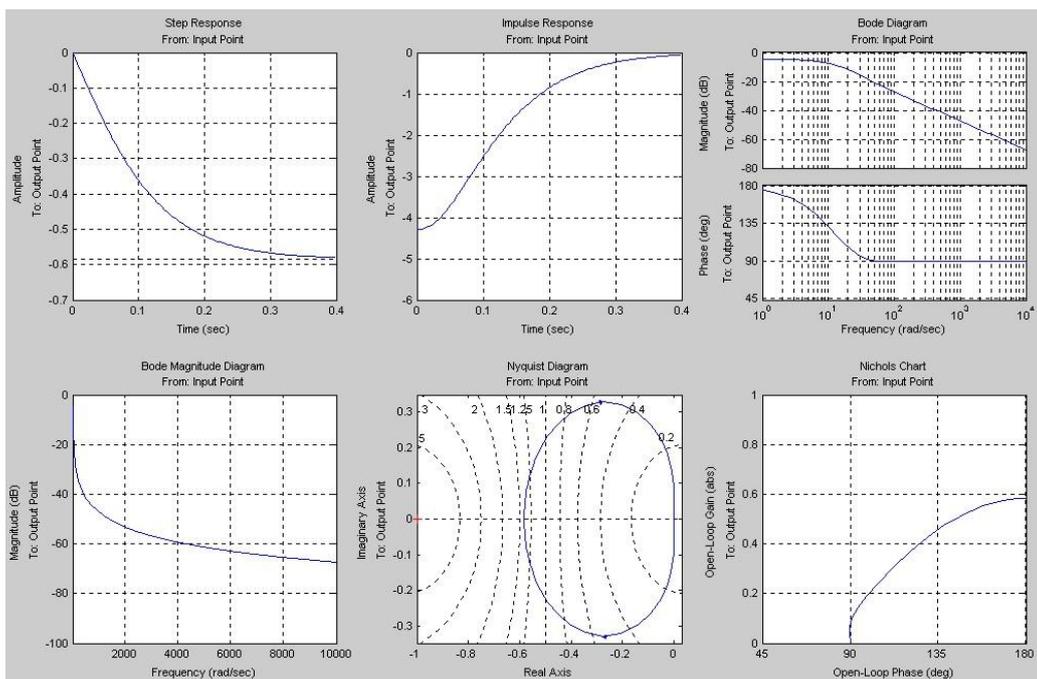
Временной интервал $(0, t_1)$ соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения (150 рад/с). В момент t_1 (0.4 с) напряжение источника питания увеличивается на 50%, а в момент t_2 (0.7 с) уменьшается на 50%. В момент времени t_3 (0.8 с) происходит изменение полярности напряжения приложенного к якорю двигателя. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс.

Результаты моделирования системы, представленной на рисунке 3.5, даны на рисунке 3.7.

Графики рисунка 3.7а соответствуют случаю, когда используется управляющее воздействие, а кривые рисунка 3.7б - возмущающее воздействие.



a)



b)

Рис. 3.7.

Задание

1. Исследовать пуск двигателя в системе электропривода.
2. Провести линейный анализ электропривода.

Контрольные вопросы

1. Предложите модель для реализации реверса электропривода.
2. Как осуществить настройку параметров регулятора исследуемой модели на заданные показатели качества переходного процесса?

3. Можно ли получить аналитическое выражение передаточной функции линейной модели изображенной на рис.3.5?

Лабораторная работа 5. Модельное исследование выпрямителя с фильтром в качестве источника питания (ИП).

Цель работы: исследование характеристик ИП.

Модель выпрямителя с фильтром, предназначенная для снятия характеристик ИП, представлена на рис.4.1 .

Модель содержит трехфазный источник питания (Three-Phase Source), трехфазный выпрямитель (Universal Bridge), емкостной фильтр (Cf), нагрузку (L,R,E0) блок задания противо эдс в нагрузке (Repeating Sequence), блоки измерения напряжений и токов на входе и выходе ИП (V1, I1, V2, I2). Для наблюдения мгновенных токов на входе и выходе, а также напряжения на выходе схемы, служит блок Scope. Для записи значений измеренных величин в рабочее пространство служит блок To Workspace. Измерение тока в диоде выпрямителя осуществляется блоком Multimeter. Блоки Goto и From предназначены для передачи соответствующих сигналов в пределах модели.

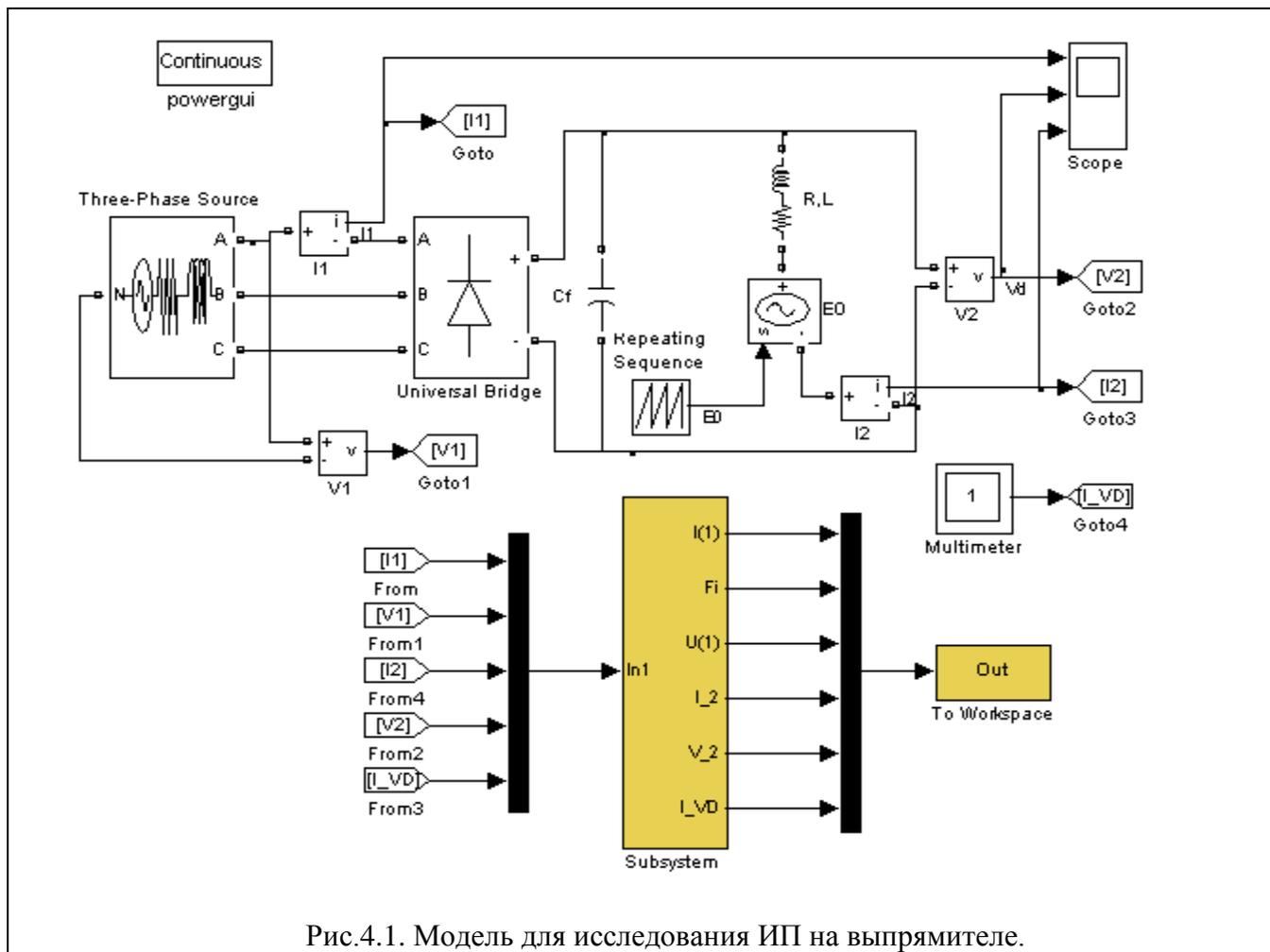


Рис.4.1. Модель для исследования ИП на выпрямителе.

Реализация управляемой противо эдс в нагрузке осуществляется двумя блоками. Источником управляемого напряжения (Control Voltage Source), обозначенного в модели через E0 и настраиваемым генератором Repeating Sequence, окна настройки которых показаны на рис.4.2.

В полях окна блока Control Voltage Source задаются: Initialize[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами.

Source type - 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 .

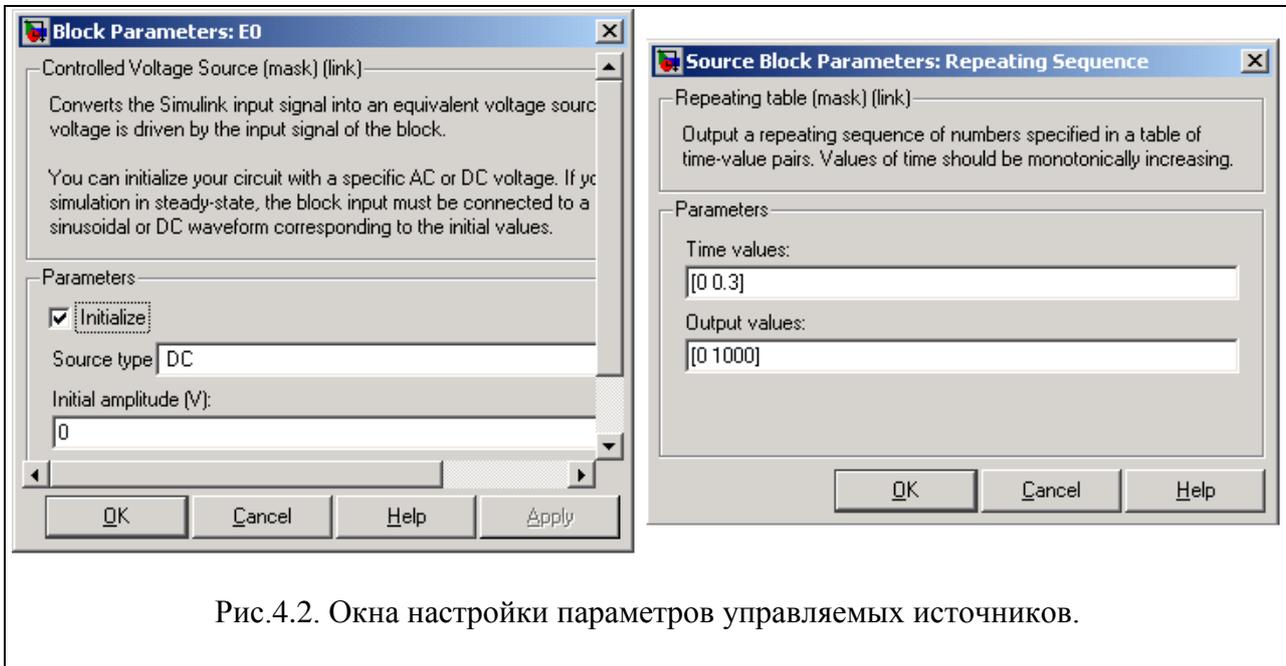


Рис.4.2. Окна настройки параметров управляемых источников.

- Initial amplitude - начальное значение выходного напряжения источника. Measurements-измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные.

В полях окна параметров генератора Repeating Sequence задаются:

- Time values - начальное и конечное время изменения сигнала;
- Output values – начальное и конечное значение сигнала.

Конечное время изменения сигнала задается равным времени симуляции. Скорость изменения сигнала выбирается такой, при которой электромагнитные процессы в нагрузке можно не учитывать:

$$L \frac{di_n}{dt} \approx 0$$

Модель (рис.4.3) измерительной части (Subsystem) содержит:

- блок для измерения амплитуды и фазы первой гармоники тока питания (I1);
- блок для измерения амплитуды первой гармоники напряжения питания (V1);
- блок для измерения постоянной составляющей тока диода выпрямителя (IVD).

Все перечисленные блоки осуществляют Фурье разложение входного сигнала. В полях окна параметров блоков задаются частота и номер измеряемой гармоники.

