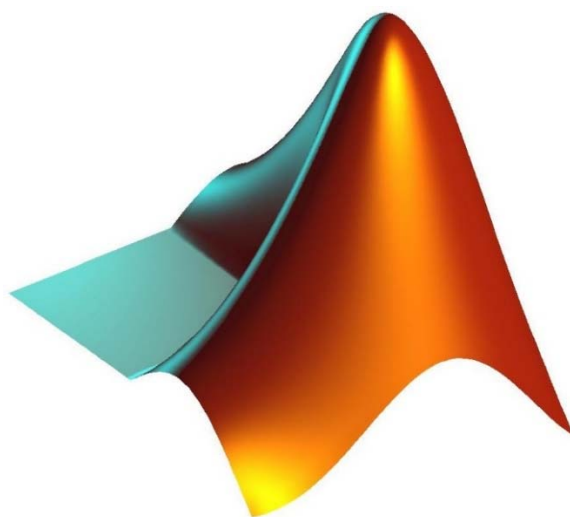


Владимирский государственный университет

С. И. ЛИХОДЕЕВ

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум



Владимир 2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

С. И. ЛИХОДЕЕВ

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

*Электронное издание*



Владимир 2019

© Лиходеев С. И., 2019  
ISBN 978-5-9984-1074-1

УДК 621.3+621.38

ББК 31.2+32.85

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент  
зам. начальника отдела измерительной техники

ЗАО «Автоматика плюс»

*В. М. Дерябин*

Кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры мехатроники и электронных систем автомобилей

*Ю. Е. Мишулин*

**Лиходеев, С. И.** Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : практикум / С. И. Лиходеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 131 с. – ISBN 978-5-9984-1074-1. – Электрон. дан. (12,8 Мб). – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод DVD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Представлено 17 практических работ по основным разделам курса «Электротехника и электроника», которые выполняются в среде MATLAB.

Предназначен для студентов вузов направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 9. Ил. 151. Библиогр.: 8 назв.

ISBN 978-5-9984-1074-1

© Лиходеев С. И., 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Система MATLAB предлагается разработчиками (корпорация MathWorks, Inc.) как лидирующий на рынке, в первую очередь на предприятиях военно-промышленного комплекса, в энергетике, в аэрокосмической отрасли и автомобилестроении, язык программирования высокого уровня для технических вычислений, расширяемый большим числом пакетов прикладных программ. Она вобрала в себя не только передовой опыт развития и компьютерной реализации численных методов, накопленный за последние три десятилетия, но и весь опыт становления математики за всю историю человечества [1].

Популярности системы MATLAB способствует ее матричная ориентация и мощное главное расширение Simulink. MATLAB и Simulink предоставляют пользователю удобные и простые средства, в том числе визуального объектно-ориентированного программирования, для моделирования линейных и нелинейных динамических систем, а также множество других пакетов расширения системы.

Начинающий пользователь MATLAB может в процессе работы совершенствовать свои знания как в области моделирования и численных методов, так и в области программирования и визуализации данных.

## Практическое занятие 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**Цель работы:** изучить методы и приобрести навыки измерения величин тока, напряжения, мощности, угла сдвига фаз между синусоидальным напряжением и током, а также величин сопротивлений резисторов, индуктивностей индуктивных катушек и ёмкостей конденсаторов.

#### 1. Виды и методы измерения электрических величин

В зависимости от способа обработки экспериментальных данных для нахождения результата различают прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения.

При *прямом* измерении искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения; например, измерение амперметром тока в ветви цепи.

При *косвенном* измерении искомое значение величины находят на основании известной зависимости между измеряемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям; например, определение сопротивления  $R$  резистора из уравнения  $R = U/I$ , в которое подставляют измеренное значение напряжения  $U$  на зажимах резистора и протекающего через него постоянного тока  $I$ .

*Совместные* измерения – одновременные измерения нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними; например, определение зависимости сопротивления резистора от температуры по формуле  $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$  посредством измерения сопротивления резистора  $R_t$  при трех различных температурах  $t$ . Составив систему из трех уравнений, находят параметры  $R_0$ ,  $a$  и  $b$  зависимости сопротивления резистора от температуры.

*Совокупные* измерения – одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, составленных из результатов прямых измерений различных сочетаний этих величин; например, определение сопротивлений резисторов, соединенных треугольником, посредством измерения со-

противлений между различными вершинами треугольника. По результатам трех измерений по известным соотношениям определяют сопротивления резисторов треугольника.

Различают также аналоговые и дискретные измерения. При *аналоговых* измерениях на заданном интервале число измерений электрической величины бесконечно, а при *дискретных* – число измерений конечно.

В зависимости от способа применения меры известной величины, выделяют при измерениях метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. При *методе непосредственной оценки* значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчётному устройству (индикатору) измерительного прибора; например, измерение напряжения с помощью вольтметра. *Методы сравнения с мерой* – методы, при которых проводится сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой; например, измерение сопротивления резистора с помощью моста сопротивлений.

Ниже кратко описываются виды и способы измерения электрических величин и параметров компонентов схем электронных устройств с помощью моделей измерительных приборов среды MATLAB.

## 2. Измерение тока и напряжения

*Мгновенные* значения напряжения и тока можно измерить с помощью вольтметра и амперметра, которые находятся в библиотеке **SimPowerSystems/Measurements**. Измерение *действующих* значений напряжения и тока в ветвях электрической цепи проводится вольтметрами и амперметрами, на выход которых включается блок RMS из библиотеки **SimPowerSystems/Extra Library/Measurements/RMS**: На выход этого блока включается дисплей. Амперметр включается *последовательно* с элементами участка цепи, а вольтметр – *параллельно* участку напряжение на котором необходимо измерить.

В библиотеке **Instruments** находится мультиметр который также можно использовать для измерения тока, напряжения.

## 3. Измерение угла сдвига фаз

Для измерения угла сдвига фаз  $\varphi$  между синусоидальным напряжением и током в реальной цепи используют блок для измерения активной

и реактивной мощности, по величинам которой рассчитывается угол сдвига фаз рис.1.1. Кроме этого можно использовать блок Фурье (см рис.1.1).

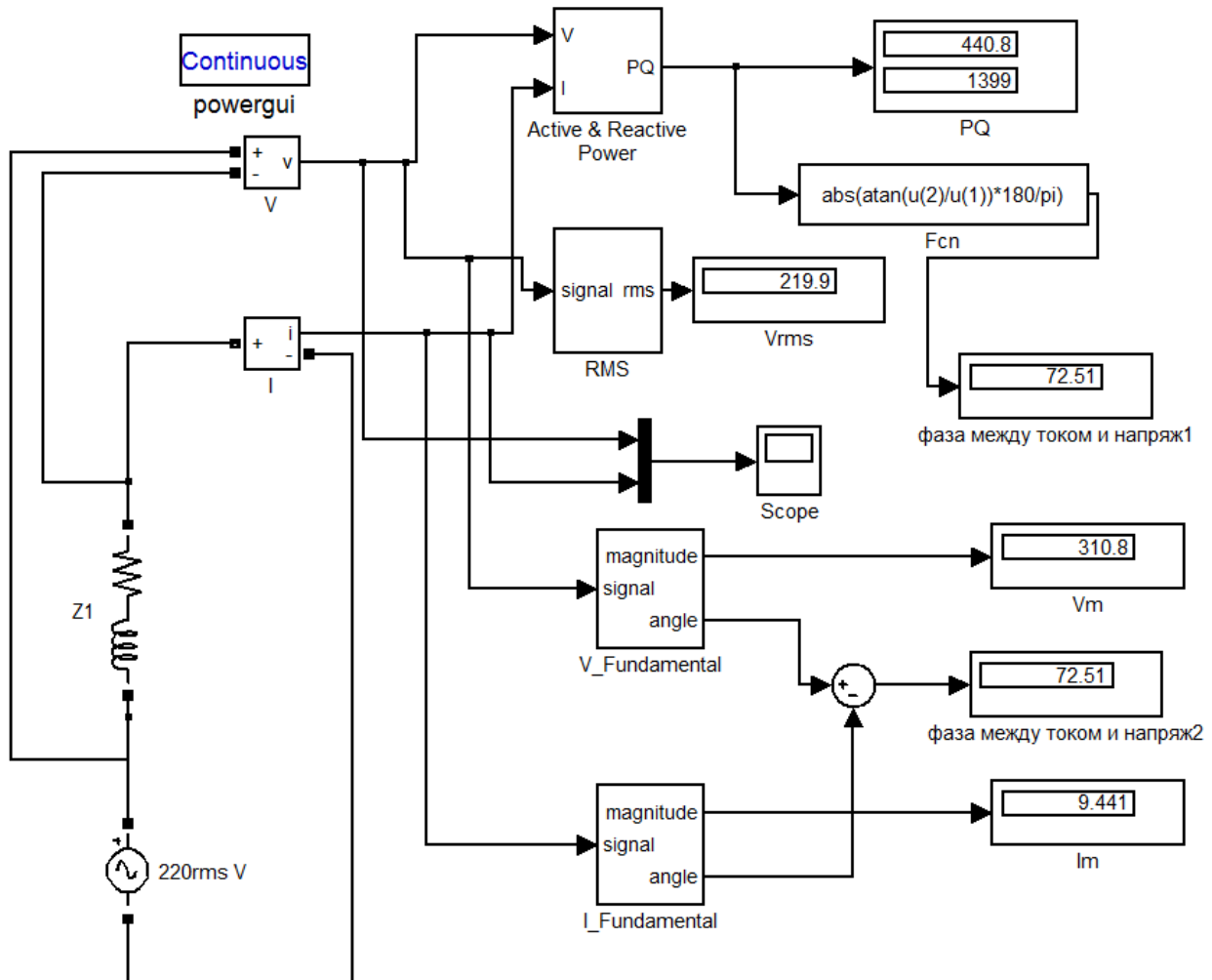


Рис. 1.1. Модель для измерения угла сдвига фаз  $\varphi$  между синусоидальным напряжением и током

#### 4. Измерение сопротивлений

Для измерения *сопротивлений*, широко используется так называемый *метод вольтметра-амперметра*, в основу которого положен закон Ома для цепей постоянного тока. Для измерения сопротивления в цепи переменного тока можно использовать схему, представленную на рис.1.2. После расчета, необходимо в блоке «**Powergui**» открыть опцию «**Impedance vs Frequency Measurement**» и определить параметры сопротивления.

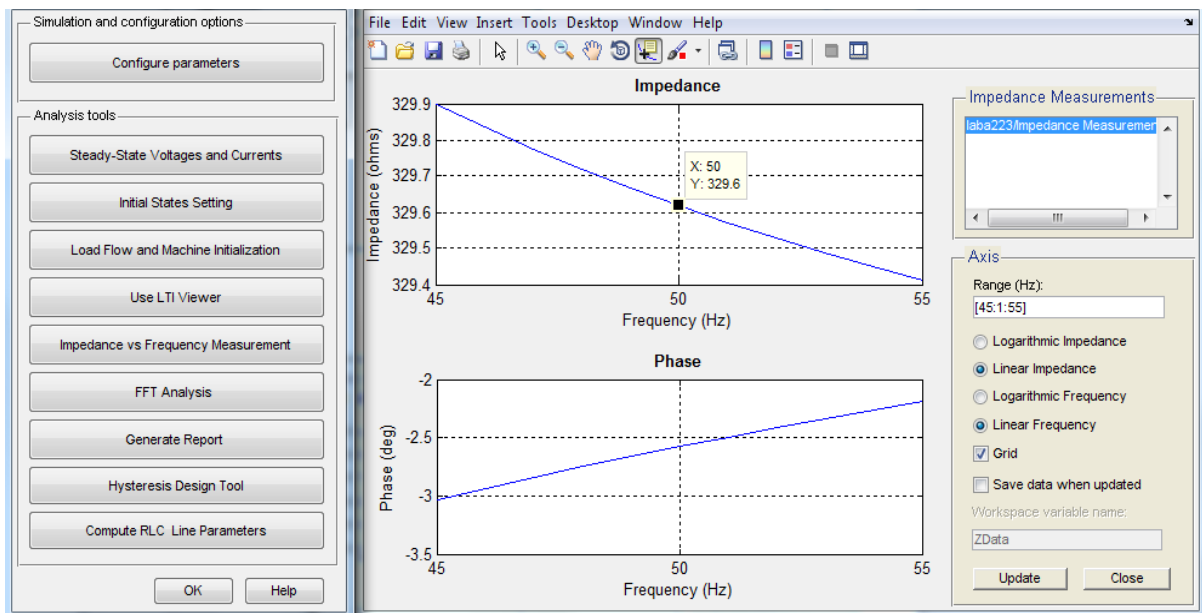
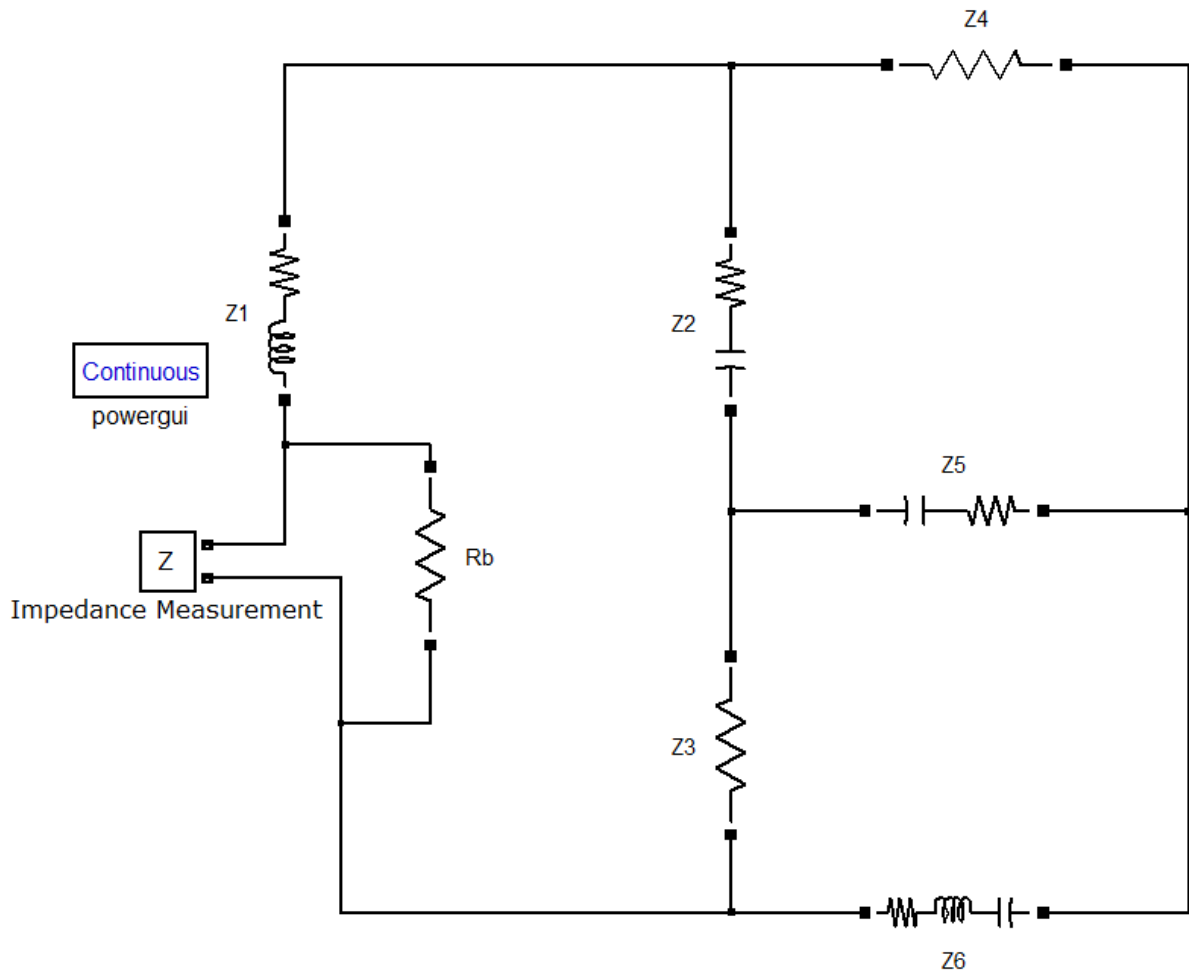


Рис. 1.2. Модель для измерения сопротивлений



## 5. Задание

1. Собрать схему, представленную на рис. 1.3. Варианты для расчета представлены в таблице 1.1.

2. Определить токи и напряжения на всех элементах схемы.

3. Сделать выводы.

4. Собрать схему, представленную на рис. 1.4. Варианты для расчета представлены в таблице 1.2.

5. Определить токи и напряжения на всех элементах схемы. Определить суммарную потребляемую мощность и мощность источников напряжения.

6. Определить эквивалентное сопротивление схемы относительно точек, заданных преподавателем.

7. Определить разность фаз для тока и напряжения в цепи 1-2 схемы рис. 1.4.

8. Сделать выводы.

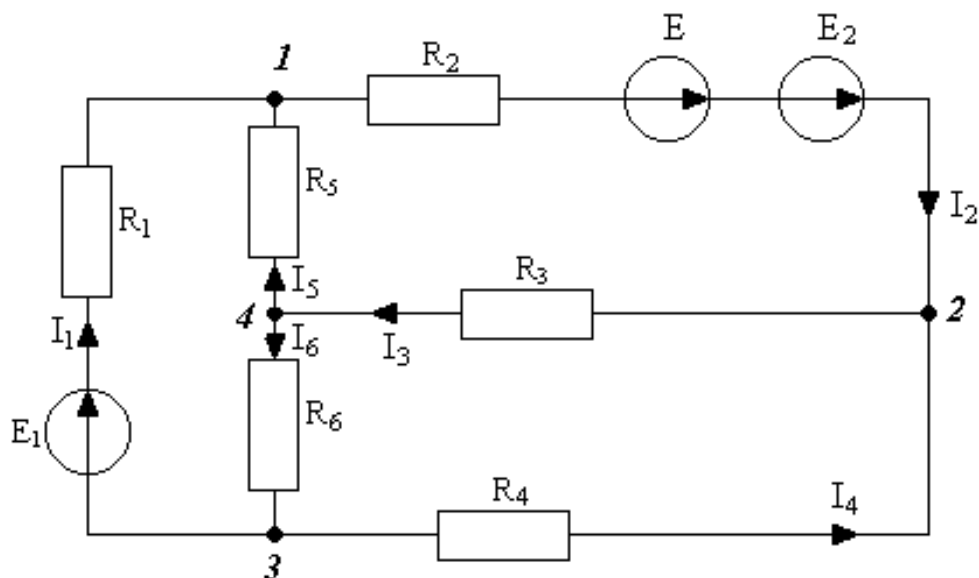


Рис. 1.3. Схема для расчета на постоянном токе

Таблица 1.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$R_1$ Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660	760
$R_2$ Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80	60
$R_3$ Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110	120
$R_4$ Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150	200
$R_5$ Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200	220
$R_6$ Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60	70
$E_1$ В	30	24	26	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$E_2$ В	40	38	36	34	32	30	32	34	36	38	40	42	44
$E_3$ А	45	58	16	44	38	35	45	36	26	24	25	35	70

Таблица 1.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1$ Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660
$L_1$ Н·10 <sup>-6</sup>	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
$R_2$ Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80
$R_3$ Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110
$C_3$ F·10 <sup>-6</sup>	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
$R_4$ Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150
$L_4$ Н·10 <sup>-6</sup>	20	10	40	40	30	35	30	20	10	20	40	30
$R_5$ Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200
$C_5$ F·10 <sup>-6</sup>	40	50	30	60	70	65	50	30	70	40	30	20
$R_6$ Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60
$E_1$ В	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
$E_2$ В	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127

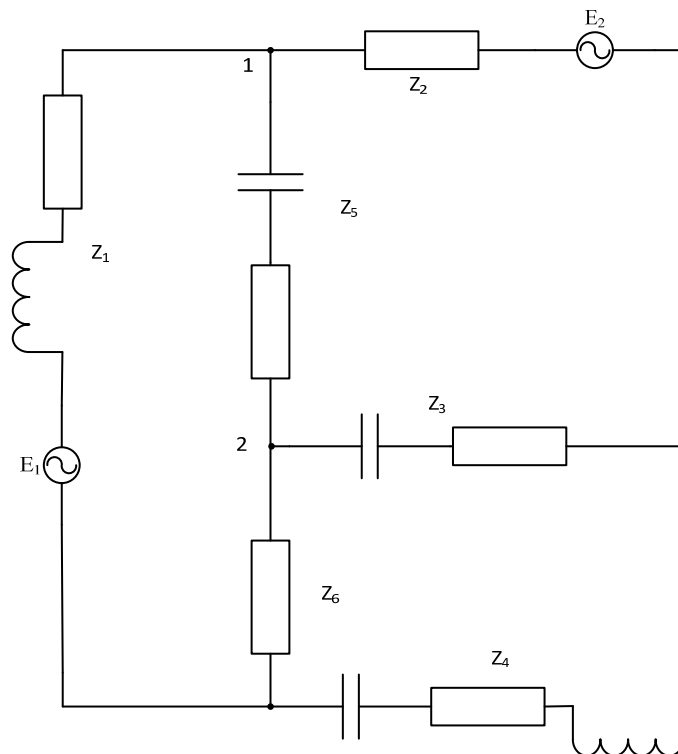


Рис. 1.4. Схема для расчета на переменном токе

Содержание отчета. Отчет должен содержать:

- Заданные схемы с параметрами.
- Схемы модели, выполненные в MATLAB, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Результаты расчета «SimPowerSystems Report».
- Выводы.

## 6. Контрольные вопросы

1. Укажите, чему равен частота и период  $T$  колебания ЭДС источника синусоидального напряжения  $e = 315 \sin(314t)$  В?
2. Укажите, как изменится индуктивное сопротивление катушки, если уменьшить частоту синусоидального напряжения в 3 раза?
3. Укажите, чему равен угол  $\varphi$  в последовательной RC-цепи, если известны значения синусоидального напряжения  $U = 30$  В, тока  $I = 3$  А и мощности  $P = 18$  Вт?
4. Конденсатор с ёмкостью  $C = 180$  мкФ установлен в цепи синусоидального тока с напряжением  $u = \sqrt{2} \cdot 220 \sin(2\pi \cdot 1000t + \pi / 6)$  В. Вычислить сопротивление конденсатора.
5. Напряжения на трёх последовательно соединённых резисторах относятся как 1:4:6. Определите, как относятся значения сопротивлений резисторов?

## Практическое занятие 2

### РАСЧЕТ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** создание модели и расчет токов и напряжения в цепи постоянного тока.

В данной работе необходимо построить модель электрической схемы представленной на рис. 2.1 в пакете Simulink.

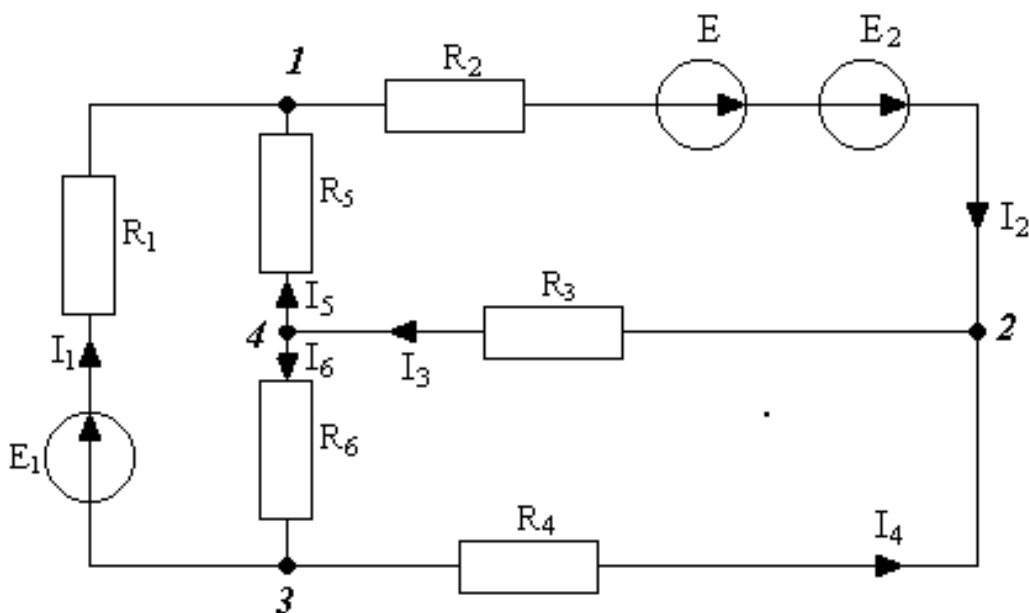


Рис. 2.1. Схема для исследования в пакете Simulink

Пример модели представлен на рис. 2.2. Варианты для расчета представлены в таблице.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R <sub>1</sub> Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660	760
R <sub>2</sub> Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80	60
R <sub>3</sub> Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110	120
R <sub>4</sub> Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150	200
R <sub>5</sub> Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200	220
R <sub>6</sub> Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60	70
E <sub>1</sub> В	30	24	26	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
E <sub>2</sub> В	40	38	36	34	32	30	32	34	36	38	40	42	44
J А	0,4	0,2	0,6	0,2	0,4	0,2	0,5	0,2	0,8	0,2	0,4	0,2	0,5

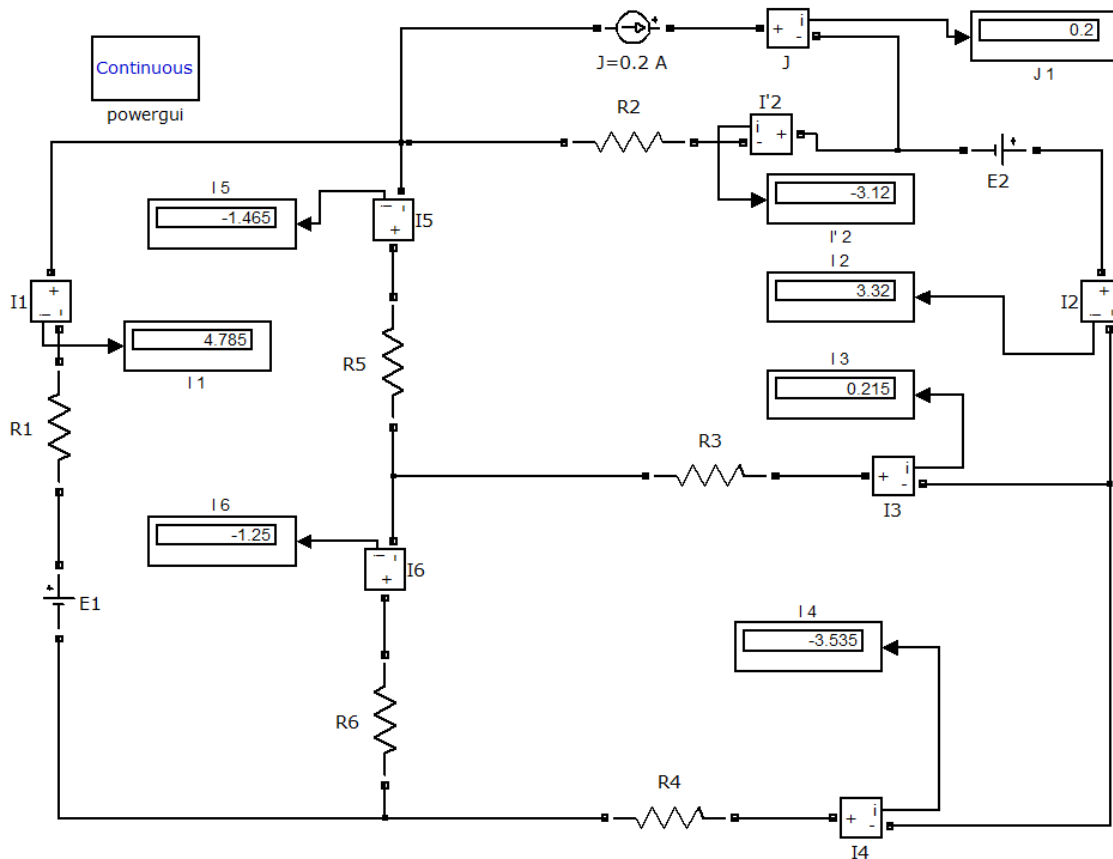


Рис. 2.2. Пример модели

### 1. Задание к работе

Набрать на компьютере и исследовать электрическую схему, представленную на рис. 2.1.

