

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра управления и информатики в технических
и экономических системах

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ MATLAB

Методические указания

Составители
С.И. ЛИХОДЕЕВ
А.Б. ГРАДУСОВ
Д.А. ГРАДУСОВ

Владимир 2006

УДК 621.396.218
ББК 32.884.1
М74

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Моделирование электромеханических систем в среде
М74 MATLAB : метод. указания / Владим. гос. ун-т ; сост. : С. И. Лихо-
деев, А. Б. Градусов, Д. А. Градусов. – Владимир : Изд-во Владим.
гос. ун-та, 2006. – 52 с.

Рассмотрены некоторые элементы электронной библиотеки блоков
«SimPowerSystems» системы MATLAB. Приведены примеры моделирования электро-
механических устройств.

Предназначены для использования в самостоятельной работе студентами специ-
альности 220201 – управление и информатика в технических системах и в курсах «Мо-
делирование», «Электромеханические системы», «Технические средства автоматизации
и управления», «Теория автоматического управления».

Ил. 46. Табл. 5. Библиогр.: 2 назв.

УДК 621.396.218
ББК 32.884.1

ВВЕДЕНИЕ

Электронная библиотека блоков «SimPowerSystems» – одна из многих дополнительных библиотек пакета «Simulink» для моделирования конкретных установок. «SimPowerSystems» содержит состав блоков для моделирования электротехнических установок. Состав библиотеки содержит модели пассивных и активных электротехнических элементов: источники энергии, двигатели, трансформаторы, линии передач и оборудования и т.д. Он включает также блоки для моделирования установок силовой электроники и их систем управления. Используя специальные возможности «Simulink» и «SimPowerSystems», пользователь может не только имитировать, но также анализировать работу установок во времени. В частности, пользователь имеет возможность анализировать установившийся режим работы системы на переменном токе, рассчитать эквивалентное сопротивление, получить частотные характеристики, анализировать устойчивость, так же как и делать гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненное достоинство «SimPowerSystems» – 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. Такой подход, в отличие от пакетов схмотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с блоками «SimPowerSystems» (в дальнейшем SPS-модели) можно использовать блоки и остальных библиотек «Simulink», а также функции самого MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Библиотека «SimPowerSystems» довольно обширная. В случае если в библиотеке не хватает необходимого блока, пользователь имеет возможность его создать средствами самого MATLAB.

1. СОСТАВ БИБЛИОТЕКИ И ГЛАВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ «SIMPOWERSYSTEMS»¹

1.1. Состав библиотеки «SimPowerSystems»

Библиотека «SimPowerSystems» имеет семь основных разделов.

1. Источники электроэнергии (Electrical Sources).
2. Соединители (Connectors).
3. Измерительные и контрольные устройства (Measurements).
4. Электротехнические элементы (Elements).
5. Устройства силовой электроники (Power Electronics)
6. Электрические машины (Машины).
7. Дополнительные электротехнические устройства (Powerlib Extras).

Используя эти блоки, можно за короткое время создать модель достаточно сложной системы.

1.2. Основные особенности создания SPS-модели

Методика создания SPS-модели ничем 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. Для SPS-моделей доступен ускоренный режим расчета и все возможности Simulink, включая набор инструментов Simulink Performance Tools, линейный анализ, отладчик и т.д. Однако SPS-модели имеют и некоторые особенности.

1. Входы и выходы SPS-блоков в отличие от блоков Simulink 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 вовнутрь блока, так и наружу.
2. Соединительные линии между блоками являются, по сути, электрическими проводами, по которым ток может протекать также в двух направлениях. В Simulink-моделях же информационный сигнал рас-

¹ При написании первого и второго параграфа частично использовались материалы сайта <http://matlab.exponenta.ru/>

пространяется только в одном направлении – от выхода одного блока к входу другого.

3. Simulink-блоки и SimPowerSystems-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 не наоборот, с помощью измерителей тока или напряжения.
4. Несколько линий связи (проводов) могут быть соединены между собой. Для выполнения такого соединения должны использоваться специальные блоки – Connectors (соединители).
5. При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, следует использовать методы:
 - 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, которые дают наилучшие результаты по быстродействию.

Рассмотрим пример модели трехфазного мостового тиристорного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку и противо-ЭДС (рис 1.1).

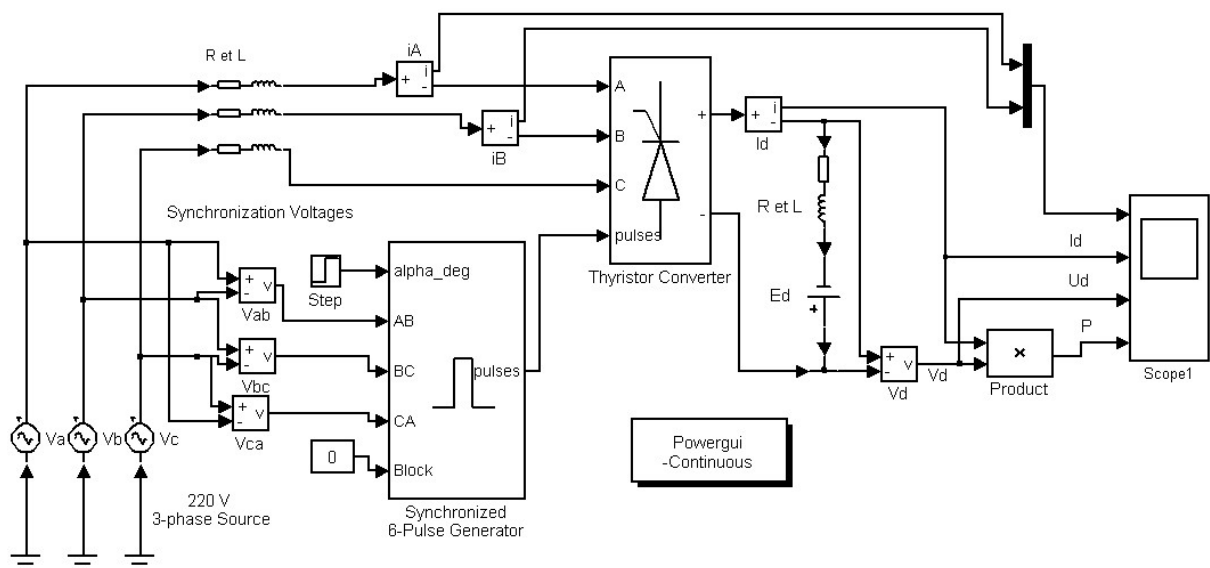


Рис. 1.1

В модели преобразователя использованы как блоки библиотеки «SimPowerSystems» (источники переменного напряжения, тиристорный выпрямитель, система управления, RLC-цепи, измерители тока и напряже-

ния), так и блоки основной библиотеки «Simulink» (осциллограф, блок ступенчатого сигнала, сумматоры и т.д.).

Мгновенная мощность в нагрузке вычисляется перемножением сигналов, пропорциональных току и напряжению нагрузки, которые формируются с помощью соответствующих измерителей.

На схеме модели показаны изображения резистора и катушки индуктивности в соответствии со стандартом, принятым в России. Если не предпринимать специальных мер, то изображения этих элементов будут выглядеть в соответствии со стандартом США.

Результаты моделирования представлены на рис. 1.2.

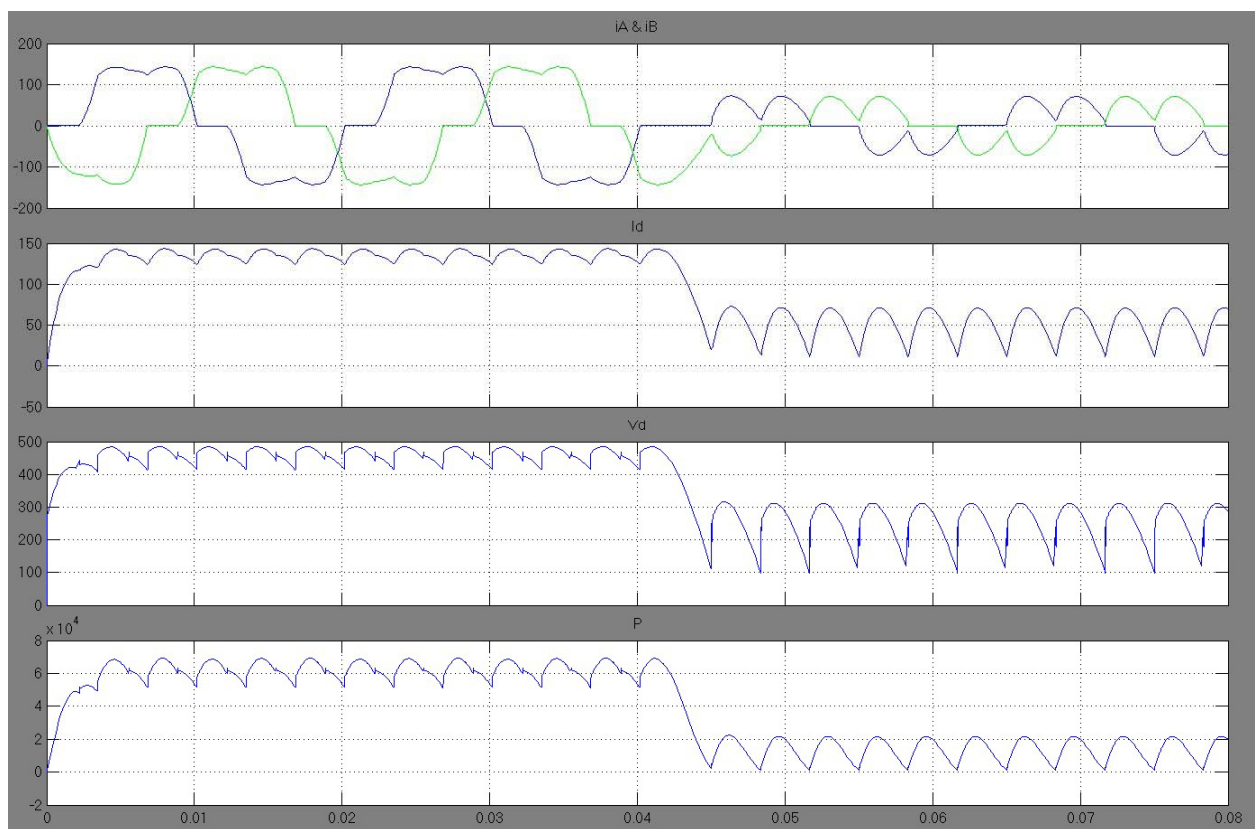


Рис. 1.2

1.3. Единицы измерения электрических и неэлектрических величин

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

Таблица 1.1

Параметр	Обозначение	Единица 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 (В·А)
Reactive power (реактивная мощность)	var	var (В·Ар)
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)
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

$$y = Y / Y_b,$$

где Y – значение физической величины (параметра, переменной и т.п.) в исходной системе единиц, например в системе единиц СИ; Y_b – 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, для разработки моделей в «SimPowerSystems» выбраны две независимые величины:

- P_b – базисная мощность, равная номинальной активной мощности устройства (P_H),
- U_b – базисное напряжение, равное номинальному действующему значению напряжения питания устройства (U_H).

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

$$I_b = P_b / U_b.$$

Базовое сопротивление считается следующим образом:

$$R_b = U_b^2 / P_b.$$

Для цепей переменного тока должна задаваться базисная частота f_b , равная, как правило, номинальной частоте питающего напряжения f_H .

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

Для асинхронной электрической машины дополнительно задаются: Ω_b – базисная угловая скорость, M_b – базисный момент.

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

$$H = \frac{1/2J\Omega_1^2}{P_H},$$

где J – момент инерции; Ω_1 – угловая частота 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 1.

Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора имеют значения, представленные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Число фаз	m	3	–
Nominal power (номинальная мощность)	P_n	300	кВ·А
Nominal frequency (номинальная частота сети)	f_n	50	Гц
Первичная обмотка			
Схема соединения	–	звезда	–
Nominal voltage (номинальное напряжение)	U_{1n}	25	кV
Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)	R_1	0,01	о.е.
Leakage reactance (индуктивность рассеяния)	L_1	0,02	о.е.
Вторичная обмотка			
Схема соединения	–	треугольник	–
Nominal voltage (номинальное напряжение)	U_{2n}	600	V
Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)	R_2	0,01	о.е.
Leakage reactance (индуктивность рассеяния)	L_2	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)	Δ_{110a}	1	%
Число фаз	Δ_{110p}	1	%

Выражения для определения базисных единиц и их значения приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единица измерения
Frequency (частота)	$f_{\delta} = f_n$	50	Гц
Первичная обмотка			
Current (ток)	$I_{\delta} = \frac{P_{1\delta}}{U_{1\delta}} = \frac{100 \cdot 10^3}{14434}$	6,928	А

Окончание табл. 1.3

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единица измерения
Impedance (полное сопротивление)	$Z1_{\sigma} = \frac{U1_{\sigma}}{I1_{\sigma}} = \frac{14434}{6,928}$	2083	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R1_{\sigma} = \frac{U1_{\sigma}}{I1_{\sigma}} = \frac{14434}{6,928}$	2083	Ом
Inductance (индуктивность)	$L1_{\sigma} = \frac{R1_{\sigma}}{2\pi f_{\sigma}} = \frac{2083}{2\pi 60}$	5,525	Гн
Вторичная обмотка:			
Power (мощность)	$P2_{\sigma} = \frac{P_H}{m} = \frac{300 \cdot 10^3}{3}$	100·103	В·А
Voltage (напряжение)	$U2_{\sigma} = U2 = 600$	600	V
Current (ток)	$I2_{\sigma} = \frac{P2_{\sigma}}{U2_{\sigma}} = \frac{100 \cdot 10^3}{600}$	166,7	А
Impedance (полное сопротивление)	$Z2_{\sigma} = \frac{U2_{\sigma}}{I2_{\sigma}} = \frac{600}{166,7}$	3,60	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R2_{\sigma} = \frac{U2_{\sigma}}{I2_{\sigma}} = \frac{600}{166,7}$	3,60	Ом
Inductance (индуктивность)	$L2_{\sigma} = \frac{R2_{\sigma}}{2\pi f_{\sigma}} = \frac{3,60}{2\pi 60}$	0,009549	Гн

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

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

$$L_m = 100 \cdot L1_{\sigma} = 100 \cdot 5,525 = 552,25 \text{ Гн.}$$

Пример 2.

Параметры трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя с фазным ротором имеют значения, представленные в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Число фаз	m	3	–
Число пар полюсов	p	2	–
Nominal power (номинальная мощность)	P_n	2238	В·А
Nominal frequency (номинальная частота сети)	f_n	50	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 и их значения приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единица измерения
Power (мощность)	$P_6 = \frac{P_n}{m} = \frac{2238}{3}$	746	ВА
Frequency (частота)	$f_6 = f_n$	60	ч
Voltage (напряжение)	$U_6 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}}$	127,0	В
Current (ток)	$I_6 = \frac{P_n}{U_6} = \frac{746}{127}$	5,874	А
Impedance (полное сопротивление)	$Z_6 = \frac{U_6}{I_6} = \frac{127}{5,874}$	21,62	Ом
Resistance (активное сопротивление)	$R_b = \frac{U_b}{I_b} = \frac{127}{5,874}$	21,62	Ом
Inductance (индуктивность)	$L_6 = \frac{Z_6}{2\pi f_6} = \frac{21,62}{2\pi 50}$	0,0688	Ч.
Speed (скорость)	$\Omega_b = \Omega_1 = \frac{2\pi f_n}{p} = \frac{2\pi 50}{2}$	157,08	рад/с
Torque (момент)	$M_6 = \frac{P_6 m}{\Omega_6} = \frac{746 \cdot 3}{157,08}$	14,247	Н·м

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

- сопротивление статора

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

- индуктивность статора

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

- сопротивление ротора

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

- индуктивность ротора

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

Величина инерционной постоянной

$$H = \frac{1/2 \cdot J \Omega_1^2}{P_H} = \frac{1/2 \cdot 0,089 \cdot 157^2}{2238} = 0,49011 \text{ с.}$$

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.