Внешняя, энергетические и электромагнитные характеристики рассмотренного ИП рассчитываются Matlab – программой, представленной в листинге 4.4. Эти характеристики показаны на рис.4.4. Из этих характеристик следует, что до тока в нагрузке -2 А энергия, поступающая из нагрузки рассеивается на элементах ИП и в нагрузке. При токе в нагрузке <-2 А энергия, поступающая из нагрузки частично накапливается в конденсаторе фильтра ИП. Напряжение на конденсаторе возрастает до бесконечности уже при токе нагрузки <-3.5 А.

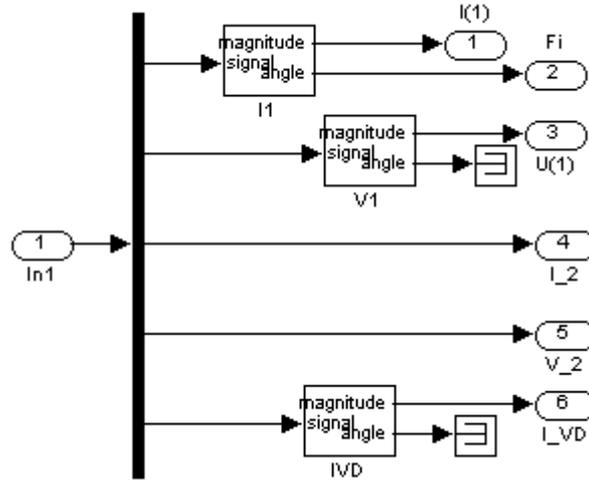
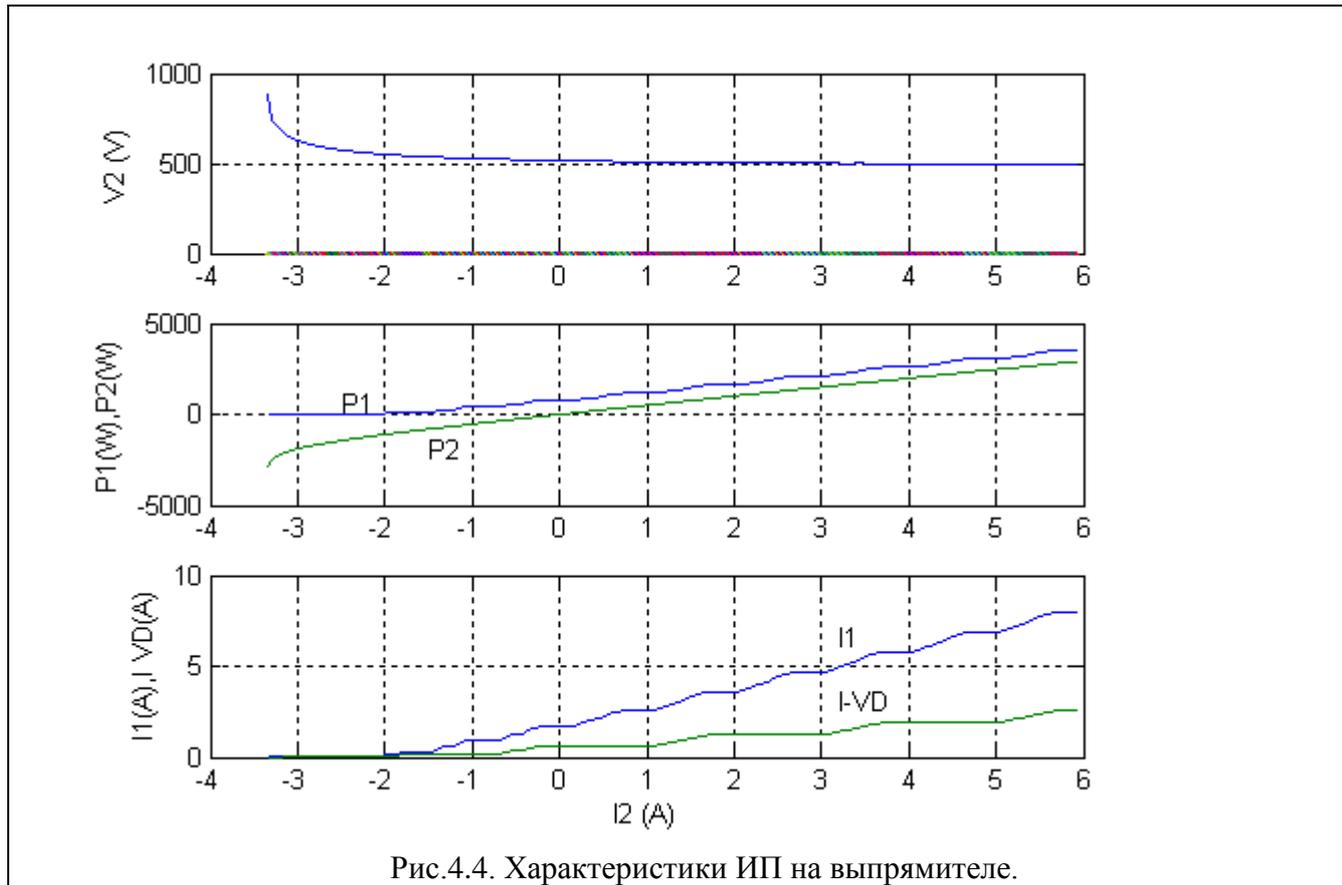


Рис.4.3. Измерительная часть модели ИП на выпрямителе

```

Листинг 5.3
I1=Out(:,1);
Fi=Out(:,2);
V1=Out(:,3);
I2=Out(:,4);
V2=Out(:,5);
I_VD=Out(:,6);
S11=(1.5*V1.*I1);
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
P2=V2.*I2;
subplot(3,1,1);
plot(I2,V2,I2,0);grid on;
ylabel('V2 (V)');
subplot(3,1,2);
plot(I2,P11,I2,P2);grid on;
ylabel('P1(W),P2(W)');
text(-2.5,500,'P1');
text(-1.5,-2000,'P2');
subplot(3,1,3);
plot(I2,I1,I2,I_VD);grid on;
xlabel('I2 (A)');
ylabel('I1(A),I_VD(A)');
text(3.2,3,'I-VD');
text(3.2,6.5,'I1');

```

**Задание.**

1. Собрать схему лабораторной установки.
2. Провести расчёт характеристик (рис.4.4).

Контрольные вопросы

1. Как изменится внешняя характеристика ИП при изменении параметров диодов?
2. Предложите алгоритм для расчета КПД ИП.
3. Как изменятся характеристики ИП при отключении конденсатора C_f в схеме рис.4.1?

Лабораторная работа 6. Моделирование следящей системы**6.1 Описание следящей системы.**

Следящая система, система автоматического регулирования (управления), воспроизводящая на выходе с определённой точностью входное задающее воздействие, изменяющееся по заранее неизвестному закону. Следящая система может иметь любую физическую природу и различные способы технического осуществления. В таких системах главная обратная связь есть обратная связь по положению.

Системы автоматического управления могут быть гидравлическими, пневматическими и электрическими.

По принципу следящих систем работают системы наведения. В следящей системе антенны радиолокационной станции рассогласованием служит угловая ошибка между радиолокационным лучом и направлением на цель; исполнительное устройство — электропривод антенны. Автопилот наводимой ракеты также работает по принципу следящей системы, причём для него рассогласованием служит отклонение ракеты от направления луча, а исполнительным устройством являются рулевая машинка и рули.

По принципу следящей системы работают многие системы телеуправления и самонаведения.

Следящими системами являются также измерительные приборы, работающие по компенсационному принципу; в них рассогласованием служит разность между показанием прибора и входной измеряемой величиной.

По принципу следящей системы работают некоторые вычислительные устройства.

Следящие системы, выходной величиной которых является механическое перемещение, называются следящим приводом.

Примеры следящих систем можно обнаружить и в живых организмах.

Следящий электропривод - следящая система, обеспечивающая воспроизведение некоторых механических перемещений на управляемом объекте посредством исполнительного электродвигателя (ИЭ). Следящий электропривод включает в себя задающее устройство, измерительный преобразователь, орган сравнения, усилитель и ИЭ. Задающее устройство вырабатывает исходный сигнал (изменяющийся, как правило, по произвольному закону). Измерительный преобразователь непрерывно измеряет фактическое значение воспроизводимой величины на управляемом объекте, которое при помощи органа сравнения сопоставляется с заданным. Обычно измерительный преобразователь и орган сравнения объединены в одном устройстве, вырабатывающем электрический сигнал рассогласования (СР), пропорциональный разности между заданным и фактическими значениями воспроизводимой величины. СР (в виде напряжения или тока) поступает на вход усилителя, а затем на ИЭ, осуществляющий такое движение управляемого объекта, при котором СР уменьшается. В отсутствие СР ротор электродвигателя находится в покое.

Существуют три режима функционирования следящих систем:

1. Режим малых перемещений. В этом режиме регуляторы не достигают режима ограничения, то есть система ведет себя как линейная.
2. Режим средних перемещений. В этом режиме регуляторы положения и скорости достигают ограничения. Система прекращает быть линейной, но частота вращения ротора двигателя не превышает максимального установленного уровня. Кривые режима средних перемещений изображены на рисунке 6.1.
3. Режим больших перемещений. Регуляторы положения и частоты вращения достигают ограничения. Частота вращения ротора двигателя достигает максимального значения, и система работает некоторое время с этой частотой. График режима больших перемещений в зависимости от времени представлен на рисунке 6.2.

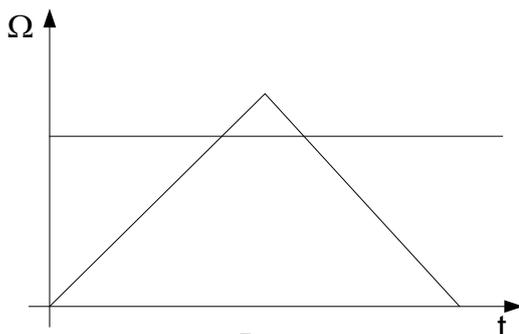


Рис 6.1

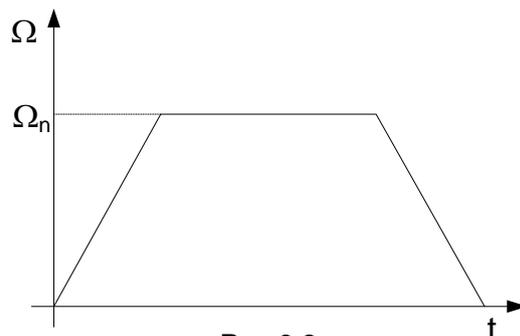


Рис 6.2

Модель следящей системы автоматического управления представлена на рисунке 6.3. Она состоит из двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, двух подсистем и трех регуляторов. Модели подсистем представлены на рисунках 6.4 и 6.5.

Первой подсистемой (рис 6.4) является тиристорный преобразователь напряжения с импульсной системой регулирования (SCIP). Входной сигнал (α) - это угол управления, приложенный к управляющему электроду тиристора. Выходной сигнал - выпрямленное напряжение (полярность «+» и «-»).

Вторая подсистема (рис 6.5) предназначена для изменения полярности напряжения в зависимости от знака отклонения от положения (F_{ent}). Она моделируется на базе идеальных ключей.

чей. Если значение F_{ent} положительно, ключи 1 и 3 замкнуты и на выходе создается напряжение положительной полярности (+-). В то же самое время ключи 2 и 4 разомкнуты.

Если значение величины F_{ent} отрицательно, ключи 2 и 4 замыкаются и в то же самое время, ключи 2 и 4 открыты. На выходе подсистемы создается напряжение отрицательной полярности (-+).