## **2. Порядок выполнения работы**

1. Набрать и исследовать модель в MATLAB (рис. 2.2).
2. Промоделировать работу модели.

## **3. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- Заданную схему с параметрами.
- Схему модели, выполненную в MATLAB, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Выводы.

## **4. Контрольные вопросы**

1. Как запустить Simulink?
1. В какой библиотеке MATLAB находятся сопротивления?
2. В какой библиотеке MATLAB находятся измерительные приборы?
3. Как смоделировать источник постоянного тока?
4. Как проверить расчетное значение тока в сопротивлении  $R_3$ ?
5. Как измерить значение напряжения на сопротивлении  $R_2$ ?
6. Как измерить сопротивление между точками 1 и 2 схемы представленной на рис. 2.1?

## **Практическое занятие 3**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Цель работы:** моделирование и исследование линейной разветвлённой цепи постоянного тока.

Задача анализа разветвленной электрической цепи обычно сводится к нахождению токов ветвей и напряжений на различных участках цепи.

Необходимо рассчитать схему, представленную на рисунке, используя варианты задания из таблицы.

Вариант	Источники		Сопротивления резисторов, Ом					
	ИН с ЭДС $E_k$ , В	ИТ с током $J_k$ , А	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
1	$E_1 = 15; E_5 = -5$	$J_3 = 4$	7	2	1	3	9	8
2	$E_1 = -20; E_5 = 2$	$J_2 = -5$	9	9	7	1	2	3
3	$E_1 = 35; E_5 = -5$	$J_3 = -6$	1	6	3	9	5	1
4	$E_1 = 20; E_5 = 30$	$J_2 = 7$	3	4	9	7	8	2
5	$E_1 = 40; E_5 = 30$	$J_2 = 8$	6	2	6	6	1	3
6	$E_1 = 30; E_5 = 15$	$J_3 = 2$	9	1	3	4	5	3
7	$E_1 = 40; E_5 = -30$	$J_3 = -1$	3	3	7	3	8	2
8	$E_1 = -15; E_5 = 5$	$J_2 = 6$	8	2	8	3	2	2
9	$E_1 = -30; E_5 = 5$	$J_1 = -7$	3	9	8	3	5	2
10	$E_1 = -35; E_5 = 10$	$J_1 = 5$	4	2	7	4	2	1
11	$E_1 = 25; E_5 = -15$	$J_2 = 3$	5	2	1	3	9	8
12	$E_1 = -30; E_6 = 10$	$J_3 = -3$	9	7	7	1	2	3
13	$E_1 = 25; E_6 = -15$	$J_2 = 8$	1	6	2	9	5	1
14	$E_1 = 10; E_6 = 20$	$J_2 = 5$	3	4	9	5	8	2
15	$E_1 = 30; E_3 = 20$	$J_3 = 4$	6	2	6	6	4	3
16	$E_1 = 20; E_4 = 25$	$J_2 = 3$	9	1	3	4	5	1
17	$E_1 = 30; E_6 = -20$	$J_2 = -5$	3	3	7	3	5	2
18	$E_1 = -5; E_4 = 15$	$J_3 = -4$	8	2	8	6	2	2
19	$E_1 = -20; E_5 = 15$	$J_2 = -6$	3	9	2	3	5	2
20	$E_1 = -25; E_4 = 30$	$J_2 = 4$	4	6	7	4	2	1
21	$E_1 = 25; E_6 = -15$	$J_2 = 3$	5	2	1	3	9	8
22	$E_1 = -10; E_6 = 30$	$J_2 = -5$	9	4	7	1	2	3
23	$E_1 = 25; E_2 = -15$	$J_1 = -2$	1	6	7	9	5	1
24	$E_1 = 30; E_6 = 10$	$J_1 = 4$	3	4	9	5	8	2
25	$E_1 = 30; E_3 = 20$	$J_2 = 5$	6	2	6	6	4	3
26	$E_1 = 40; E_4 = 5$	$J_3 = 6$	9	1	3	4	5	2
27	$E_1 = 30; E_6 = -20$	$J_3 = -7$	7	3	7	3	8	2
28	$E_1 = -5; E_4 = 10$	$J_2 = 1$	8	4	8	3	2	2
29	$E_1 = -20; E_5 = 15$	$J_1 = -4$	3	9	3	3	5	2
30	$E_1 = 5; E_6 = -15$	$J_3 = -5$	7	2	1	4	9	8

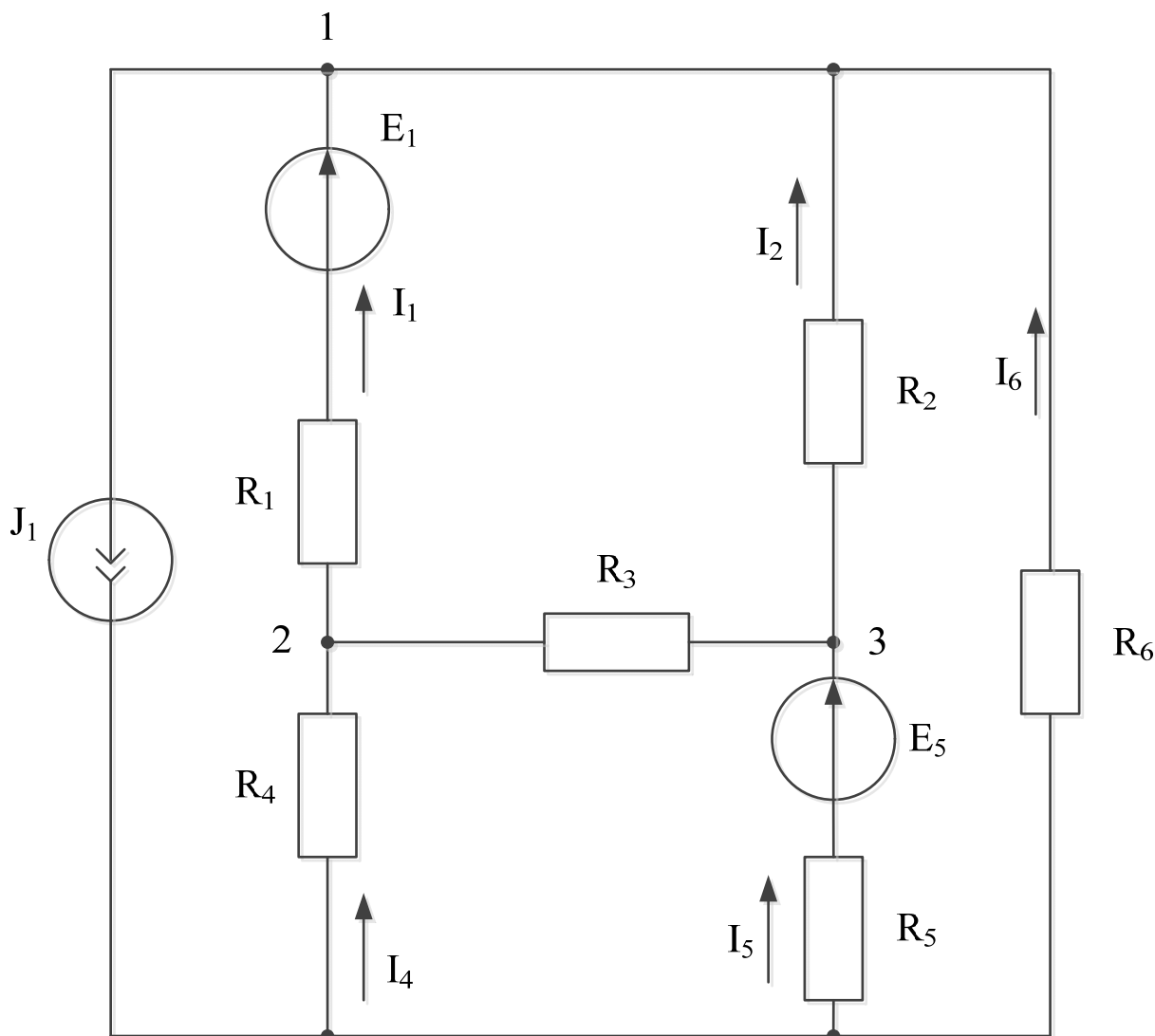


Схема для анализа разветвленной электрической цепи

### 1. Задание к работе

*Задание 1.* Согласно варианту задания набрать схему цепи (см. рисунок) и рассчитать токи и напряжения. Результаты расчёта занести в таблицу.

	Узловые напряжения			Токи ветвей схемы					
	$U_{10}, \text{В}$	$U_{20}, \text{В}$	$U_{30}, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_4, \text{А}$	$I_5, \text{А}$	$I_6, \text{А}$
Рассчитано									
Измерено в MATLAB									

*Задание 2.* Проверить выполнение первого закона Кирхгофа для всех узлов схемы и второго закона Кирхгофа для двух произвольно выбранных контуров схемы (исключая контур с источником тока).

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические расчётная и смоделированная в MATLAB схемы цепи.
3. Таблица с расчётными и экспериментальными данными.
4. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. Как проверить первый закон Кирхгофа для узлов схемы?
2. Как проверить второй закон Кирхгофа для схемы, изображённой на рис.3.1?
3. Как определить параметры эквивалентного генератора между точками 1 и 2 схемы, изображённой на рисунке?

## Практическое занятие 4

### РАСЧЕТ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы:** расчет токов и напряжения в цепи переменного тока.

Уравнения электрического равновесия напряжений и токов цепи синусоидального тока можно записать в аналитической форме и представить графически в виде векторных диаграмм.

При анализе цепей синусоидального тока необходимо иметь в виду следующее:

– реактивное *индуктивное* сопротивление  $X_L$  индуктивной катушки и реактивное *ёмкостное*  $X_C$  сопротивление конденсатора зависят от частоты  $f$  источника синусоидального напряжения  $u = U_m \sin(2\pi ft + \Psi_u)$ , т. е.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC),$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота напряжения, рад/с;  $f = 1/T$  – частота напряжения, Гц;  $T$  – период синусоидального напряжения, с;  $\Psi_u$  – его начальная фаза, рад или град;

– в ветвях с реактивными элементами  $L$  и  $C$  между напряжением и током возникает *фазовый сдвиг*  $\varphi$ .

Задание к работе.

В данной работе необходимо построить и рассчитать модель электрической цепи переменного тока в пакете Simulink (рис. 4.1).



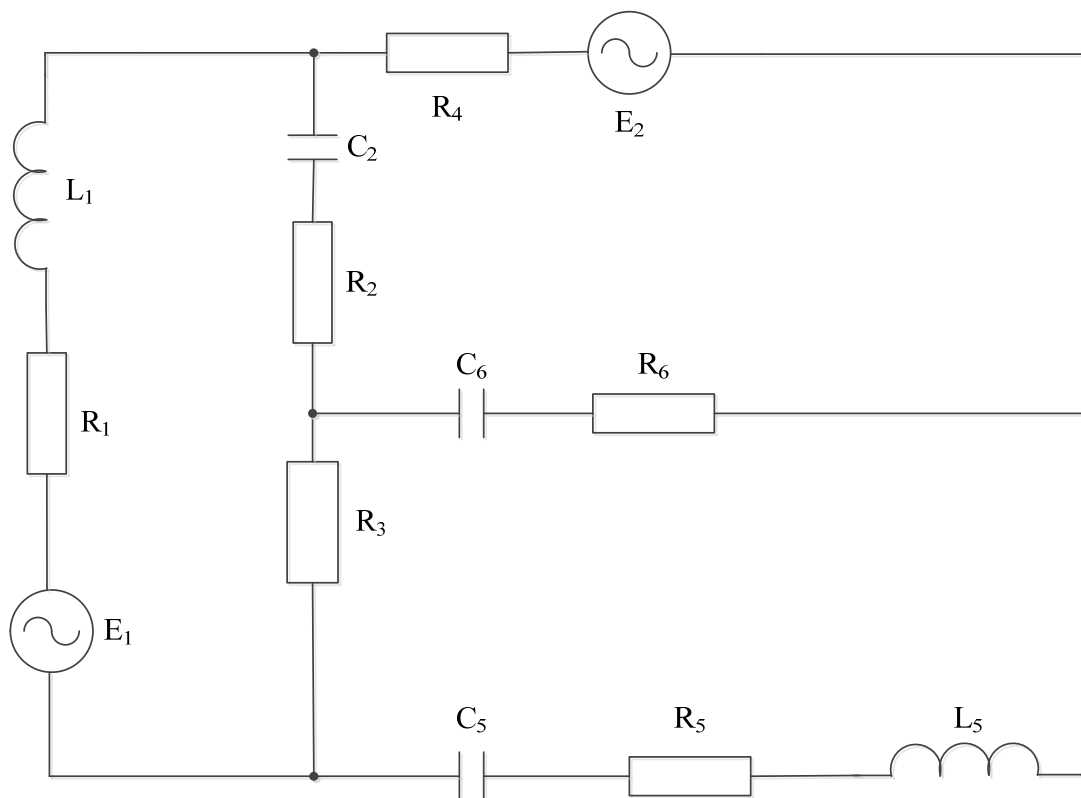


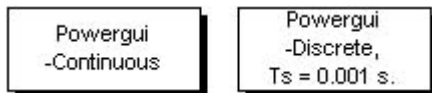
Рис. 4.1. Электрическая цепь переменного тока для исследования

Варианты для расчета представлены в таблице.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R <sub>1</sub> Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660
L <sub>1</sub> H·10 <sup>-6</sup>	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
R <sub>2</sub> Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80
R <sub>3</sub> Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110
C <sub>2</sub> F·10 <sup>-6</sup>	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
R <sub>4</sub> Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150
L <sub>5</sub> H·10 <sup>-6</sup>	20	10	40	40	30	35	30	20	10	20	40	30
R <sub>5</sub> Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200
C <sub>5</sub> F·10 <sup>-6</sup>	40	50	30	60	70	65	50	30	70	40	30	20
R <sub>6</sub> Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60
C <sub>6</sub> F·10 <sup>-6</sup>	30	40	40	50	70	60	55	35	60	45	35	25
E <sub>1</sub> В	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
E <sub>2</sub> В	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127

Для получения результатов расчета необходимо использовать блоки «Мультиметр» и «Powerqui – Continuous». «Powerqui – Continuous» это графический интерфейс пользователя.

Пиктограмма:



Назначение:

Блок является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы комплексным методом,
- расчет установившегося режима,
- дискретизация модели,
- задание начальных условий,
- инициализация трехфазных схем содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима,
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer,
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи,

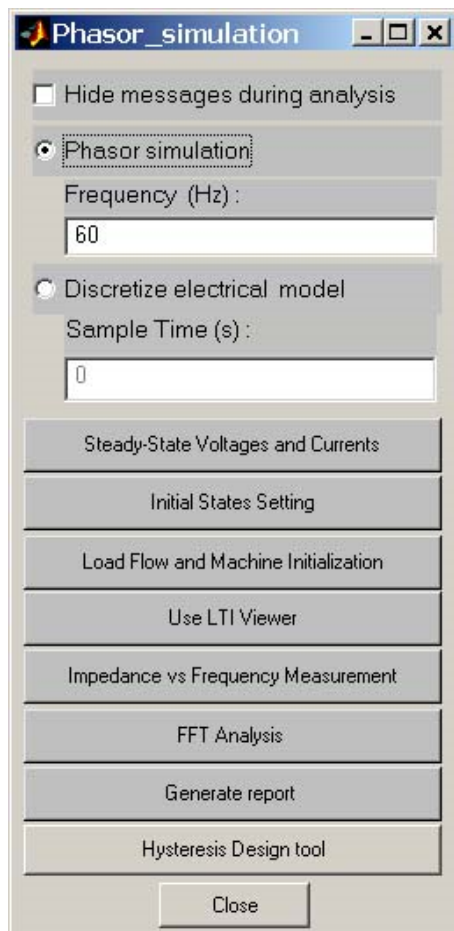


Рис. 4.2. Окно задания параметров

- выполнение гармонического анализа,
- создание отчета,
- создание файла характеристик намагничивания для модели нелинейного трансформатора.
- Окно задания параметров:

Параметры блока:

«Hide messages during analysis» [Скрывать сообщения при проведении анализа]. Если флажок установлен, то подавляется вывод сообщений в командном окне MATLAB при выполнении расчетов.

«Phasor simulation» [Расчет схемы комплексным методом]. При установленном флажке выполняется расчет схемы комплексным методом. При этом необходимо задать частоту источников в графе Frequency.

«Frequency (Hz)» [Частота (Гц)]. Частота источников при расчете схемы комплексным методом. При других видах анализа параметр является недоступным.

«Discretize electrical model» [Выполнить дискретизацию модели]. При установленном флажке выполняется дискретизация модели. При этом необходимо задать шаг дискретизации в графе «Sample time.» «Sample time (s)».

[Шаг дискретизации]. Параметр является доступным, если задан режим дискретизации модели.

При этом на пиктограмме блока будет показана величина этого параметра.

«Steady State Voltages and Currents» [Установившееся значения напряжений и токов]. Расчет установившихся значений переменных. При нажатии на кнопку открывается окно, в котором будут показаны соответствующие значения.

«Initial states Setting» [Установка начальных значений]. При нажатии на кнопку открывается окно, в котором отображаются начальные значения переменных. Эти значения можно изменять. Новые значения используются при расчете переходных процессов.

«Load Flow and Machine Initializations» [Инициализация схем содержащих электрические машины].

«Use LTI Viewer» [Использование LTI Viewer]. Применение инструмента Simulink LTI Viewer для анализа схемы.

«Impedance vs Frequency Measurements» [Определение импеданса цепи].

«FFT Analysis» [Гармонический анализ].

«Generate Report» [Создание отчета].

«Hysteresis Design Tool» [Инструмент расчета характеристики намагничивания].

Multimeter – Мультиметр

Его назначение – выполнять измерение токов и напряжений блоков библиотеки SimPowerSystem для которых в их окне диалога установлен параметр Measurements (измеряемые переменные). Окно задания параметров:

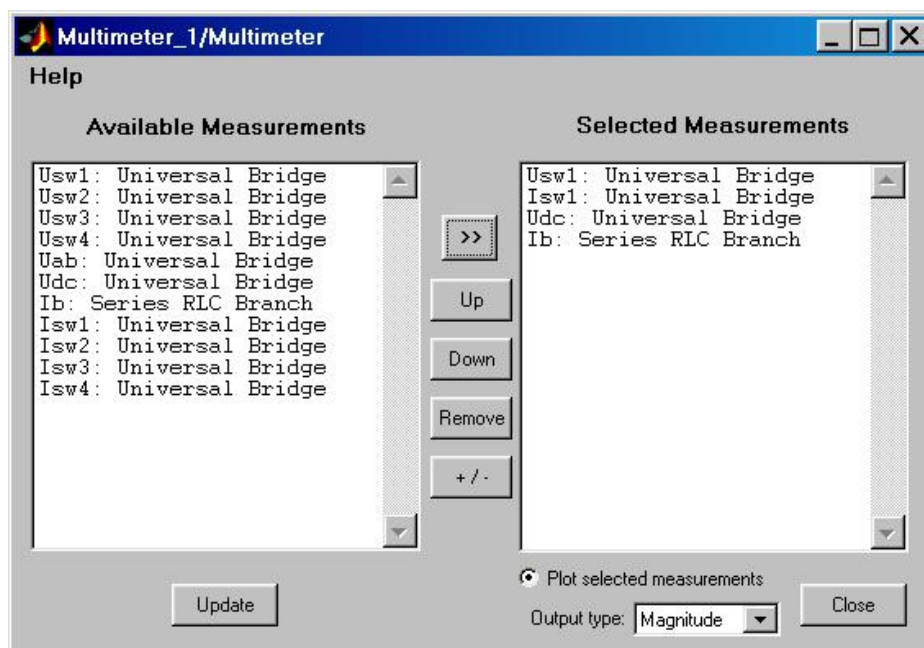


Рис. 4.3. Окно задания параметров мультиметра

Параметры блока:

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

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

- >> - Добавить выделенную переменную в список измеряемых.
- Up - Передвинуть вверх выделенную переменную в список измеряемых.
- Down - Передвинуть вниз выделенную переменную в список измеряемых.
- Remove - Удалить выделенную переменную из списка измеряемых.
- +/- - Изменить знак выделенной переменной.

Output signal: [Выходной сигнал]. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только, если с помощью блока Powergui

установлен режим расчета на переменном токе (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

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

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей - Current Measurement и Voltage Measurement. Список блоков, в окне параметров которых имеется графа Measurements, приведен ниже.

№	Название блока
1	AC Current Source Parallel RLC Branch
2	AC Voltage Source Parallel RLC Load
3	Controlled Current Source PI Section Line
4	Controlled Voltage Source Saturable Transformer
5	DC Voltage Source Series RLC Branch
6	Breaker Series RLC Load
7	Distributed Parameter Line Surge Arrester
8	Linear Transformer Three-Phase Transformer (Two and Three Windings)
9	Mutual Inductance
10	Universal Bridge

Выходным сигналом блока является вектор сигналов измеряемых переменных. На рис. 4.4 показана схема и результаты расчёта однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку.

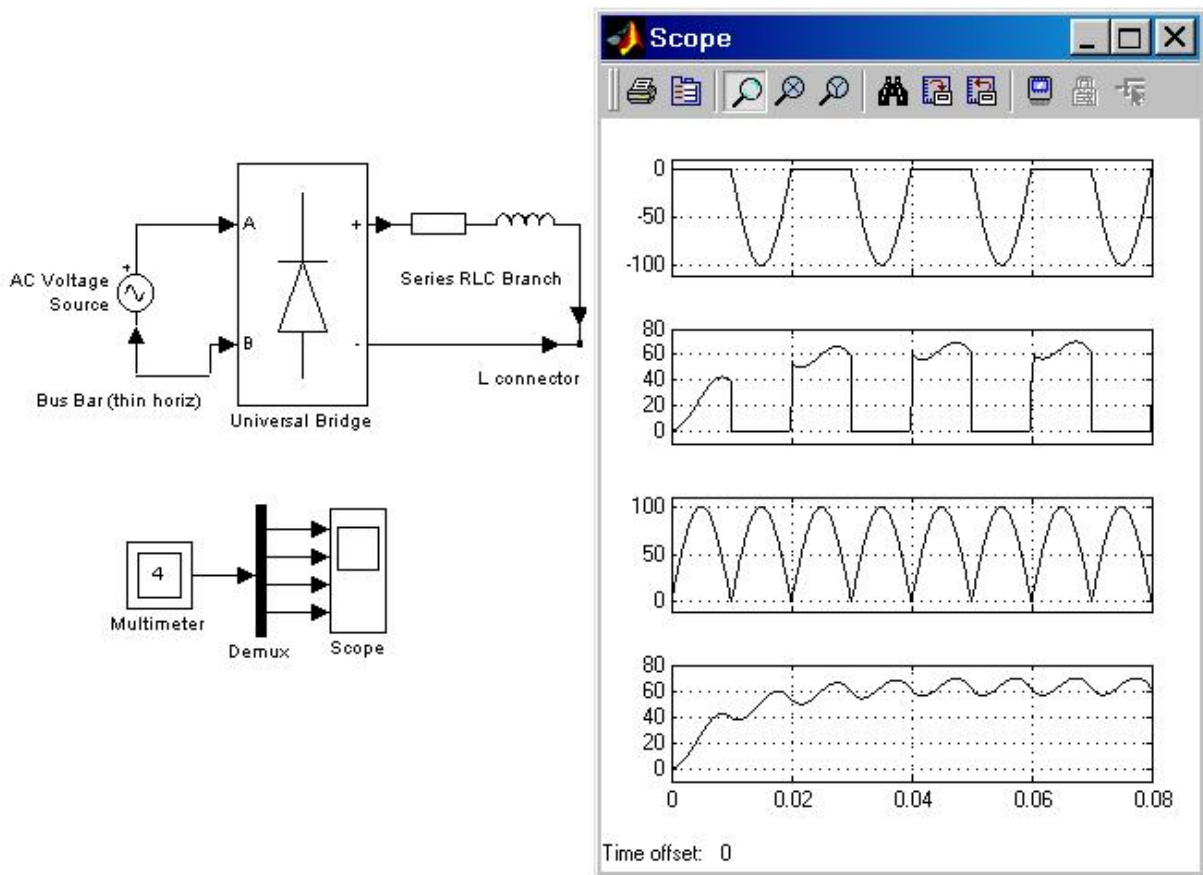


Рис. 4.4. Модель и результаты расчёта однофазного мостового выпрямителя

С помощью блока Multimeter измеряются напряжение и ток одного из вентилях, напряжение на нагрузке и ток нагрузки.

## 1. Порядок выполнения работы

1. Набрать и исследовать модель в MATLAB (рис. 4.1.).
2. Промоделировать работу модели.
3. Составить схему для расчета баланса мощностей.

## 2. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Заданную схему с параметрами.
- Схему модели, выполненную в MATLAB, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Результаты расчета «SimPowerSystems Report».
- Схему для расчета баланса мощностей.
- Выводы.

Пример.

Результаты расчета «SimPowerSystems Report».