1. 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.

2. Величины полных сопротивлений слабо меняются при изменении мощности и питающего напряжения устройства. Например, для всех трансформаторов в диапазоне мощностей от 3 до 300 кВ·А 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 кВ·А до 300 МВ·А 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. Таким образом, если параметры трансформатора мощностью 10 кВ·А неизвестны, не будет большой ошибкой принять среднее значение 0,02 о.е. для реактивности рассеяния и 0,0075 о.е. для обмоточных сопротивлений.

3. 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. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ELECTRICAL SOURCES)

2.1. Идеальный источник постоянного напряжения (DC Voltage Source)

Идеальный источник постоянного напряжения вырабатывает постоянное по величине напряжение.



Рис. 2.1

Пиктограмма, обозначающая идеальный источник постоянного напряжения, приведена на рис. 2.1.

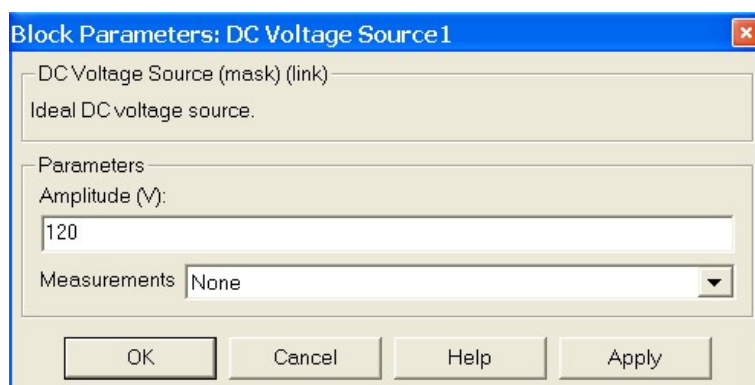


Рис. 2.2

Окно задания параметров идеального источника постоянного напряжения, приведено на рис. 2.2.

Параметры рассматриваемого блока:

Amplitude (V) (Амплитуда (В)) – задает величину выходного напряжения источника;

Measurements (Измеряемые переменные) – параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Score. 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.

На рис. 2.3 показан пример включения активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение. Подключение источника к нагрузке обеспечивается блоком Breaker, 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.

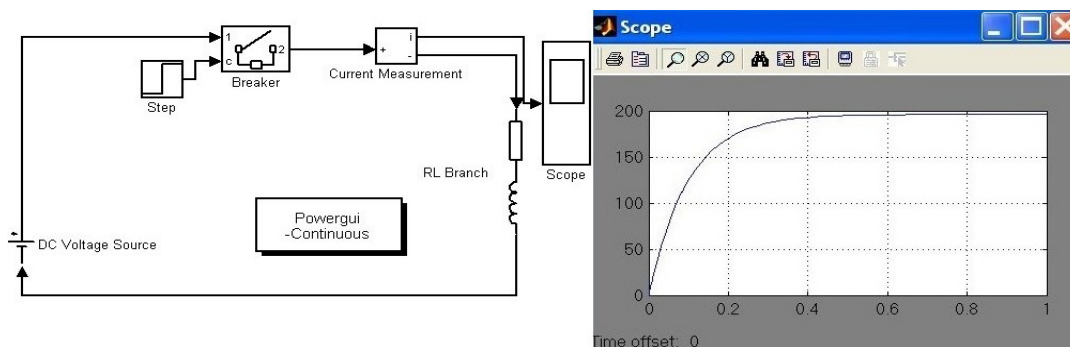


Рис. 2.3

2.2. Идеальный источник переменного напряжения (AC Voltage Source)

Идеальный источник переменного напряжения вырабатывает синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой.

Пиктограмма блока приведена на рис. 2.4.

Окно задания параметров представлено на рис. 2.5.



Рис. 2.4

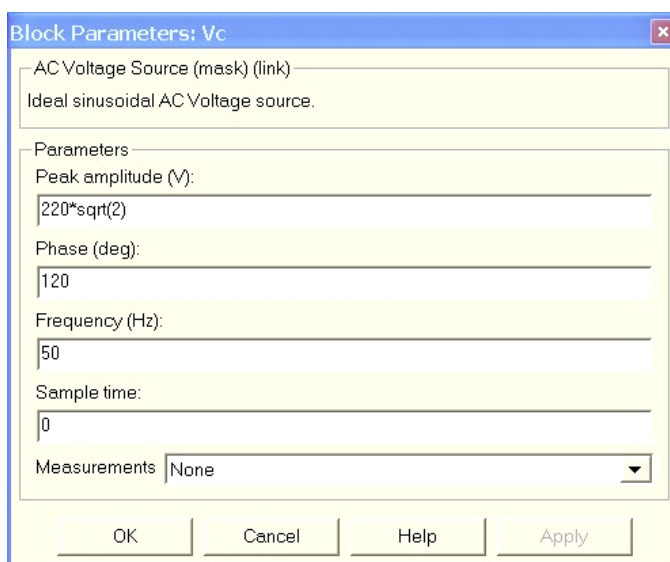


Рис. 2.5

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.

На рис. 2.6 показана схема, моделирующая подключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного напряжения. Там же приведен график тока в нагрузке.

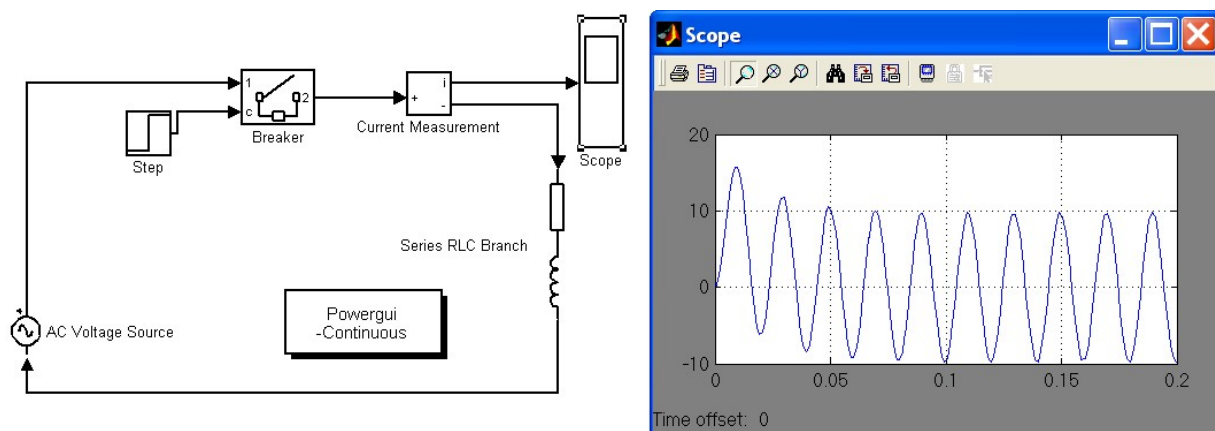


Рис. 2.6

2.3. Идеальный источник переменного тока (AC Current Source)

На рис. 2.7 приведена пиктограмма идеального источника переменного тока:

Идеальный источник переменного тока вырабатывает синусоидальный ток с постоянной амплитудой.

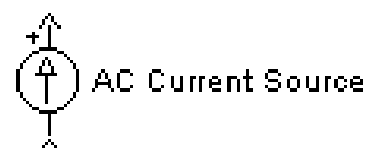


Рис. 2.7

Окно задания параметров представлено на рис. 2.8.

Параметры блока:

Peak Amplitude (A) (амплитуда) – амплитуда выходного тока источника;

Phase (deg) (фаза (град)) – начальная фаза;

Frequency (Hz) (частота (Гц)) – частота источника;

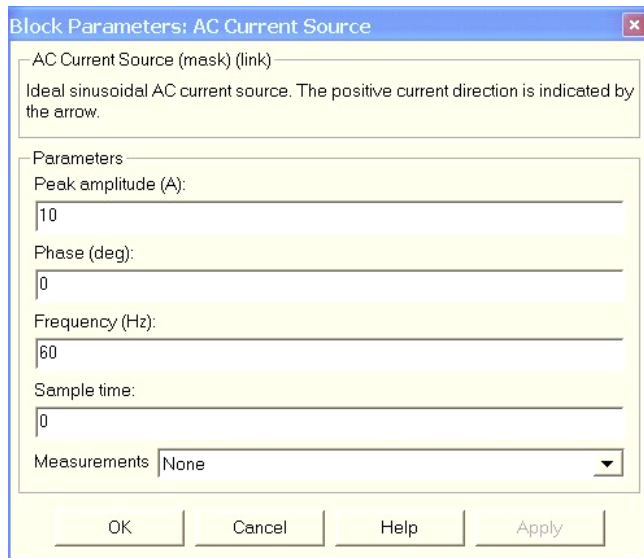


Рис. 2.8

- Current – выходной ток источника.

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

На рис. 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.

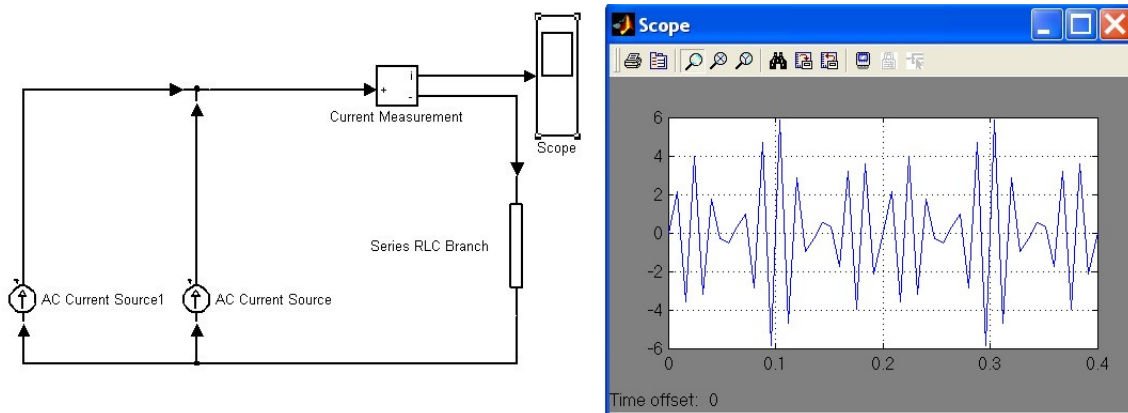


Рис. 2.9

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;

2.4. Управляемый источник напряжения (Controlled Voltage Source)

Управляемый источник напряжения вырабатывает напряжение в соответствии с сигналом управления.

Пиктограмма управляемого источника напряжения приведена на рис. 2.10.

На рис. 2.11 представлено окно задания параметров блока.

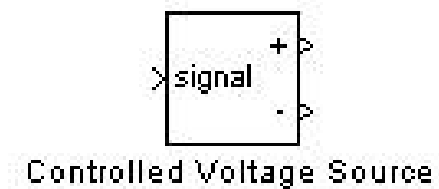


Рис. 2.10

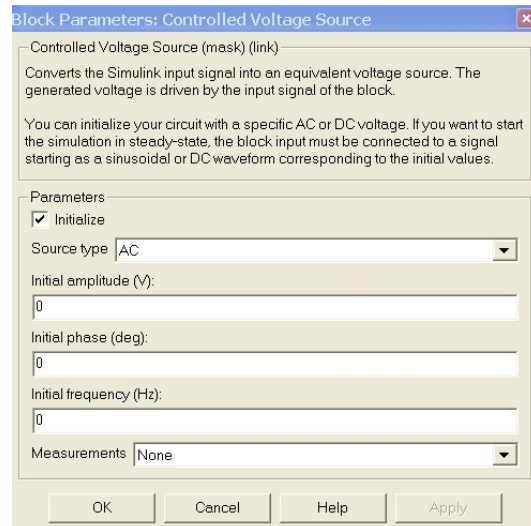


Рис. 2.11

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) (начальная частота (Гц)) – начальная частота источника. Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения;

Measurements (измеряемые переменные) – параметр позволяет выбирать, 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. На рис. 2.12 показана схема с использованием управляемого источника напряжения, формирующего по сигналу управления прямоугольное напряжение на нагрузке.

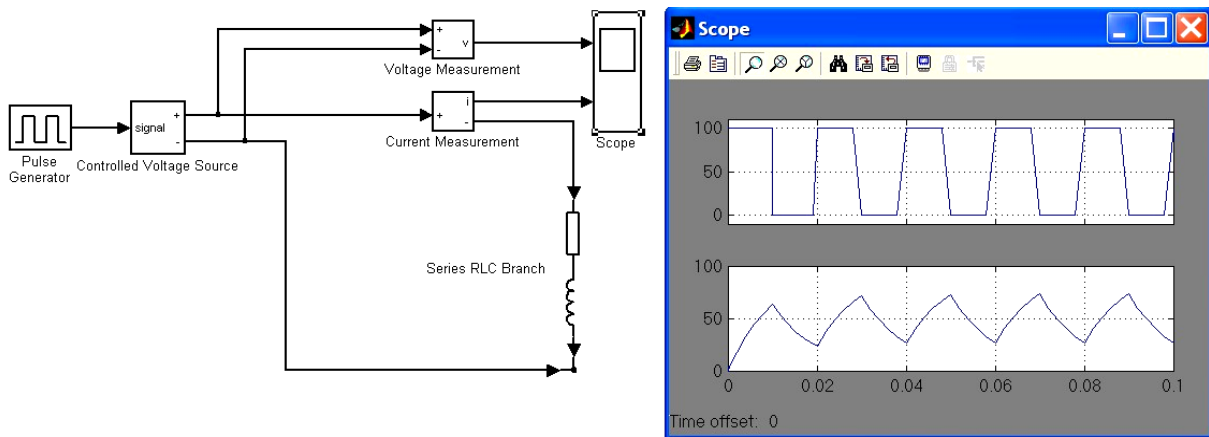


Рис. 2.12

2.5. Управляемый источник тока (Controlled Current Source)

Управляемый источник тока вырабатывает ток в соответствии с сигналом управления. Пиктограмма этого блока изображена на рис. 2.13.

Окно задания параметров приведено на рис. 2.14.

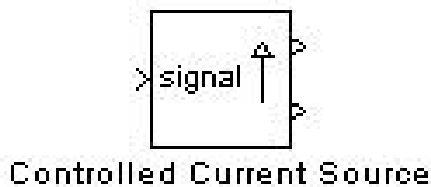


Рис. 2.13

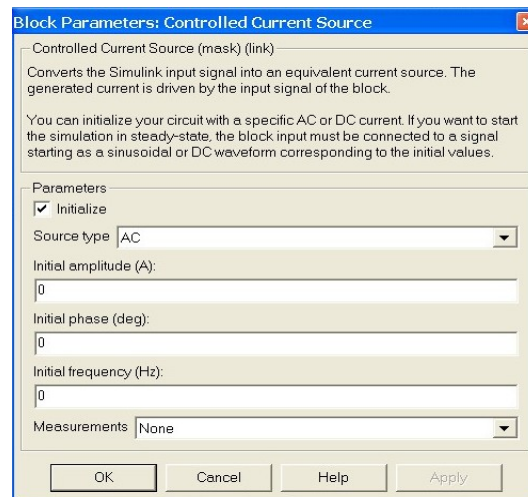


Рис. 2.14

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, если источник инициализируется как источник переменного тока;

Initial frequency (Hz) (начальная частота (Гц)) – начальная частота источника. Параметр доступен, если 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.

На рис. 2.15 показана схема с использованием управляемого источника тока, формирующего в нагрузке серии синусоидальных импульсов тока.