Логические элементы L01 и L02 используют, для того чтобы осуществлять необходимое функционирование ключей

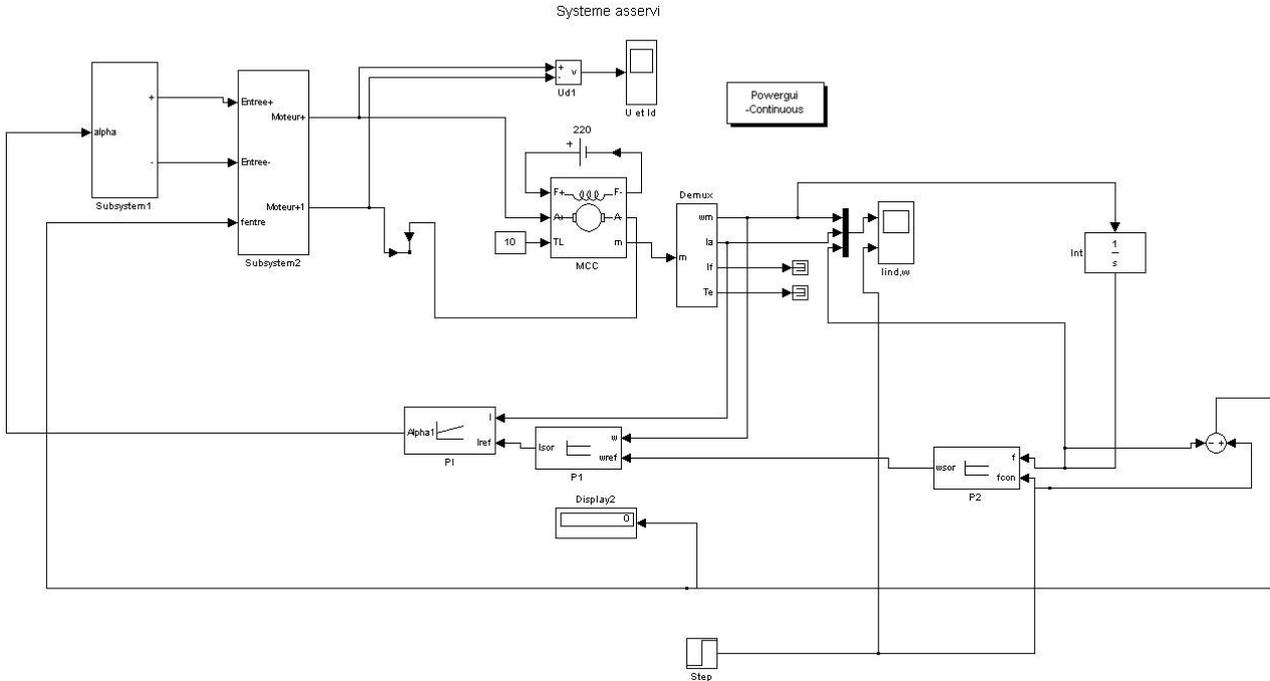


Рис 6.3

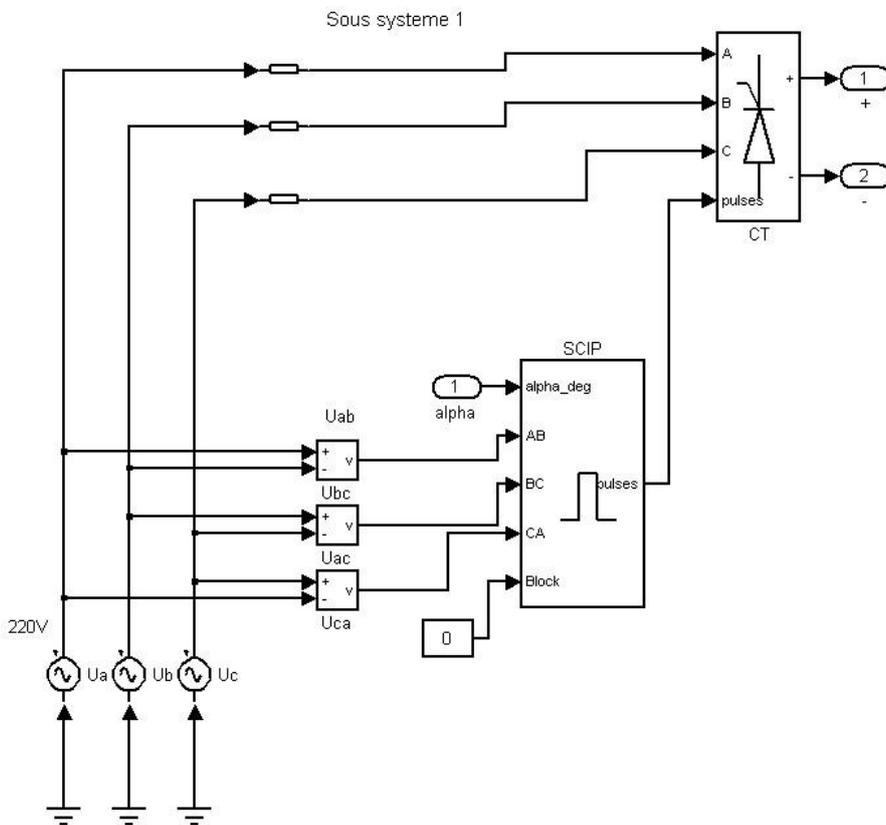


Рис 6.4

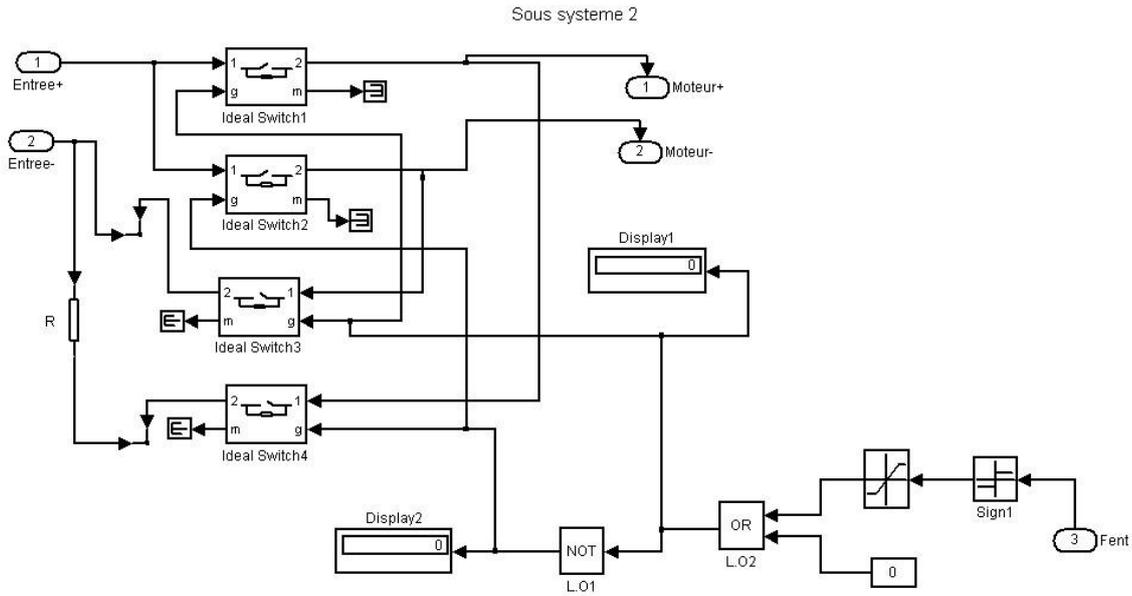


Рис 6.5

6.2 Результаты моделирования

Результаты моделирования следящей системы (рис 6.3), представлены на рисунке 6.6.

В начале моделирования значения положения было равно 5 градусам. Затем в момент времени равный 0.6 секундам значение величины положения увеличивается, и становится равным 10 градусам.

Чтобы осуществить линейный анализ системы необходимо набрать с использованием «Simulink» структурную схему (рис 6.7). Осуществляя моделирование следящей системы, получим характеристики представленные на рисунке 6.9.

Для осуществления линейного анализа системы необходимо кликнуть по пиктограмме «Linear analysis» (см. рис 6.7). Затем надо включить элемент «Input Point» и «Output Point» в структурную схему как показано на рисунке 6.8. и щелкать по пиктограмме «Get Linearized Model» (см. рисунок 6.7a), чтобы получать представленные на рисунке 6.10 характеристики.