SimPowerSystems Report.

generated by powergui,

16-Oct-2005 20:28:09

[1] Steady-State voltages and currents:

States at 50 Hz :

$I_{l\_Z1} = 0.699 \text{ A} \quad 0.65$

$U_{c\_Z3} = 15.32 \text{ V} \quad -86.13$

$I_{l\_Z4} = 0.4842 \text{ A} \quad -177.77$

$U_{c\_Z4} = 15.41 \text{ V} \quad 92.23$

$U_{c\_Z5} = 8.547 \text{ V} \quad -80.70$

Measurements at 50 Hz :

Voltage Measurement = 181.7 V 0.66

Current Measurement = 0.699 A 0.65

Ub: Z1 = 181.7 V 0.66

Ub: Z2 = 193.1 V 3.05

Ub: Z4 = 78.99 V 170.99

Ub: Z5 = 59.69 V 1.07

Ub: Z6 = 19.39 V -2.90

Usrc: AC Voltage Source1 = 141.4 V 0.00

Usrc: AC Voltage Source2 = 311.1 V 0.00

Ib: Z1 = 0.699 A 0.65

Ib: Z2 = 0.9653 A 3.05

Ib: Z4 = 0.4842 A -177.77

Ib: Z5 = 0.2685 A 9.30

Ib: Z6 = 0.2154 A -2.90

Sources at 50 Hz :

AC Voltage Source1 = 141.4 V 0.00

AC Voltage Source2 = 311.1 V 0.00

Nonlinear elements at 50 Hz :

[2] Initial values of States Variables:

$I_{l\_Z1} = 0 \text{ A}$

$U_{c\_Z3} = 0 \text{ V}$

$I_{l\_Z4} = 0 \text{ A}$

$U_{c\_Z4} = 0 \text{ V}$

$U_{c\_Z5} = 0 \text{ V}$

### 3. Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение блока «Powerqui - Continuous»?
2. Как задаются в модели значения индуктивности и емкости?
3. Какое значение тока измеряется с помощью блока «RMS»?
4. Что такое активная мощность?
5. Как вычислить активную мощность потребляемую схемой представленной на рис.4.1?
6. Что такое реактивная мощность?
7. Как вычислить реактивную мощность потребляемую схемой представленной на рис. 4.1?
8. Как провести визуализацию значений физических величин измеряемых мультиметром?

## Практическое занятие 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Цель работы:** исследование явления резонанса в последовательном и параллельном колебательных контурах и определение параметров колебательных контуров.

Под резонансом понимают такой режим работы электрической цепи, при котором её входное сопротивление имеет чисто резистивный характер и, следовательно, сдвиг фаз между напряжением  $u$  и током  $i$  на её входе равен нулю ( $\varphi = 0$ ) [1].

Цепи, в которых возникают резонансные явления, называют резонансными цепями или колебательными контурами. Простейший колебательный контур содержит один индуктивный  $L$  и один емкостный  $C$  элементы, соединенные между собой и источником синусоидального напряжения последовательно (последовательный колебательный контур) или параллельно (параллельный колебательный контур).

Различают две основные разновидности резонансных режимов: резонанс напряжений и резонанс токов.

**Резонанс напряжений** (РН) возникает в последовательном колебательном контуре (рис. 5.1) [1]. В схему замещения цепи, кроме индуктивного  $L$  и ёмкостного  $C$  элементов, включен также элемент  $R$ , учитывающий все



виды активных потерь в контуре (в катушке, в конденсаторе, во внутреннем сопротивлении источника питания, в соединительных проводах).

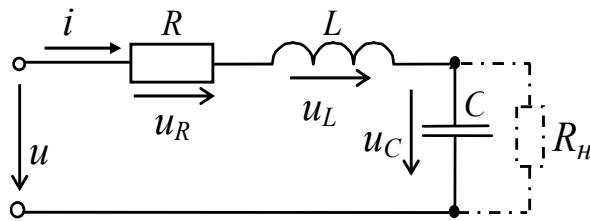


Рис. 5.1. Последовательный колебательный контур

Условием наступления РН в схеме (рис.5.1) является равенство нулю реактивного сопротивления на входе цепи:

$$X_{PH} = X_{L(PH)} - X_{C(PH)} = 0 \text{ или}$$

$$\omega_{PH}L = 1/(\omega_{PH}C),$$

откуда угловая (в рад/с) и циклическая (в Гц) резонансные частоты контура

$$\omega_{PH} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_{PH} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

**Характеристическое** (волновое) сопротивление  $\rho$  (в Ом) последовательного колебательного контура равно его индуктивному или ёмкостному сопротивлению при резонансе:

$$\rho = X_{L(PH)} = \omega_{PH}L = \frac{1}{\sqrt{LC}}L = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

**Добротностью**  $Q$  контура называют отношение характеристического сопротивления  $\rho$  контура к активному сопротивлению  $R$  при резонансе:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{X_{L(PH)}}{R} = \frac{X_{C(PH)}}{R}.$$

Чем больше  $\rho$  и меньше  $R$ , тем добротнее контур, тем будут уже частотные характеристики тока и напряжений на элементах контура. В радиотехнических контурах добротность  $Q = 100 \dots 1000$ ; в электрических цепях добротность обычно не превышает  $3 \dots 5$ .

Добротность показывает, во сколько раз напряжение на зажимах конденсатора  $U_C$  или индуктивное напряжение  $U_L$  катушки при резонансе больше напряжения питания контура  $U$ :

$$Q = \frac{(U_C)_{PH}}{U} = \frac{(U_L)_{PH}}{U} = \frac{\rho}{R}$$

Ток  $I$  при РН имеет максимальное значение, т. к.

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_{L(PH)} - X_{C(PH)})^2}} = \frac{U}{R} = I_{max}.$$

Характерной особенностью режима РН является превышение напряжениями  $U_L$  и  $U_C$  входного напряжения  $U$  контура.

Векторные диаграммы напряжений на элементах контура до режима резонанса (а), при режиме резонанса (б) и после режима РН (в) представлены на рис. 5.2.

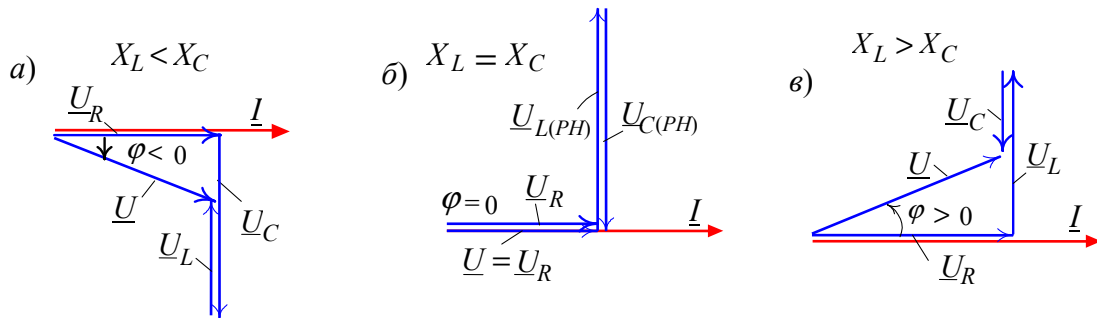


Рис. 5.2. Векторные диаграммы напряжений

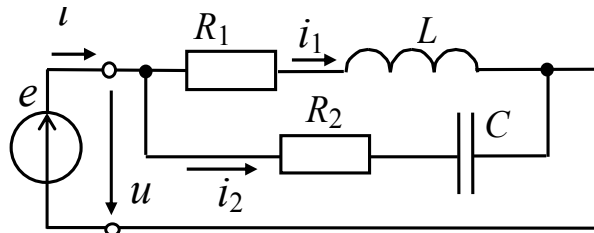


Рис.5.3. Параллельный колебательный контур

**Резонанс токов** (РТ) возникает в параллельном колебательном контуре (рис. 5.3), условием которого является равенство нулю входной реактивной проводимости  $b_{PT} = b_{L(PT)} - b_{C(PT)} = 0$  или

$$b_{L(PT)} = \frac{\omega_{PT} L}{R_1^2 + (\omega_{PT} L)^2} =$$

$$= b_{C(PT)} = \frac{1/(\omega_{PT} C)}{R_2^2 + 1/(\omega_{PT} C)^2},$$

откуда резонансная угловая частота

$$\omega_{PT} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}},$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – резонансная частота контура без потерь ( $R_1 = R_2 = 0$ );  
 $\rho = \sqrt{L/C}$  – характеристическое сопротивление контура.

$$Q = \frac{I_{C(PT)}}{I_{PT}}.$$

Ток  $I$  при РТ имеет *минимальное* значение,

$$I_{PT} = \frac{U}{Z_{PT}} = UY_{PT} = U\sqrt{g_{PT}^2 + (b_{L(PT)} - b_{C(PT)})^2} = Ug_{PT} = I_{min},$$

так как полная проводимость контура в этом режиме  $Y_{PT} = g_{(PT)} = Y_{min}$ ,  
а сопротивление контура  $Z_{PT} = 1/Y_{PT} = Z_{max}$ .

**Векторные диаграммы** токов ветвей и тока на входе реального (а) и идеального (в) колебательных контуров для режима РТ представлены на рис. 5.4, б и г; ток  $I_1$  в первой ветви отстаёт от напряжения по фазе на угол  $\varphi_1$ , а ток  $I_2$  во второй ветви его опережает по фазе на угол  $\varphi_2$  (рис. 5.4, б).

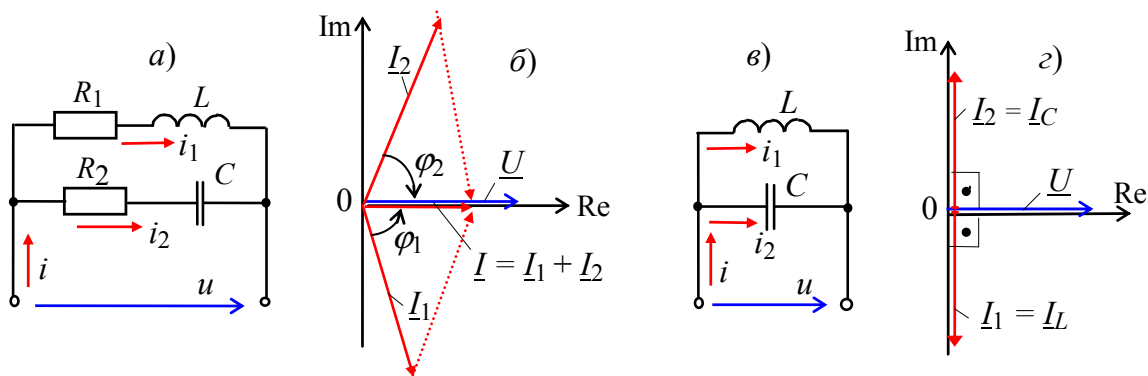


Рис. 5.4. Векторные диаграммы токов

## 1. Задание к работе

*Задание 1.* Найти параметры элементов схем контуров (рис. 5.5) с округлением до десятичного знака по формулам:

$$E = \text{int}(10/\sqrt[4]{N}), \text{ В } [E \in (10, \dots, 4), \text{ В}]; \quad e = \sqrt{2}E \sin(2\pi f t); \quad f = (30, \dots, 120)$$

Гц, где  $N$  – номер записи фамилии студента в учебном журнале группы.

$$R_1 = \text{int}(10/\sqrt{N}), \text{ Ом}; \quad [R \in 10, \dots, 2 \text{ Ом}]; \quad R_2 = R_3 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$L_1 = \text{int}(100/\sqrt{N}), \text{ мГн}; \quad [L_1 \in 100, \dots, 18 \text{ мГн}];$$

$$C_1 = C_2 = 100 + 10N, \text{ мкФ } [C \in 110, \dots, 400 \text{ мкФ}];$$

$$L_2 = 25/\sqrt{N}, \text{ мГн } [L_2 \in 25, \dots, 4,6 \text{ мГн}]$$

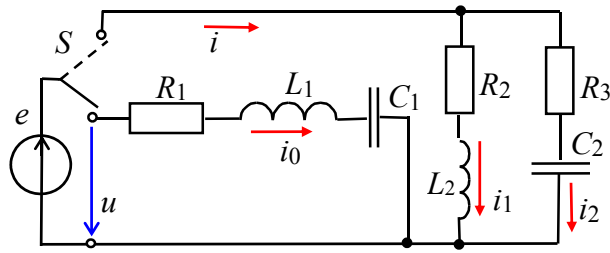


Рис. 5.5. Схема для определения параметров контуров

Занести их значения в таблицу.

Вариант $N = \dots$	
$R_1L_1C_1$ -контур	$R_2L_2R_3C_2$ -контур
$E = \dots, \text{В}$	$E = \dots, \text{В}$
$R_1 = \dots, \text{Ом}$	$R_2 = R_3 = \dots, \text{Ом}$
$L_1 = \dots, \text{мГн}$	$L_2 = \dots, \text{мГн}$
$C_1 = \dots, \text{мкФ}$	$C_2 = \dots, \text{мкФ}$

Рассчитать напряжения на элементах схемы, токи ветвей и углы сдвига фаз  $\varphi_k$  ветвей и токи на входе колебательных контуров при резонансных частотах:

$$f_{PH} = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1}, f_{PT} = (1/2\pi\sqrt{L_2C_2})\sqrt{(L_2/C_2 - R_2^2)/(L_2/C_2 - R_3^2)}$$

и занести их значения в таблицу.

Ток, напряжение, угол $\varphi$	Рассчитано по формулам		Рассчитано в MATLAB											
	Частота		Частота $f$ , Гц											
	$f_{PH}$ , Гц	$f_{PT}$ , Гц	30	40	50	60	70	80	90	110	130	140	$f_p$	
$I_0, \text{А}$														
$U_R, \text{В}$														
$U_L, \text{В}$														
$U_C, \text{В}$														
$I_1, \text{А}$														
$I_2, \text{А}$														
$I, \text{А}$														
$\varphi_1, \text{град}$			<b>Примечание.</b> $\varphi_1 = \arctg(X_{L2} / R_2)$ ; $\varphi_2 = -\arctg(X_{C2} / R_3)$ .											
$\varphi_2, \text{град}$														

**Задание 2.** Построить векторные диаграммы напряжений и токов схем замещения контуров в режиме резонанса.

**Задание 3.** Собрать схему (рис. 5.5) в MATLAB (рис. 5.6, рис. 5.7) и установить параметры её элементов. Создать м-файл (рис. 5.10).

Изменяя частоту ЭДС источника  $e$  от 30 Гц до 140 Гц, рассчитать показания приборов.

**Задание 4.** Используя экспериментальные и рассчитанные данные, построить графики амплитудно-частотных характеристик токов и напряжений: на одном рисунке представить графики  $I_0(f)$ ;  $U_R(f)$ ;  $U_L(f)$ ;  $U_C(f)$ , а на втором – графики  $I(f)$ ;  $I_1(f)$  и  $I_2(f)$ .

Отметить на графиках координаты точек напряжений и токов при резонансных режимах.

Построить векторные диаграммы напряжений и тока последовательного контура при частотах 40 Гц, и – векторные диаграммы токов и напряжения параллельного контура при частотах 80 Гц.

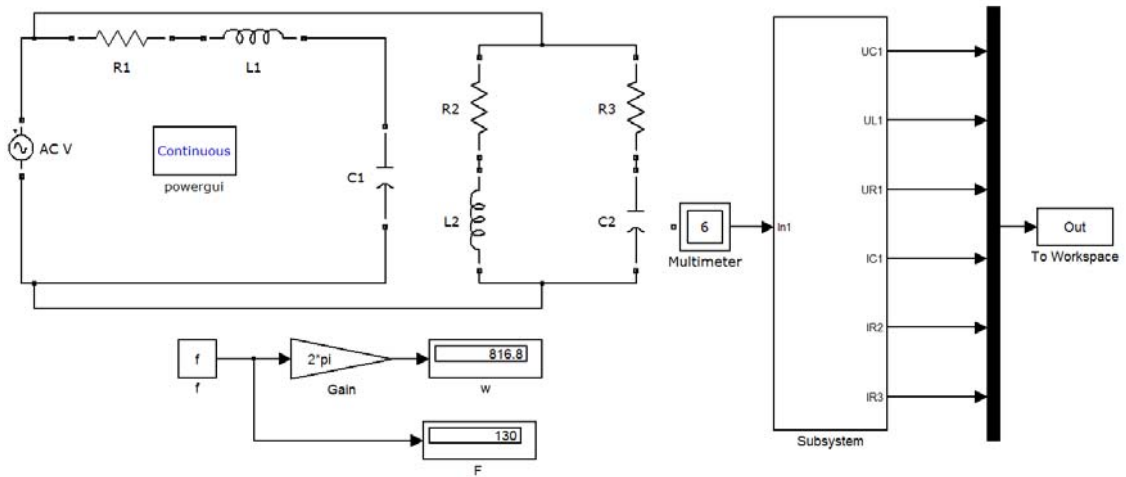


Рис. 5.6. Модель для исследования резонанса

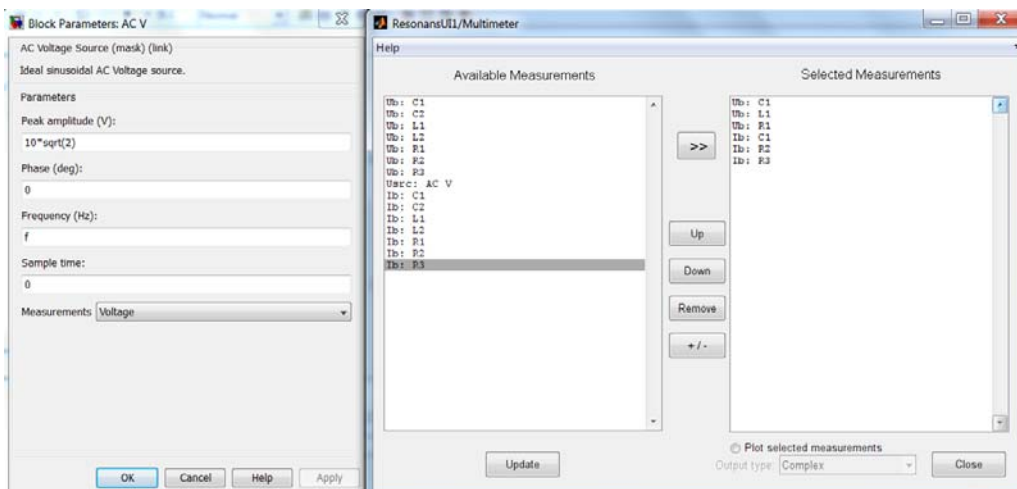


Рис. 5.7. Окно настройки мультиметра

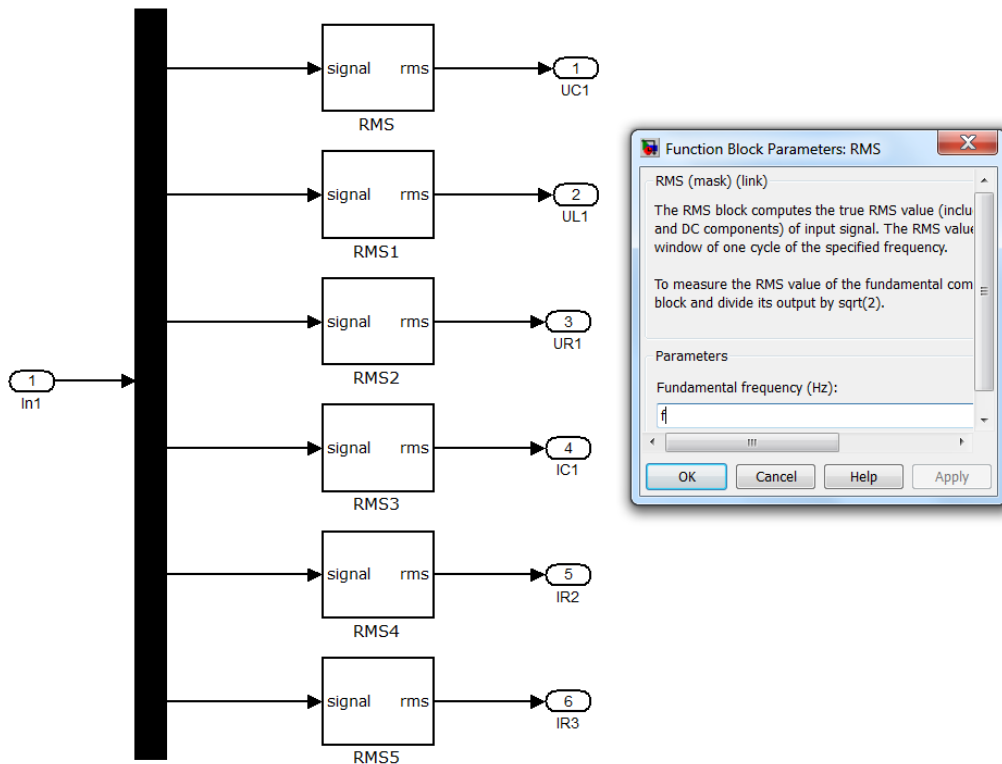


Рис. 5.8. Субсистема

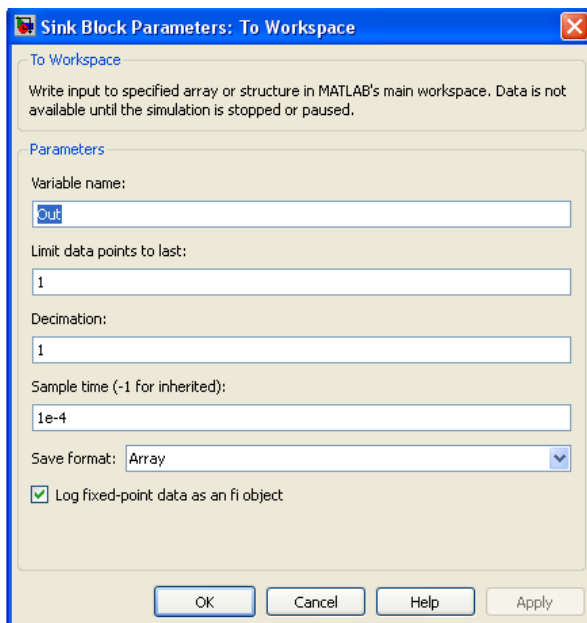


Рис. 5.9. Настройка блока «To Workspace»

```

for k=0:1:20;
    f=30+5*k;
    sim('ResonansUI1')
    A(k+1,1)=Out(1);
    A(k+1,2)=Out(2);
    A(k+1,3)=Out(3);
    A(k+1,4)=Out(4);
    A(k+1,5)=Out(5);
    A(k+1,6)=Out(6);
    A(k+1,7)=f;
end

```

Рис. 5.10. М-файл

Для расчета и построения семейства характеристик, например, зависимость тока от частоты при различных значениях индуктивности, можно использовать программу, представленную на рис. 5.11.

```

for k1=0:1:2;
L=0.01+0.01*k1;% величина индуктивности;
for k=1:1:40;
f=5*k;% величина частоты напряжения;
sim('ResonansUI3') % команда обращения к модели;
A(k,1)=Out(1); % формирование массива данных;
A(k,2)=Out(2);
A(k,3)=Out(3);
A(k,4)=Out(4);
A(k,5)=f;
end
plot(A(1:k,5),A(1:k,4),'k')% построение графиков;
hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее
окно,
%что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
end

```

Рис. 5.11. Программа расчета и построения семейства характеристик

Рассчитанные характеристики представлены на рис. 5.12.

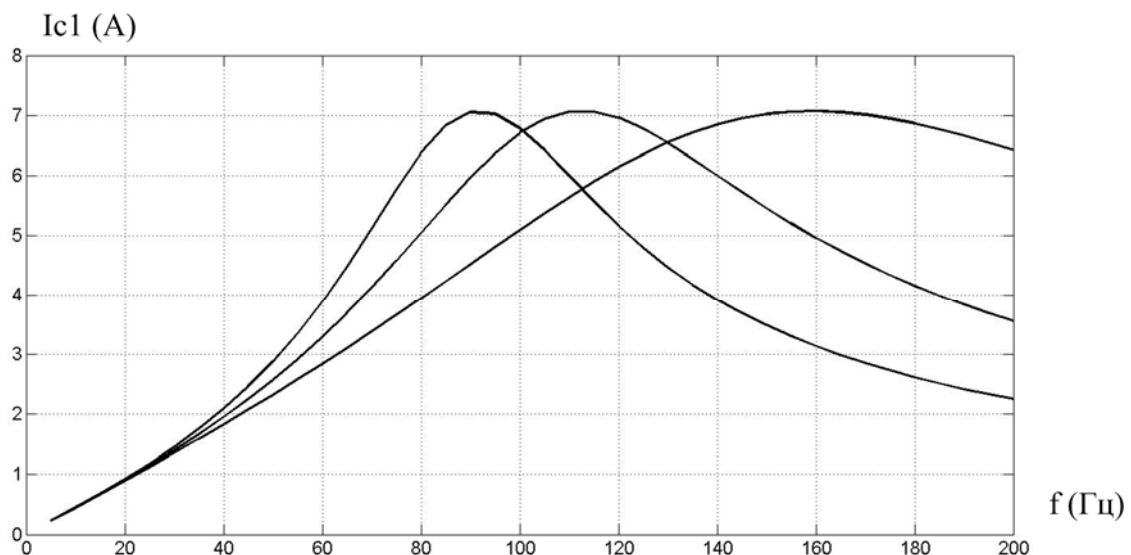


Рис. 5.12. Зависимость тока от частоты при различных значениях индуктивности

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические расчётные схемы и схемы цепи, смоделированной в программной среде MATLAB.
3. Расчётные формулы и значения параметров колебательных контуров, векторные диаграммы напряжений и токов, графики резонансных кривых.
4. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
5. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. Укажите, какие признаки из приведенных ниже характеризуют режим резонанса напряжений, а какие – режим резонанса токов:

- а) возникает в цепи синусоидального тока, когда катушка и конденсатор включены последовательно между собой и с источником;
- б) ток на зажимах контура достигает максимального значения;
- в) ток на зажимах контура достигает минимального значения;
- г) значение полной входной проводимости контура минимальное;
- д) значение полного входного сопротивления контура минимальное;

2. Укажите, добротность контура отображает кратность превышения напряжения на ёмкостном элементе над входным напряжением или тока ёмкостного элемента над входным током простейших последовательного и параллельного колебательных контуров?

3. Определите ток при резонансе в последовательном колебательном контуре (рис. 5.13) с параметрами:  $R = 10 \text{ Ом}$ ;  $L = 10 \text{ мГн}$ ;  $C = 10 \text{ мкФ}$ , если напряжение на зажимах контура  $U = 40 \text{ В}$ .