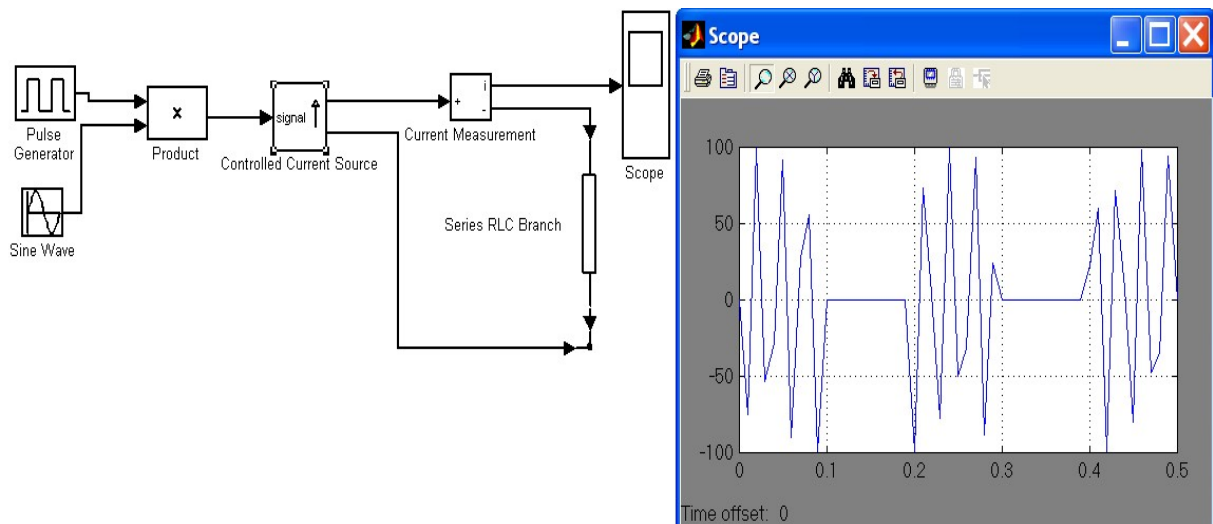


Рис. 2.15

2.6. Трехфазный источник напряжения (3-Phase Source)

Трехфазный источник напряжения вырабатывает трехфазную систему напряжений.

Пиктограмма трехфазного источника напряжения приведена на рис. 2.16.

Окно задания параметров представлено на рис. 2.17.

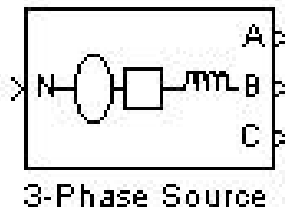


Рис. 2.16

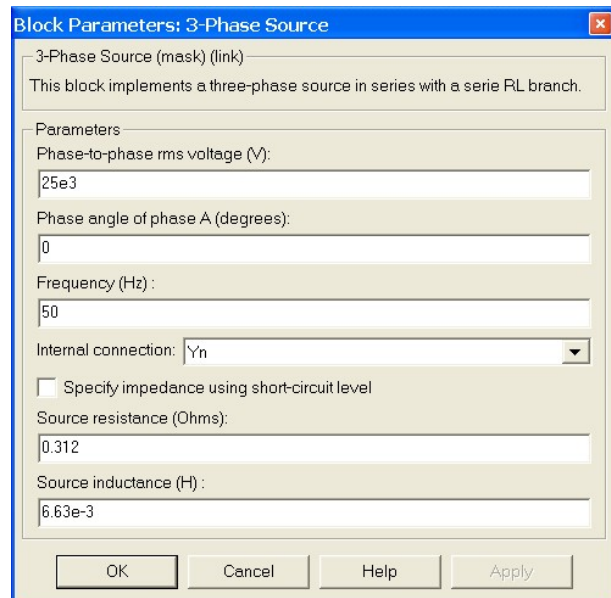


Рис. 2.17

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;

- Y_n – звезда с нулевым проводом;
- Y_g – 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 (V_{rms} 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

$$X = U_{кз}^2 / Q_{кз},$$

где $Q_{кз}$ – мощность короткого замыкания,

$U_{кз}$ – напряжение источника, при котором определена мощность короткого замыкания.

Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

$$R = X / k ,$$

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

На рис. 2.18 показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке. Токи в нагрузке измерены с помощью блока Multimeter.

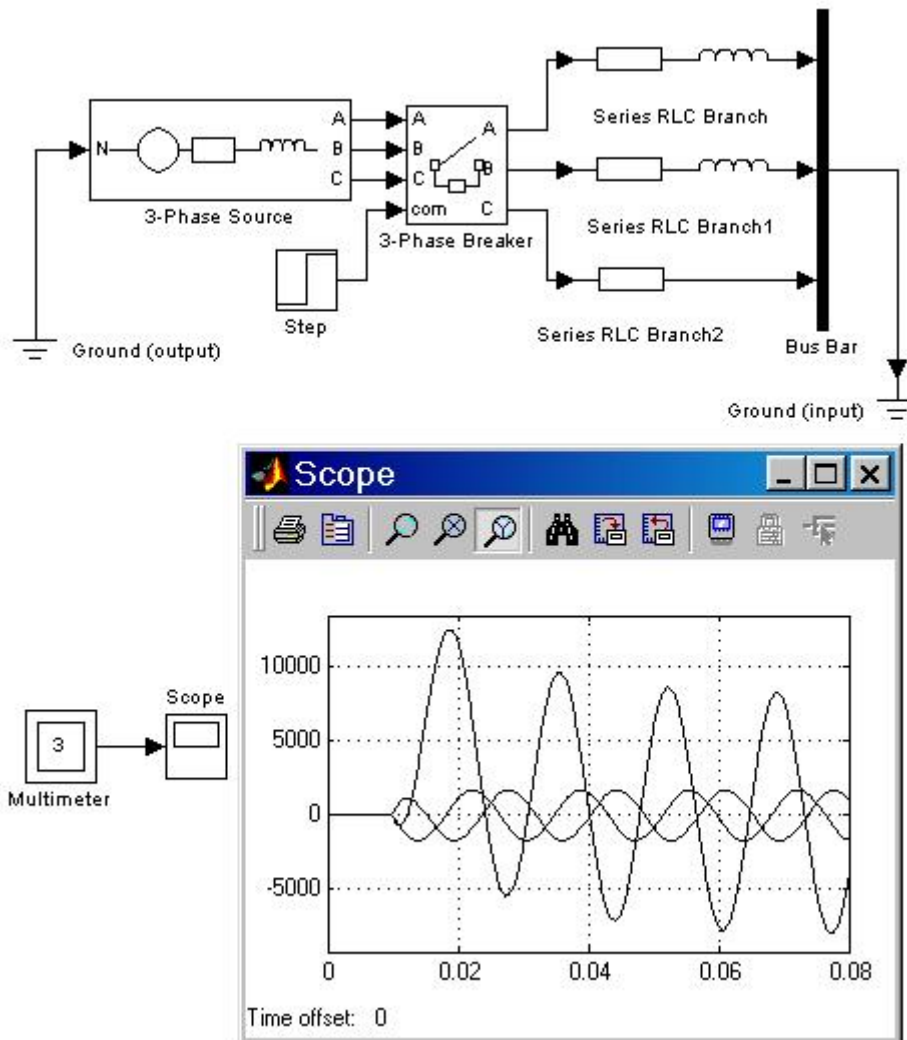


Рис. 2.18

2.7. Трехфазный программируемый источник напряжения (3-Phase Programmable Voltage Source)

Трехфазный программируемый источник напряжения вырабатывает трехфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты, а также гармонического состава.

На рис. 2.19 приведена пиктограмма трехфазного программируемого источника напряжения.

Окно задания параметров блока представлено на рис. 2.20.

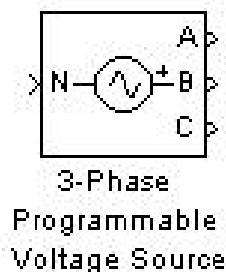


Рис. 2.19

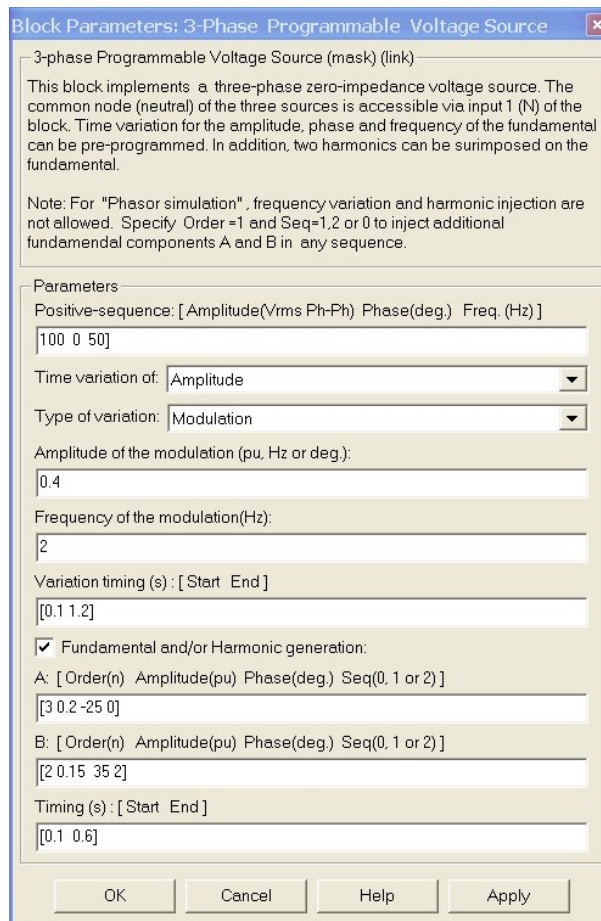


Рис. 2.20

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»;
- Step magnitude (уровень ступенчатого сигнала) – задает величину, на которую ступенчато изменяется выбранный параметр. Изменение величины напряжения задается в относительных единицах (о.е.), фазы – в электрических градусах и частоты – в герцах. 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;
- 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 электрических градусах и частоты – в герцах;
- Frequency of the modulation (Hz) (частота модуляции (Гц));
- Variation timing (s): [Start End] (время действия изменения (начало, конец)) – параметр определяет время начала и окончания действия 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: номер гармоники, амплитуда (в о.е., 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;

- В: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq(0, 1 or 2)] (В: (гармоника (n), амплитуда, фаза (град), последовательность (0, 1 или 2))) – параметр задается аналогично предыдущему;
- Harmonic timing (s): [Start End] (время действия гармоника (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).

На рис. 2.21 показана схема с использованием трехфазного программируемого источника напряжения, подключенного к симметричной активной нагрузке. В интервале времени от 0,02 до 0,06 с источник дополнительно генерирует третью гармонику напряжения прямой последовательности с амплитудой 0,5 о.е.

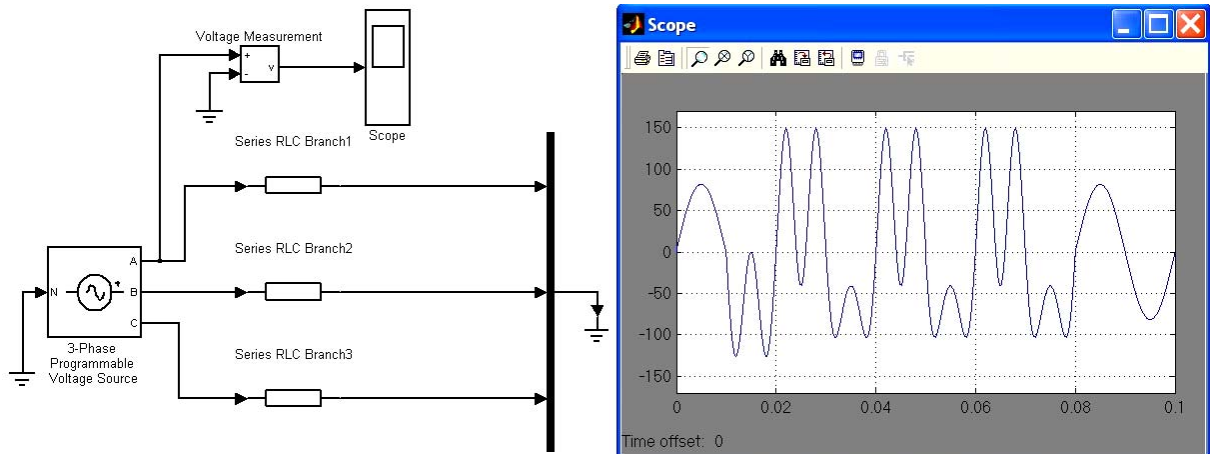


Рис. 2.21

3. МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

3.1. Математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и его Simulink-модель

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (рис. 3.1) описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах:

$$u = e + R_{ind}i + L_{ind} \frac{di}{dt}; \quad (1)$$

$$C - C_r = J \frac{d\Omega}{dt}; \quad (2)$$

$$C = c_e \Phi i; \quad (3)$$

$$e = c_e \Phi \Omega, \quad (4)$$

где u – напряжение на якорной обмотке двигателя; e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; i – ток якоря; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; C – электромагнитный момент двигателя; C_r – момент сопротивления движению; Ω – частота вращения вала двигателя; R_{ind} – активное сопротивление якорной цепи; L_{ind} – индуктивность якорной цепи; J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки, приведенный к валу двигателя; c_e – коэффициент связи между скоростью и ЭДС.

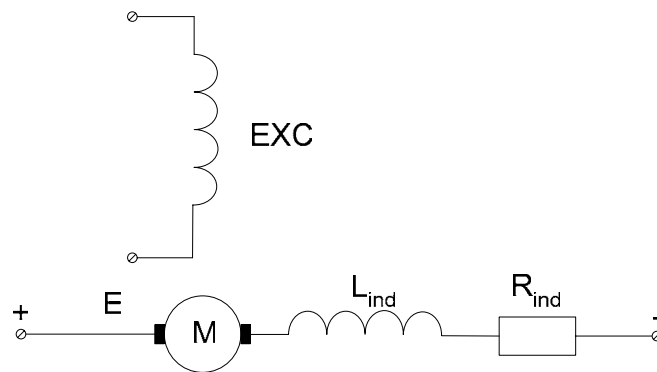


Рис. 3.1

Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением приведена на рисунке 3.2.

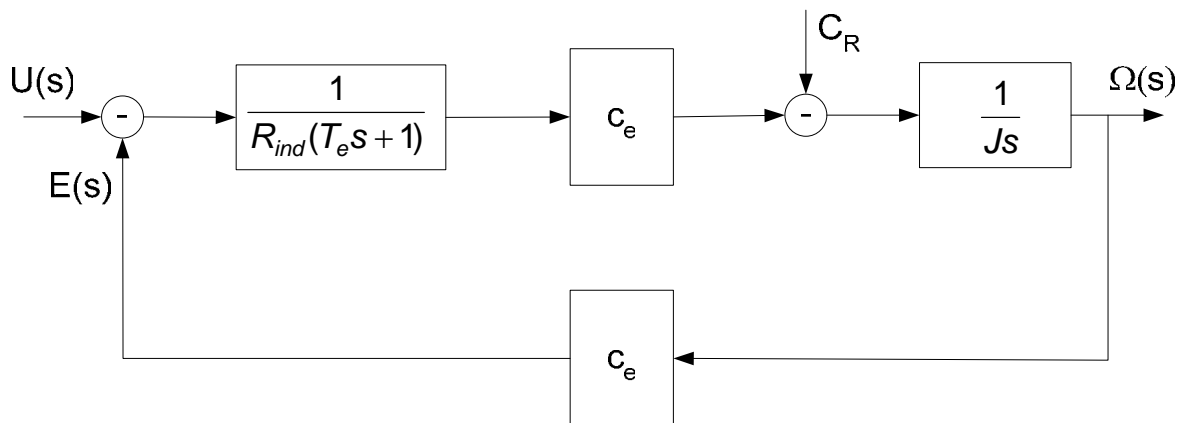


Рис. 3.2

С точки зрения будущей модели, входные воздействия: напряжение якоря u и момент сопротивления движению C_r ; выходные переменные –

электромагнитный момент двигателя C и скорость вращения вала двигателя Ω , переменные состояния – переменные, стоящие под знаком производной (ток якоря i и частота вращения вала двигателя Ω). Остальные переменные, входящие в состав уравнений (1) – (4), являются параметрами, численные значения которых необходимо будет задавать при проведении моделирования.