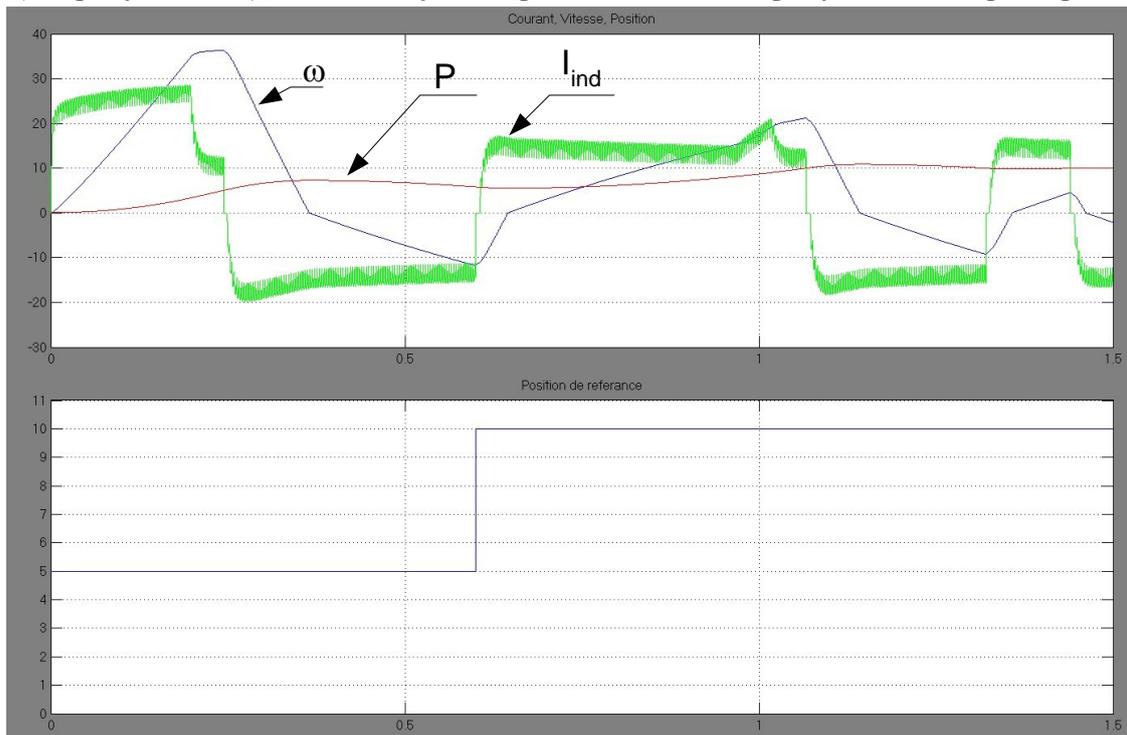


Рис. 6.6

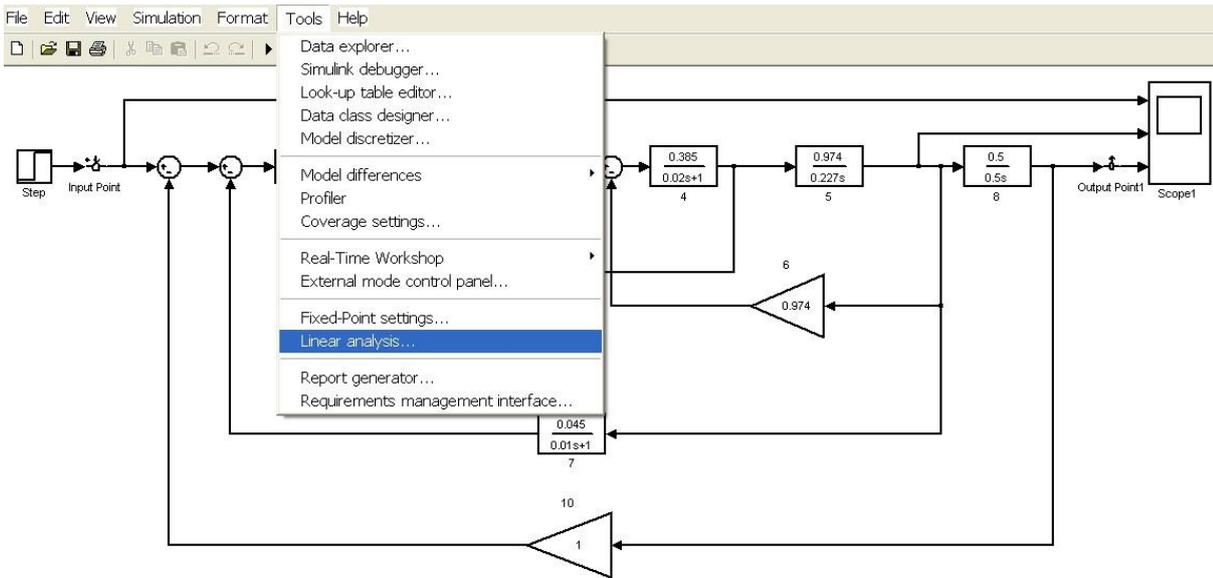


Рис.6.7

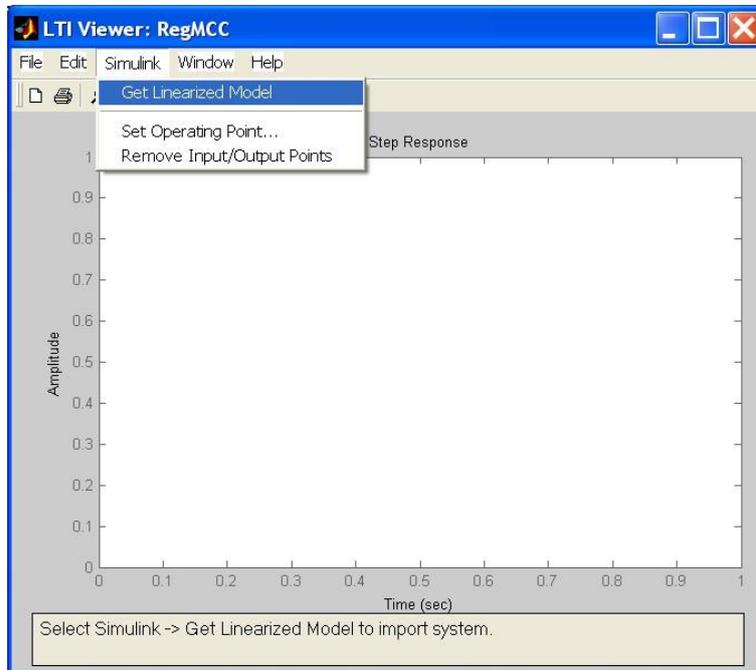


Рис 6.7а

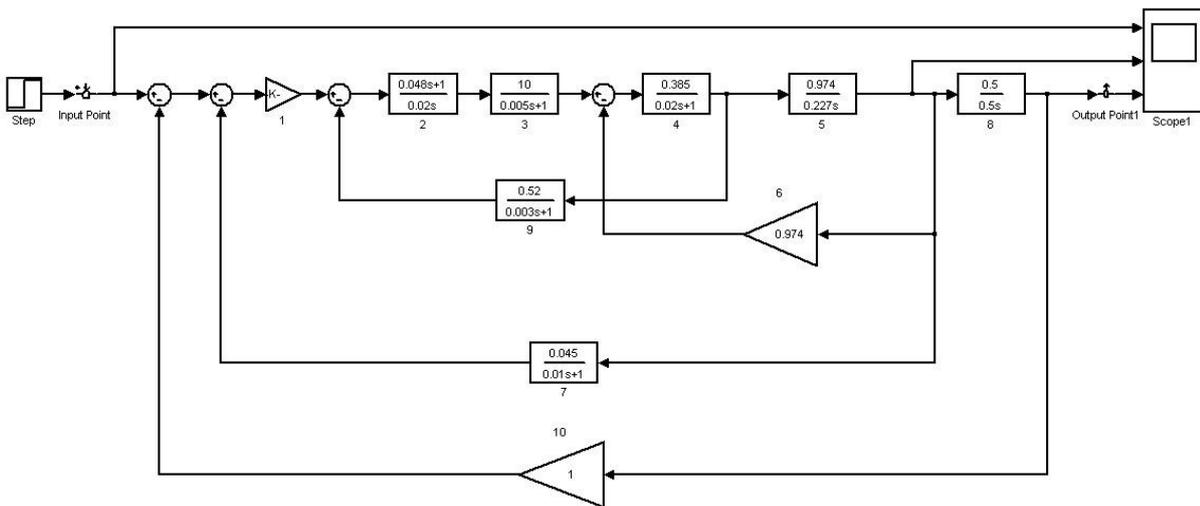


Рис 6.8

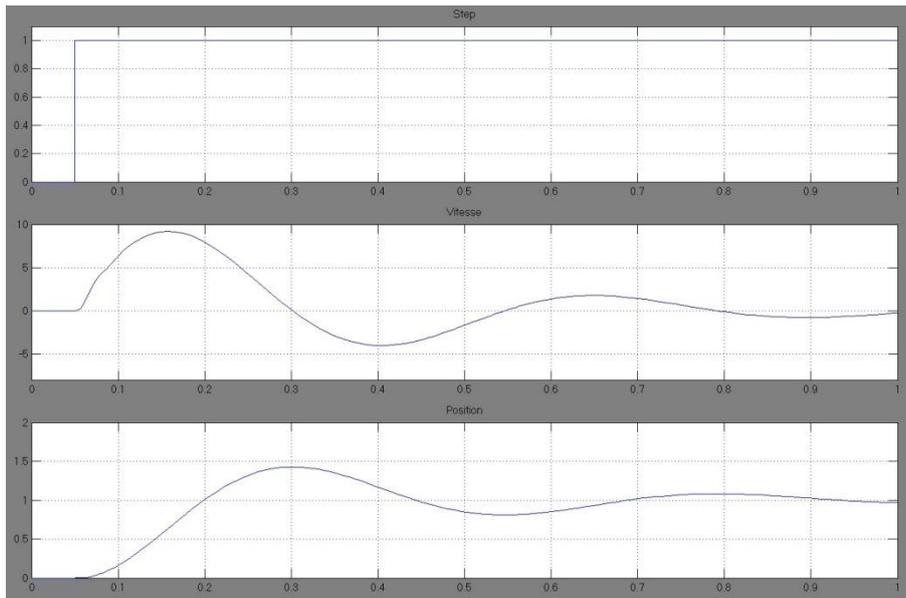


Рис 6.9

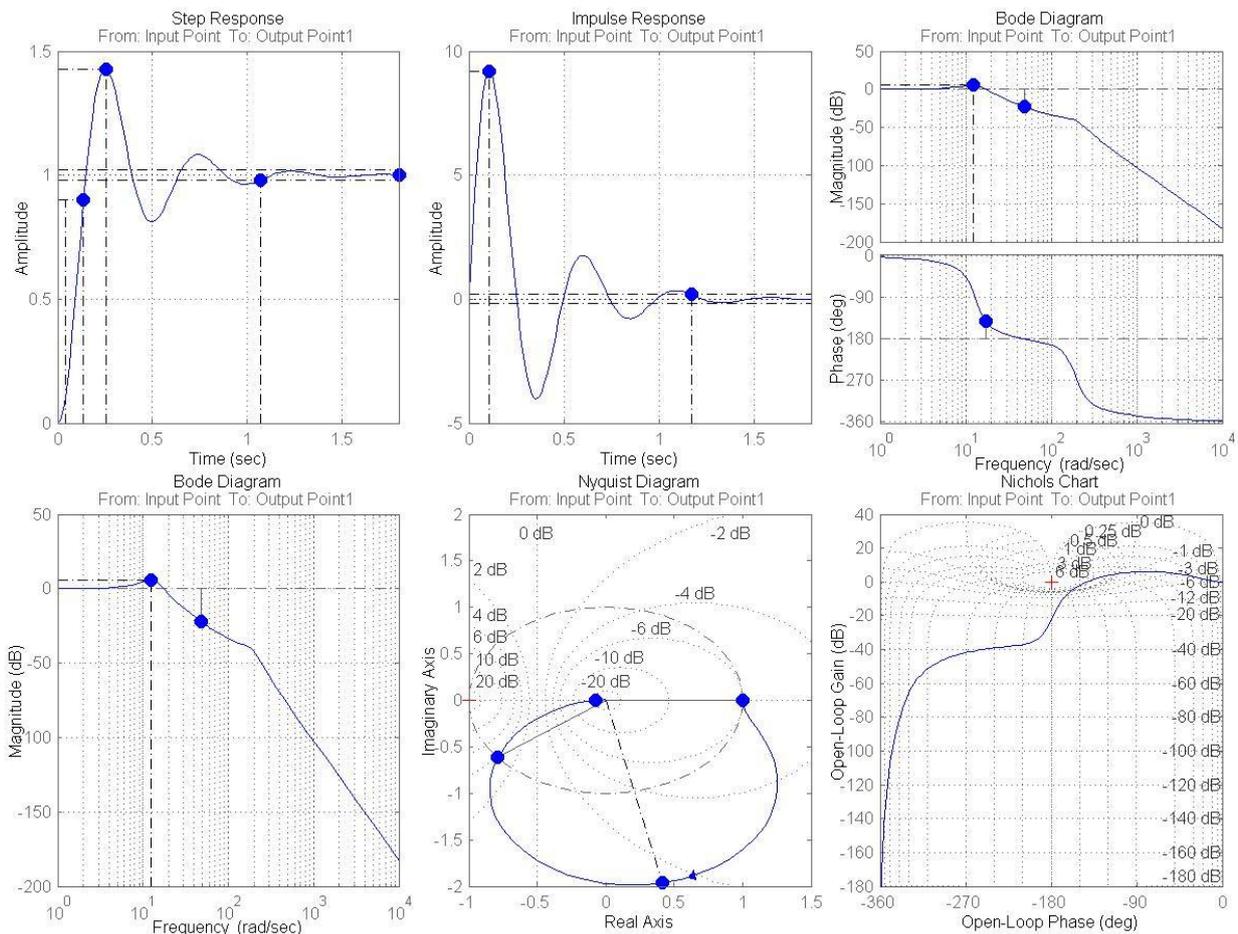


Рис 6.10

Задание

1. Собрать схемы, представленные на рис 6.3 и 6.8.
2. Провести исследование моделей.

Контрольные вопросы

1. Какие основные достоинства и недостатки схем с подчинённым регулированием?
2. Как настраивается в схеме регулятор тока и частоты вращения?
3. Предложите модель для исследования аварийных режимов следящей системы.
4. Как в командном окне MATLAB вычислить характеристическое уравнение системы (рис 6.8) и определить его корни?

Лабораторная работа 7. Моделирование трехфазного инвертора.

Цель работы. Моделирование и исследование трехфазного автономного инвертора напряжения с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией.

Модель трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ показана на рис.7.1.