4. Определите показание вольтметра  $V_C$  в схеме (рис. 5.13) цепи при резонансе, если известны показания вольтметра  $V = 10 \text{ В}$  и частота  $f = 1 \text{ МГц}$

5. Укажите значение угловой резонансной частоты последовательного колебательного контура с параметрами:  $R = 10 \text{ Ом}$ ;  $L = 10 \text{ мГн}$ ;  $C = 10 \text{ мкФ}$ .

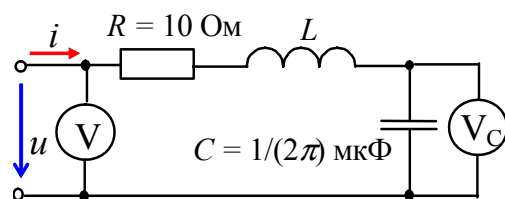


Рис. 5.13. Последовательный колебательный контур



## Практическое занятие 6

### РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

**Цель работы:** расчет токов, напряжений и мощности в трехфазной цепи.

#### 1. Задание к работе

Построить и рассчитать модель электрической трехфазной цепи в пакете Simulink при различных нагрузках.

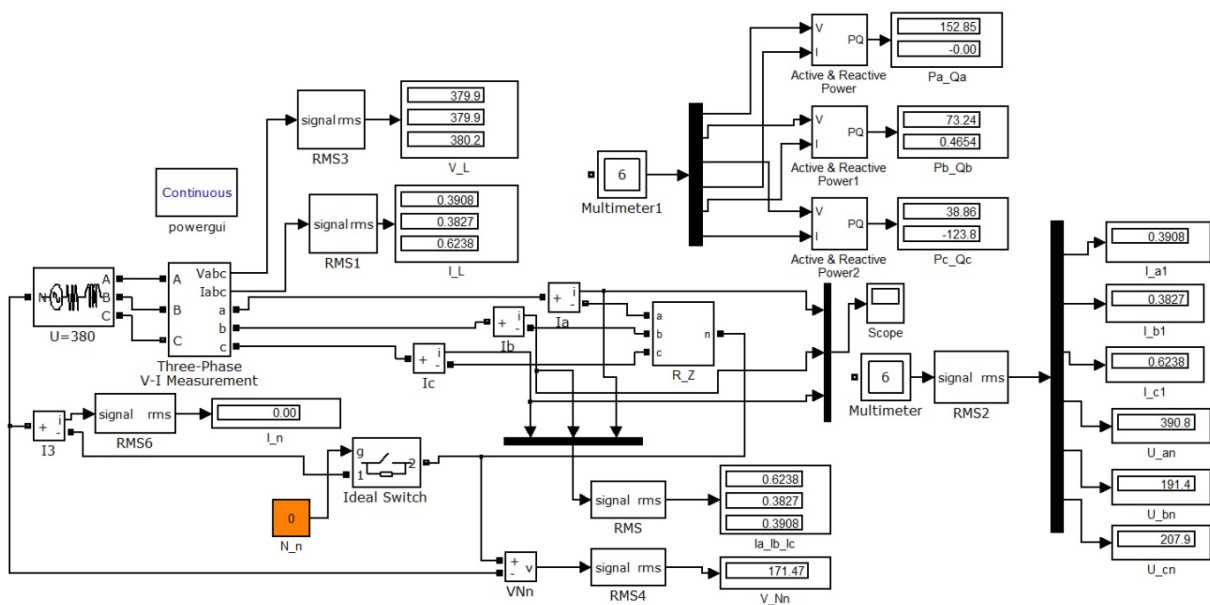


Рис. 6.1. Модель электрической трехфазной цепи в пакете Simulink

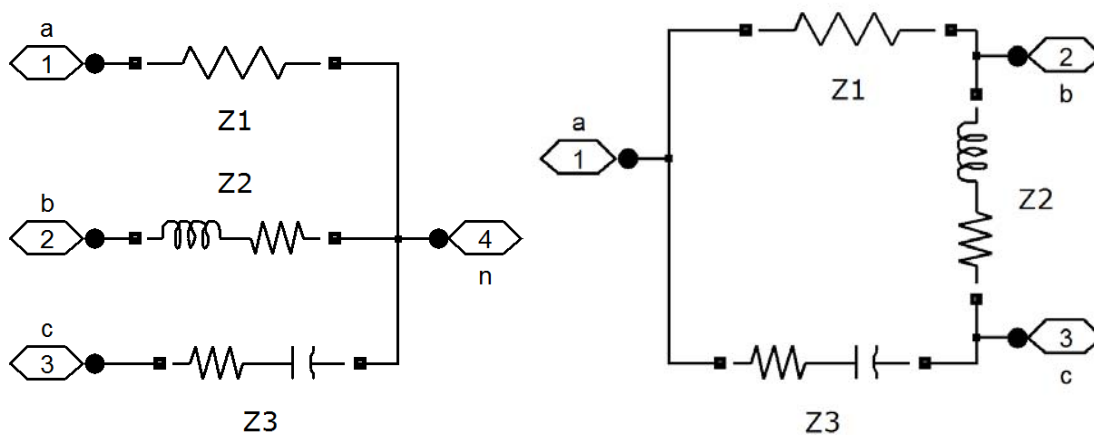


Рис. 6.2. Схемы нагрузки

## 2. Порядок выполнения работы

1. Набрать и исследовать модель в MATLAB (рис.6.1 и рис.6.2). Данные использовать из таблицы.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1$ Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660
$L_1$ H·10 <sup>-6</sup>	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
$C_1$ F·10 <sup>-6</sup>	20	30	40	50	60	70	10	20	80	10	30	60
$U_{л.}$ В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380

2. Промоделировать работу модели.

3. Соединение потребителя по схеме «звезда»: расчет токов при симметричной нагрузке

4. Соединение потребителя по схеме «звезда»: расчет токов при несимметричной нагрузке

5. Соединение потребителя по схеме «треугольник»: расчет токов при симметричной нагрузке

6. Соединение потребителя по схеме «треугольник»: расчет токов при несимметричной нагрузке

## 3. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Заданные схемы с параметрами.
- Схему модели, выполненную в MATLAB, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Выводы.

## 4. Контрольные вопросы

1. Как провести измерения токов и напряжений с помощью блока «Powergui - Continuous»?

2. Как измерить действующее значение линейного напряжения трех фазного источника напряжения в схеме, представленной на рис. 6.1?

3. Что такое активная мощность?

4. Как вычислить активную мощность потребляемую схемой представленной на рис. 6.1?

5. Что такое реактивная мощность?

6. Как вычислить реактивную мощность потребляемую схемой представленной на рис.6.1?

7. Как измерить значение фазы и амплитуды тока в сопротивлении  $Z_1$  рис. 6.2?

8. Почему показания двух измерителей «Active & Reactive Power» используемых в схеме рис. 6.1 различны?

## Практическое занятие 7

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

**Цель работы:** Моделирование и исследование апериодических и колебательных переходных процессов в линейных электрических цепях первого и второго порядков.

*Переходным процессом* называют процесс изменения токов и напряжений в цепи при переходе от одного установившегося режима к другому [1]. Причиной, вызывающей начало переходного процесса, является *коммутация*, под которой понимают отключение цепи или её подключение к внешнему источнику питания, либо скачкообразное изменение топологии или параметров элементов цепи. В общем случае вид кривой переходного процесса зависит как от изменения топологии цепи, накопленной в ней энергии, так и от видов, действующих в цепи ЭДС источников напряжения и токов источников тока.

Переходный процесс в цепи может протекать как за счёт начального запаса энергии, накопленного в реактивных  $L$  и  $C$  элементах, так и за счёт энергии внешнего источника. При этом переходный процесс, протекающий за счёт расходования накопленной в элементах  $L$  и  $C$  энергии, называют *свободным* процессом или процессом *собственных колебаний*, а режим, близкий к стационарному, который устанавливается в цепи по истечении времени переходного процесса с момента коммутации, называют *установившимся* режимом; напряжения и токи в установившемся режиме называют *установившимися* напряжениями и токами.

В общем случае напряжения и токи цепи в переходном режиме выражают в виде суммы установившихся и свободных составляющих, т. е.  $u = u_y + u_{св}$  и  $i = i_y + i_{св}$ .

Рассмотрим переходные процессы в линейных цепях первого порядка. На рис. 7.1 и рис. 7.2 изображены схемы  $RL$ - и  $RC$ -цепей, входы которых

подключаются к источникам постоянного напряжения  $U$ . В линейных цепях первого порядка переходные процессы описываются экспоненциальными уравнениями.

Для  $RL$ -цепи (рис.7.1, а) ток и напряжение на индуктивной катушке:

$$i_L(t) = I_0(1 - e^{-\frac{t}{T}}); u_L(t) = L[di_L(t)/dt] = Ue^{-\frac{t}{T}},$$

где  $I_0 = U/R$  – установившийся ток;  $T = L/R$  – постоянная времени в секундах.

Графики тока  $i_L(t)$  и напряжения  $u_L(t)$  представлены на рис.7.1, б и в, где  $t = 0_-$  означает мгновение до коммутации.

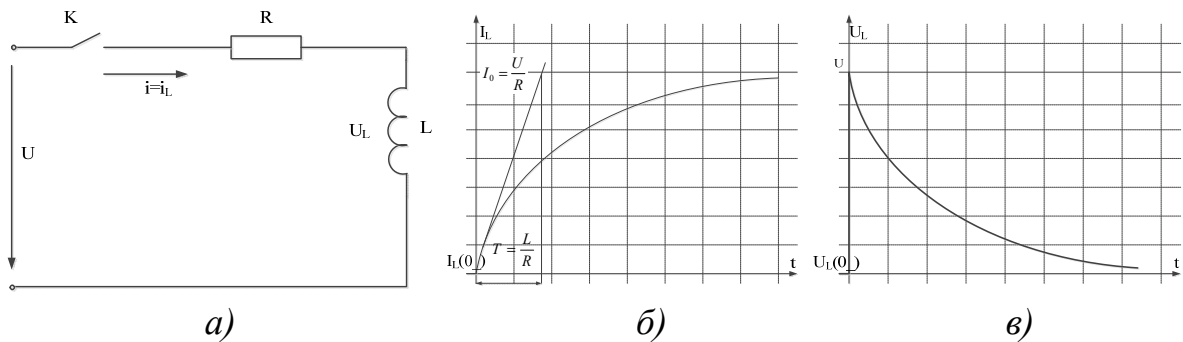


Рис. 7.1. Схема  $RL$ -цепи и кривые переходных процессов

При подключении  $RC$ -цепи (рис. 7.2, а) к источнику постоянного напряжения  $U$  напряжение и ток конденсатора равны:

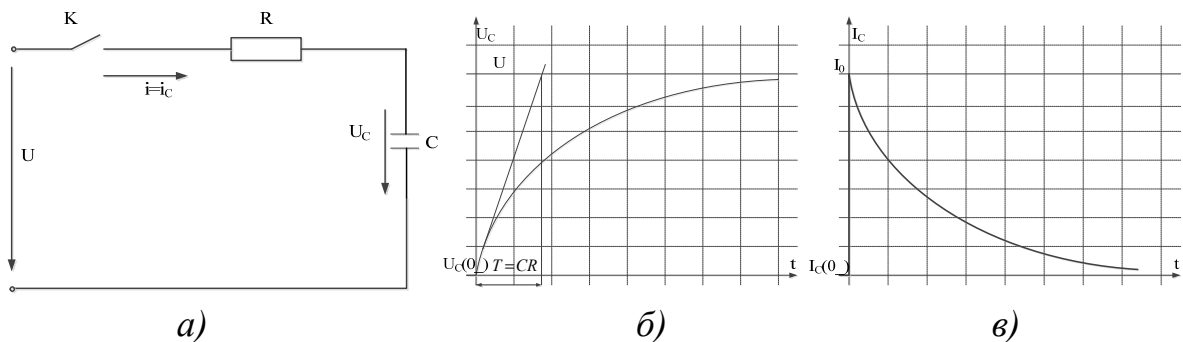


Рис. 7.2. Схема  $RC$ -цепи и кривые переходных процессов

$$u_C(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{T}}); i_C(t) = C[du_C(t)/dt] = I_0 e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $I_0 = U/R$  – ток при  $t = 0_+$ ;  $T = RC$  – постоянная времени;  $t = 0_+$  – мгновение после коммутации. Графики  $u_C(t)$  и  $i_C(t)$  представлены на рис. 7.2б, и рис. 7.2в.

В цепи второго порядка характер изменения тока и напряжений на

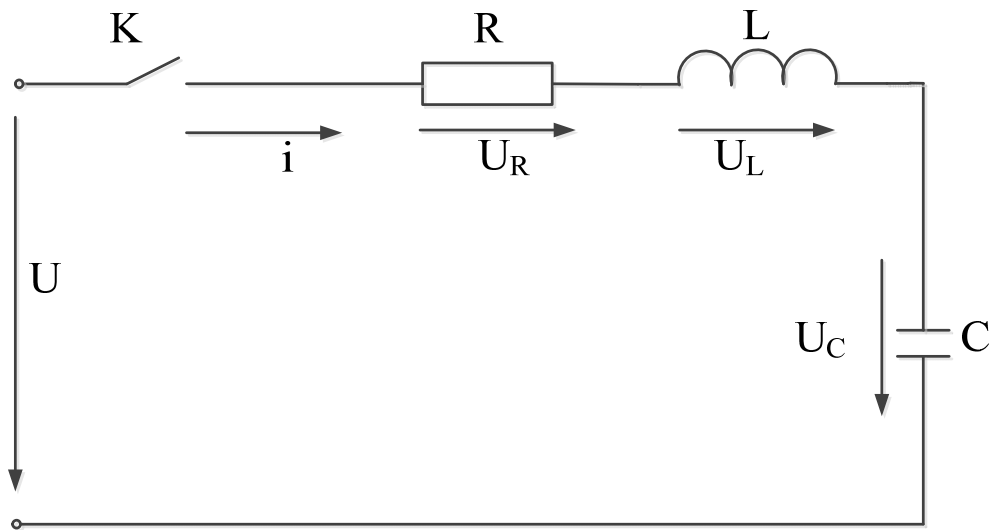


Рис. 7.3. Схема последовательной  $RLC$ -цепи

индуктивной катушке и конденсаторе зависит от соотношения параметров элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  последовательной  $RLC$ -цепи (рис. 7.3):

- при  $R > 2\sqrt{L/C}$  (при неравных вещественных отрицательных корнях  $-a_1$  и  $-a_2$  характеристического уравнения  $p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0$  цепи, где  $\alpha = R/2L$ ;  $\omega_0^2 = 1/LC$ ) переходный процесс носит аperiодический характер.

$$i(t) = \frac{U}{L(a_2 - a_1)}(e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}); \quad u_L(t) = L \frac{di}{dt} =$$

$$= \frac{U}{a_2 - a_1}(a_2 e^{-a_1 t} - a_1 e^{-a_2 t});$$

$$u_C(t) = U \left(1 + \frac{1}{a_2 - a_1}(a_2 e^{-a_1 t} - a_1 e^{-a_2 t})\right);$$

- при  $R < 2\sqrt{L/C}$  (при  $\alpha < \omega_0$  корни характеристического уравнения  $p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0$  комплексно-сопряжены:  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_c$ , где  $\alpha = R/2L$  – коэффициент затухания переходного процесса;  $\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$  – угловая частота свободных (собственных) колебаний реального контура;  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – собственная частота идеального контура (при  $R = 0$ )) переходный ток

$$i(t) = \frac{U}{\omega_c L} e^{-\alpha t} \sin \omega_c t.$$

Определив постоянную времени цепи  $T=1/\alpha$  и период собственных колебаний тока  $T_{св} = 2\pi/\omega_c$ , строим график тока  $i(t)$  (рис. 7.4).

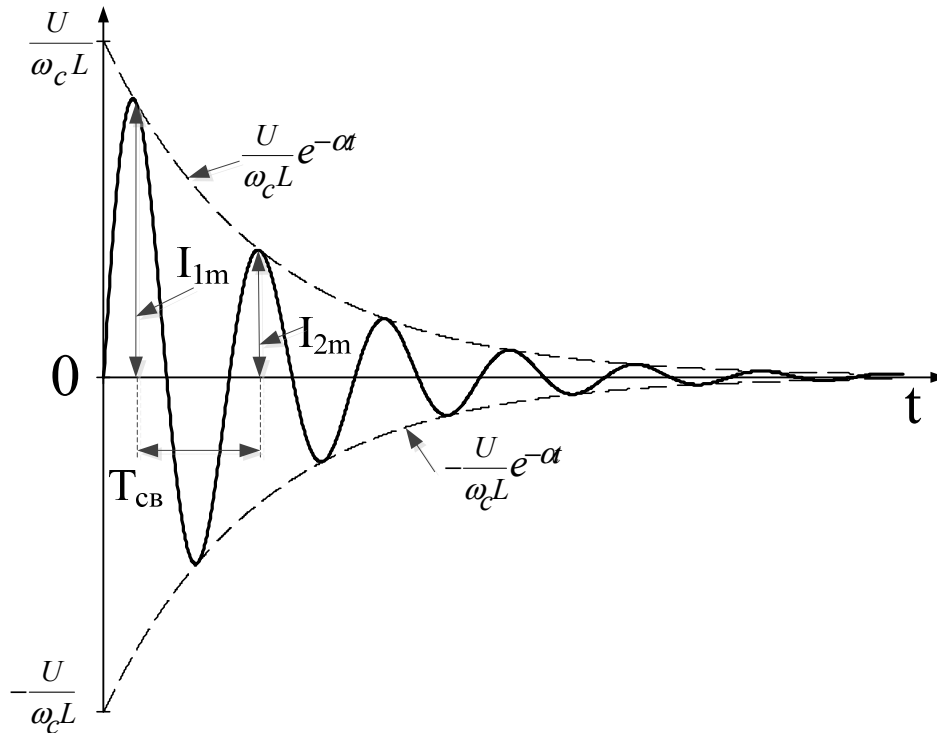


Рис. 7.4. График тока

Скорость затухания колебаний тока в переходном процессе зависит от постоянной времени  $T=1/\alpha=2L/R$  цепи и определяется *декрементом затухания*  $\Delta = I_{1m}/I_{2m} = e^{\alpha T_{св}}$  или  $\Delta = U_{C1m}/U_{C2m} = e^{\alpha T_{св}}$ , а логарифм натуральный от  $\Delta$  называют *логарифмическим декрементом затухания*

$$\Theta = \ln \Delta = \alpha T_{св} = 2\pi\alpha/\omega_c.$$

Откуда коэффициент затухания

$$\alpha = \ln(I_{1m}/I_{2m})/T_{св} \text{ или } \alpha = \ln(U_{C1m}/U_{C2m})/T_{св}.$$

В случае  $\alpha = 0$  ( $R = 0$ ),  $\omega_c = \omega_0$  колебания будут *незатухающими* с периодом  $T_0 = 2\pi\sqrt{L/C}$ , соответствующими характеру этих кривых при установившемся процессе в случае резонанса напряжений;

В случае, когда сопротивление, называемое *критическим*, равно  $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$  ( $\alpha = \omega_0$  и корни  $p_1 = p_2 = -\alpha = -R/2L$  уравнения  $p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0$

вещественны и равны друг другу), получим  $\omega_c = 0$  и  $T_{св} = \infty$ . При этом периодические затухающие колебания переходят в апериодические. Этот случай называют *критическим* (предельно апериодическим).

### 1. Порядок выполнения работы

1. Для чётных вариантов  $N$ : смоделировать переходный процесс в  $RL$ -цепи (рис. 7.1а) при  $U = 4$  В;  $R = R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ , Ом;  $C = \text{int}(100/N)$ , мкФ;  $L = 10\text{int}(100/N)$ , мГн, где  $N$  – номер записи фамилии студента в учебном журнале группы.

Для нечётных вариантов  $N$ : смоделировать переходный процесс в  $RC$ -цепи (рис. 7.2а) при  $U = 4$  В;  $R = R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ , Ом;  $L = 10\text{int}(100/N)$ , мГн;  $C = \text{int}(100/N)$ , мкФ. Пример, набранной в MATLAB схемы и графиков, показан на рис. 7.5 и рис. 7.6.

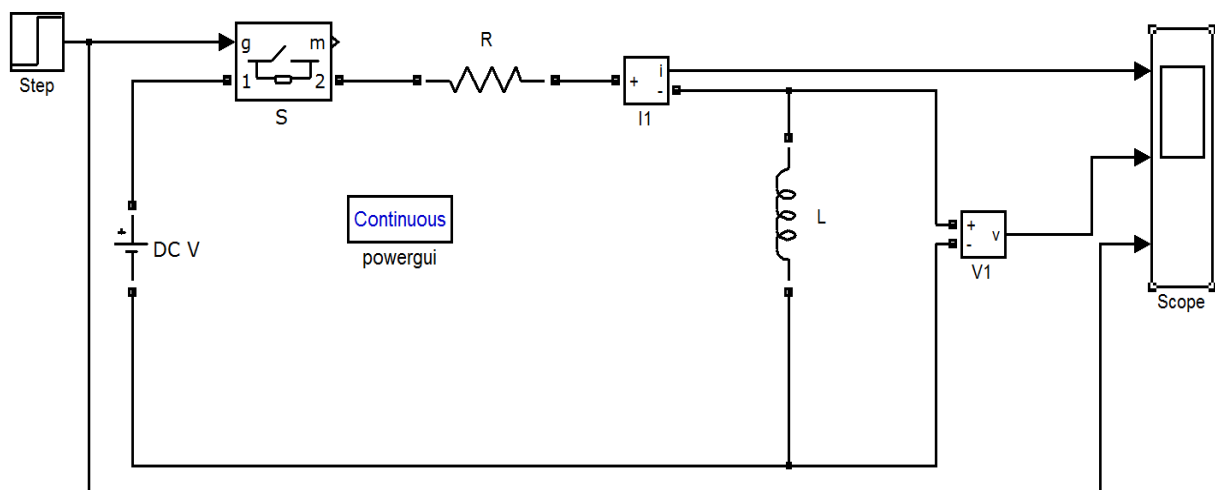


Рис. 7.5. Модель в MATLAB последовательной  $RLC$ -цепи

2. Рассчитать коэффициент затухания  $\alpha$ , частоту свободных колебаний  $\omega_c$  и период свободных колебаний  $T_{св}$  переходного тока в  $RLC$ -цепи (рис. 7.3) при её подключении к источнику постоянного напряжения  $U$ , если напряжение  $U = 4$  В; индуктивность катушки  $L = 10\text{int}(100/N)$ , мГн; ёмкость конденсатора  $C = \text{int}(100/N)$ , мкФ; сопротивление резистора  $R = (0,1 \dots 0,2)R_{кр}$ , где  $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ . Построить модель и график  $i(t)$  в MATLAB.

3. Задать значение сопротивления  $R = 2R_{кр}$ . Осциллограмму напряжения на конденсаторе  $u_C(t)$  и тока  $i(t)$  скопировать в отчёт.

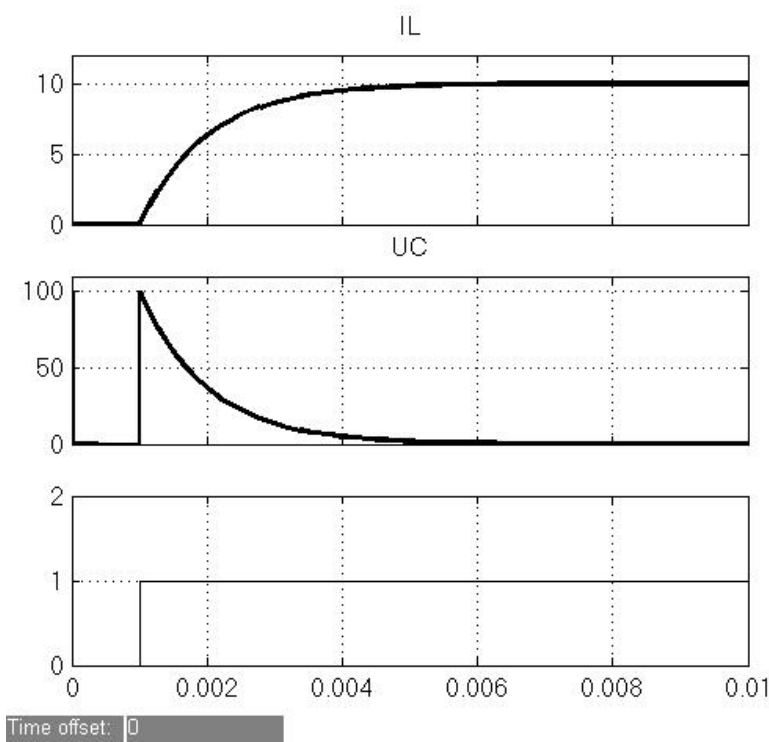


Рис.7.6. Рассчитанные кривые последовательной  $RLC$ -цепи

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Расчётные и набранными в MATLAB схемы цепей первого и второго порядков с исходными значениями параметров.
3. Расчётные формулы и вычисления. Таблица с занесенными предварительно вычисленными и измеренными переходными величинами.
4. Осциллограммы переходных величин с оцифровкой шкал осей и характерных точек.
5. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. При подключении последовательной  $RL$ -цепи к источнику постоянного напряжения возникает переходный процесс, длительность которого определяют в единицах постоянной времени  $T$ . Укажите, во сколько раз изменится практическое время переходного процесса при уменьшении индуктивности  $L$  в 2 раза?



2. Напряжение на зажимах конденсатора последовательной  $RC$ -цепи ( $R = 1$  кОм,  $C = 1$  мкФ) в переходном режиме изменяется по закону  $u_C(t) = 1 - e^{-1000t}$  В. Определить ток в цепи при  $t = 0_+$ .

3. Цепь с последовательно соединёнными резистором ( $R = 100$  Ом) и предварительно заряженным конденсатором ( $C = 20$  мкФ) до напряжения  $u_C(0_-) = 5$  В подключается к источнику постоянного напряжения с ЭДС  $E = 10$  В. Определить ток в цепи при  $t = 0_+$ .

4. Укажите характер изменения тока в последовательной  $RLC$ -цепи с параметрами:  $R = 1$  Ом;  $L = 1$  Гн и  $C = 1$  Ф при её подключении к источнику постоянного напряжения.

5. Определите выражение оригинала тока  $i(t)$  по найденному его изображению (по Лапласу)  $I(p) = \frac{5}{(p+3)^2 + 5^2}$ .

6. Укажите, может ли при коммутациях в линейной электрической цепи, содержащей  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементы и подключаемой к источнику постоянного напряжения, ток в резистивной ветви, имеющейся в схеме цепи, измениться скачком?

7. Определить напряжение на конденсаторе и токи (рис. 7.7) при замыкании контакта  $K$  и построить их кривые. Даны:  $E = 24$  В.  $R = 20$  Ом,  $R_1 = 50$  Ом,  $R_2 = 100$  Ом,  $C = 3$  мкФ.