Схема модели, а также графики электромагнитного момента и частоты вращения при прямом пуске двигателя показаны на рис. 3.3. В примере приняты следующие значения параметров двигателя (в единицах СИ): $L_{ind} = 0,001$, $R_{ind} = 0,1$, $J = 10$, $c_e = 10$, $U = 220$. Наброс нагрузки производится в момент времени 0,2 с, величина момента нагрузки – 2500 Н·м.

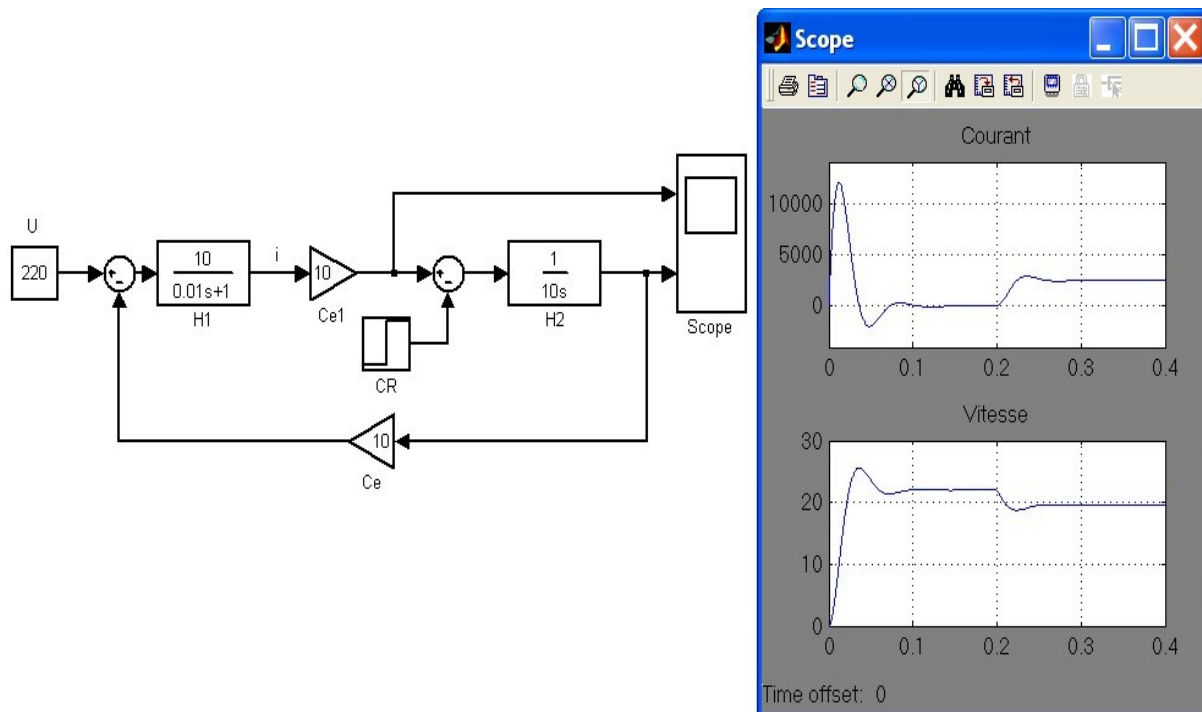


Рис. 3.3

Для создания модели «SimPowerSystems» (в дальнейшем SPS-модели) двигателя на базе управляемого источника тока можно воспользоваться общей схемой, приведенной на рис. 3.4. Выход датчика напряжения должен быть подключен к первому входу сумматора, а на управляющий вход источника тока должен быть подан сигнал, пропорциональный току

якоря двигателя. Схема блока SPS-модели двигателя, полная схема модели, а также графики тока якоря и частоты вращения вала показаны на рис. 3.5 и 3.6.

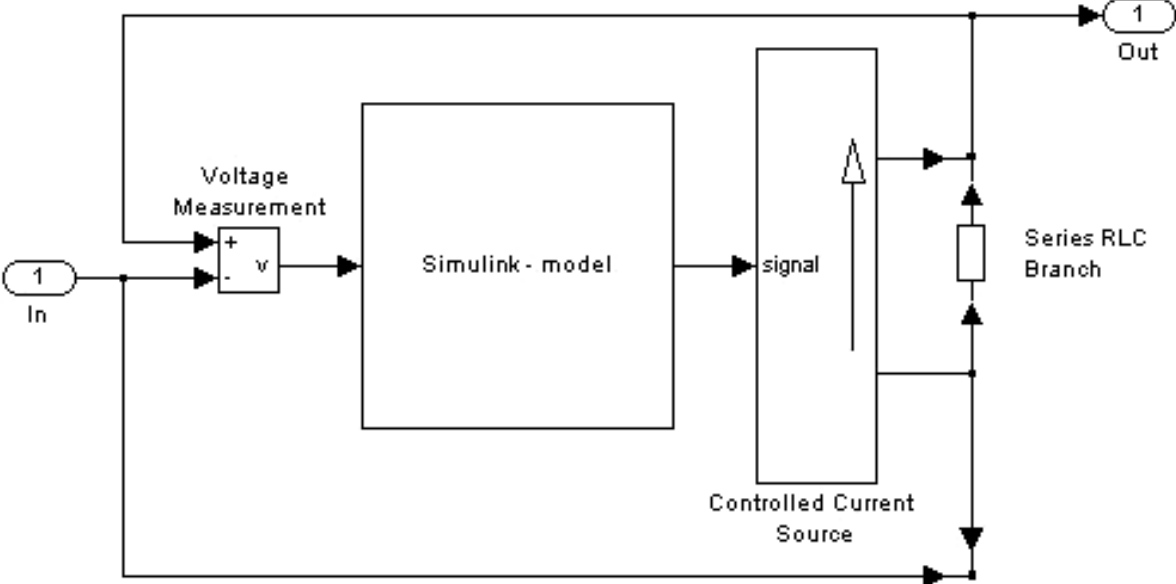


Рис. 3.4

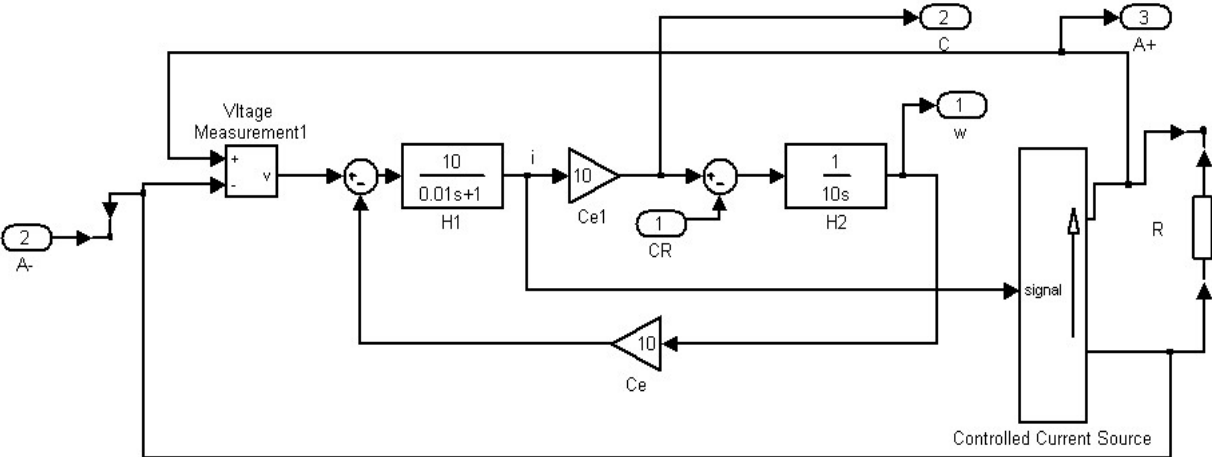


Рис. 3.5

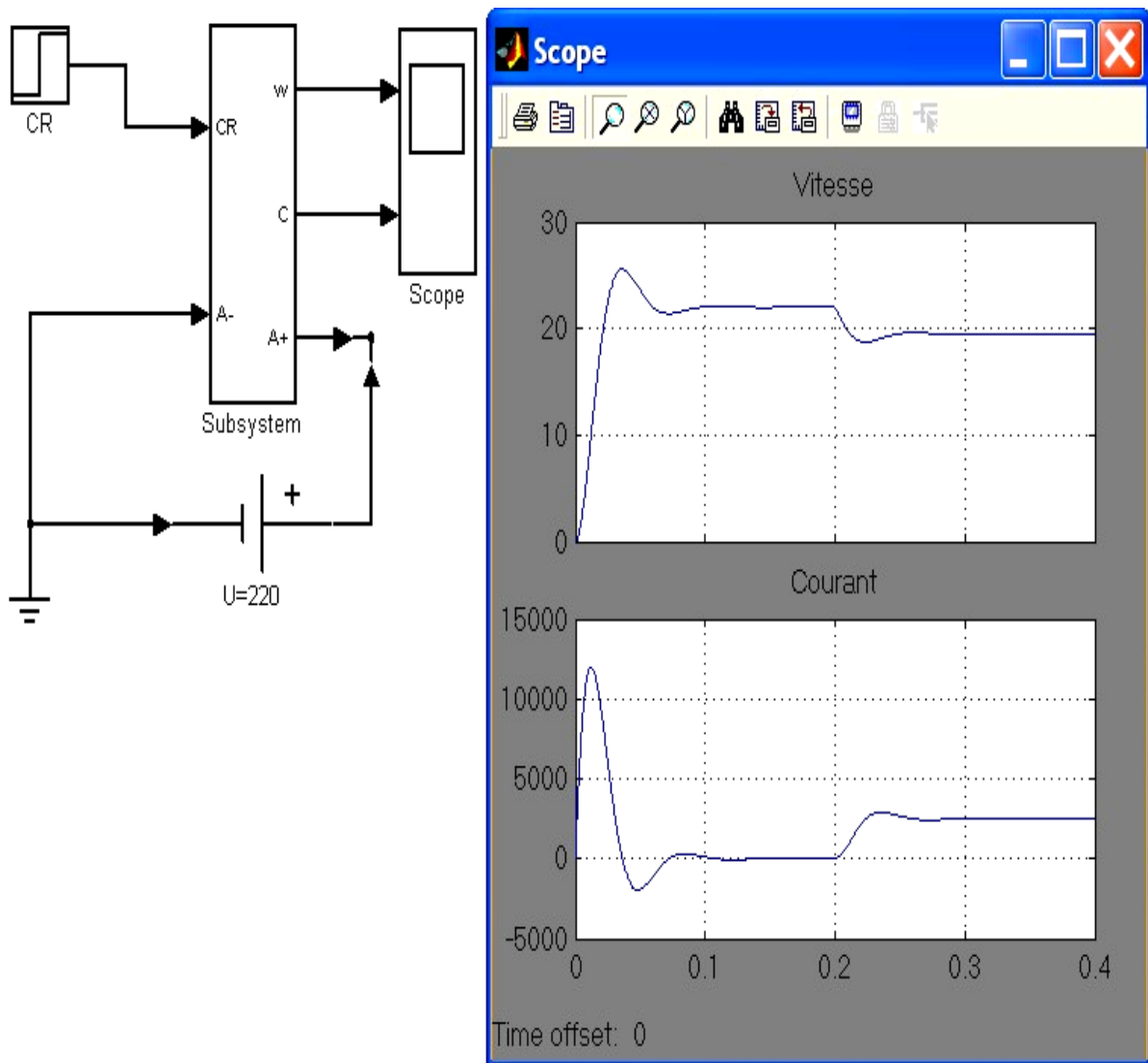


Рис. 3.6

При работе с моделью двигателя следует иметь в виду, что она не является электротехнической в чистом виде, поскольку выходные сигналы электромагнитного момента и скорости – обычные однонаправленные безразмерные сигналы Simulink.

3.2. Модель для исследования двигателя постоянного тока

Модель для исследования ДПТ, реализованная в MATLAB, приведена на рис. 3.7.

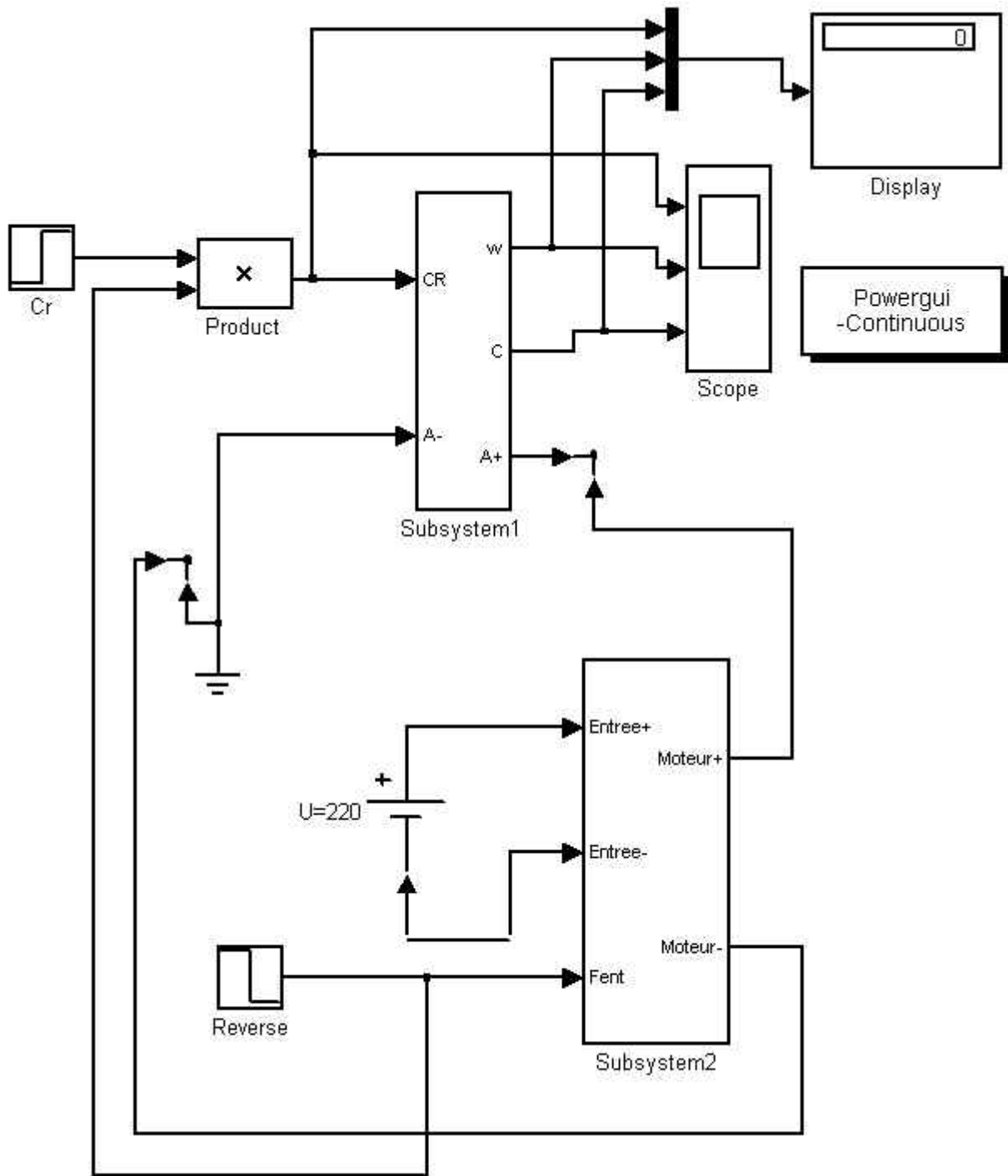


Рис. 3.7

Модели подсистемы 1 и 2 приведены на рис. 3.8 и 3.9. Подсистема 1 описана выше. Подсистема 2 служит для изменения полярности напряжения, приложенного к якорю ДПТ.