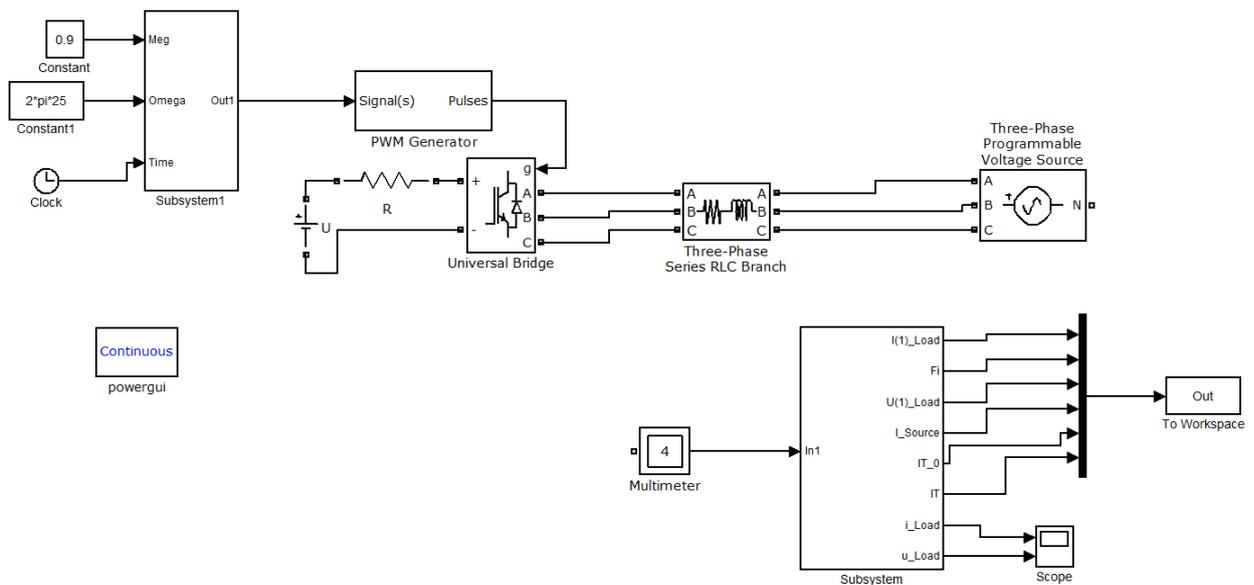


Рис.7.1. Модель трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ

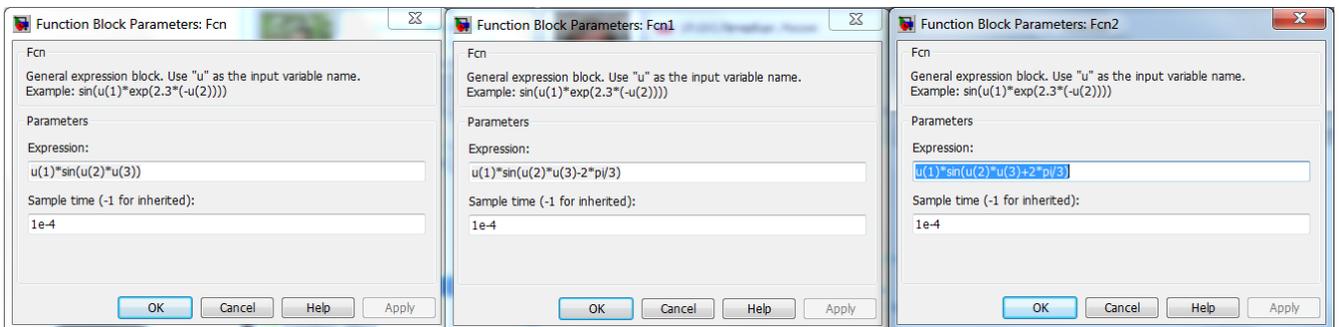
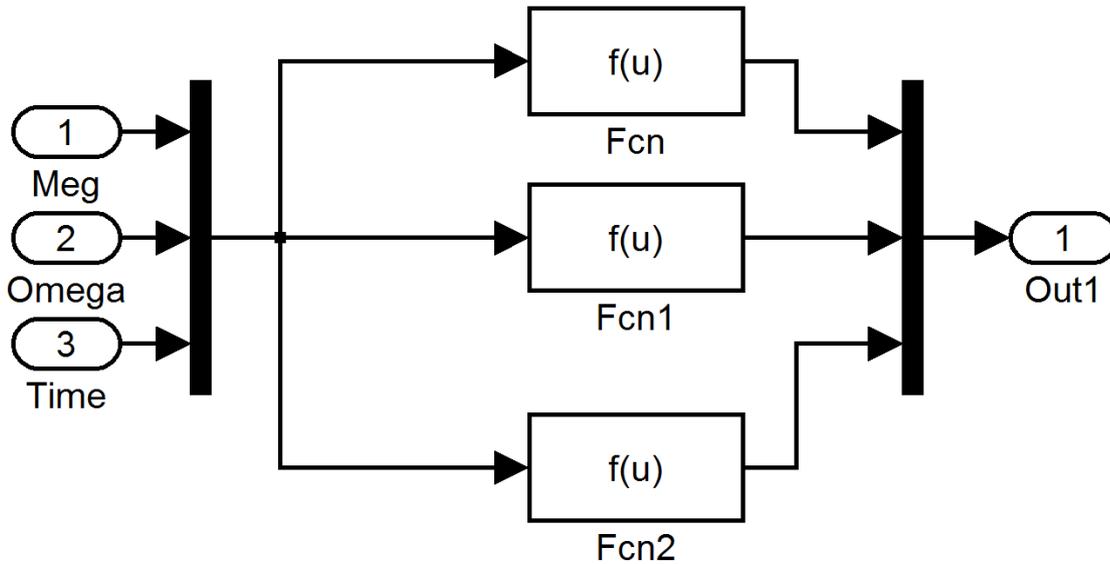


Рис.7.2. Настройка подсистемы 1.

Параметры модели:

Напряжение питания $U=540$ В, сопротивление, включенное в блок питания 0,1 Ома, инвертор (Universal Bridge) -трехфазный мост на IGBT транзисторах, частота модулирующего напряжения – 25 Гц., коэффициент модуляции $m=0.9$, параметры нагрузки – $L=0.1$ Гн., $R=10$ Ом., время моделирования – 0.5 с., шаг моделирования – 0.1 мс.

На рис. 2 показано окно подсистемы 1.

Пилообразное напряжение несущей частоты, генерируемое блоком Control System, имеет амплитуду 1 В. Поэтому величина сигнала блока Meg равна коэффициенту модуляции инвертора. На вход блока Subsystem (рис. 2) подано три сигнала: $u(1)$ — амплитуда модулирующего напряжения (блок Mag), $u(2)$ — угловая частота модулирующего напряжения $\omega=2\pi f$, где $f=25$ Гц (блок Omega) и $u(3)$ — текущее время (блок Clock). Во всех моделях шаг дискретизации (Max Step Size = $1e-4$).

Программируемый источник, окно настройки которого показано на рис.3, предназначен для изменения нагрузки инвертора в течение моделирования.

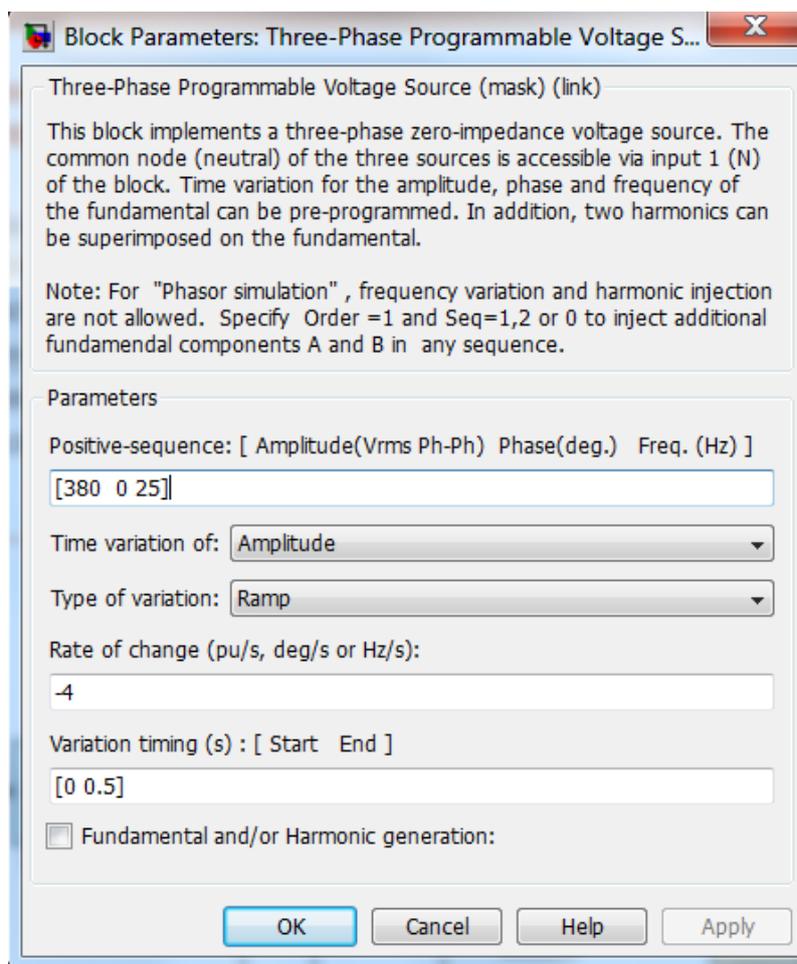


Рис.7.3. Программируемый источник в нагрузке АИН.

Измерительная часть модели содержит 5 блоков (4). Блоком Multimeter измеряются мгновенные значения тока нагрузки, напряжения нагрузки, тока в цепи питания и тока в полупроводниковом ключе инвертора. Блок Powergui служит для спектрального анализа мгновенного тока и напряжения нагрузки, зафиксированных блоком Scope. Блок To Workspace служит для записи в рабочее пространство Matlab величин, измеренных блоком Subsystem. Содержание блока Subsystem представлено на рис. 4

В этом блоке последовательно измеряются:

- амплитуда первой гармоники тока нагрузки;
- фаза первой гармоники тока нагрузки;
- амплитуда первой гармоники линейного напряжения нагрузки;
- средний ток питания инвертора;
- средний и эффективный токи в полупроводниковом ключе инвертора;
- мгновенные ток и напряжение нагрузки.

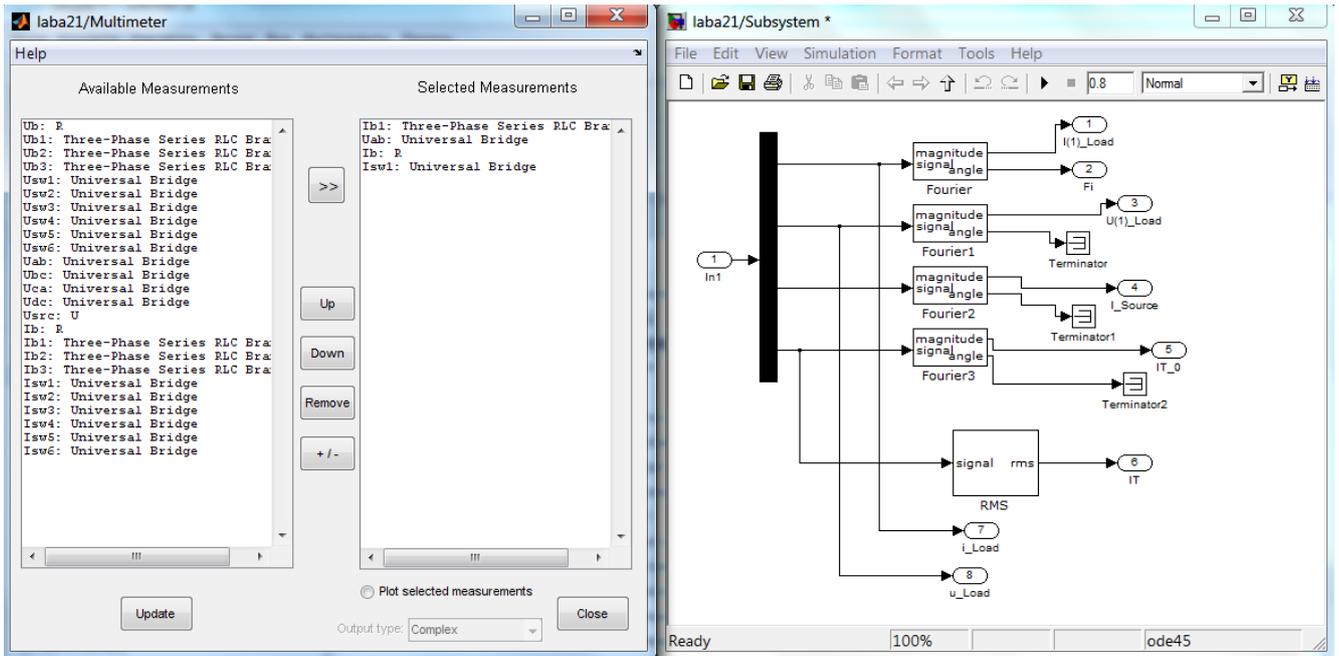


Рис 7.4. Измерительная часть модели

Для построения основных характеристик служит программа, представленная в листинге 1. Эти характеристики показаны на рис.5.