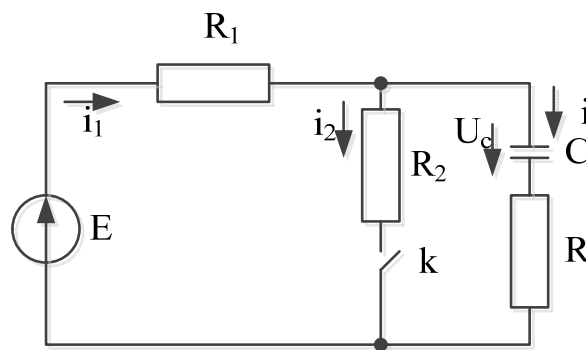


Рис. 7.7. Схема к вопросу №7

8. Цепь, состоящая из трех параллельных ветвей параметры, которых  $R = 16$  Ом,  $L = 1,6$  мГн,  $C = 25$  мкФ, подключена к генератору синусоидального напряжения, действующее значение которого  $U = 10$  В. Найти резонансную частоту  $f_{рез}$  и токи  $I$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  при резонансе. Построить кривые токов  $I$ ,  $I_L$ ,  $I_C = F(f)$ , и угла сдвига фаз между напряжением  $U$ , величина которого поддерживается постоянной, и током  $I$  в зависимости от частоты [ $\varphi = F(f)$ ]. Частоту изменять в пределах от 0 до  $4f_{рез}$ .

9. В схеме (рис. 7.8.) до коммутации (контакт К замкнут) был установлен режим. Даны:  $R_1=50$  Ом,  $R_2=30$  Ом,  $R_3=20$  Ом,  $C=10$  мкФ,  $U=80$  В. Определить после размыкания контакта:

1. Начальные значения переходных токов и напряжения на конденсаторе и их установившиеся и свободные составляющие;
2. Выражения токов и напряжения на конденсаторе.

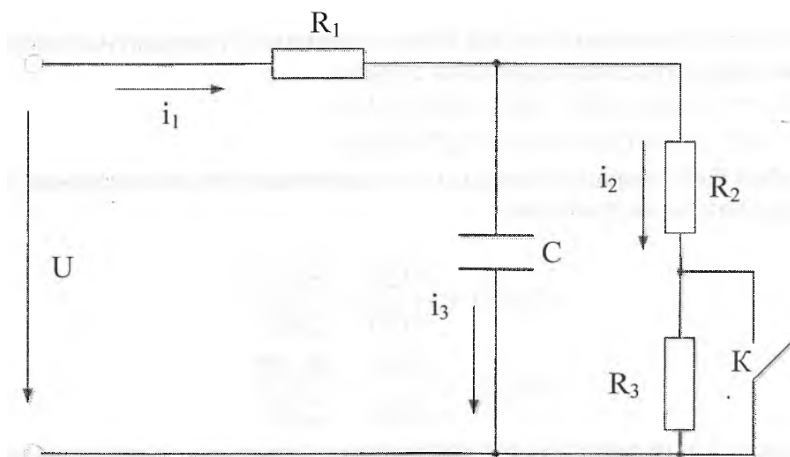


Рис. 7.8. Схема к вопросу №9

### Практическое занятие 8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭДС

**Цель работы:** моделирование однофазной линейной цепи с периодической несинусоидальной ЭДС.

Периодическими несинусоидальными электродвижущими силами, напряжениями и токами называют ЭДС, напряжения и токи, изменяющиеся во времени по периодическому несинусоидальному закону с периодом  $T$ .

В общем случае значение, например, ЭДС  $e(t)$  в произвольный момент времени  $t$  совпадает со значениями в моменты  $t + kT$ , т. е.

$$e(t) = e(t + kT), k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

В качестве примера на рис. 8.1 изображены периодические несинусоидальные ЭДС созданные в MATLAB: трапецеидальные импульсы (а) прямоугольные импульсы (б), пилообразные импульсы (в).

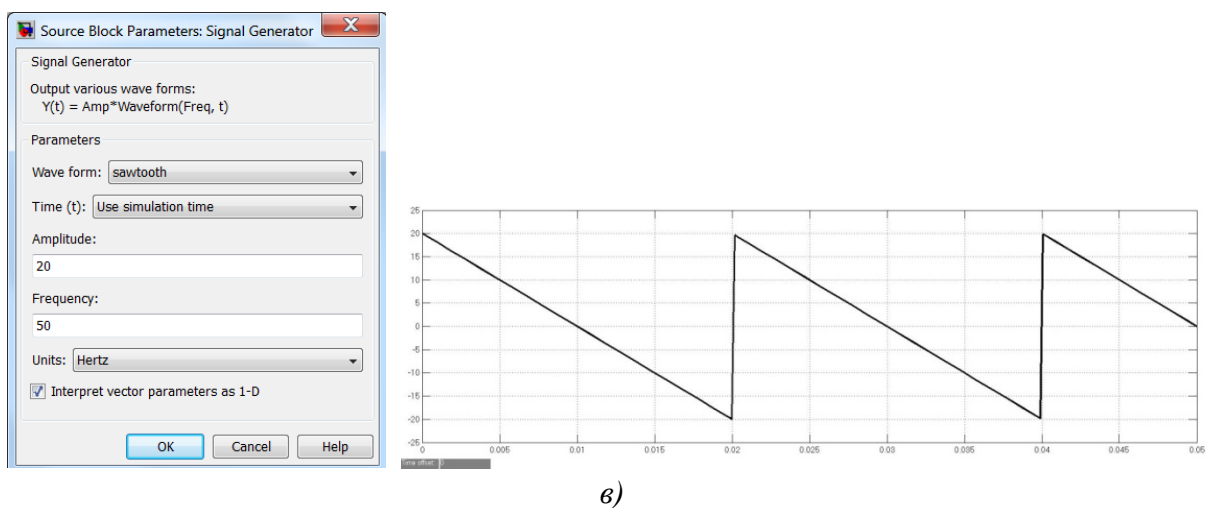
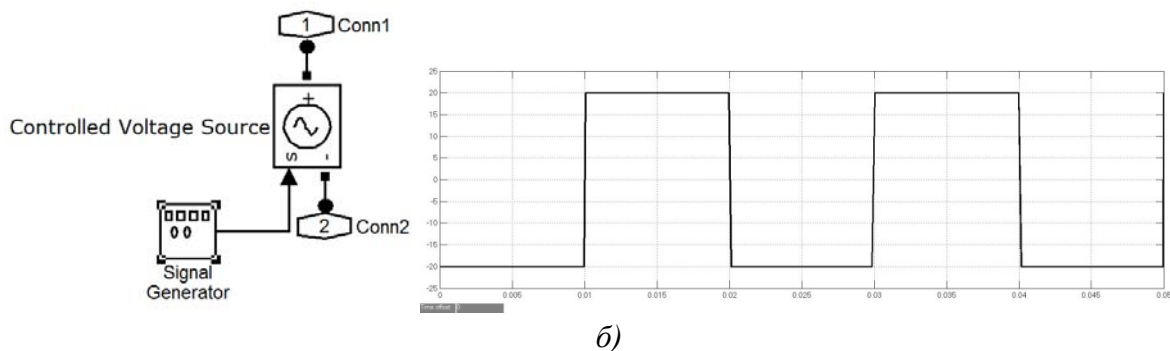
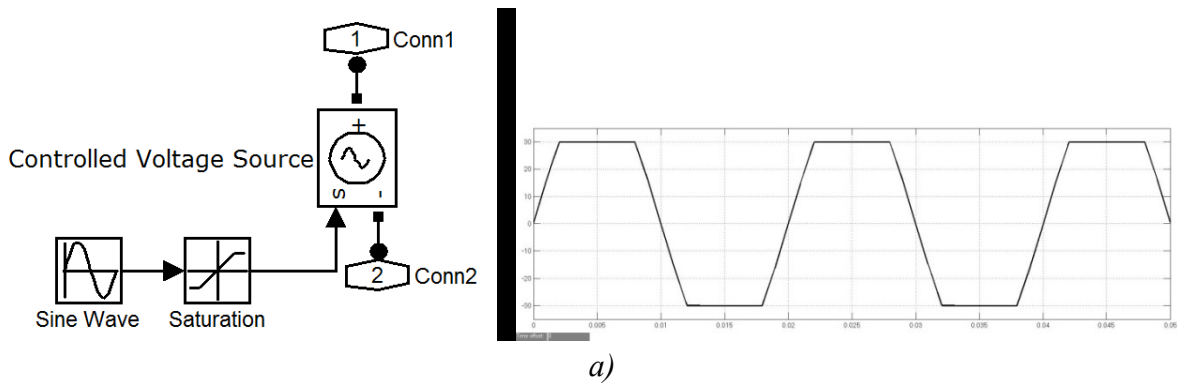


Рис. 8.1. Периодические несинусоидальные ЭДС созданные в MATLAB: трапецидальные импульсы (а) прямоугольные импульсы (б), пилообразные импульсы (в)

Периодические несинусоидальные напряжения и токи в цепи возникают как при действии источника напряжения с несинусоидальной ЭДС, так и при действии синусоидальной ЭДС, но если один или несколько элементов цепи нелинейные.

Анализ схем цепей при периодической несинусоидальной ЭДС  $e(t)$  основан на представлении этой ЭДС тригонометрическим или комплексным рядом Фурье с последующим применением метода наложения решений.

Напряжения и токи ветвей схемы определяют от каждой составляющей (гармоники) ряда Фурье в отдельности. При этом источник ЭДС  $e(t)$  рассматривают (в общем случае) как последовательное соединение источника *постоянной* ЭДС  $e_0$  и источников *синусоидальных* ЭДС  $e_k(t)$ , т. е.

$$e(t) = e_0 + e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) + \dots = e_0 + \sum_{k=1}^n E_{mk} \sin(k\omega_1 t + \Psi_{ek}),$$

где  $E_{mk}$  и  $\Psi_{ek}$  – амплитуда и начальная фаза  $k$ -й гармоники ЭДС  $e(t)$ .

При расчёте токов (напряжений) ветвей от *постоянной* составляющей  $e_0$  индуктивные элементы  $L_k$  схемы замыкают накоротко, а ветви с ёмкостными элементами  $C_k$  размыкают. Токи (напряжения) ветвей от *синусоидальных* источников  $e_k(t)$  находят *комплексным* методом, определяя комплексы сопротивлений ветвей для каждой гармоники:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_{Lk} - jX_{Ck} = R_k + jk\omega_1 L_k - j(1/k\omega_1 C_k),$$

где  $k$  – номер гармоники ЭДС  $e(t)$ ;  $\omega_1 = 2\pi/T$  – угловая частота *основной* гармоники периодической несинусоидальной ЭДС с периодом  $T$ .

Выражение для мгновенного значения тока ветви записывают после расчёта всех его комплексных амплитуд  $\underline{I}_{mk} = \underline{U}_{mk} / \underline{Z}_k = I_{mk} e^{j\Psi_{ik}}$ :

$$i_k(t) = i_0 + \sum_{k=1}^n I_{mk} \sin(k\omega_1 t + \Psi_{ik}),$$

где  $I_{mk}$  и  $\Psi_{ik} = \Psi_{ek} - \varphi_k$  – амплитуда и начальная фаза  $k$ -й гармоники тока ветви;  $\varphi_k = \arctg[(X_{Lk} - X_{Ck})/R_k]$  – угол сдвига фаз между напряжением  $\underline{U}_{mk}$  и током  $\underline{I}_{mk}$  ветви при воздействии  $k$ -й гармоники ЭДС  $e(t)$ .

При расчёте энергетических характеристик цепи с периодической несинусоидальной ЭДС используют следующие величины: действующие значения тока  $I$ , напряжения  $U$  и ЭДС  $E$ ; активную (среднюю) мощность  $P$ ; реактивную  $Q$  и полную  $S$  мощности; мощность  $T$  искажений; коэффициенты искажений  $k_{иск}$ , несинусоидальности  $k_{нс}$  и др.

*Действующий* периодический несинусоидальный ток (по определению – это его среднее квадратичное значение за период  $T$ )

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{i_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \sin(k\omega_1 t + \Psi_{ik}) \right]^2 dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^T I_{mk}^2 \sin^2(k\omega_1 t + \Psi_{ik}) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2} \end{aligned}$$

равен корню квадратному из суммы квадратов действующих значений всех гармоник тока, включая квадрат его постоянной составляющей  $I_0$ .

Запишем по аналогии выражения действующих периодических несинусоидальных напряжения и ЭДС:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2} \text{ и } E = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + \dots + E_k^2}.$$

*Активная мощность* цепи определяется как её среднее значение за период и равна сумме активных мощностей всех гармоник тока  $I$  и напряжения  $U$  на её входе, включая и нулевую (постоянную) составляющую ряда Фурье, т. е.

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k = \\ &= U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k. \end{aligned}$$

По аналогии с выражением активной мощности запишем выражения *реактивной* и *полной* мощностей цепи при периодических несинусоидальном токе  $I$  и напряжении  $U$  на её входе:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_k I_k \sin \varphi_k.$$

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2} \cdot \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}.$$

Известно, что в цепях синусоидального тока квадрат полной мощности равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей, т. е.

$$S^2 = P^2 + Q^2.$$

Однако, в цепях с несинусоидальной ЭДС квадрат полной мощности больше суммы квадратов активной и реактивной мощностей:

$$S^2 = (UI)^2 > P^2 + Q^2.$$

Степень различия в формах кривых напряжения и тока характеризуется величиной

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)},$$

носящей название *мощность искажений*.

*Коэффициент* мощности *искажений* характеризует отклонение формы тока от формы напряжения и равен отношению мощности искажений  $T$  к полной мощности  $S = EI$ , т. е.

$$k_{иск} = \frac{T}{S} = \frac{\sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}}{S} < 1.$$

*Коэффициент несинусоидальности* равен отношению действующего значения тока  $I_{(1)}$  (напряжения  $U_{(1)}$ ; ЭДС  $E_{(1)}$ ) основной гармоники к действующему значению периодического несинусоидального тока  $I_1$  (напряжения  $U$ ; ЭДС  $E$ ), т. е.

$$k_{нс(i)} = I_{(1)} / I_1 \quad (k_{нс(u)} = U_{(1)} / U; \quad k_{нс(e)} = E_{(1)} / E).$$

Для гармонической функции  $k_{нс} = 1$ .

## 1. Порядок выполнения работы

1. Рассчитать токи и напряжения ветвей, активную и реактивную мощности, потребляемые однофазной линейной цепью (рис.8.2) с периодической несинусоидальной ЭДС

$$e(t) = e_0 + e_1 + e_2 + e_4 =$$

$$= E_0 + E_{m1} \sin(\omega_1 t + \Psi_{e1}) + E_{m2} \sin(2\omega_1 t + \Psi_{e2}) + E_{m4} \sin(4\omega_1 t + \Psi_{e4}), \text{ В,}$$

где  $E_{m1} = \sqrt{2}(15 + \text{int}(N/2))$ , В;  $E_{m2} = \sqrt{2}(7 + \text{int}(N/2))$ , В;  $E_{m4} = \sqrt{2}(4 + \text{int}(N/3))$ , В;

$E_0 = 10$  В;  $\Psi_{e1} = 30^\circ + N$ , град;  $\Psi_{e2} = 90^\circ$ ;  $\Psi_{e4} = 0^\circ$ ;  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ;  $f_1 = 50$  Гц;

$R_1 = R_2 = R = 20$  Ом;  $L = 0,02$ , Гн;  $C = 80$  мкФ,

где  $N$  – номер записи фамилии студента в учебном журнале группы.

Необходимо собрать схему в MATLAB (рис. 8.2)

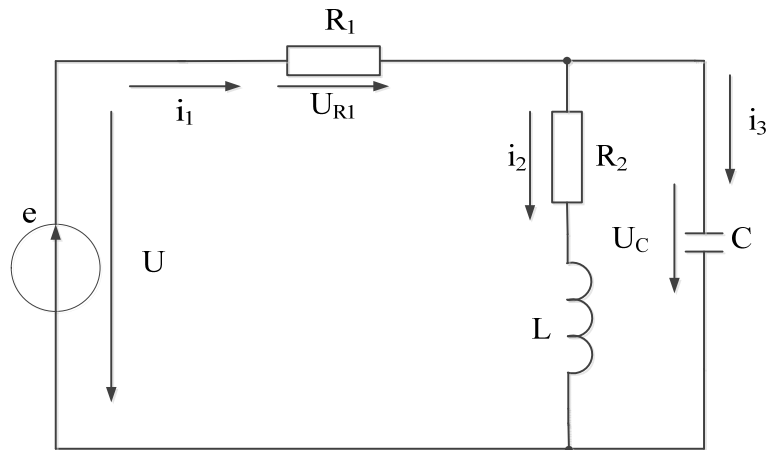


Рис. 8.2. Схема для исследования и моделирования

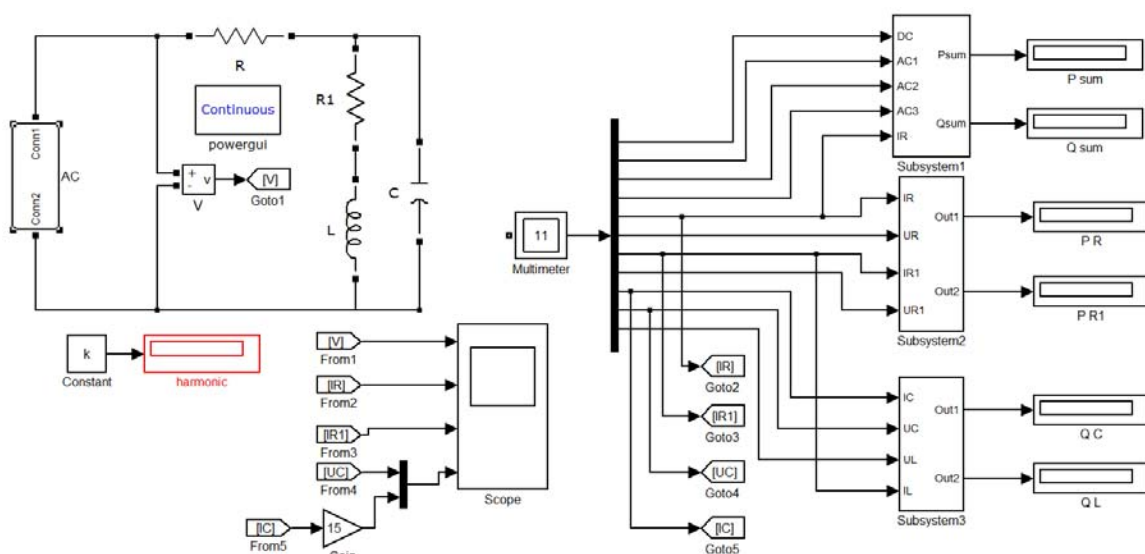


Рис. 8.3. Модель исходной схемы

На рис. 8.4 представлена настройка мультиметра.

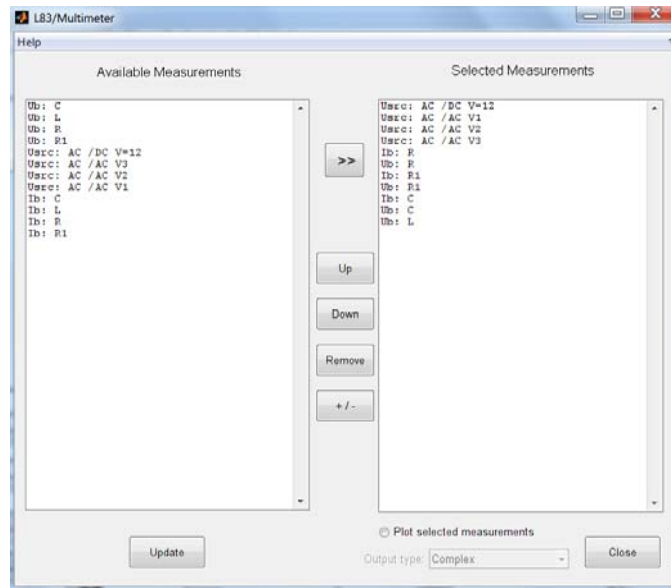


Рис. 8.4. Окно настройки мультиметра

Субсистемы 1, 2, 3 представлены, соответственно, на рис.8.5, 8.6 и 8.8.

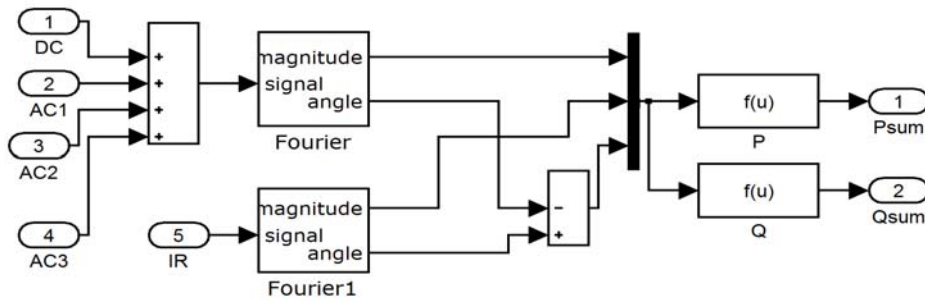


Рис. 8.5. Модель subsystemы 1

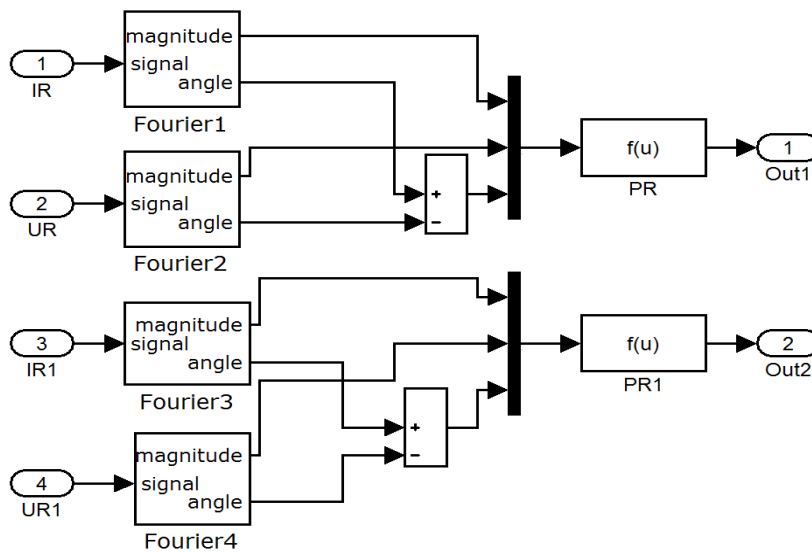


Рис. 8.6. Модель subsystemы 2

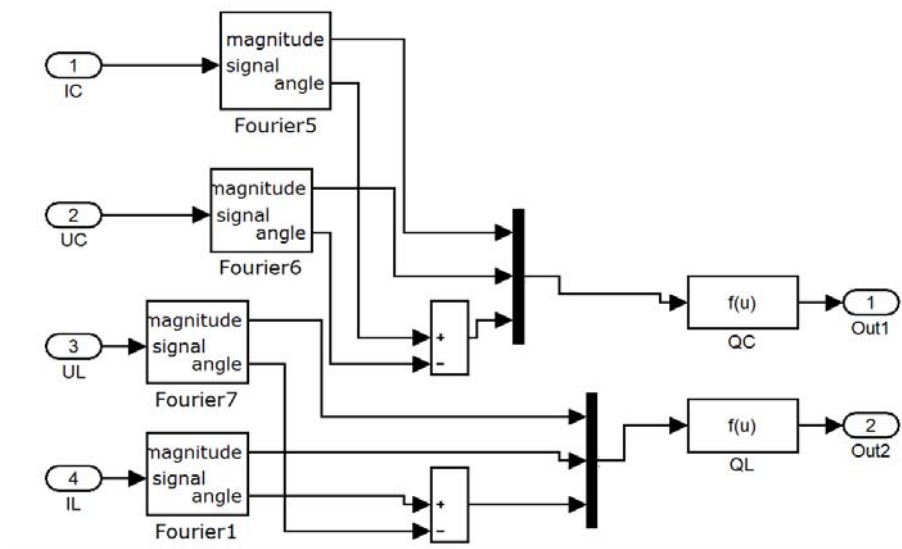


Рис. 8.7. Модель subsystemы 3

Вычислить коэффициент мощности искажений  $k_{иск} = T/S$  цепи и коэффициент несинусоидальности ЭДС  $k_{нс(e)} = E_1/E$ .

2. Провести гармонический анализ тока  $i_1$  схемы (рис. 8.1) с помощью блока «powergui». Пример приведен на рис. 8.8.

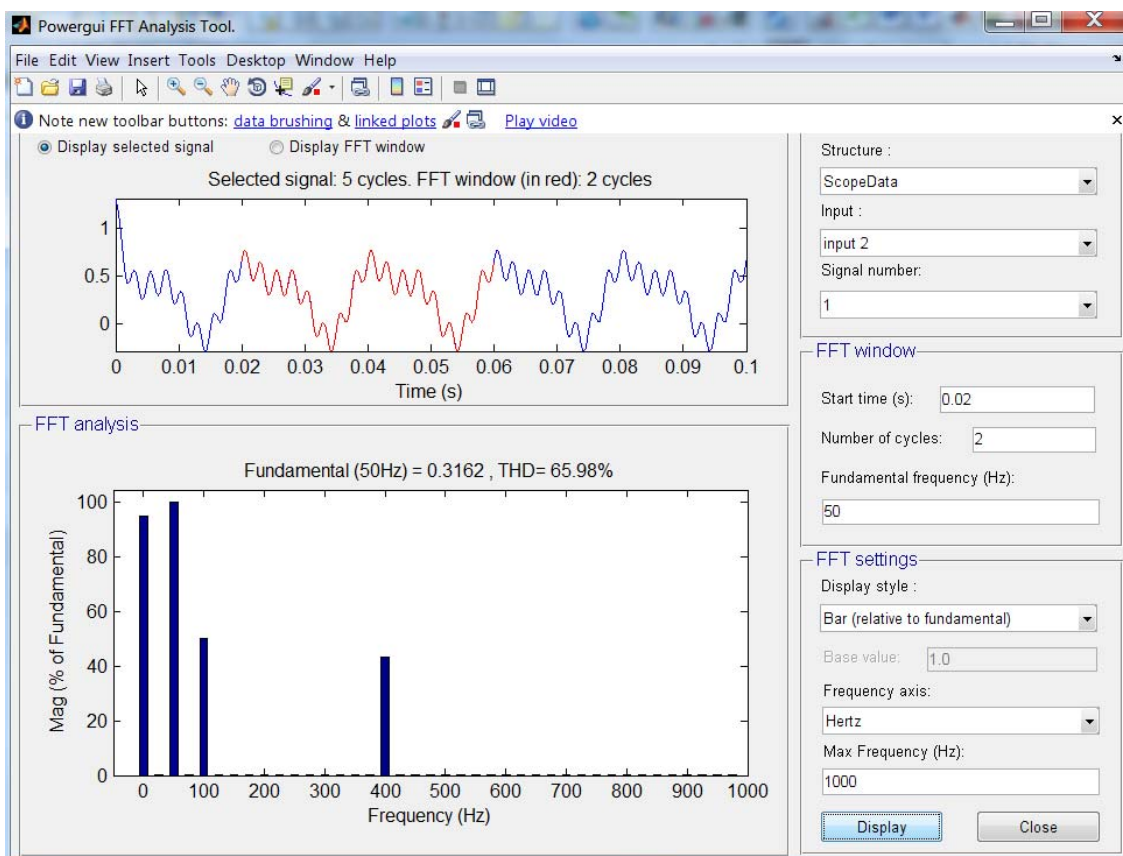


Рис. 8.8. Гармонический анализ тока  $i_1$  схемы (рис. 8.1) с помощью блока «powergui»



Рассчитать действующее значение ЭДС  $E_{\Sigma}$ , напряжения  $U_{C\Sigma}$  и токов  $I_{1\Sigma}$ ,  $I_{2\Sigma}$ ,  $I_{3\Sigma}$  ветвей по соотношениям

$$A_{\Sigma} = \sqrt{A_{0\Sigma}^2 + A_{1\Sigma}^2 + A_{2\Sigma}^2 + A_{4\Sigma}^2},$$

где  $A_{k\Sigma}$  – измеренные постоянная и переменные составляющие соответствующей электрической величины.