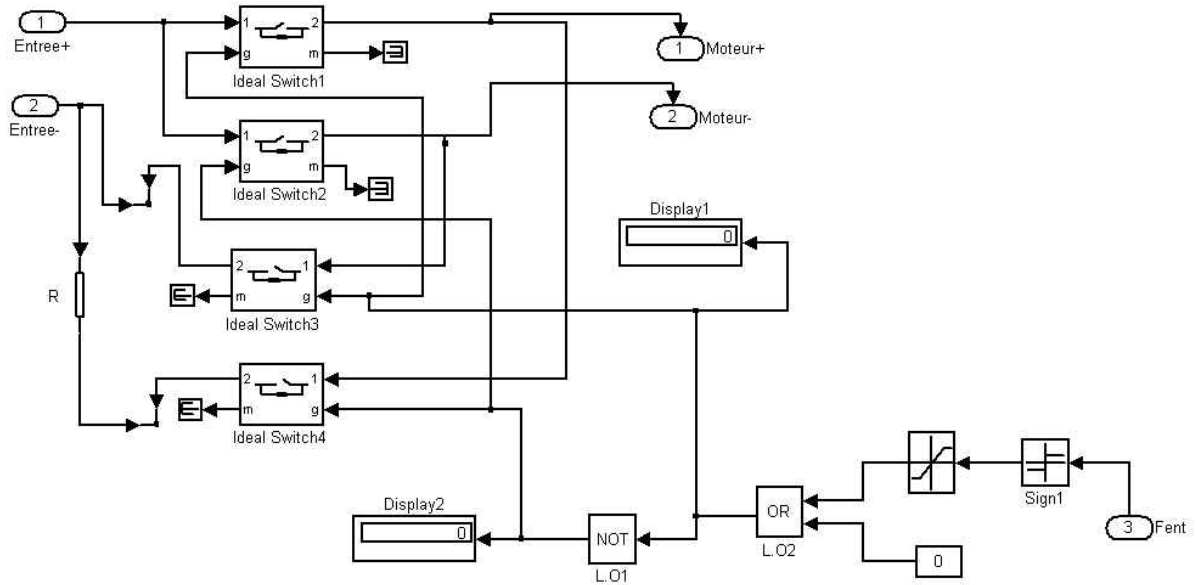


Рис. 3.8

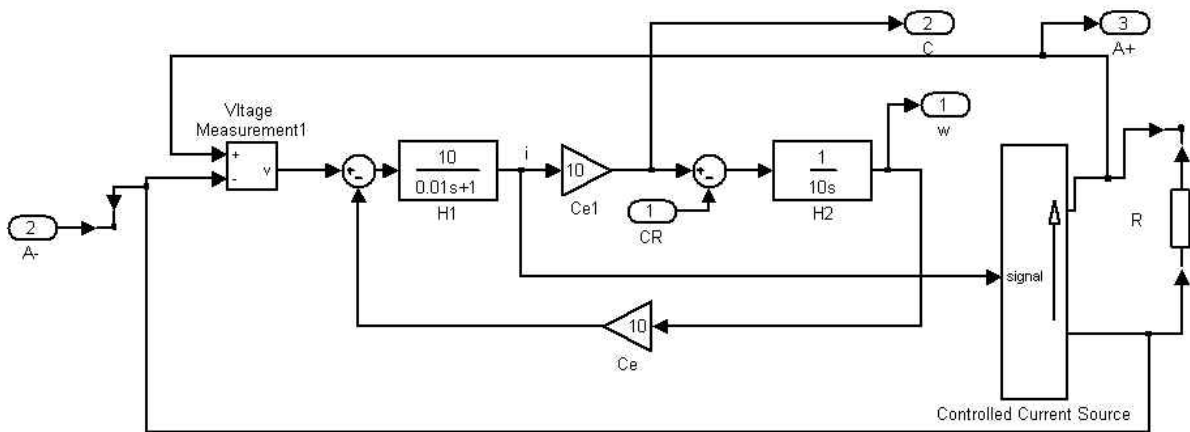
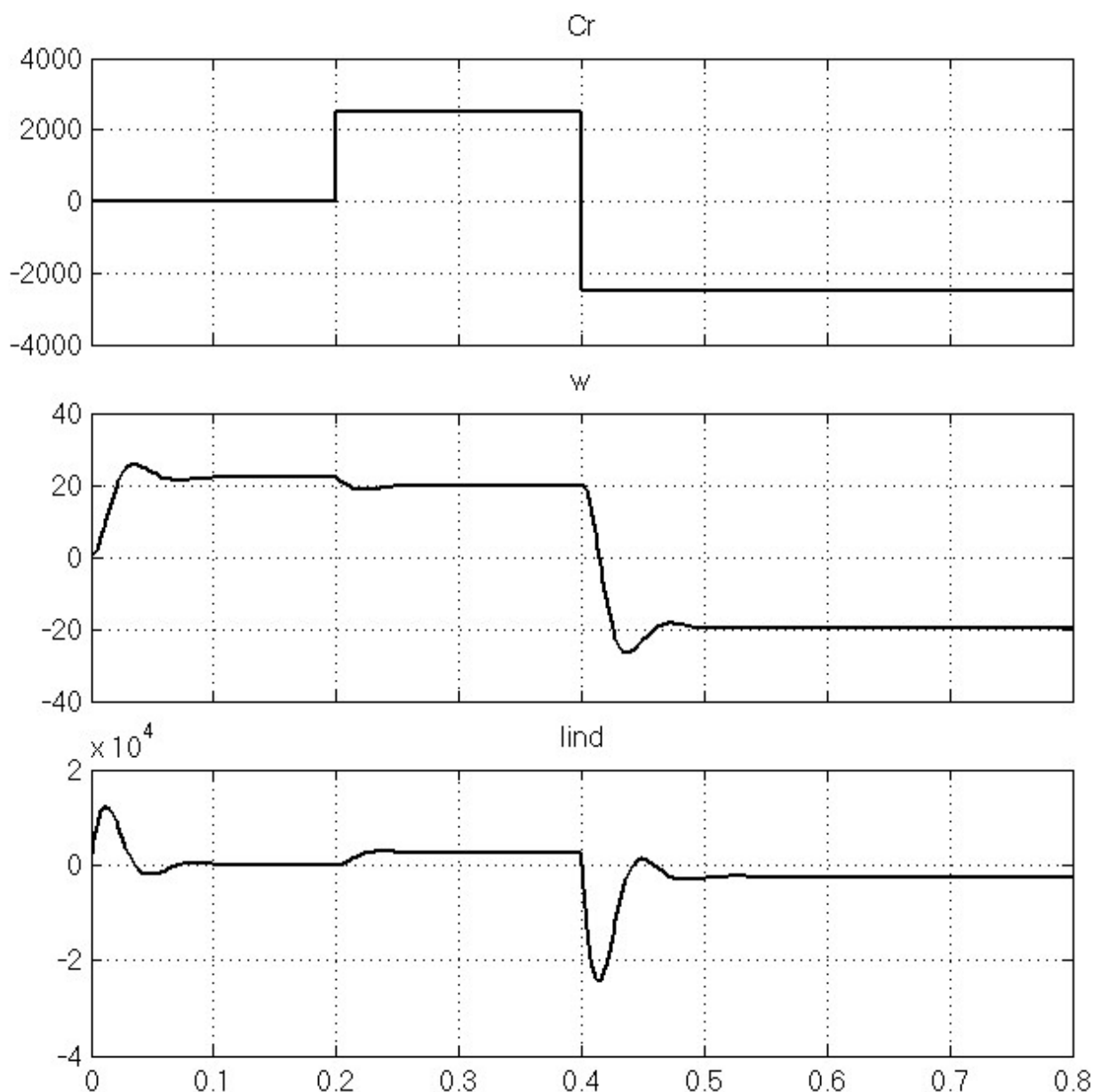


Рис. 3.9

3.3. Результаты моделирования

Результаты моделирования пуска двигателя (см. рис. 3.5) даны на рис. 3.10. Зависимости тока якоря и частоты вращения ротора ДПТ (I_{ind} , w) получены с помощью осциллографа.

Временной интервал (0 – 0,2 с) соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения при моменте сопротивления, равном нулю. В момент времени 0,2 с момент сопротивления, приложенный к валу ДПТ, увеличивается до номинального значения. В момент времени 0,4 с изменяется полярность напряжения, приложенного к якорию двигателя. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс.



Time offset: 0

Рис. 3.10

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Описание модели

«Simulink» – это универсальное средство для решения проблем в различных областях электромеханики. Использование Simulink упрощает работу над созданием модели, позволяя концентрировать усилия прямо на целях. Инженер или студент должен овладеть правилами использования функциональных блоков, при помощи которых набирается модель.

«Simulink» – графическая интерактивная программа, которая позволяет моделировать динамические системы структурными и функциональными схемами. Библиотека Simulink содержит большое количество функциональных блоков, которые изображены на экране пиктограммами.

Процесс создания модели заключается в перемещении функциональных блоков библиотек «Simulink» в окно модели при помощи мыши и их соединений между собой. Работая с программой «Simulink», можно создать модели линейных, нелинейных, непрерывных и дискретных схем и систем. Изменяя параметры блоков прямо во время процесса моделирования, можно мгновенно наблюдать реакцию моделируемой системы.

Модель рассматриваемой системы представлена на рис. 4.1.

Система включает двигатель постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением. Параметры двигателя и программируемого источника напряжения даны на рис. 4.2.

В качестве регулятора частоты вращения ДПТ используется пропорциональный регулятор (П-регулятор), схема и параметры которого даны на рис. 4.3.