Листинг 1

```

I1Load=Out(:,1);% Амплитуда первой гармоники тока нагрузки
Fi=Out(:,2);% Фаза тока нагрузки
U1Load=Out(:,3);% Амплитуда первой гармоники линейного напряжения нагрузки
ISource=Out(:,4);% Средний ток источника питания
IT0=Out(:,5);% Средний ток в пп плече инвертора
IT=Out(:,6);% Эффективный ток в пп плече инвертора
S11=(1.73*U1Load.*I1Load)/2;% Полная мощность в нагрузке
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);% Активная мощность в нагрузке
Q11=S11.*sin(-Fi*pi/180);% Реактивная мощность в нагрузке
subplot(3,1,1);
plot(I1Load,U1Load);
grid on;
ylabel('U Load (V)');
subplot(3,1,2);
plot(I1Load,ISource,I1Load,IT0,I1Load,IT);
grid on;
ylabel('I Source,IT0,IT (A)');
subplot(3,1,3);
plot(I1Load,S11,I1Load,P11);
grid on;
xlabel('Load current (A)');
ylabel('S1 (VA), P1 (Wt)');

```

Линейное напряжение на выходе инвертора и его спектр представлены на рис.6. Ток на выходе инвертора и его спектр показаны из рис.7.

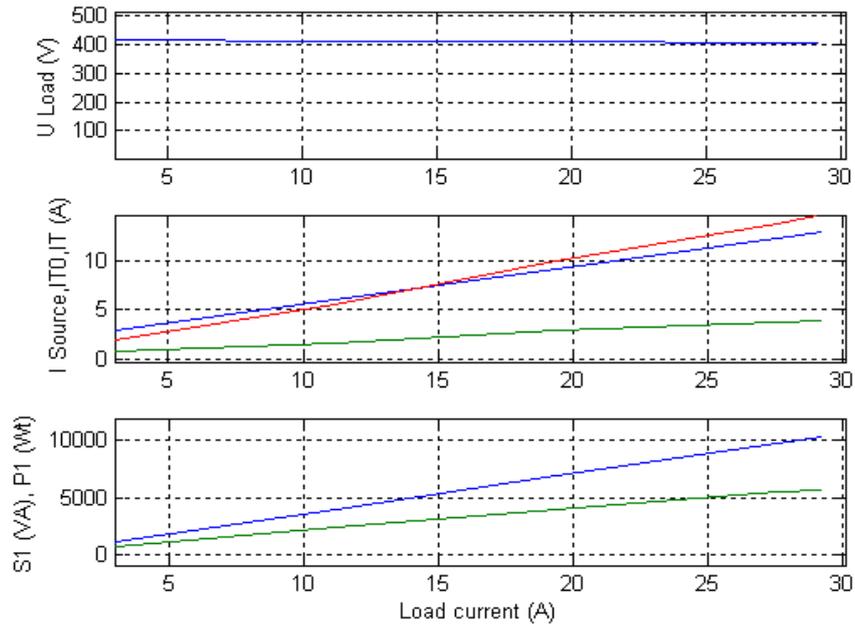


Рис.7.5. Основные характеристики инвертора.

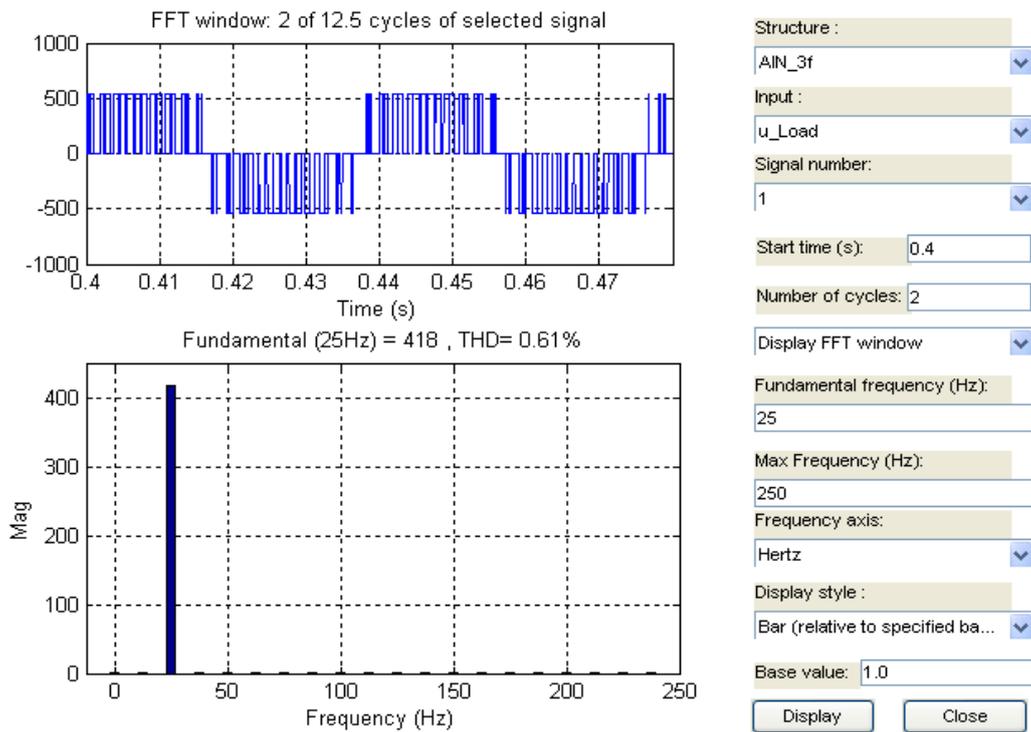


Рис.7.6. Спектр выходного напряжения инвертора.

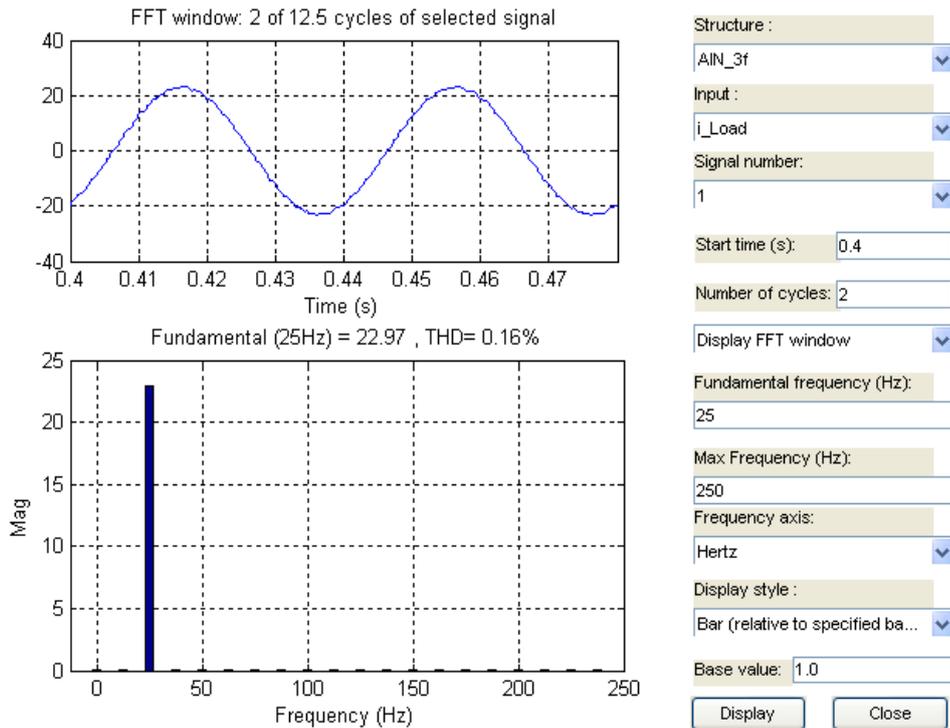


Рис.7.7. Спектр тока на выходе инвертора.

Задание

1. Собрать схему модели, выполненную в MATLAB,
2. Рассчитать основные характеристики инвертора.
3. Провести анализ спектра тока и напряжения на выходе инвертора.

Контрольные вопросы

1. Предложите алгоритм расчета КПД инвертора?
2. Какое назначение инвертора напряжения?
3. Какое назначение инвертора тока?

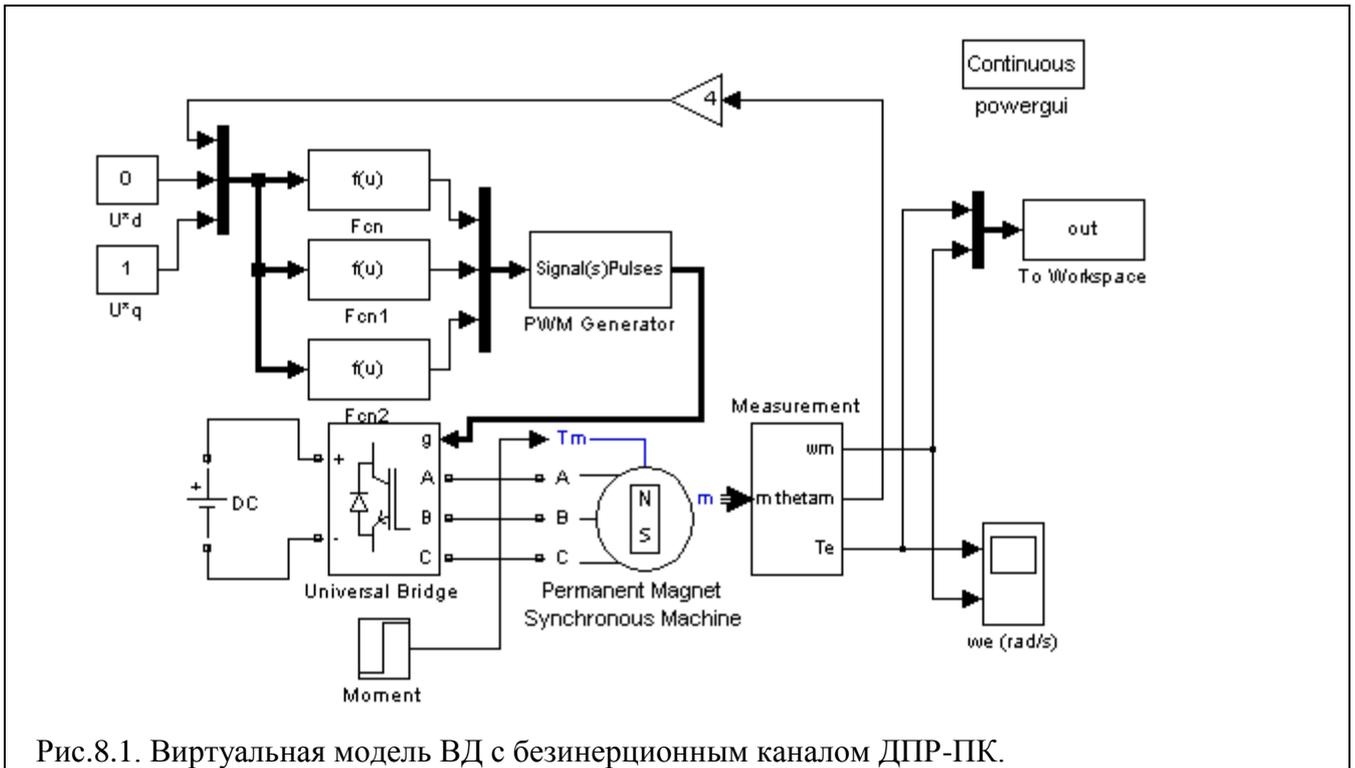
Лабораторная работа 8. Исследование виртуальной модели ВД.