Активная мощность на входе цепи равна сумме активных мощностей от всех гармоник несинусоидальной ЭДС, т. е.

$$P_{\Sigma} = P_{0\Sigma} + P_{1\Sigma} + P_{2\Sigma} + P_{4\Sigma}.$$

Реактивная мощность на входе цепи равна сумме реактивных мощностей от всех гармоник несинусоидальных ЭДС, кроме нулевой, т. е. при  $U_k = E_k$

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= Q_{1\Sigma} + Q_{2\Sigma} + Q_{4\Sigma} = E_1 I_{11\Sigma} \sin\varphi_1 + E_2 I_{12\Sigma} \sin\varphi_2 + E_4 I_{14\Sigma} \sin\varphi_4 = \\ &= X_{L1} I_{21\Sigma}^2 - X_{C1} I_{31\Sigma}^2 + X_{L2} I_{22\Sigma}^2 - X_{C1} I_{32\Sigma}^2 + X_{L4} I_{24\Sigma}^2 - X_{C4} I_{34\Sigma}^2. \end{aligned}$$

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы набранными в MATLAB с заданным преподавателем несинусоидальной ЭДС.
3. Осциллограммы токов и напряжений.
4. Гармонический анализ тока  $i_1$  и ЭДС.
5. Рассчитанные значения активной и реактивной мощностей.
6. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. Какие функции могут быть разложены в ряд Фурье?
2. Изменится ли отношение амплитуд гармоник общего тока  $I_{mk}/I_m$  по сравнению с отношением соответствующих амплитуд  $U_{mk}/U_m$  приложенного к резистору несинусоидального напряжения, если параллельно резистору подключить индуктивную катушку?
3. Укажите, какие из приведенных ниже соотношений используют при вычислении среднего значения периодического несинусоидального сигнала  $s(t)$ ?

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad S = \frac{a_0}{2} \quad S = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad S = \sqrt{S_0^2 + S_1^2 + S_2^2 + \dots}$$

4. Укажите, можно ли определить полную мощность периодического несинусоидального сигнала по формуле  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , В·А?

5. Можно ли определить мощность искажений в цепи периодического несинусоидального тока по формуле  $T_{иск} = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$ ?
6. Как определить активную мощность, потребляемую цепью периодического несинусоидального тока?
7. Как определить реактивную мощность, потребляемую цепью периодического несинусоидального тока?
8. С какой целью проводится гармонический анализ?

## Практическое занятие 9

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Цель работы:** исследование однофазных одно- и двухполупериодных схем выпрямления.

Выпрямителем называют устройство, служащее для преобразования переменных напряжения и тока в постоянные, которые необходимы для питания ряда электронных устройств.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется с помощью нелинейных элементов с несимметричной ВАХ, диодов. Идеальный электрический вентиль не имеет потерь, его сопротивление в проводящем направлении от анода  $A$  к катоду  $K$  равно нулю, в непроводящем – бесконечности.

С учетом рассмотренных типов вентиляей и предъявляемых требований к качеству напряжения питания нагрузочных устройств, строят различные схемы выпрямления, т. е. устройства, называемые выпрямителями.

Основные параметры выпрямителя:

- $U_{cp} (I_{cp})$  – среднее значение выпрямленного напряжения (тока) нагрузки;
- $U_{m.ог}$  – амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения;
- $q_n = U_{m.ог}/U_{cp}$  – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения;
- $S$  – мощность трансформатора (в вольт-амперах – В·А или в киловольт-амперах – кВ·А);
- $I_{пр.ср}$  – прямой средний ток вентиля;
- $U_{пр.ср}$  – среднее напряжение (менее 2 В) на вентиле при токе  $I_{пр.ср}$ ;

- $U_{обр.max}$  и  $I_{пр.max}$  – максимальные допустимые обратное напряжение и прямой ток вентиля.

Мощность однофазных неуправляемых выпрямителей переменного тока колеблется от десятков до нескольких сотен ватт. Основными схемами однофазных выпрямителей являются: однополупериодная и двухполупериодная (мостовая или со средней точкой).

Модель однофазной однополупериодной схемы выпрямления представлена на рис. 9.1.

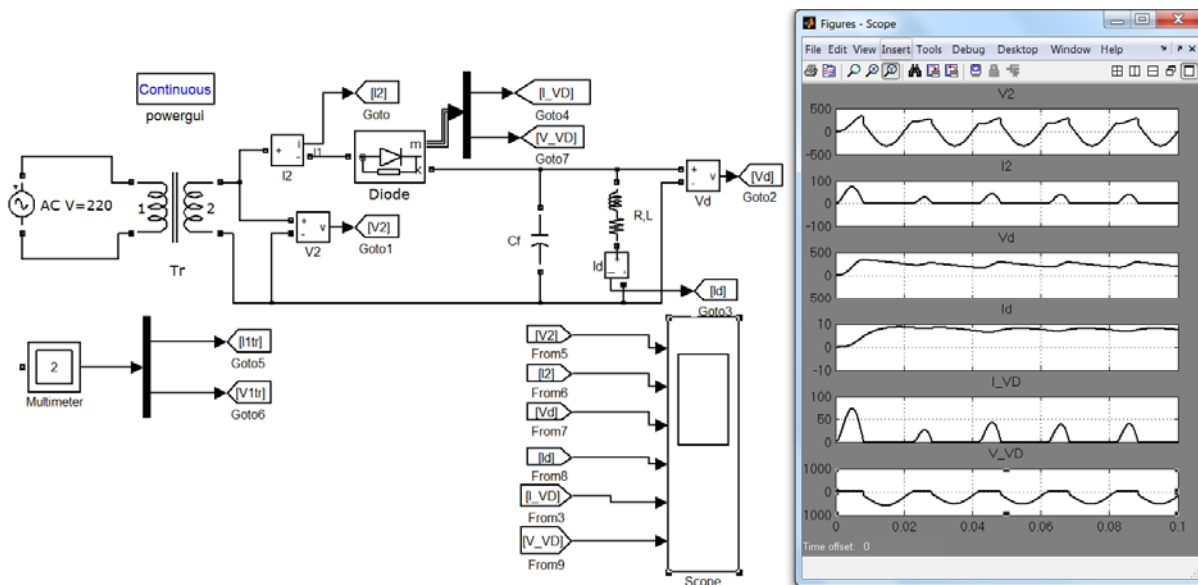


Рис. 9.1. Модель однофазной однополупериодной схемы выпрямления

Она состоит из силового трансформатора  $Tr$ , одного диода, нагрузки и емкостного фильтра. Первичная обмотка трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением  $u_1$ ; к вторичной обмотке с напряжением  $u_2$  последовательно подключены диод и нагрузка.  $C_f=1000$  мкФ;  $R= 30$  Ом;  $L=0,2$  Гн.

Временные диаграммы напряжений и токов представлены также на рис. 9.1.

Для расчёта внешней характеристики выпрямителя, потребляемой схемой и нагрузкой активной мощности, можно воспользоваться схемой представленной на рис.9.2. Схема subsystemы, для измерения вышеназванных характеристик и сами характеристики даны на рис.9.3. Листинг программы приведен на рис. 9.4.

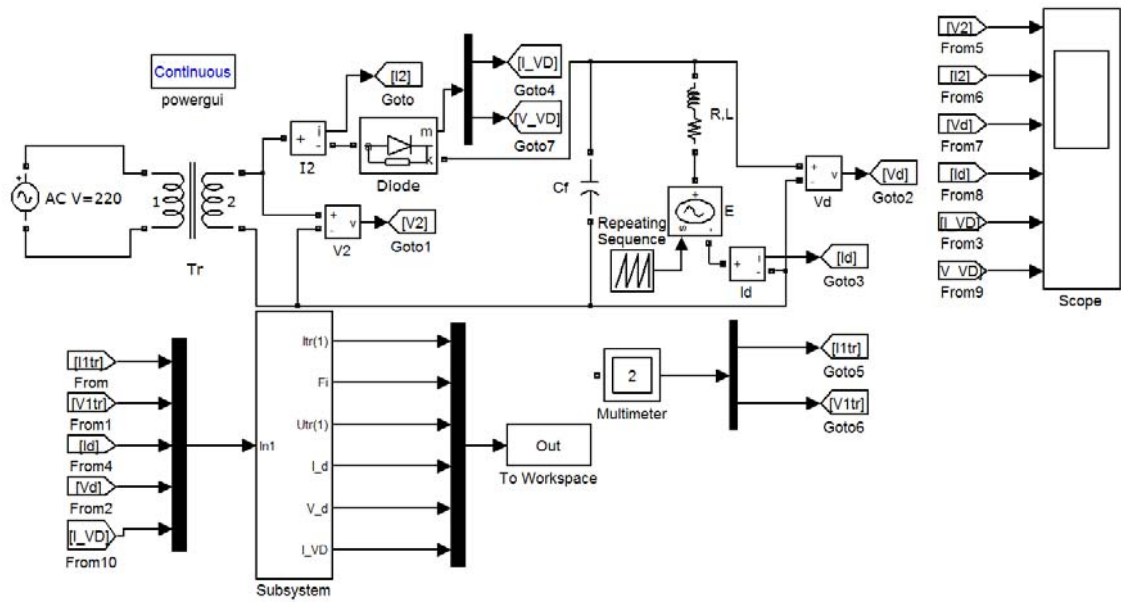


Рис. 9.2. Модель для расчета внешней характеристики и активной мощности

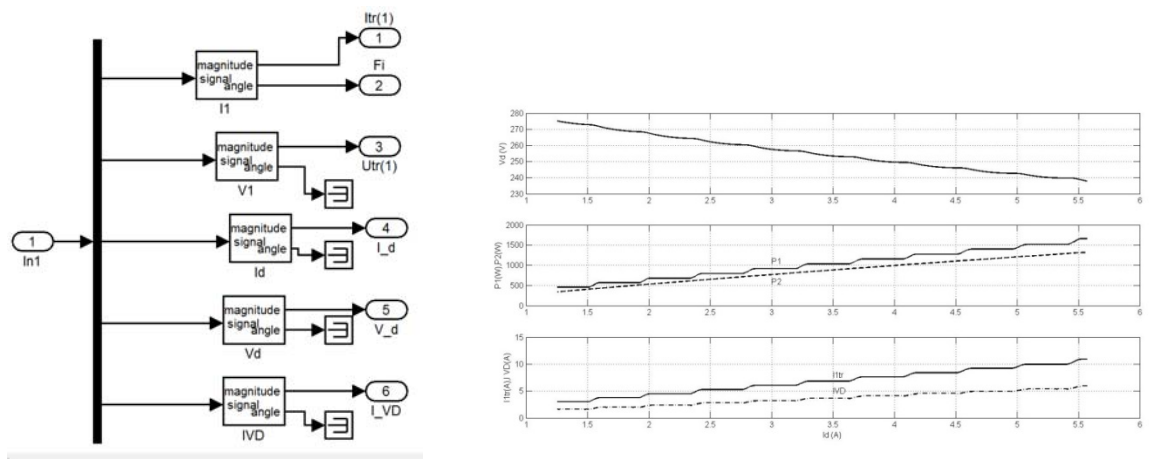


Рис. 9.3. Схема subsystemы и характеристики

<pre> 1. I1tr=Out(:,1); 2. Fi=Out(:,2); 3. V1tr=Out(:,3); 4. Id=Out(:,4); 5. Vd=Out(:,5); 6. I_VD=Out(:,6); 7. S11=(0.5*V1tr.*I1tr); 8. P11=S11.*cos(Fi*pi/180); 9. P2=Vd.*Id; 10. subplot(3,1,1); </pre>	<pre> 11. plot(Id,Vd); 12. grid on; 13. ylabel('Vd (V)'); 14. subplot(3,1,2); 15. plot(Id,P11,Id,P2); 16. grid on; 17. ylabel('P1(W),P2(W)'); 18. text(3,1100,'P1'); 19. text(3,600,'P2'); 20. subplot(3,1,3); </pre>	<pre> 21. plot(Id,I1,Id,I_VD); 22. grid on; 23. xlabel('Id (A)'); 24. yla-     bel('I1(A),IVD(A)'); 25. text(3.5,5,'IVD'); 26. text(3.5,8,'I1'); </pre>
---	---	---

Рис. 9.4. Листинг программы

Ток в нагрузке протекает только в один полупериод синусоидального напряжения, отсюда название выпрямителя – однополупериодный.

К недостаткам этих выпрямителей следует отнести униполярный ток, который, проходя через вторичную обмотку, намагничивает сердечник трансформатора, изменяя его характеристики и уменьшая КПД; малое значение выпрямленного напряжения высокий уровень пульсаций и большое обратное напряжение на диоде.

### 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему однофазного неуправляемого выпрямителя (рис. 9.1). Дополнить схему рис.9.1 до схемы рис. 9.2.

2. Создать м – файл (рис.9.4) и рассчитать внешнюю характеристику выпрямителя.

3. Собрать схему двухполупериодного выпрямителя (рис. 9.5). Рассчитать внешнюю характеристику выпрямителя  $U_2=F(I_2)$ , активную мощность потребляемой схемой и нагрузкой, ток в диоде в зависимости от тока  $I_2$ .

4. Выполнить задание третьего пункта, отключив  $L_f$ ,  $C_f$ .

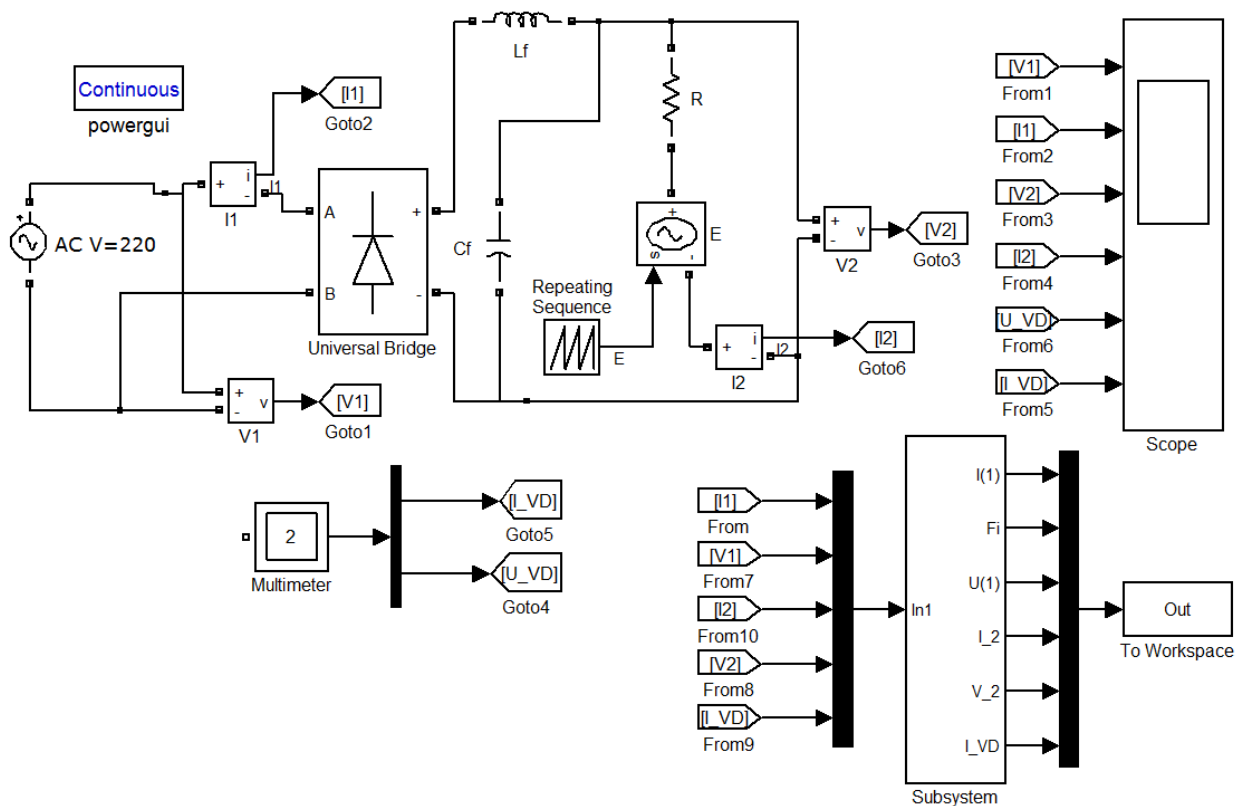


Рис. 9.5. Модель схемы двухполупериодного выпрямителя

## **2. Содержание отчёта**

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Осциллограммы токов и напряжений.
4. Рассчитанные характеристики.
5. Выводы по работе.

## **3. Контрольные вопросы**

1. Каково назначение трансформатора в выпрямительных схемах?
2. Чему равен коэффициент пульсации схем выпрямления без сглаживающих фильтров?
3. Чему равно среднее значение выпрямленного напряжения однофазных выпрямителей без сглаживающих фильтров при работе на активную нагрузку?

## **Практическое занятие 10**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОДНОФАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ**

**Цель работы:** исследование однофазного управляемого выпрямителя.

Для питания потребителей, которые нуждаются в регулируемом выходном напряжении, применяют тиристорные выпрямители: однофазные при малых токах потребления и трехфазные большой мощности.

На рис. 10.1 приведена схема однофазного управляемого выпрямителя. В качестве вентилей в выпрямителе использованы тиристоры VT1...VT4. На рис 10.2 и 10.3 представлена схема соединения тиристоров, схема управления и управляющие импульсы.

На рис. 10.4 даны осциллограммы токов и напряжений при угле управления тиристоров 0 и 60 градусов.

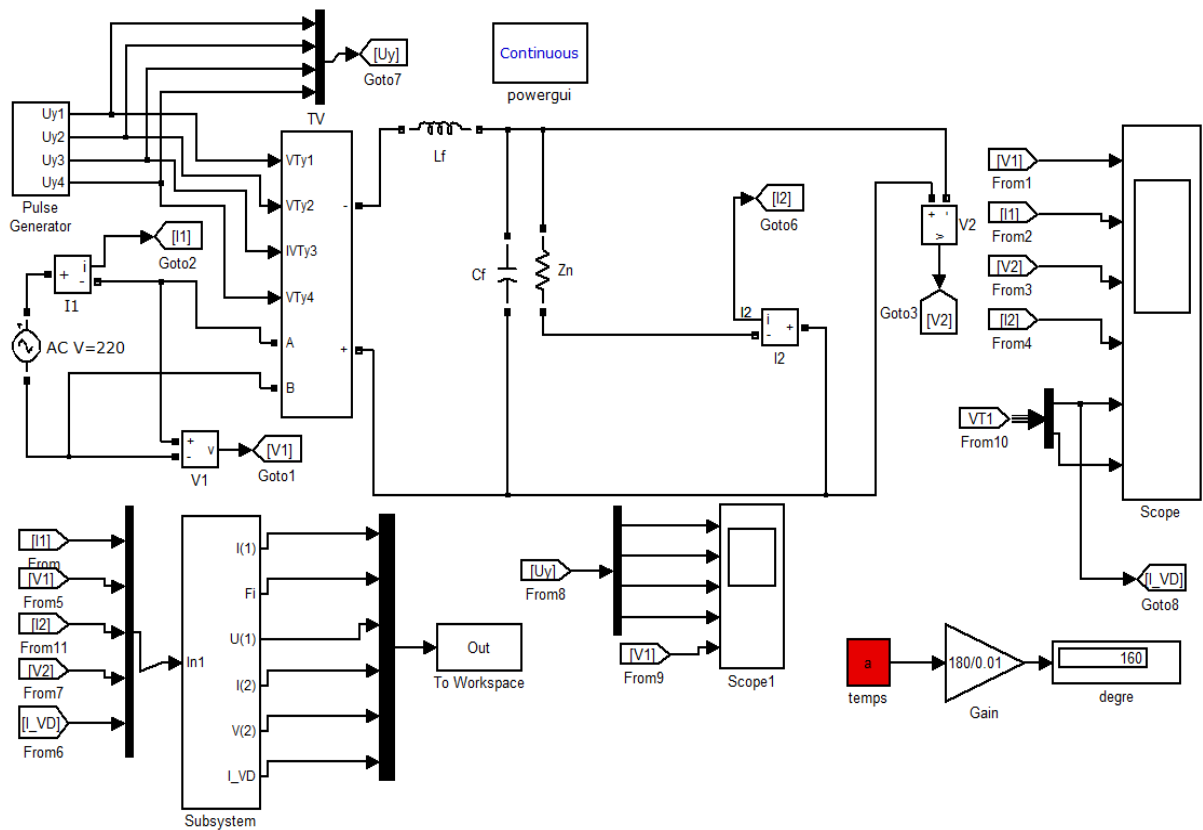


Рис. 10.1. Схема однофазного управляемого выпрямителя

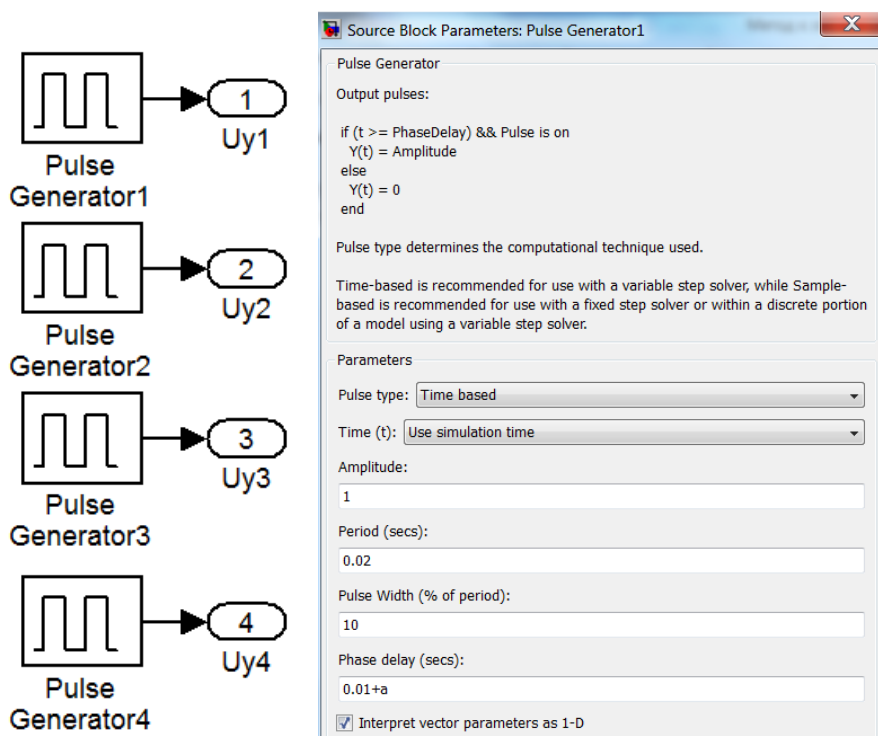


Рис. 10.2. Схема управления тиристорами

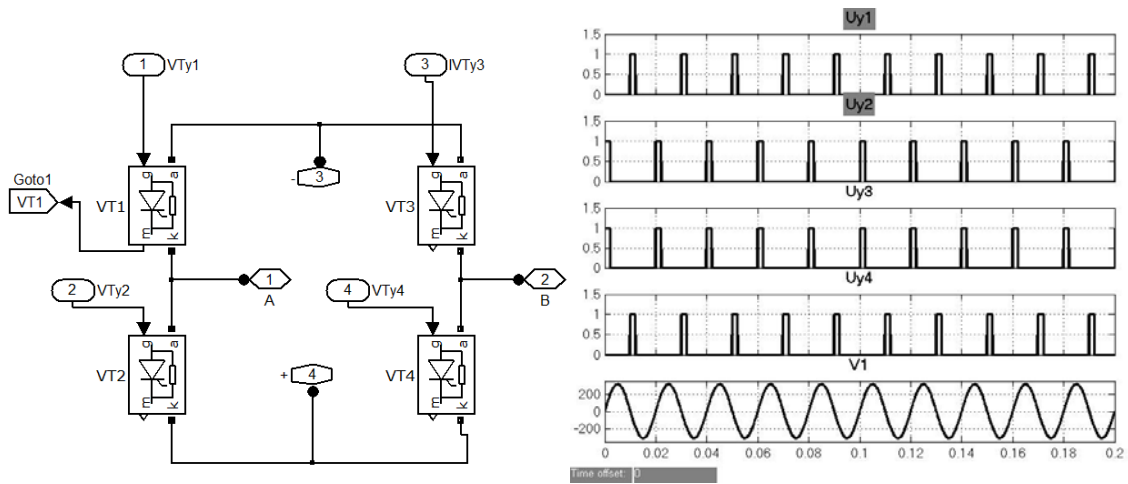
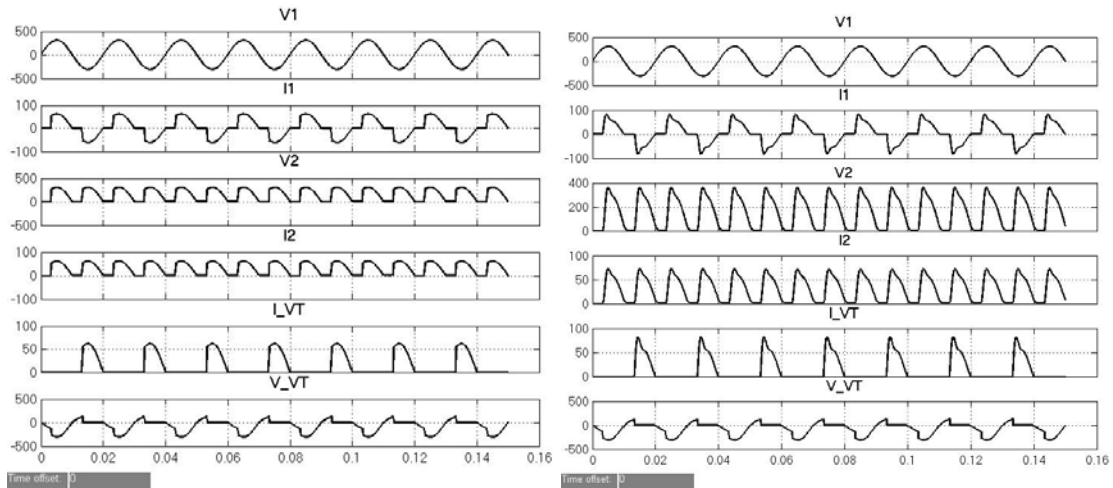


Рис. 10.3. Схема соединения тиристоров и управляющие импульсы



$\alpha=0$  град.;

$\alpha=60$  град.