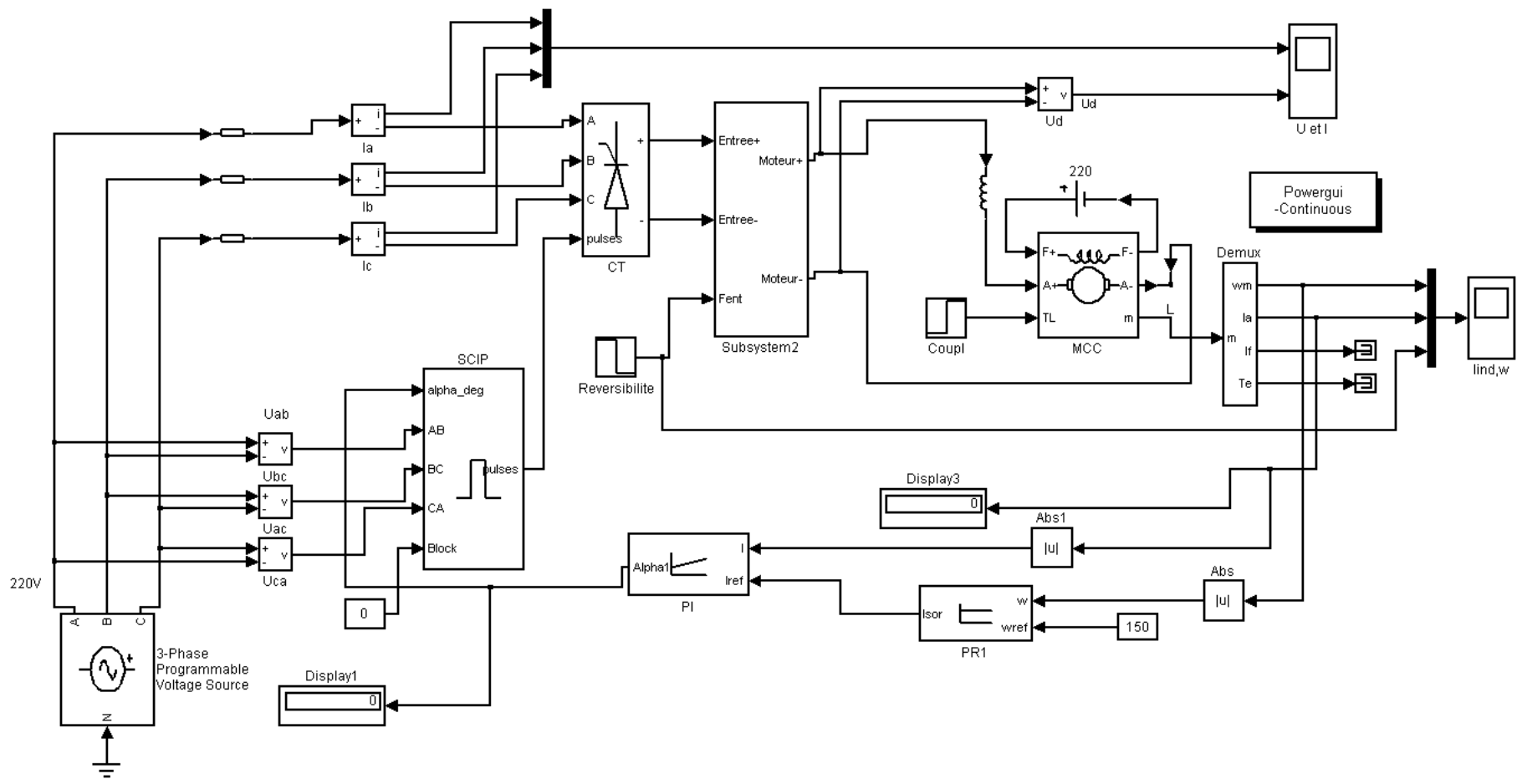


Рис. 4.1

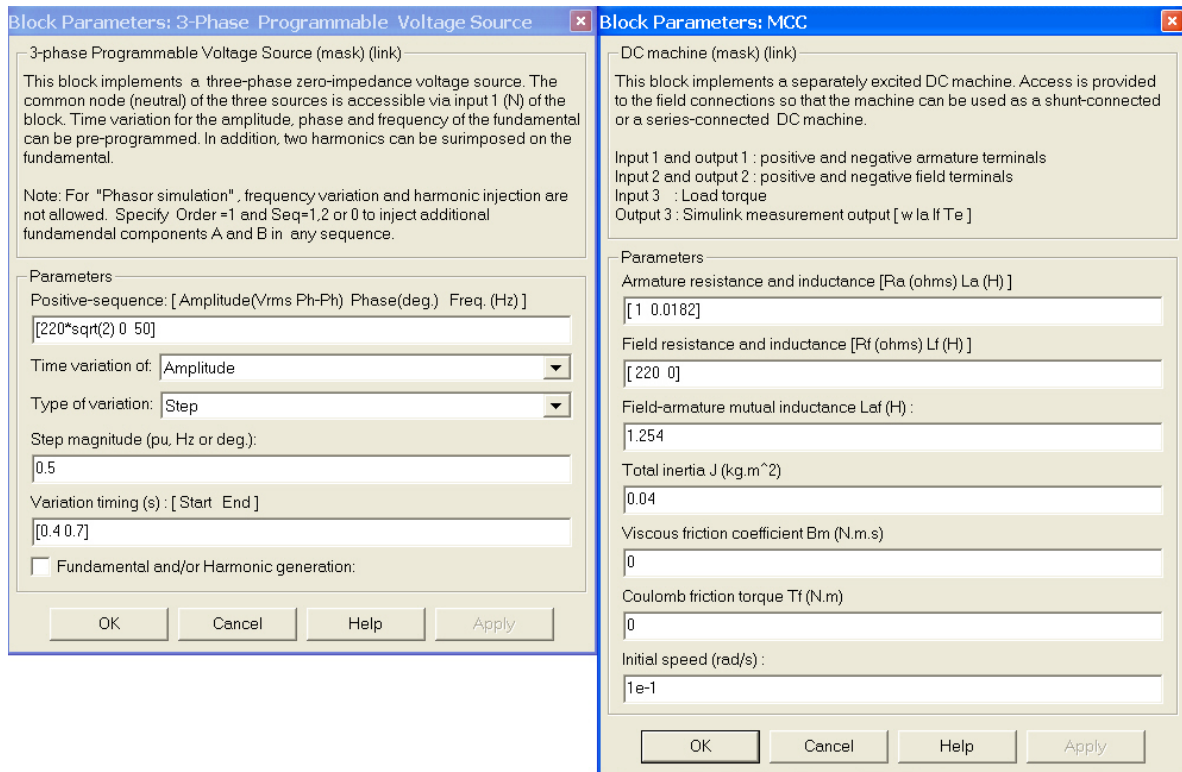


Рис. 4.2

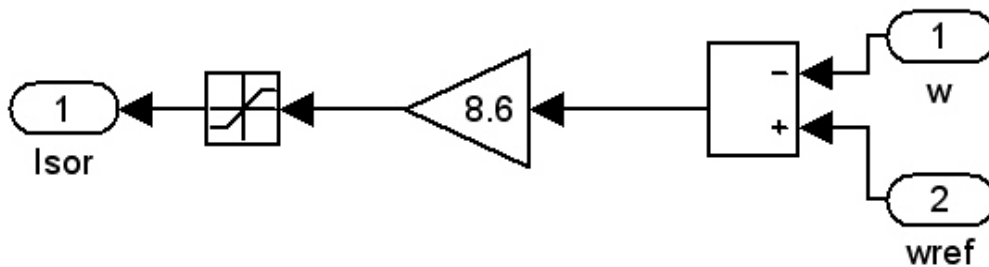


Рис. 4.3

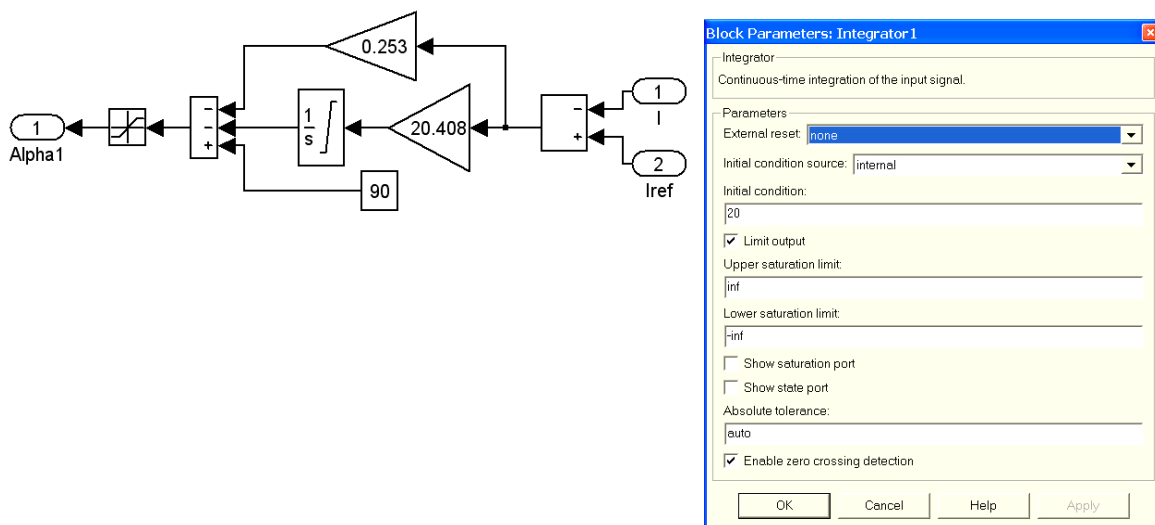


Рис. 4.4

Регулятор тока (ПИ-регулятор), параметры которого $K_p = 0,253$ и $K_i = 20,408$ (рис. 4.4).

Параметры тиристорного преобразователя и его системы управления представлены на рис. 4.5.

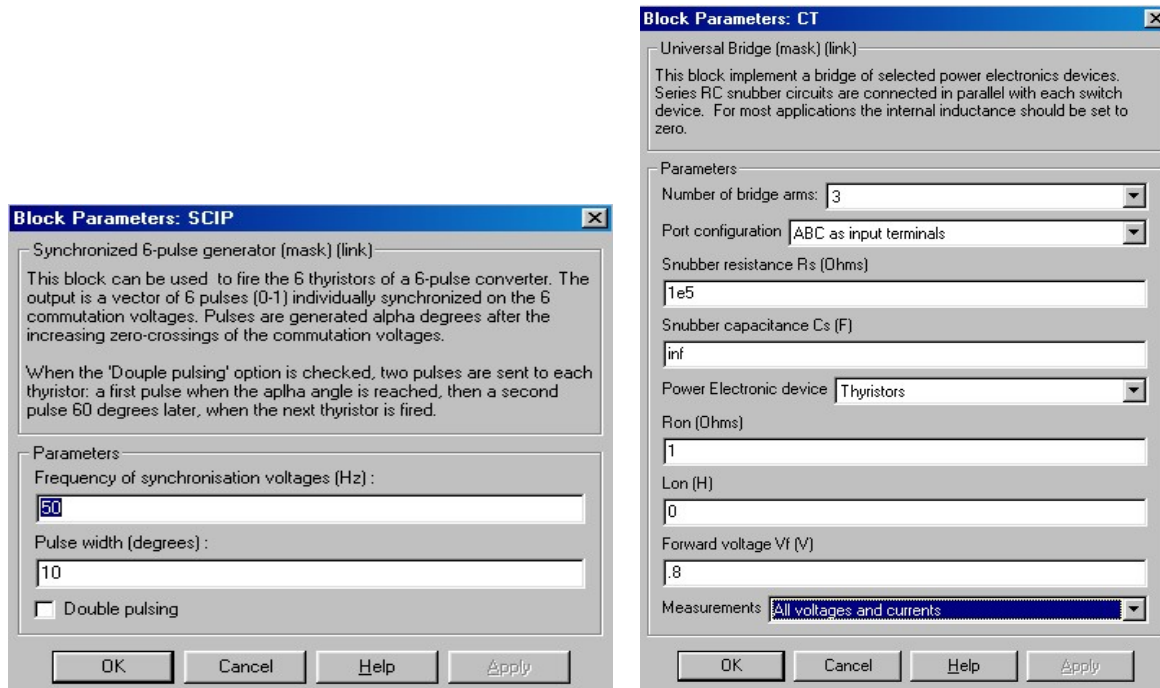


Рис. 4.5

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 рис. 4.1 представлена на рис. 4.6.

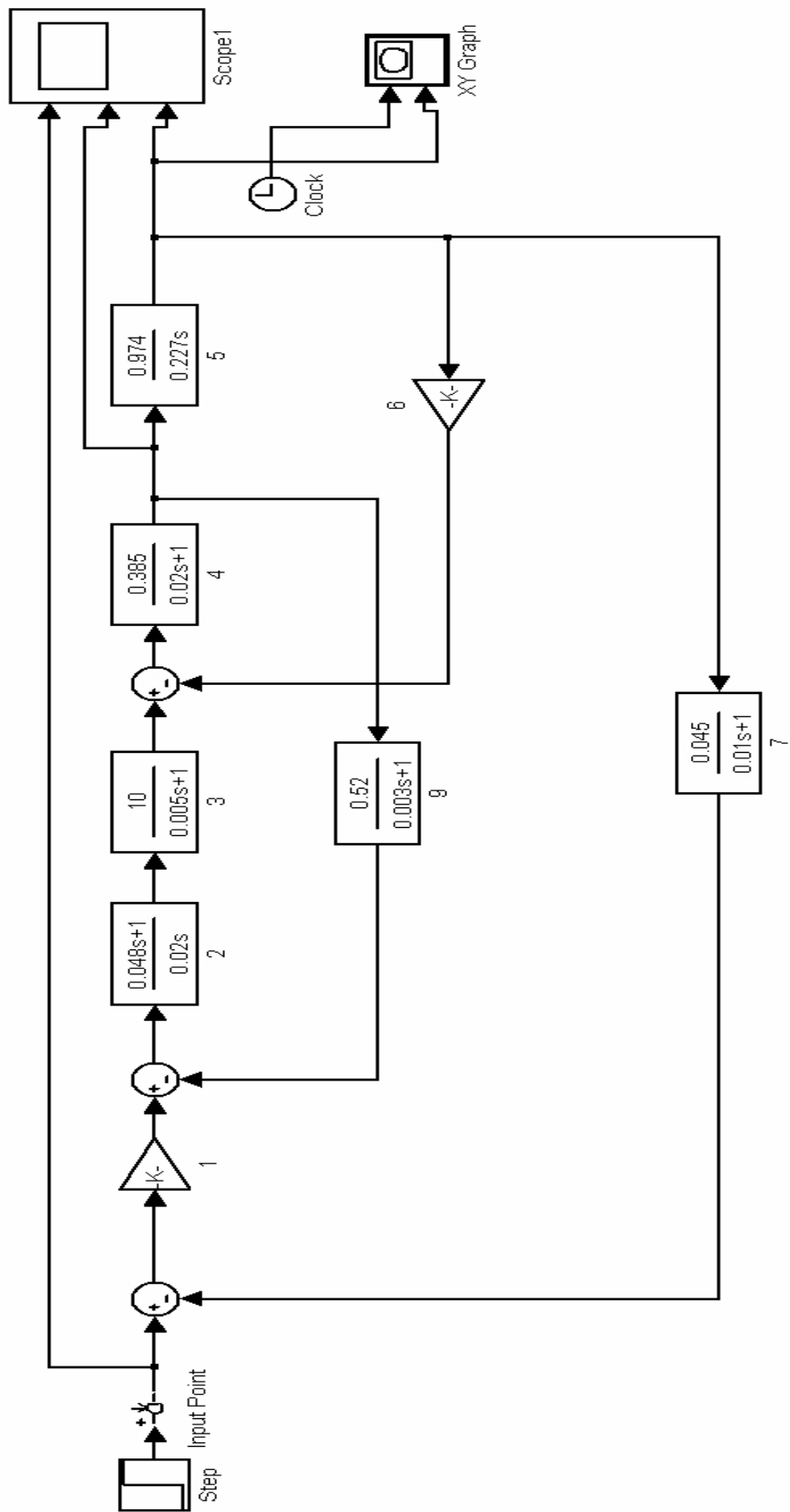


Рис. 4.6

4.2. Результаты моделирования

Результаты моделирования пуска двигателя в системе электропривода (см. рис. 4.1) показаны на рис. 4.7. 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.

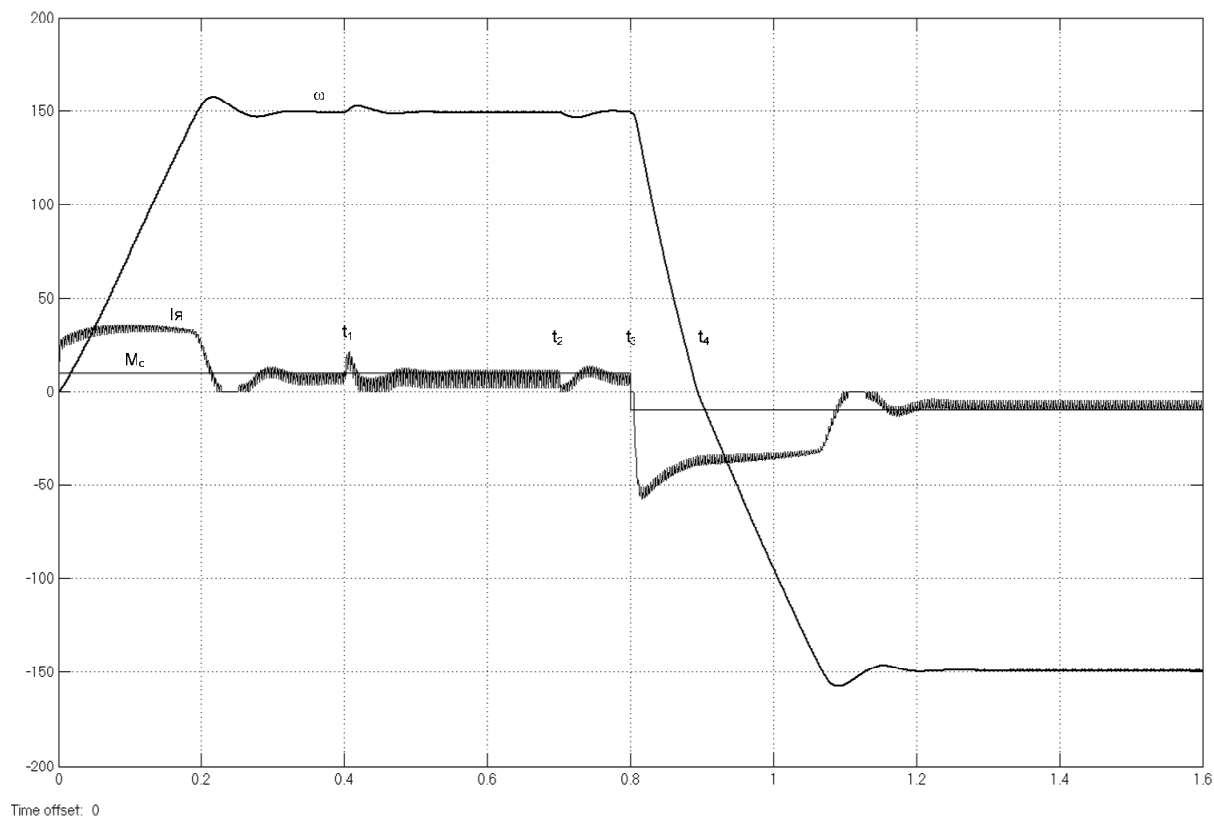
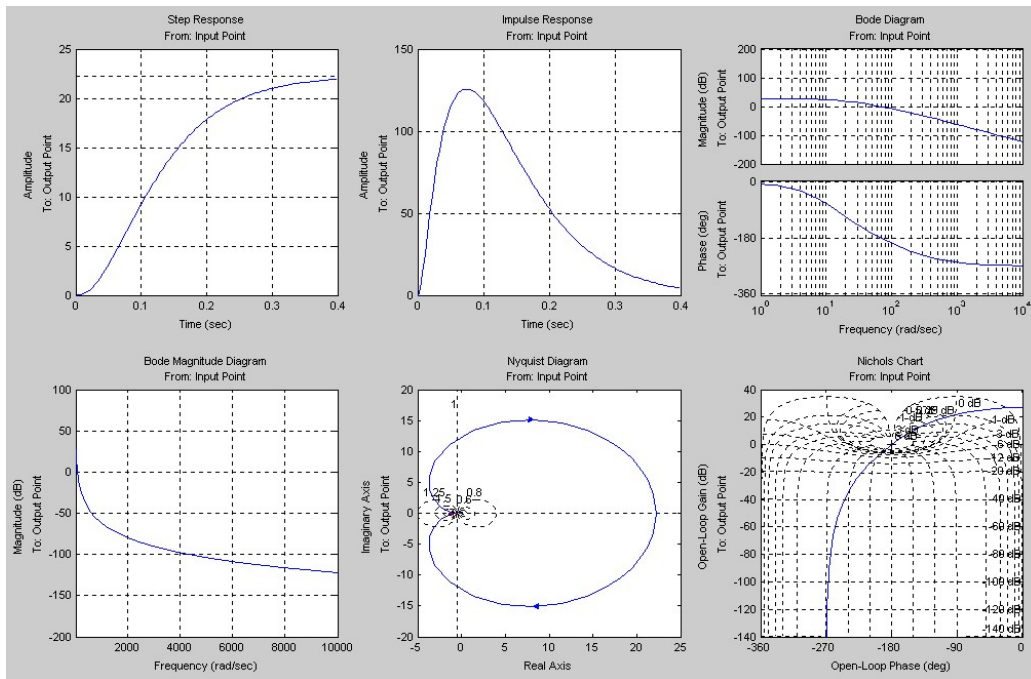