Виртуальная модель для исследования ВД показана на рис.7.1. Модель содержит трехфазную магнитоэлектрическую синхронную машину (Permanent Magnet Synchronous Machine), управляемую от трехфазного инвертора (Universal Bridge), блок управления инвертором (PWM Generator) и преобразователь координат dq-abc (блоки Fcn, Fcn1, Fcn2), в котором реализуются зависимости:

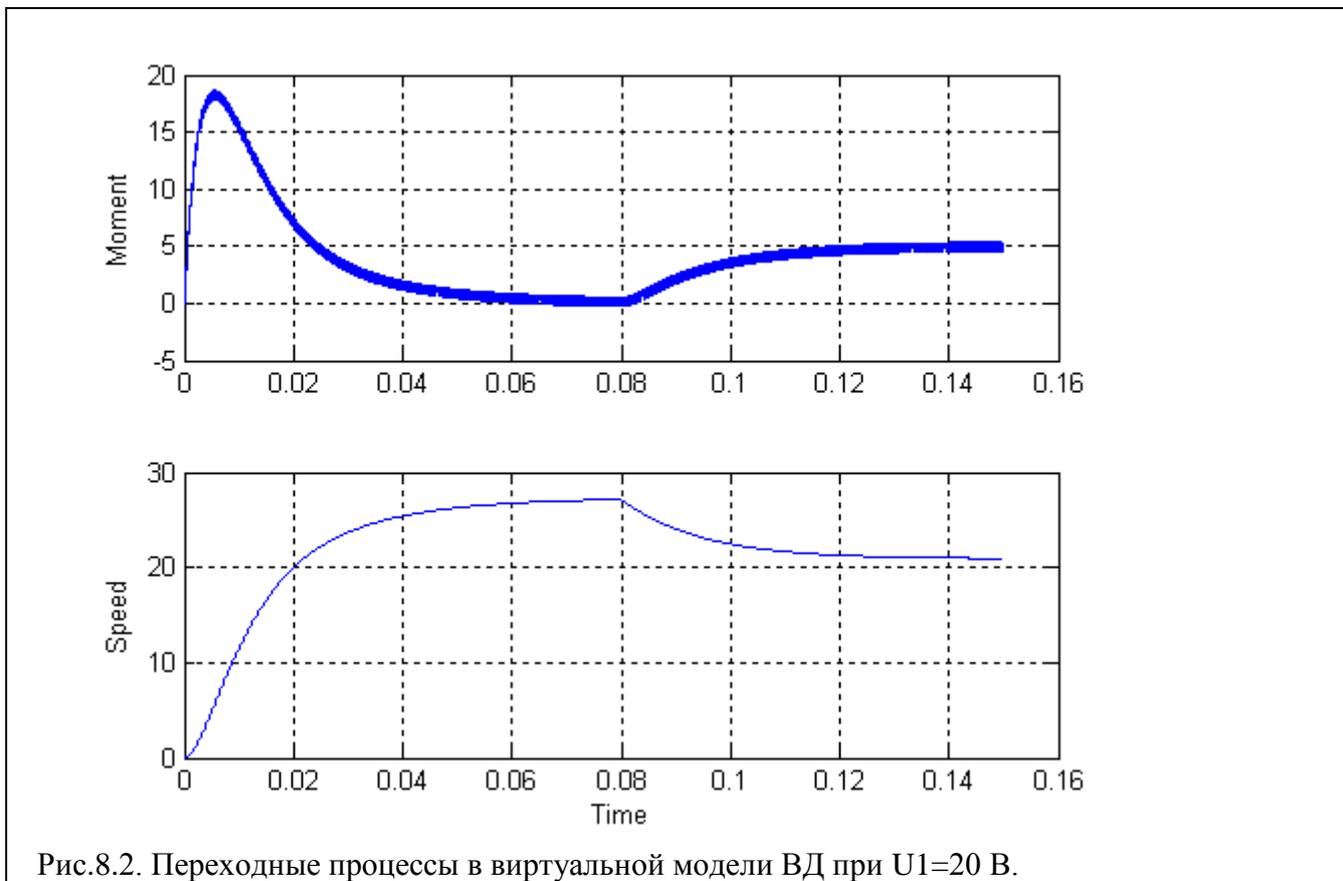
$$\begin{aligned}
 u_A^* &= u_d^* \cos \theta + u_q^* \sin \theta, \\
 u_B^* &= u_d^* \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_q^* \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 u_C^* &= u_d^* \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + u_q^* \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

В блоке Universal Bridge реализуется усиление входных сигналов в соответствии с уравнениями:

$$u_A = K_{cp} u_A^*, \quad u_B = K_{cp} u_B^*, \quad u_C = K_{cp} u_C^* \tag{2}$$



Переходные процессы в ВД при амплитудном значении первой гармоники фазного напряжения равным $U_1=20$ В и $U_1=200$ В. показаны на рис.8.2, 8.3.



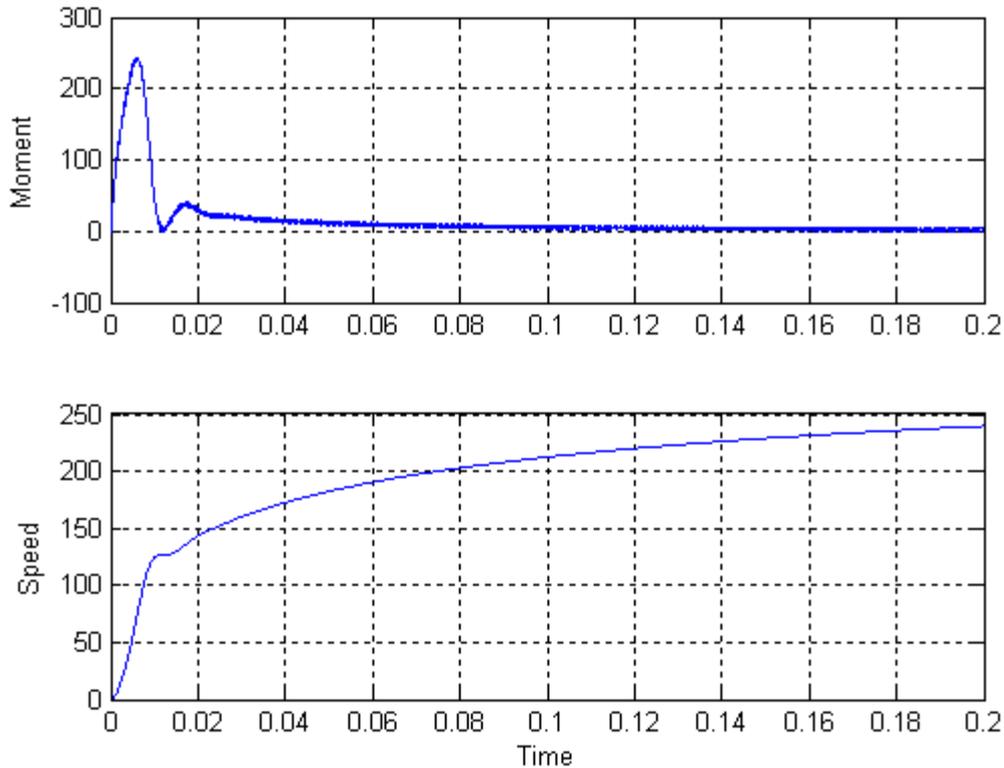


Рис.8.3. Переходные процессы в виртуальной модели ВД при $U_1=200$ В.

Виртуальная модель ВД представляет собой своего рода лабораторный стенд, на котором осуществим исследование не только динамических характеристик ВД, но и статических, электромагнитных, энергетических и спектральных характеристик.

В качестве статических рассмотрим механические ($\omega_m = f(M_H)$, $u_1 = const$) характеристики ВД.

В качестве электромагнитных рассмотрим зависимости тока в цепи питания инвертора и тока потребления двигателем от скорости вращения (I_{dc} , $I_1 = f(\omega_m)$).

В качестве энергетических рассмотрим зависимости мощности в цепи питания инвертора, полной и активной мощности на выходе инвертора от мощности на валу двигателя (P_{dc} , $P_1, S_1 = f(P_m)$).

Из спектральных характеристик рассмотрим спектры напряжения и тока на выходе инвертора. Модель для исследования всех перечисленных характеристик показана на рис.8.4.

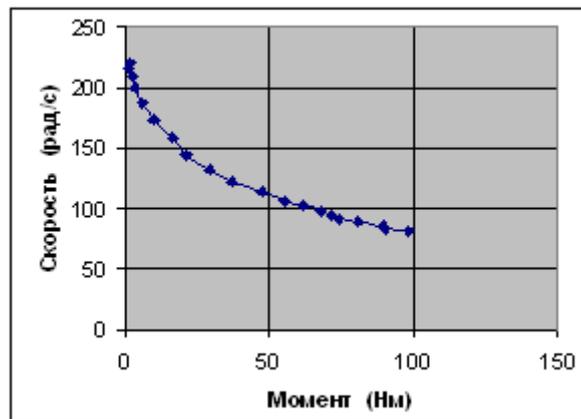
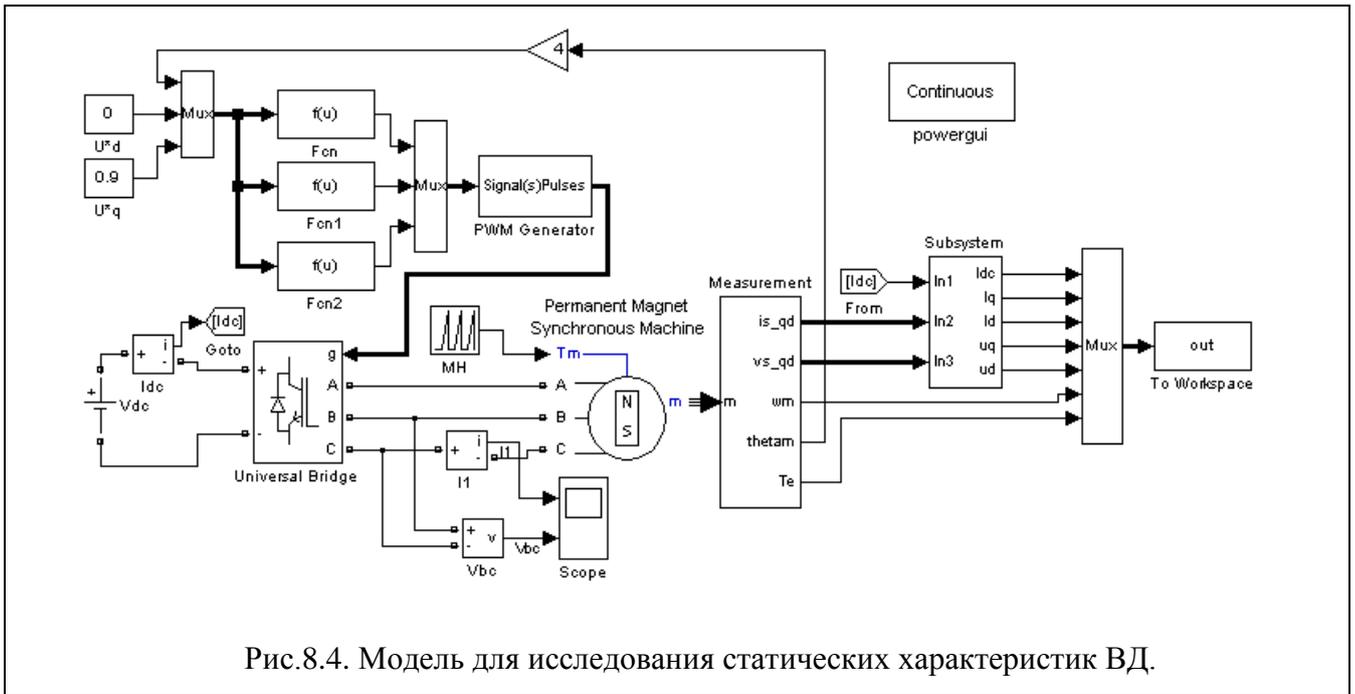


Рис.8.5 Механическая характеристика ВД.

Исследование установившихся режимов в модели реализовано путем формирования линейно нарастающего момента на валу ВД (блок Мн) после окончания переходного процесса. Для этого в течение 0.2 с. момент на валу равен нулю.

За это время заканчивается переходной процесс и скорость ВД достигает значения скорости холостого хода. В течение последующих 0.2 с. момент плавно нарастает от нуля до 100 Нм. Результаты моделирования в этом промежутке времени записываются в рабочее пространство Matlab блоком To Workspace с последующим расчетом всех перечисленных характеристик.

Результаты расчета экспортируются в Excel для построения этих характеристик. Механическая характеристика ВД показана на рис 8.5

Электромагнитные и энергетические характеристики показаны на рис.8.6.