Рис. 10.4. Осциллограммы токов и напряжений

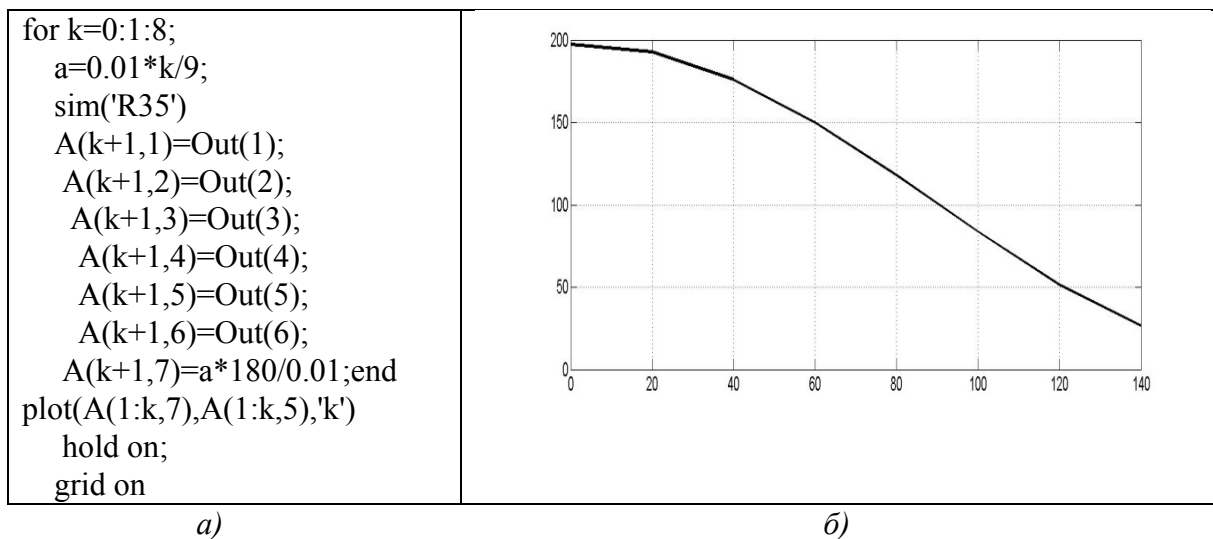


Рис. 10.5. Программа расчёта и регулировочная характеристика выпрямителя



Для расчёта регулировочной характеристикой выпрямителя (рис. 10.5б)  $U_{cp} = F(\alpha)$  можно использовать программу, представленную на рис. 10.5а.

Среднее значение напряжения на нагрузке и коэффициент пульсаций:

$$U_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t \approx \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha); q_{n(\alpha)} = \frac{2}{n^2 - 1} \sqrt{1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

где  $n \geq 2$  – номер основной гармоники выпрямленного напряжения.

Задержка по фазе управляющих сигналов, подаваемых на тиристоры, осуществляется с помощью систем импульсного фазового управления.

### 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему однофазного *управляемого* выпрямителя (рис. 10.1).
2. Создать м – файл (рис. 10.5а) и рассчитать внешнюю характеристику выпрямителя.
3. Рассчитать внешнюю характеристику выпрямителя  $U_2 = F(I_2)$ , активную мощность потребляемой схемой и нагрузкой, ток в диоде в зависимости от тока  $I_2$ .
4. Выполнить задание третьего пункта, отключив  $L_f, C_f$ .

### 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Осциллограммы токов и напряжений.
4. Рассчитанные характеристики.
5. Выводы по работе.

### 3. Контрольные вопросы

1. Как открывается и запирается тиристор?
2. Какая характеристика называется регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя?
3. Дать определение угла управления тиристоров?
4. В каких пределах можно изменять угол управления тиристоров?

## Практическое занятие 11

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы:** исследование однофазного трансформатора.

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

При подключении первичной обмотки силового трансформатора к сети первичный ток  $i_1$ , проходя по её виткам  $w_1$ , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота питающего напряжения  $u_1$  (рис. 11.1). Этот поток, пронизывая витки  $w_1$  первичной и витки  $w_2$  вторичной обмоток, наводит в них ЭДС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

или (для действующих значений)

$$E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44f w_2 \Phi_m.$$

С вторичной обмотки снимается напряжение  $u_2$ , которое подаётся к потребителю электрической энергии  $Z_H$ .

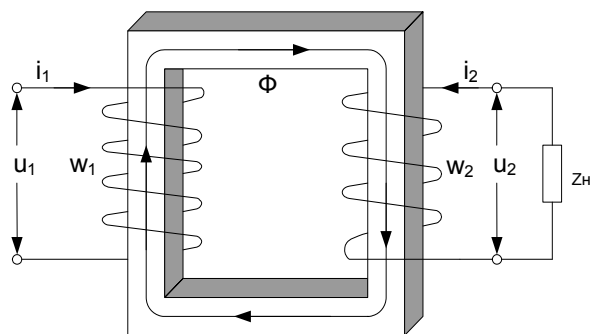


Рис. 11.1. Однофазный трансформатор.

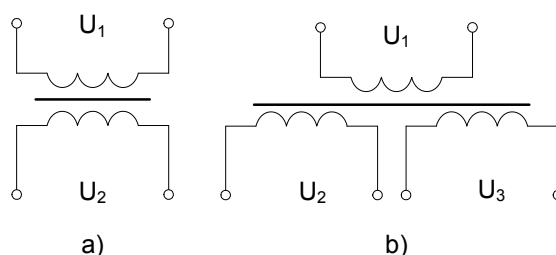


Рис. 11.2. Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками

Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками представлены на рис. 11.2.

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ( $Z_H = \infty$ ) является его током холостого хода  $I_0$ . Его выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току  $I_{1н}$ , т. е.  $i_0 (\%) = 100I_0/I_{1н}$ .

Ток холостого хода  $i_0(\%)$  в силовых трансформаторах составляет (2...5) %, а в маломощных трансформаторах может составить (20...50) % номинального тока  $I_{1н}$ .

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации* трансформатора

$$n = E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

Для определения коэффициента трансформации  $n$ , а также параметров схемы замещения и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты холостого хода (опыт ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

Потери мощности при ХХ, называемые *потерями в стали*  $P_0$ , которые затрачиваются в основном на нагрев магнитопровода от действия вихревых токов и циклического перемагничивания стали, т. е.  $P_0 \approx P_x$ .

При *опыте* КЗ в отличие от опасного аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при напряжении  $U_1 = U_{1н}$ , к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение  $U_1 = U_k$ , при котором в его обмотках устанавливаются токи, равные соответствующим номинальным значениям:

Ввиду малости магнитного потока  $\Phi$  (пропорционального пониженному напряжению  $U_k$ ) при опыте КЗ и соответственно потерь в стали (а они пропорциональны магнитному потоку в квадрате, т. е.  $\Phi^2$ ) активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, идёт в основном на нагрев обмоток, т. е. равна электрическим потерям (называемыми *потерями в меди*  $P_m$ ) в проводах обмоток:

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменяемой нагрузке от тока нагрузки, т. е.  $U_2 = f(I_2)$ , носит название *внешней характеристики* трансформатора.

## 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рис. 11.3. Настройка блоков схемы показана на рис. 11.4 – 11.7. Выбрать параметры трансформатора в таблице 11.1.

Таблица 11.1

Номер варианта	Тип трансформатора	$S_n$ , кВ·А	$U_{1n}$ , В	$U_{2n}$ , В	$i_0$ , %	$u_k$ , %	$P_0^*$ , Вт	$P_M^*$ , Вт
1	ОСМ-0,1	0,100	220	12	24	9,0	1	3
2	ОСМ-0,1	0,100	220	24	24	9,0	1	3
3	ОСМ-0,1	0,100	220	42	24	9,0	1	3
4	ОСМ-0,16	0,160	220	12	23	7,0	1,5	4,2
5	ОСМ-0,16	0,160	220	24	23	7,0	1,5	4,2
6	ОСМ-0,16	0,160	220	36	23	7,0	1,5	4,2
7	ОСМ-0,16	0,160	220	48	23	7,0	1,5	4,2
8	ОСМ-0,25	0,250	220	24	22	5,5	2,2	6,0
9	ОСМ-0,25	0,250	220	36	22	5,5	2,2	6,0
10	ОСМ-0,25	0,250	220	48	22	5,5	2,2	6,0
11	ОСМ-0,4	0,400	220	12	20	4,5	3,2	7,5
12	ОСМ-0,4	0,400	220	24	20	4,5	3,2	7,5
13	ОСМ-0,4	0,400	220	36	20	4,5	3,2	7,5
14	ОСМ-0,4	0,400	220	48	20	4,5	3,2	7,5
15	ОСМ-0,63	0,630	220	36	19	3,5	5,0	12
16	ОСМ-1,0	1,000	220	36	18	2,75	7,0	16
17	ОСМ-0,1	0,100	380	12	24	9,0	1	3
18	ОСМ-0,1	0,100	380	36	24	9,0	1	3
19	ОСМ-0,25	0,250	380	36	22	5,5	2,2	6,0
20	ОСМ-0,25	0,250	380	48	22	5,5	2,2	6,0
21	ОСМ-0,4	0,400	380	36	20	4,5	3,2	7,5
22	ОСМ-0,4	0,400	380	48	20	4,5	3,2	7,5
23	ОСМ-0,63	0,630	380	12	19	3,5	5,0	12
24	ОСМ-0,63	0,630	380	24	19	3,5	5,0	12
25	ОСМ-0,63	0,630	380	36	19	3,5	5,0	12
*) Условно-расчётные значения								

Провести расчёт параметров трансформатора по методике приведенной ниже:

– число витков первичной обмотки

$$w_1 = U_{1n} / (4,44fB_m S_m),$$

где  $S_m \approx k \cdot 0,8d^2$  (м<sup>2</sup>) – площадь поперечного сечения сердечника;  $f = 50$  Гц – частота напряжения сети;  $B_m \approx 1,3$  Тл – рекомендованная

магнитная индукция в магнитопроводе (при мощности  $S_H < 18$  кВ·А);  
 $k \approx 0,75$  – коэффициент заполнения железом магнитопровода;  
 $d \approx 0,055 \sqrt[4]{S_H}$  (м) – диаметр стержня;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора в кВ·А;

– активное сопротивление первичной обмотки:

$$R_1 \approx R_K/2$$

где  $R_K = P_M / I_{1H}^2$ ;  $I_{1H} = S_H / U_{1H}$

– индуктивность рассеяния первичной обмотки:

$$L_1 = X_1 / \omega,$$

где  $X_1 \approx X_K/2$ ;  $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$ ;  $Z_K = U_K / I_{1H}$ ;  $U_K = u_K U_{1H} / 100$ ;

– число витков вторичной обмотки

$$w_2 = w_1 / n,$$

где  $n = U_{1H} / U_{2H}$ ;

– активное сопротивление вторичной обмотки:

$$R_2 \approx R_K / (2n^2);$$

– индуктивность рассеяния вторичной обмотки:

$$L_2 = X_2 / (\omega \cdot n^2);$$

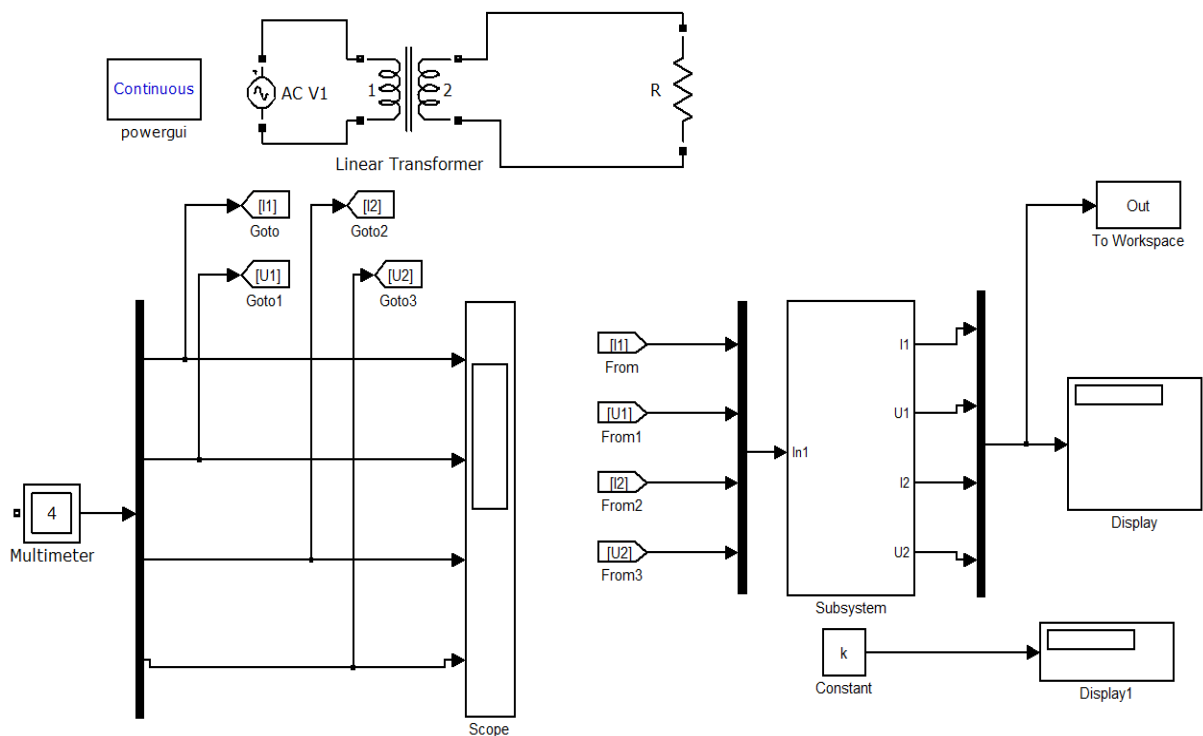


Рис. 11.3. Модель исследования трансформатора

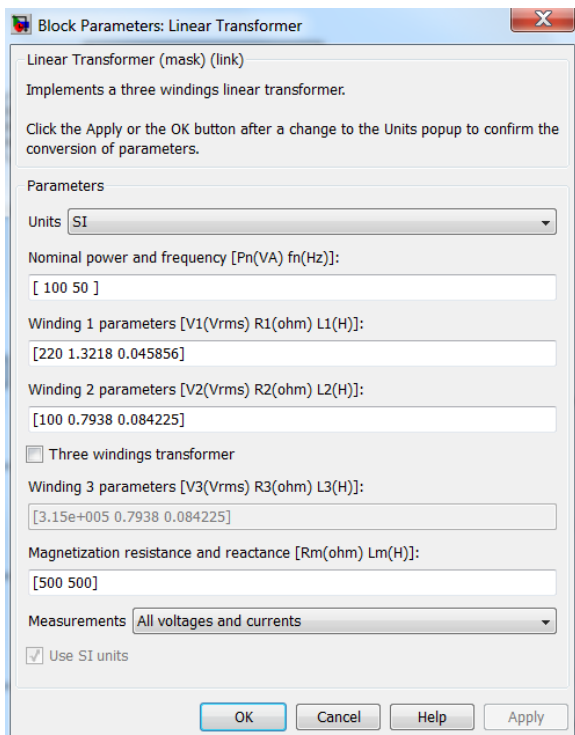


Рис. 11.4. Настройка трансформатора

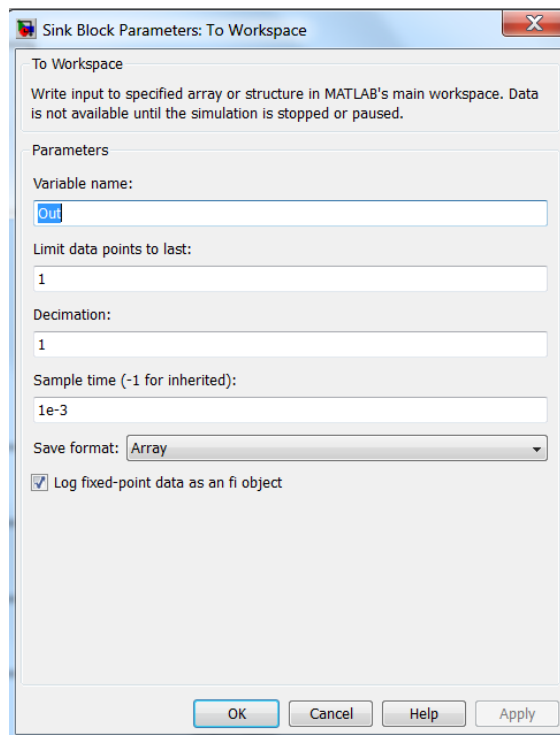


Рис. 11.5. Настройка блока To Workspace

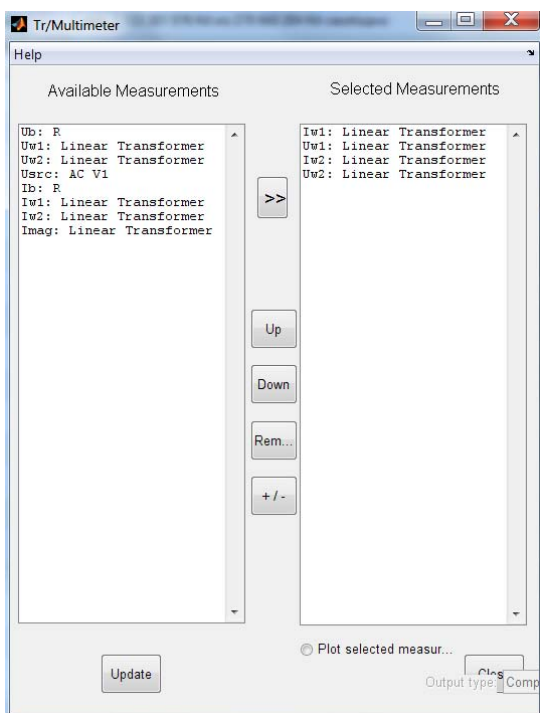


Рис. 11.6. Настройка блока Multimeter

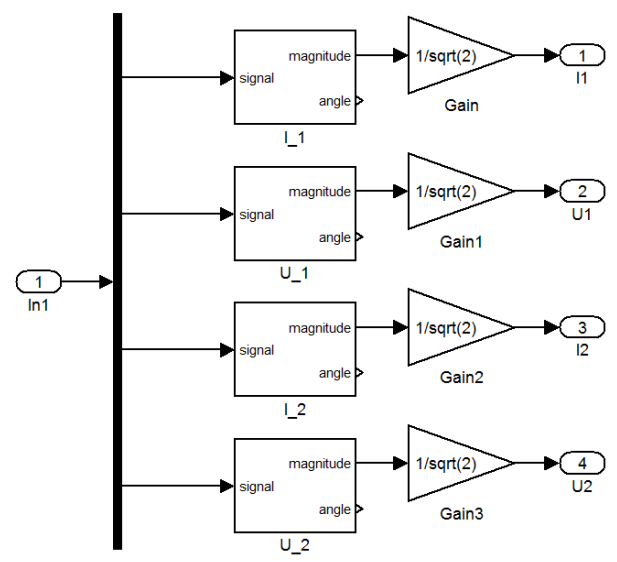


Рис. 11.7. Настройка блока Subsystem

Для расчёта внешней характеристики трансформатора необходимо собрать модель, представленную на рис. 11.8 и программу, листинг которой, дан на рис. 11.9.

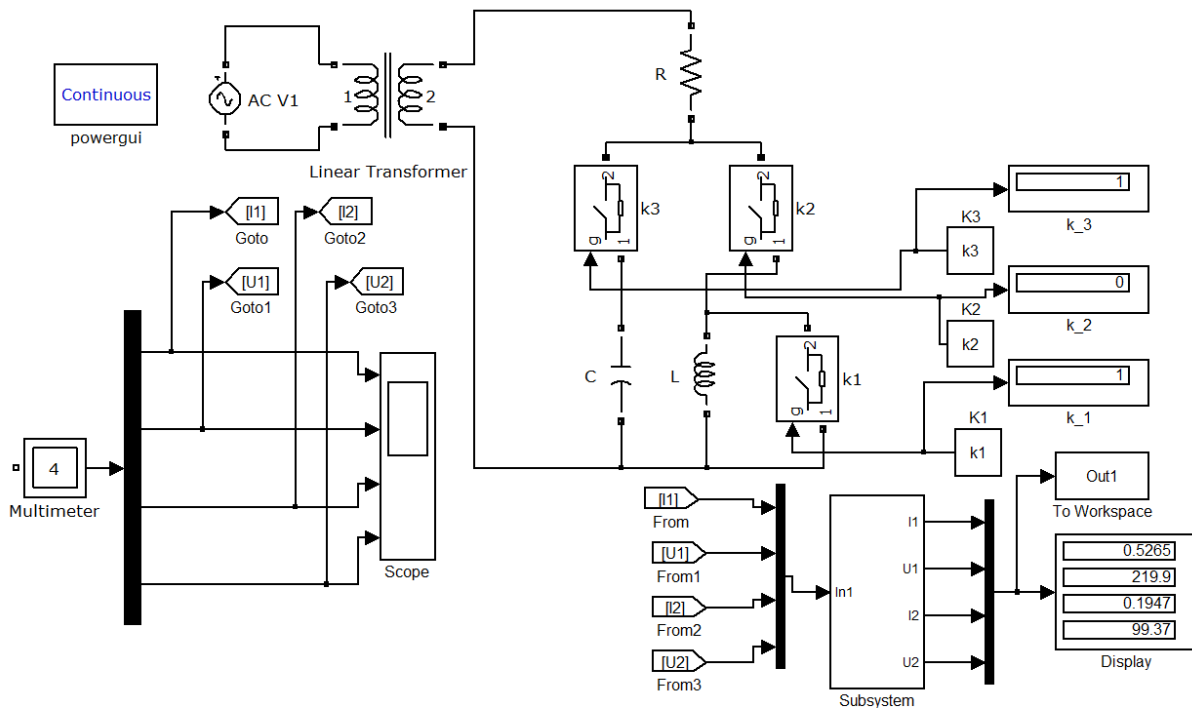


Рис. 11.8. Модель для расчёта внешней характеристики трансформатора

```

for m=0:1:2;
    if m==0 k1=1;k2=1;k3=0;% расчет для активной нагрузки
    else
        if m==1 k1=0;k2=1;k3=0; % расчет для активно-индуктивной
нагрузки
            else
                if m==2 k1=1;k2=0;k3=1; % расчет для активно-емкостной
нагрузки
                    end
                end
            end
        end
    end
for k=0:1:50;
    R=10+10*k;
    sim('Tr1222')
    A(k+1,1)=Out1(1);
    A(k+1,2)=Out1(2);
    A(k+1,3)=Out1(3);
    A(k+1,4)=Out1(4);
end
plot(A(1:k,3),A(1:k,4), 'k')
hold on;
grid on;
end

```

Рис. 11.9. Листинг программы, для расчета внешней характеристики

Комбинация значений  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  даны в таблице 11.2.

Таблица 11.2

$k_1$	$k_2$	$k_3$	
1	1	0	R
0	1	0	RL
1	0	1	RC

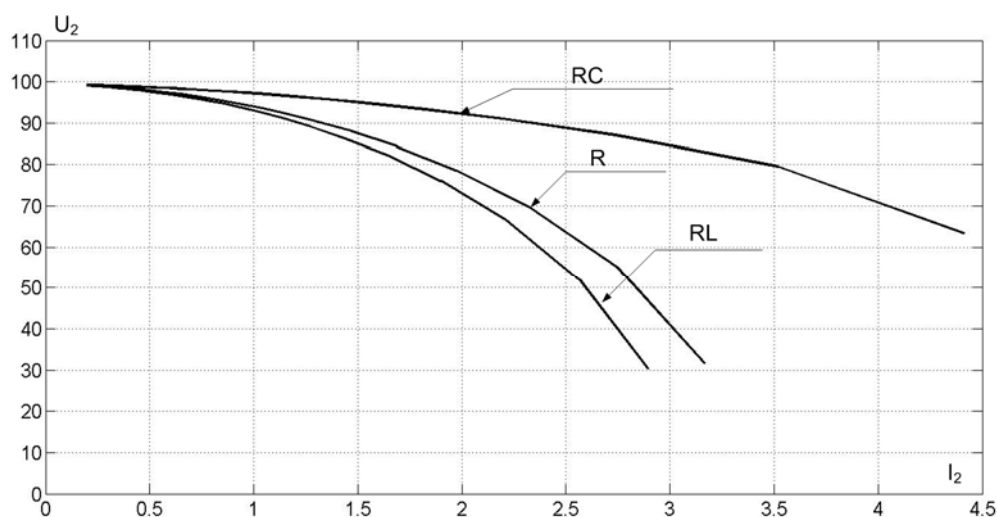


Рис. 11.10. Внешние характеристики трансформатора

1. Провести опыт ХХ трансформатора. Рассчитать и занести в таблицу параметры ХХ трансформатора.

Установлено		Измерено				Вычислено					
$U_{1н}$ , В	$f$ , Гц	$U_{1н}$ , В	$U_{20}$ , В	$I_0$ , А	$P$ , Вт	$n$	$i_0$ , %	$Z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом	$P_0$ , Вт
	50										

Рассчитать указанные параметры ХХ трансформатора.

2. Провести опыт КЗ трансформатора.