Рис. 4.7

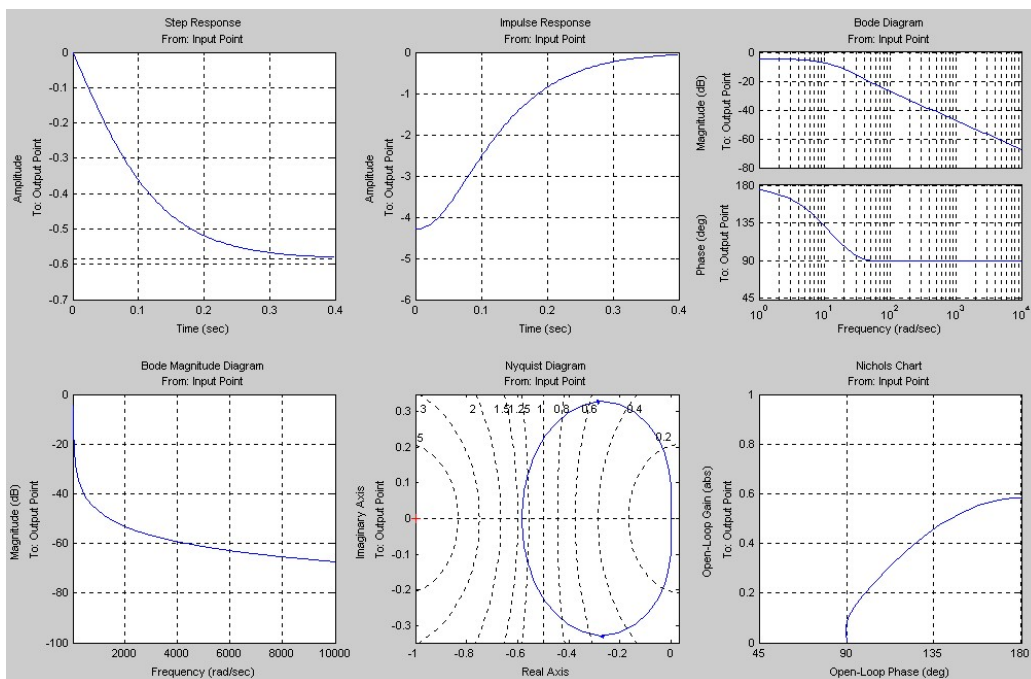
Временной интервал $(0, t_1)$ соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения (150 рад/с). В момент t_1 (0,4 с) напряжение источника питания увеличивается на 50 %, а в момент t_2 (0,7 с) уменьшается на 50 %. В момент времени t_3 (0,8 с) происходит изменение полярности напряжения, приложенного к якорю двигателя. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс.

Результаты моделирования системы, представленной на рис. 4.6, даны на рис. 4.8.

Графики рис. 4.8, а соответствуют случаю, когда используется управляющее воздействие, а кривые рис. 4.8, б – возмущающее воздействие.



a)



б)

Рис. 4.8

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

5.1. Описание следящей системы

Следящая система – это 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 – 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, т.е. 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 максимально установленного уровня. Кривые режима средних перемещений изображены на рис. 5.1.

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 рис. 5.2.

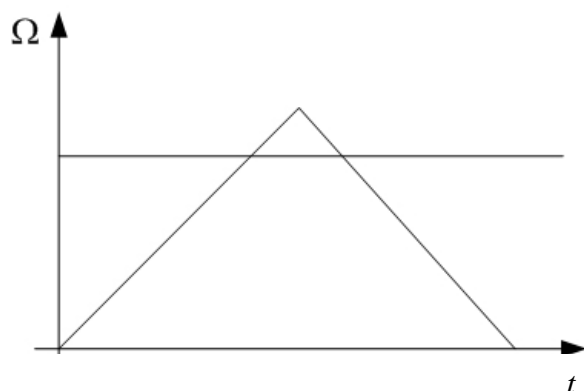


Рис. 5.1

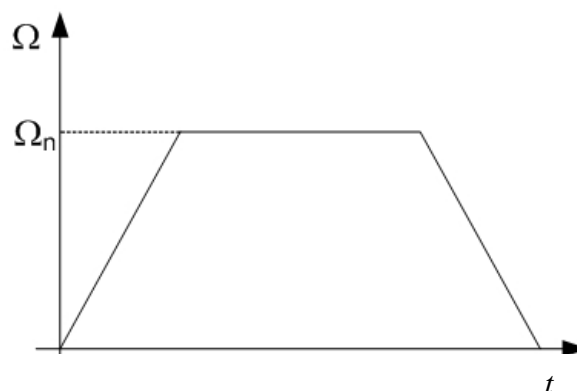


Рис. 5.2

Модель следящей системы автоматического управления представлена на рис. 5.3. Она состоит из двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, двух подсистем и трех регуляторов. Модели подсистем представлены на рис. 5.4 и 5.5.

Первой подсистемой (см. рис. 5.4) 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 (см. рис. 5.5) предназначена для изменения полярности напряжения в зависимости от знака отклонения от положения (F_{ent}). Она моделируется на базе идеальных ключей. 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 1 и 3 открываются. На выходе подсистемы создается напряжение отрицательной полярности (-+).

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

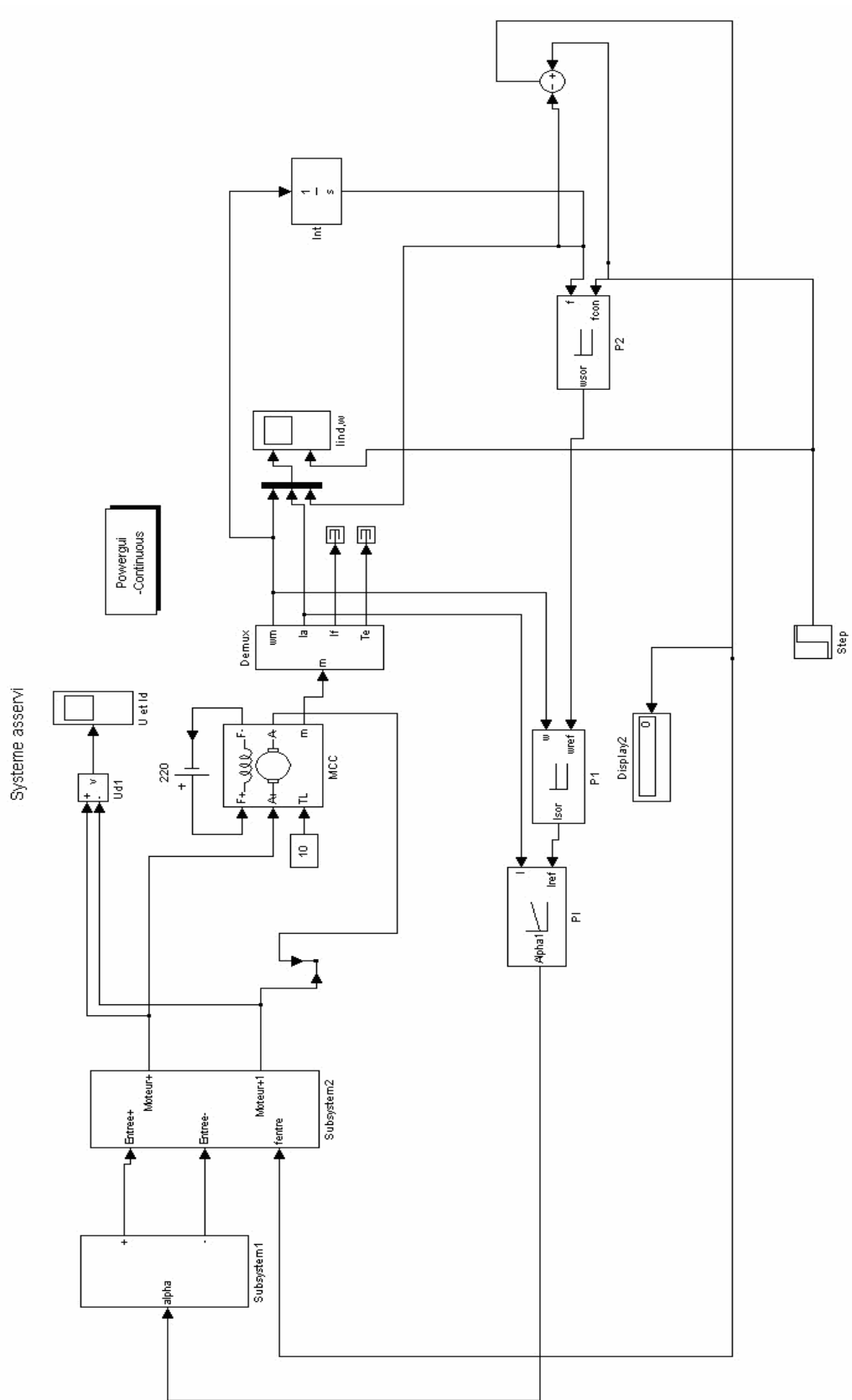


Рис 5.3

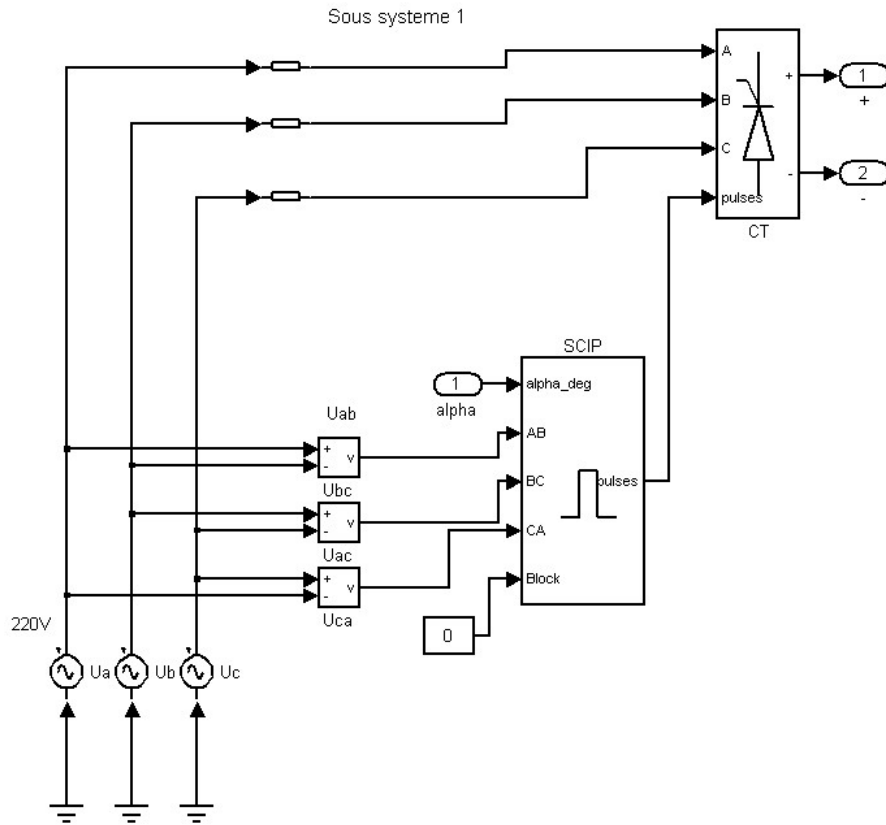


Рис. 5.4

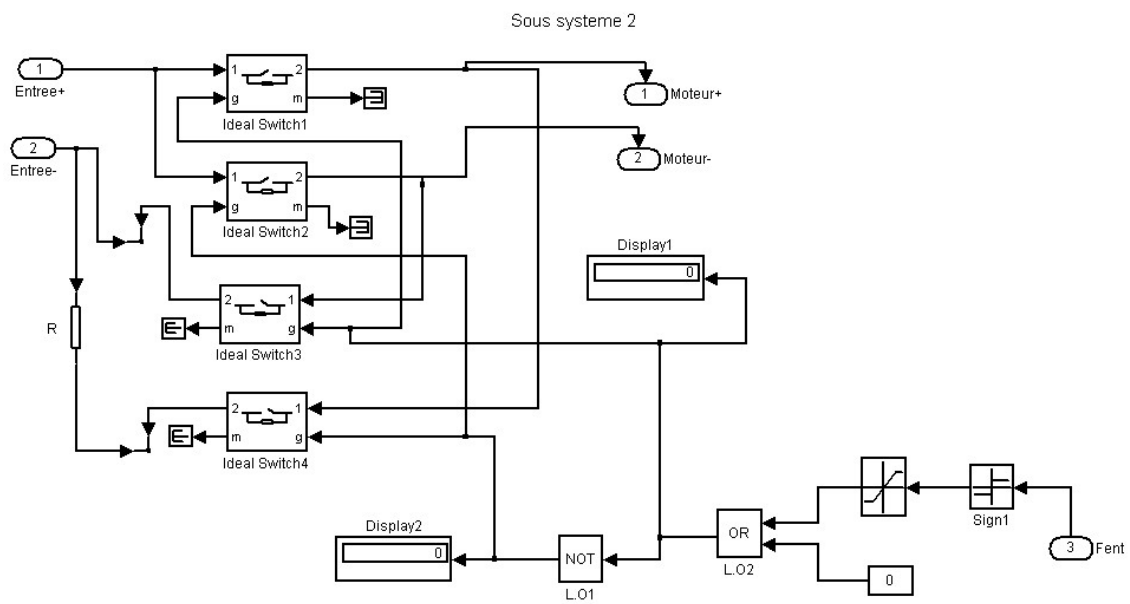


Рис. 5.5

5.2. Результаты моделирования

Результаты моделирования следящей системы (см. рис. 5.3) представлены на рис. 5.6.

В начале моделирования значение положения было равно 5° . Затем в момент времени, равным 0,6 с, значение величины положения увеличивается и становится равным 10° .

Чтобы осуществить линейный анализ системы, необходимо набрать с использованием «Simulink» структурную схему (рис. 5.7). Осуществляя моделирование следящей системы, получим характеристики, представленные на рис. 5.10.

Для осуществления линейного анализа системы необходимо «кликнуть» по пиктограмме «Linear analysis» (см. рис. 5.7). Затем надо включить элемент «Input Point» и «Output Point» в структурную схему, как показано на рис. 5.9, и «кликать» по пиктограмме «Get Linearized Model» (рис. 5.8), чтобы получить представленные на рис. 5.11 характеристики.