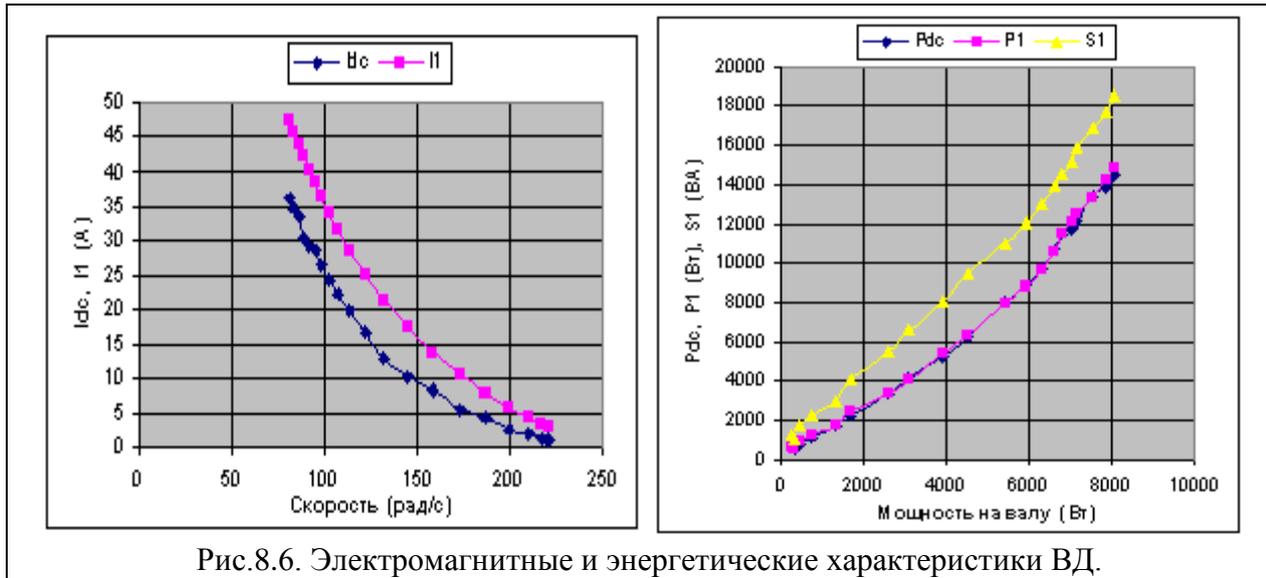


Рис.8.6. Электромагнитные и энергетические характеристики ВД.

Спектральные характеристики напряжения и тока на выходе инвертора снимаются в установленном режиме при постоянном моменте нагрузки на валу ВД с использованием блоков Scope и Powergui. На рис.8.7 показано выходное линейное напряжение инвертора и его спектр, а на рис.8.8 – ток на выходе инвертора и его спектр.

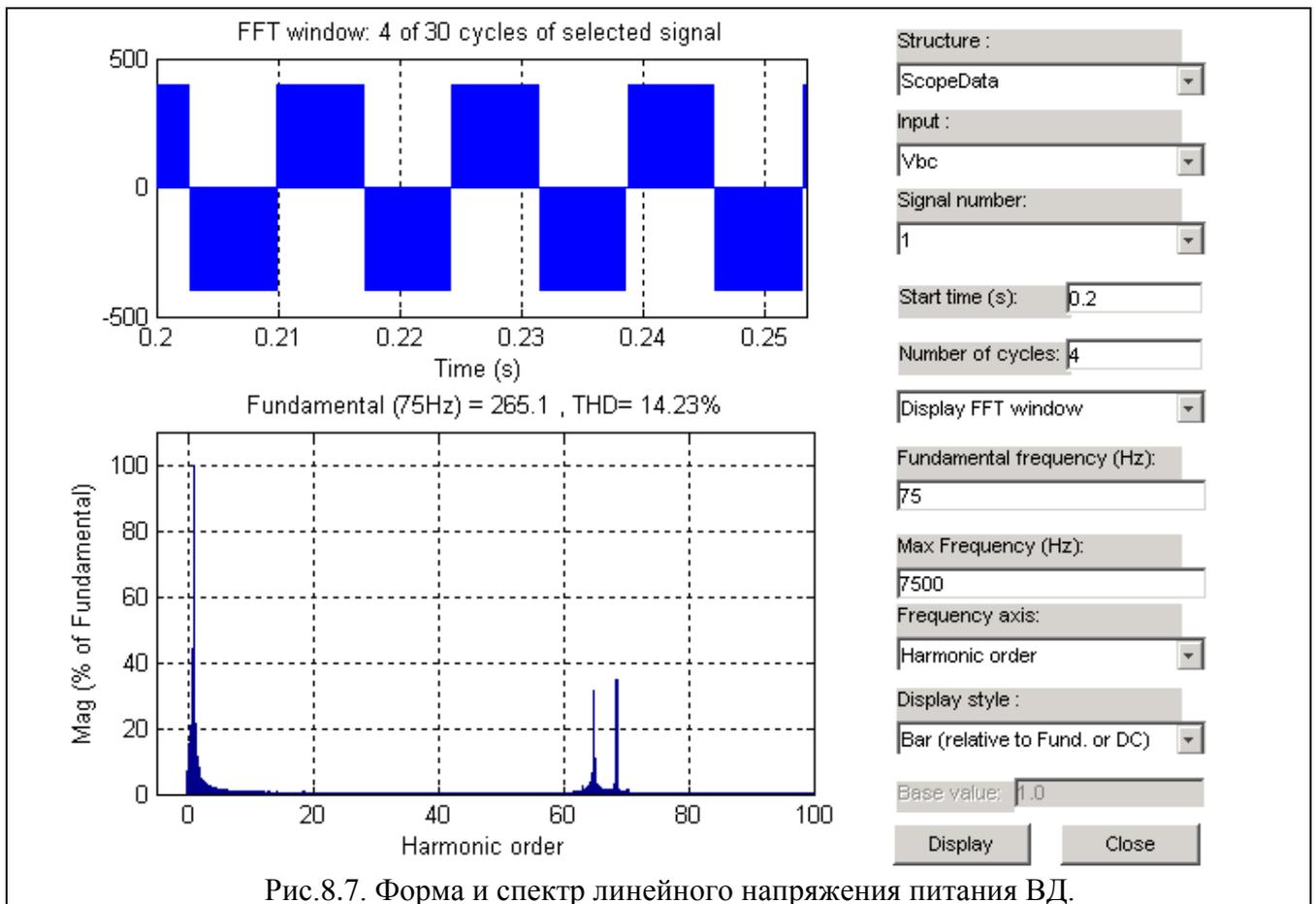


Рис.8.7. Форма и спектр линейного напряжения питания ВД.

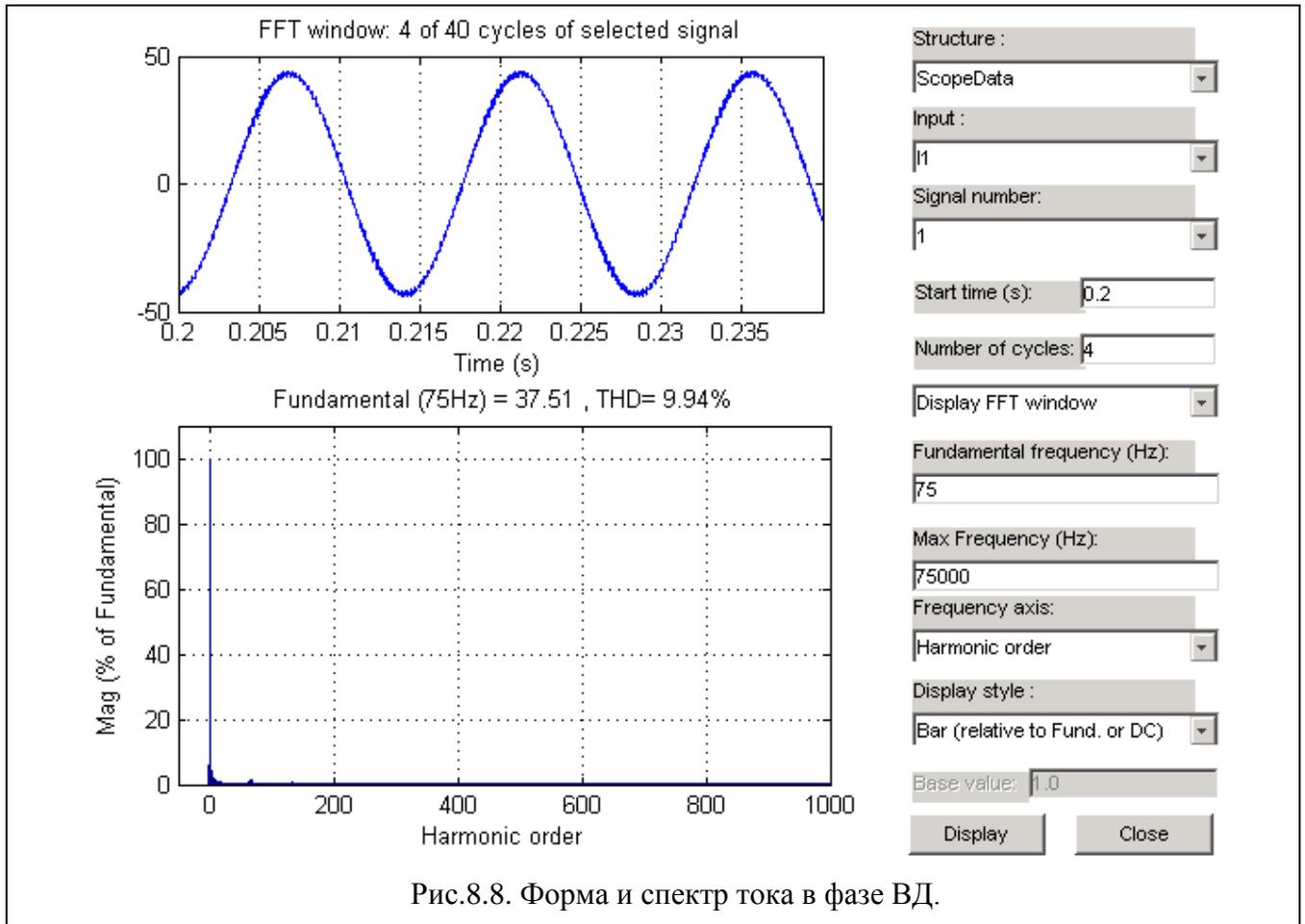


Рис.8.8. Форма и спектр тока в фазе ВД.

1. Собрать схемы, представленные на рис 6.3 и 6.8.
2. Провести исследование моделей.

Задание

1. Набрать схему модели, выполненную в MATLAB.
2. Рассчитать механические характеристики ВД для разных значений напряжения V_{dc} .
3. Провести моделирование электромагнитных и энергетических характеристик.
4. Провести спектральный анализ напряжения и тока на выходе инвертора.

Контрольные вопросы

1. Предложите алгоритм расчета КПД ВД?
2. Какое назначение инвертора напряжения в схеме ВД?
3. Предложите модель, на базе исследуемой модели, для исследования динамических характеристик ВД.

Литература

1. Герман-Галкин. С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. - 368 с. ISBN 978-5-903383-39-9
2. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. В.Дьяконов СПб.: Питер. 2001.
3. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. в математике и моделировании. В.Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс. 2005.
4. MATLAB 7. Ануариов И.Е. Санк-Петербурб. «БХВ-Петербург». 2005

5. Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 7. Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей // Силовая электроника. 2008. № 1.

Оглавление

Лабораторная работа № 1. Компьютерное моделирование при обработке опытных данных	4
Лабораторная работа 2. «Исследование статических и динамических характеристик асинхронного двигателя»	9
Лабораторная работа 3. «Исследование статических и динамических характеристик двигателя постоянного тока»	22
Лабораторная работа 4. Моделирование электрического привода с двигателем постоянного тока	32
Лабораторная работа 5. Модельное исследование выпрямителя с фильтром в качестве источника питания (ИП)	37
Лабораторная работа 6. Моделирование следящей системы	40
Лабораторная работа 7. Моделирование трехфазного инвертора	46
Лабораторная работа 8. Исследование виртуальной модели ВД	51