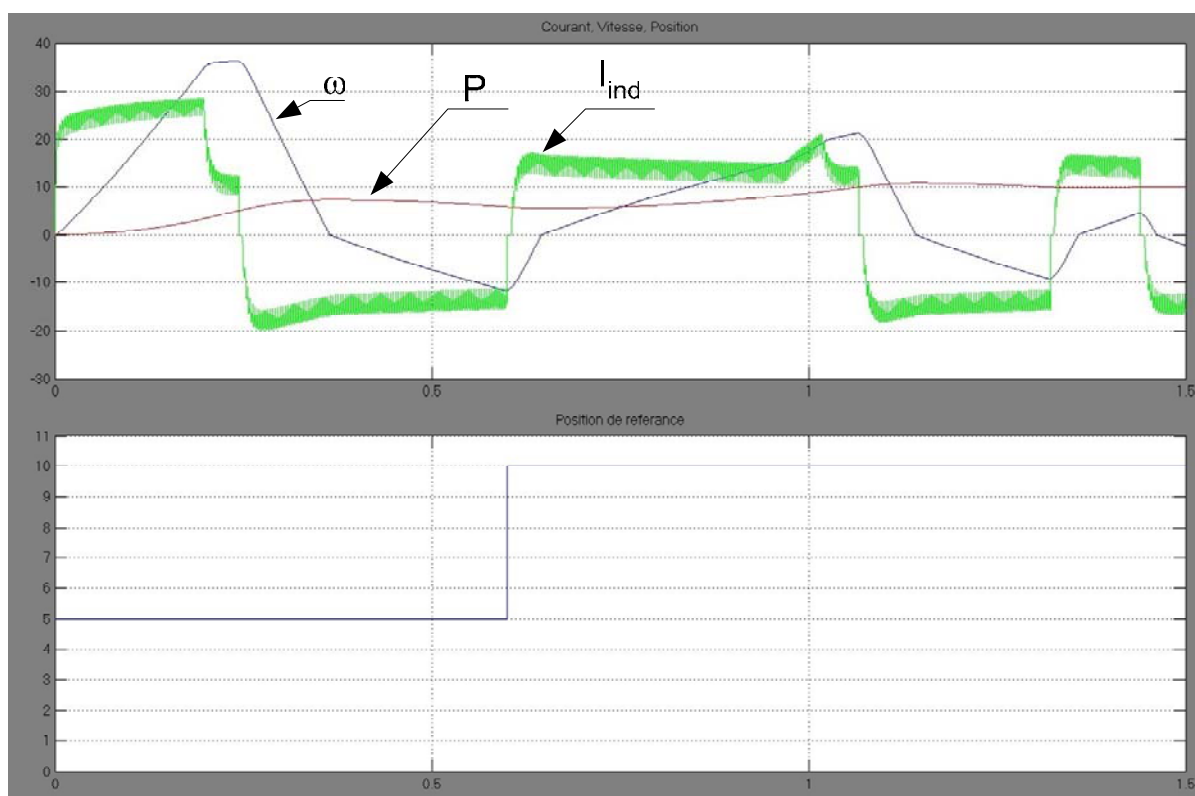


Рис. 5.6

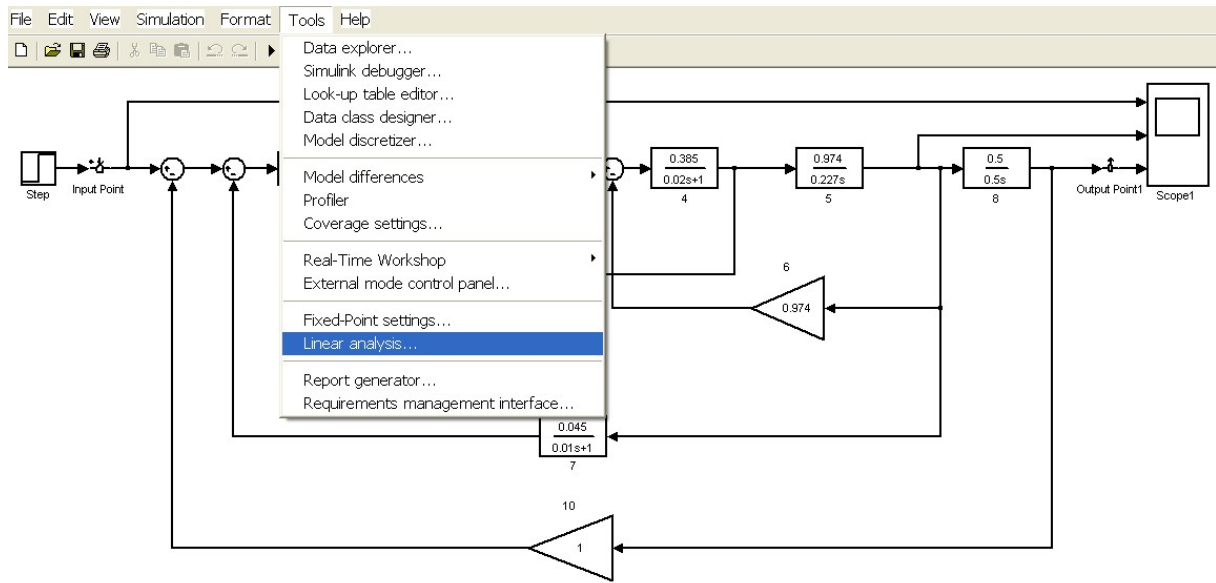


Рис. 5.7

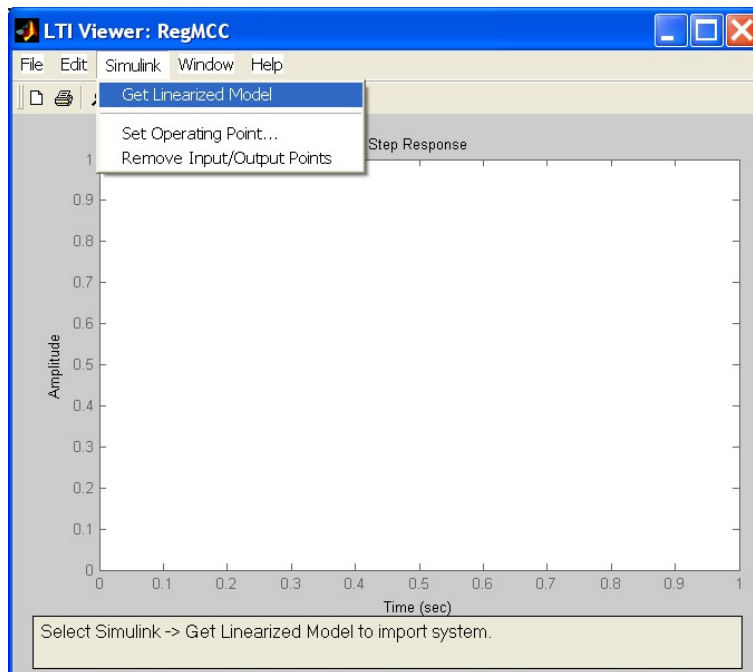


Рис. 5.8

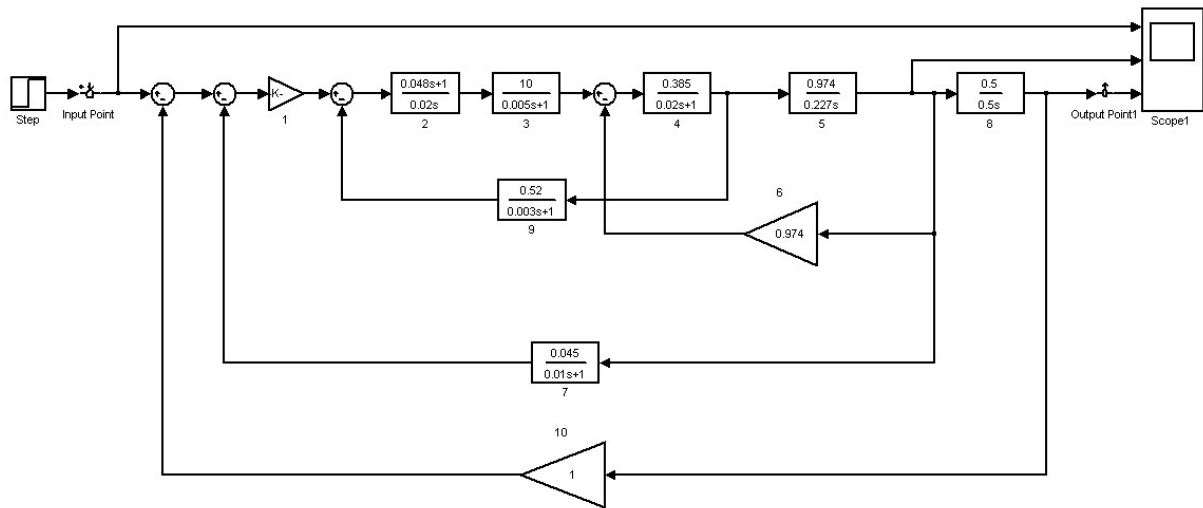


Рис. 5.9

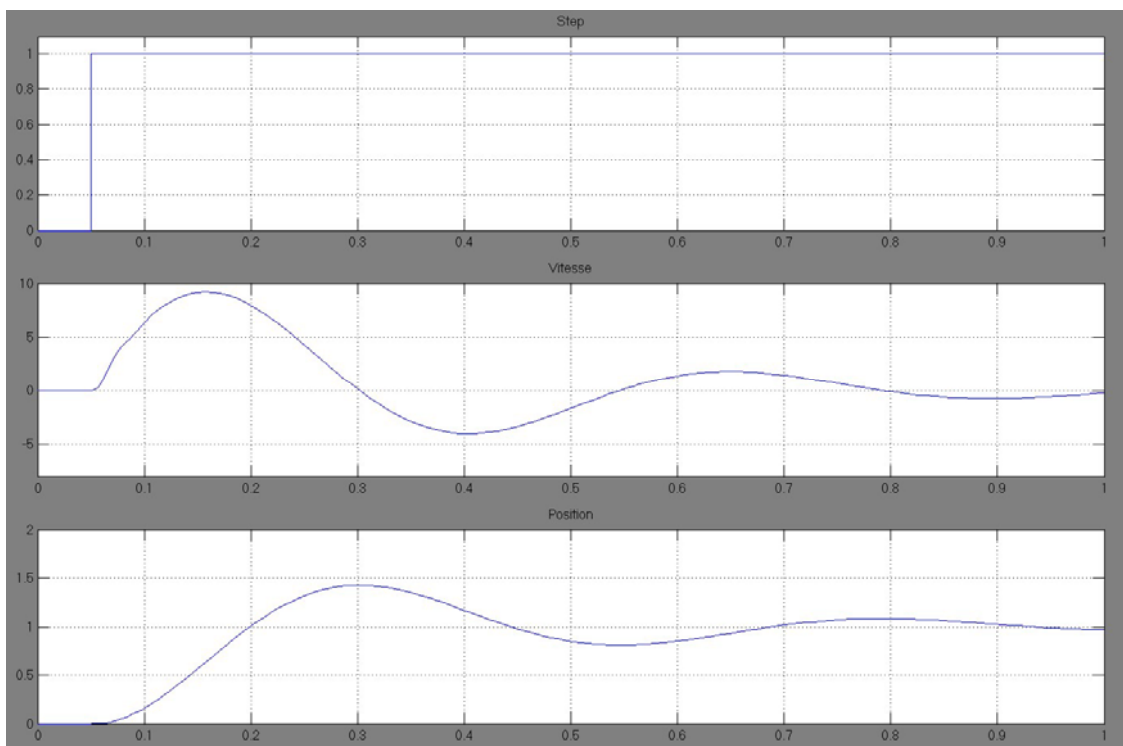


Рис. 5.10

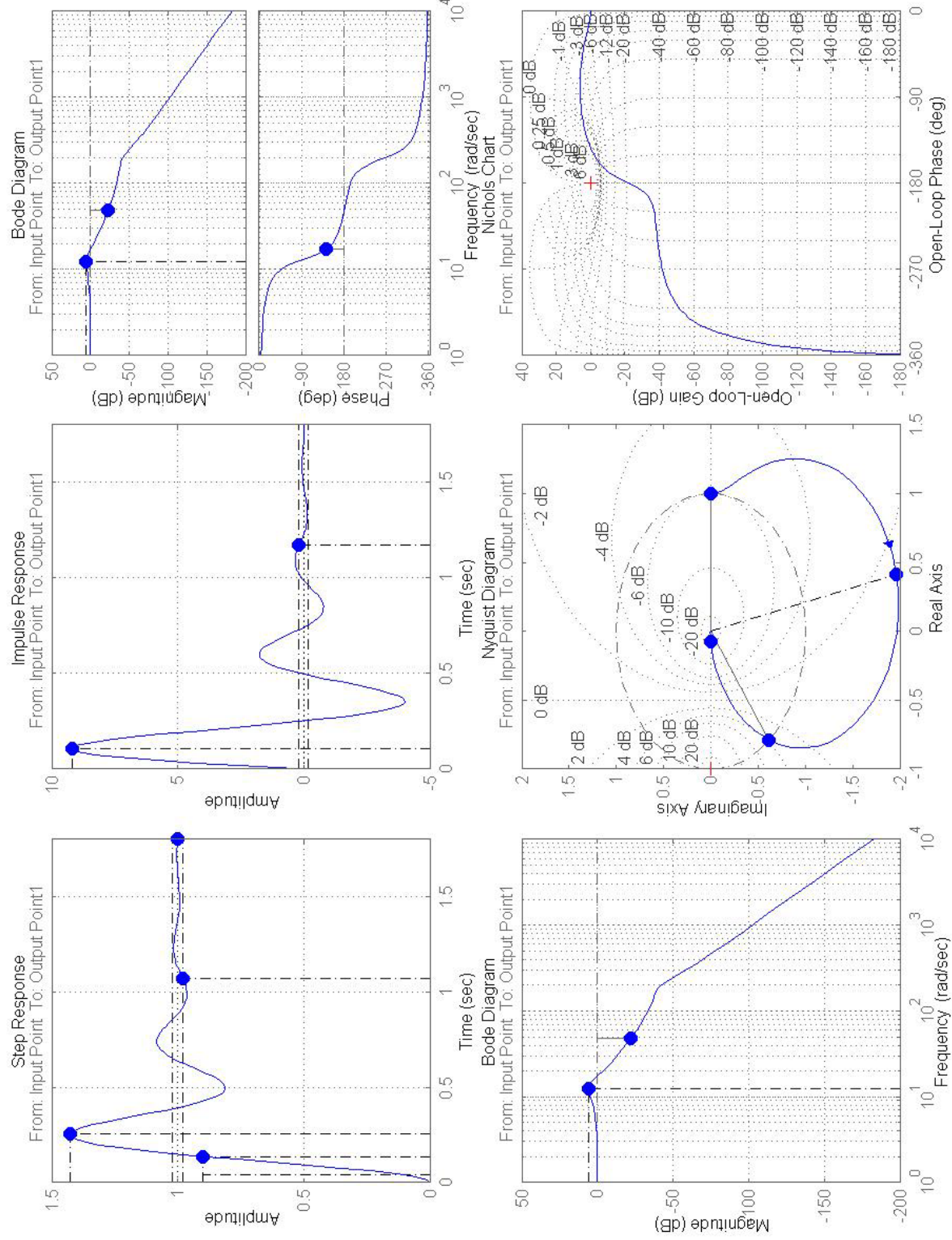


Рис. 5.11

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяконов, В. MATLAB 6.5 SP 1/7.0 Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 575 с. – ISBN 5-98003-209-6.
2. Герман-Галкин, С. Г. Линейные электрические цепи. Лабораторные работы / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА – Принт, 2002. – 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СОСТАВ БИБЛИОТЕКИ И ГЛАВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ «SIMPOWERSYSTEMS».....	4
1.1. Состав библиотеки «SimPowerSystems»	4
1.2. Основные особенности создания SPS-модели	4
1.3. Единицы измерения электрических и неэлектрических величин ..	7
2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ELECTRICAL SOURCES) 13	
2.1. Идеальный источник постоянного напряжения (DC Voltage Source)	13
2.2. Идеальный источник переменного напряжения (AC Voltage Source)	14
2.3. Идеальный источник переменного тока (AC Current Source).....	15
2.4. Управляемый источник напряжения (Controlled Voltage Source) 17	
2.5. Управляемый источник тока (Controlled Current Voltage Source) 18	
2.6. Трехфазный источник напряжения (3-Phase Source).....	20
2.7. Трехфазный программируемый источник напряжения (3-Phase Programmable Voltage Source)	22
3. МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	25
3.1 Математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и его Simulink-модель.....	25
3.2. Модель для исследования двигателя постоянного тока.....	30
3.3. Результаты моделирования	31
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	33
4.1. Описание модели	33
4.2. Результаты моделирования	38
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ.....	40
5.1. Описание следящей системы	40
5.2. Результаты моделирования	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	49

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ MATLAB

Методические указания

Составители

ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович
ГРАДУСОВ Александр Борисович
ГРАДУСОВ Денис Александрович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор А.А. Галкин

Редактор Л.В. Пукова
Технический редактор Н.В. Тупицына
Корректор Т.В. Климова
Компьютерная верстка С.В. Павлухиной

Подписано в печать 15.08.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 3.02. Уч.-изд. л. 3.21. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.