Установить ЭДС источника напряжения  $E$  такую, чтобы ток во вторичной обмотке трансформатора был равен номинальному. Данные измерений занести в таблицу;

Установлено	Измерено				Вычислено				
$E = U_k$ , В	$U_k$ , В	$I_{1н}$ , А	$I_{2н}$ , А	$P$ , Вт	$u_k$ , %	$Z_k$ , Ом	$R_k$ , Ом	$X_k$ , Ом	$P_m$ , Вт



Рассчитать указанные параметры КЗ трансформатора.

3. Снять внешние характеристики  $U_2(I_2)$  трансформатора при резистивной, индуктивной и ёмкостной нагрузках при токах 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0;  $1,25I_{2н}$  ( $I_{2н} \approx nI_{1н}$ ).

4. Начертить упрощенную Т-образную схему замещения нагруженного трансформатора. Рассчитать и построить векторные диаграммы нагруженного трансформатора при токе  $I_1 = I_{1н}$  и нагрузках  $R$ ,  $L$  и  $C$ .

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы
2. Расчёт параметров модели трансформатора.
3. Результаты измерений и расчётов.
4. Упрощенная схема замещения трансформатора, его векторные диаграммы при нагрузках  $R$ ,  $L$  и  $C$  и графики внешних характеристик  $U_2 = f(I_2)$ .
5. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. Укажите формулы расчёта коэффициента трансформации  $n$  трансформатора.
2. Как вычислить КПД трансформаторов?
3. Каким потерям мощности, в основном, соответствует показание ваттметра при опыте КЗ трансформатора?
4. Можно ли с помощью трансформатора изменить величину и частоту выходного напряжения?
5. Какие потери мощности определяют с помощью ваттметра, включенного в первичную цепь трансформатора при разомкнутой вторичной цепи?
6. Как проводится опыт холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

## Практическое занятие 12

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** исследование и расчет характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (рис. 12.1), описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах:

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

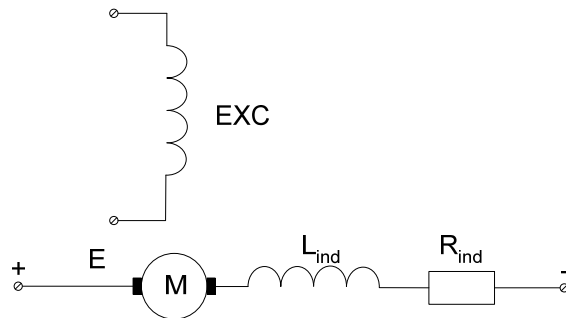


Рис. 12.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

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

$$M = c_e \cdot \Phi \cdot i; \quad (3)$$

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

где

$u$  - напряжение на якорной обмотке двигателя;

$e$  - электродвижущая сила (ЭДС) якоря;

$i$  - ток якоря;

$\Phi$  - поток, создаваемый обмоткой возбуждения;

$M$  - электромагнитный момент двигателя;

$M_r$  - момент сопротивления движению;

$\omega$  - 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.

Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением приведена на рис. 12.2.

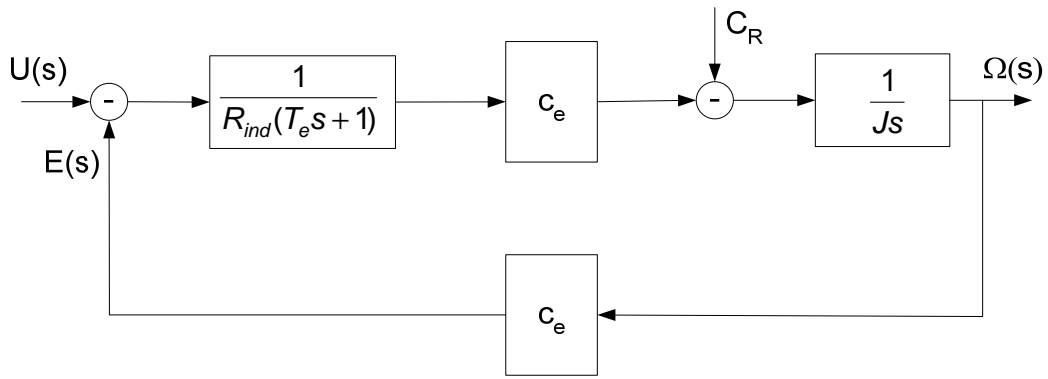


Рис. 12.2. Структурная схема двигателя постоянного тока

С точки зрения будущей модели, входными воздействиями являются напряжения якоря  $u$  и момент сопротивления движению  $M_r$ ; выходными переменными - электромагнитный момент двигателя  $M$  и скорость вращения вала двигателя  $\omega$ , а переменными состояния - переменные стоящие под знаком производной (ток якоря  $i$  и частота вращения вала двигателя  $\omega$ ). 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. 12.3. 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 равна 2500Нм.

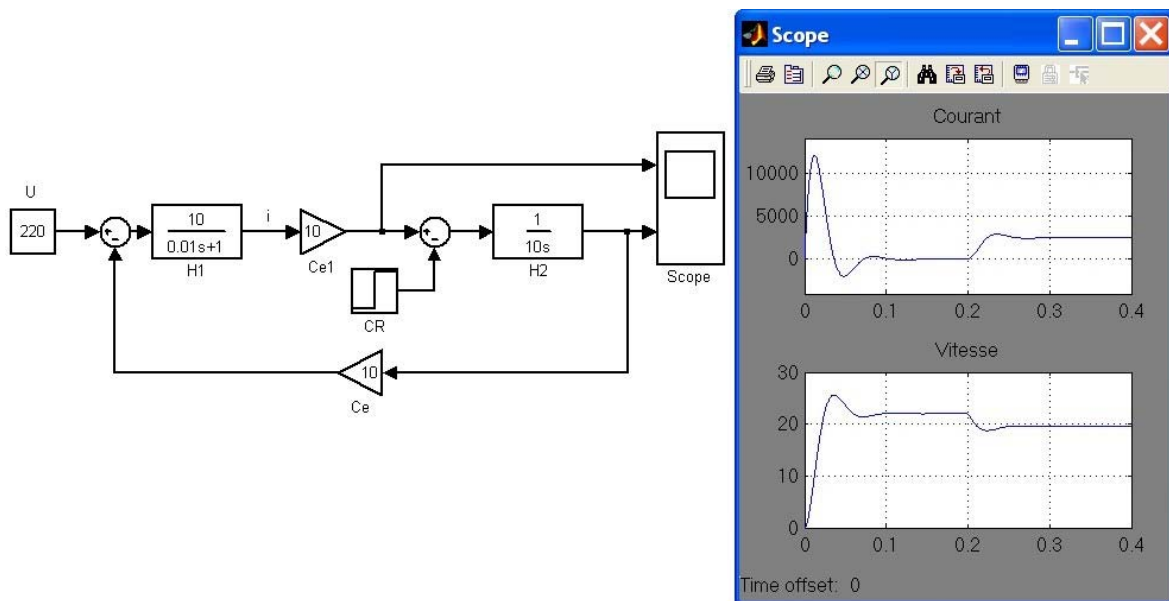


Рис. 12.3. Схема модели и графики электромагнитного момента и частоты вращения

Модель для исследования динамических характеристик ДПТ, реализованная в Matlab, приведена на рис. 12.4.

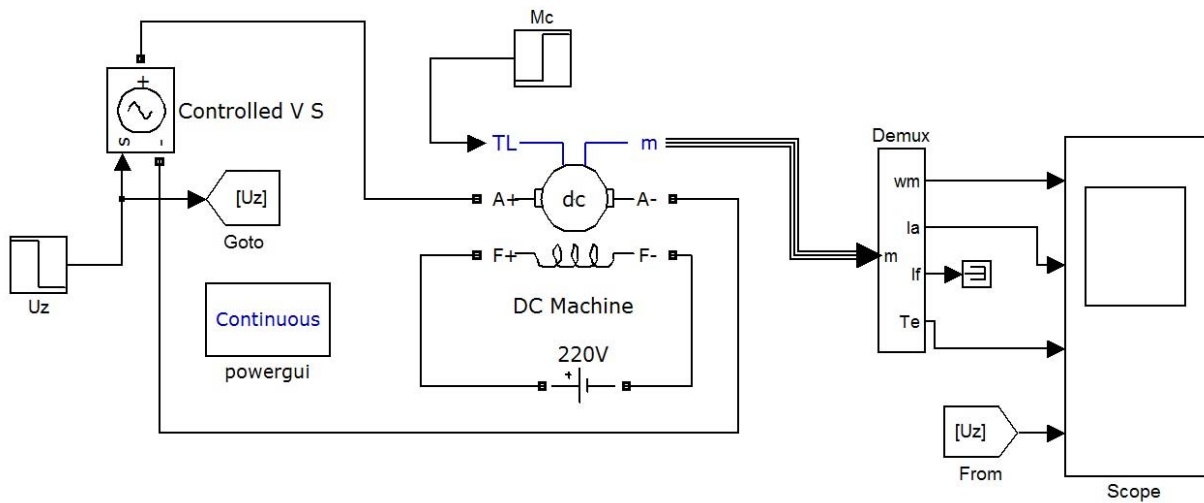


Рис. 12.4. Модель для исследования динамических характеристик ДПТ

Результаты моделирования пуска двигателя даны на рис. 12.5. Зависимости частоты вращения, тока якоря ротора ДПТ, электромагнитного момента и напряжения, приложенного к ДПТ ( $w$ ,  $I_{ind}$ ,  $M$ ,  $U_z$ ) получены с помощью осциллографа.

Временной интервал (0.2 с) соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения при моменте сопротивления равным нулю. В момент времени 0.2 с напряжение, приложенное к обмотке якоря ДПТ, меняет полярность. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс.

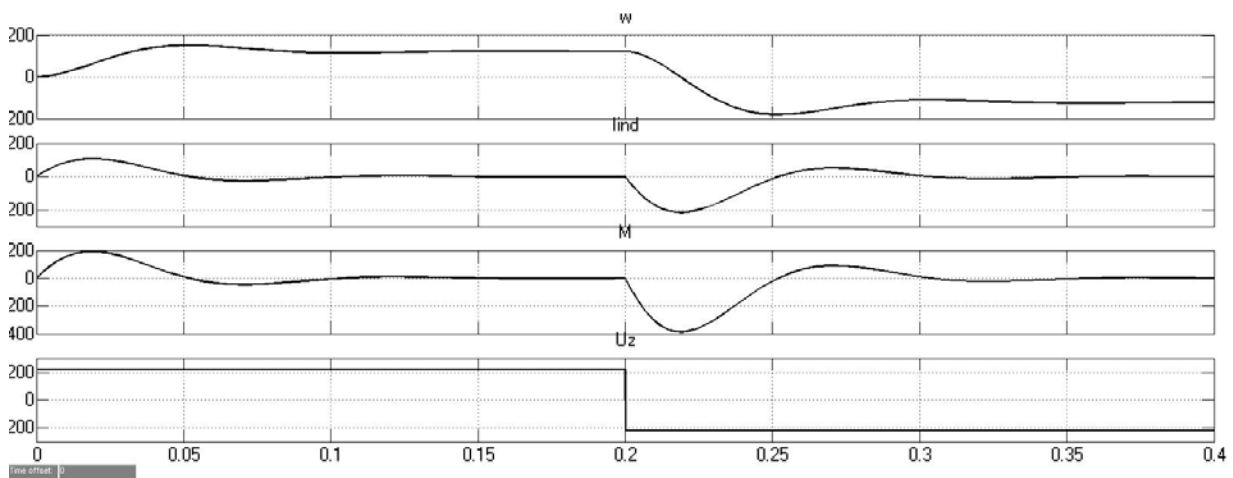


Рис. 12.5. Результаты моделирования пуска двигателя

Рассмотрим расчет механических характеристик. Модель для расчета механических характеристик ДПТ, приведена на рис. 12.6.

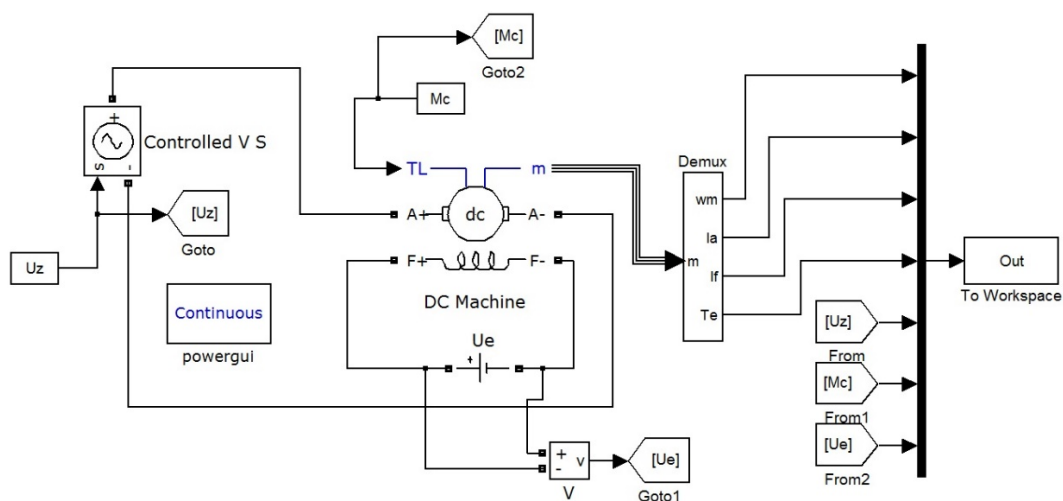


Рис. 12.6. Модель для расчета механических характеристик ДПТ

Программа расчета механических характеристик представлена на рис. 12.7.

```

Ue=220;
for k1=0:1:2;
    Uz=220-25*k1;% величина напряжения, приложенного к якорю
    ДПТ;
    for k=0:1:10;
        Mc=20*k;% величина момента нагрузки;
        sim('MCC2') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Out(1);% величина скорости;
        A(k+1,2)=Out(2);% величина тока якоря;
        A(k+1,3)=Out(3);% величина тока возбуждения;
        A(k+1,4)=Out(4);% величина электромагнитного момента;
        A(k+1,5)=Out(5);% величина напряжения, приложенного к
        якорю ДПТ;
        A(k+1,6)=Out(6);% величина момента нагрузки;
        A(k+1,7)=Out(7);% величина напряжения возбуждения;
    end
    plot(A(1:k,6),A(1:k,1),'k')
    hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в
    текущее окно, что позволяет добавлять последующие графики к
    уже существующим;
    grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
end

```

Рис. 12.7. Программа расчета

Семейство механических характеристик представлено на рис. 12.8. Изменение напряжения, подведенного к якорю двигателя при номинальном

потоке, является в регулируемом электроприводе постоянного тока основным управляющим воздействием. Как правило, изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения по сравнению с номинальным. При изменении напряжения пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода двигателя, а наклон механических характеристик при любом уровне напряжения одинаков, поэтому механические характеристики принимают вид параллельных прямых, показанных на рис. 12.8.

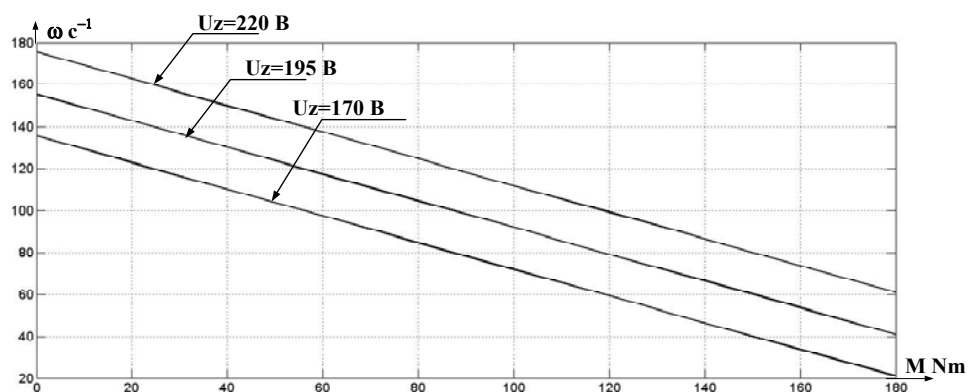


Рис. 12.8. Семейство механических характеристик при  $U = \text{var}$

Программа расчета механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлена на рис. 12.9.

```

Uz=220;
for k1=0:1:2;
    Ue=220-30*k1;% величина напряжения возбуждения;;
    for k=0:1:10;
        Mc=20*k;% величина момента нагрузки;
        sim('MCC2') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Out(1);% величина скорости;
        A(k+1,2)=Out(2);% величина тока якоря;
        A(k+1,3)=Out(3);% величина тока возбуждения;
        A(k+1,4)=Out(4);% величина электромагнитного момента;
        A(k+1,5)=Out(5);% величина напряжения, приложенного к
якорю ДПТ;
        A(k+1,6)=Out(6);% величина момента нагрузки;
        A(k+1,7)=Out(7);% величина напряжения возбуждения;
    end
    plot(A(1:k,6),A(1:k,1),'k')
    hold on;% – обеспечивает продолжение вывода графиков в
текущее окно,
        %что позволяет добавлять последующие графики к уже
существующим;
    grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
end

```

Рис. 12.9. Программа расчета механических характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейство механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлено на рис. 12.10. Изменение потока двигателя  $\Phi$  в связи с насыщением его магнитной цепи в номинальном режиме практически возможно в сторону уменьшения потока - ослабления поля двигателя. Уменьшение потока вызывает увеличение скорости идеального холостого хода и уменьшение момента короткого замыкания, а ток короткого замыкания при этом не претерпевает изменений. Соответственно наклон статической механической характеристики увеличивается пропорционально квадрату потока.

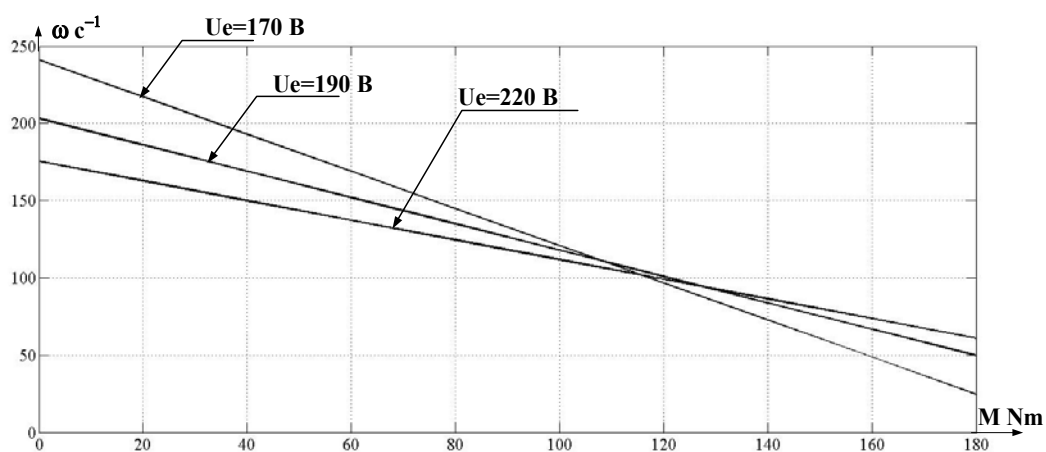


Рис. 12.10. Механические характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейство регулировочных характеристик при уменьшении напряжения питания представлено на рис. 12.11.

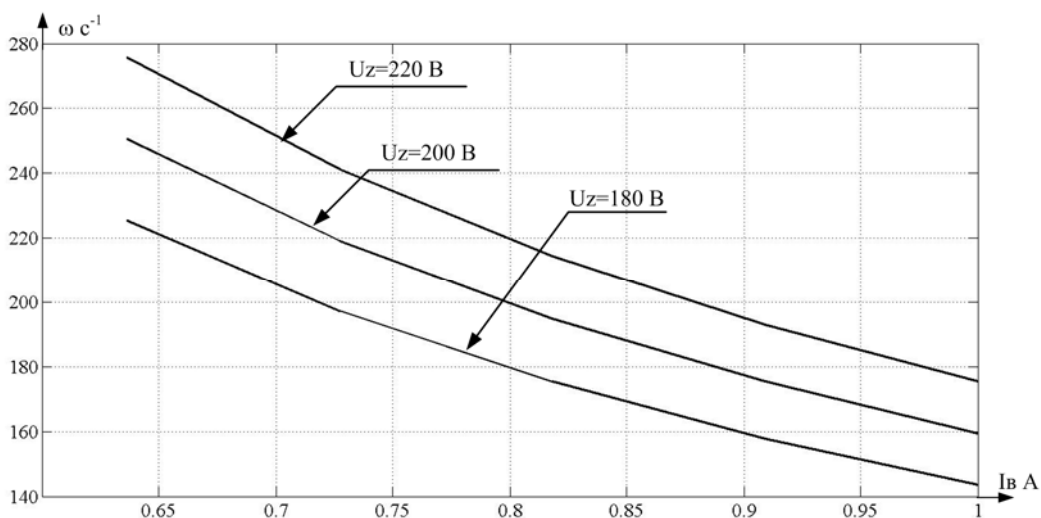


Рис. 12.11. Зависимость скорости двигателя от тока возбуждения

Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ, приведена на рисунке 12.12, а программы на рис. 12.13.

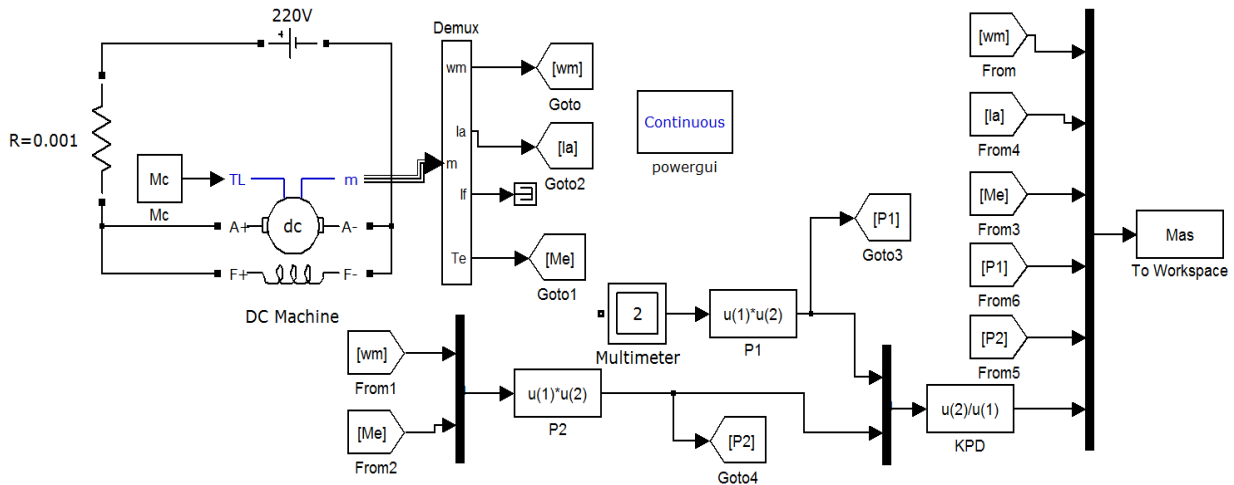


Рис. 12.12. Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ

```

for k=0:1:100;
    Mc=1*k;% величина момента нагрузки;
    sim('DPTcaract') % команда обращения к модели;
    A(k+1,1)=Mas(1);%w-частота вращения;
    A(k+1,2)=Mas(2);% Ia-ток якоря;
    A(k+1,3)=Mas(3);% Me-Электромагнитный момент;
    A(k+1,4)=Mas(4)*0.01;%P1- потребляемая мощность;
    A(k+1,5)=Mas(5);% P2-мощность на валу двигателя;
    A(k+1,6)=Mas(6)*100;%КПД;
end
plot(A(1:k,5),A(1:k,6),'k',A(1:k,5),A(1:k,3),'k');
hold on;
plot(A(1:k,5),A(1:k,1),'k',A(1:k,5),A(1:k,2),'k',A(1:k,5),A(1:
k,4),'k');
    hold on;%
    grid on

```

Рис. 12.13. Программа расчета рабочих характеристик ДПТ



Рабочие характеристики ДПТ, приведены на рис. 12.14.

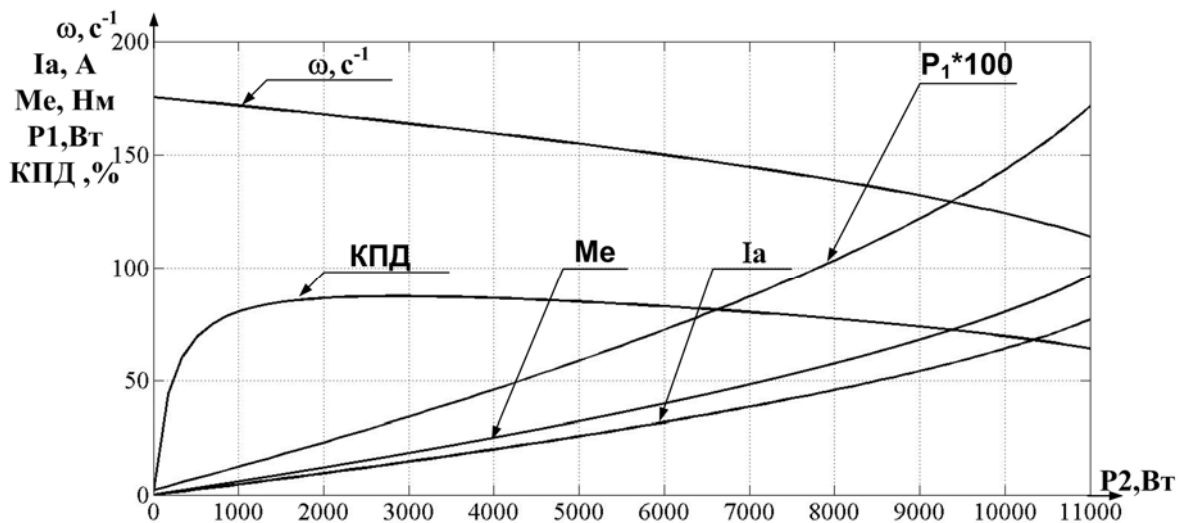


Рис. 12.14. Рабочие характеристик ДПТ

### 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать модель, представленную на рис.12.4 и исследовать режим пуска.
2. Собрать модель, представленную на рис. 12.6 и составить программу расчета механических характеристик. Провести расчет.
3. Рассчитать рабочие характеристики ДПТ.

### 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Осциллограммы режимов пуска.
4. Рассчитанные характеристики.
5. Выводы по работе.

### 3. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
2. Как устроен двигатель постоянного тока?
3. В чем состоит особенность пуска двигателя?
4. Для чего используется пусковой резистор и из каких соображений выбирают его сопротивление?
5. Какой вид имеет механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением?

6. Какой вид имеют рабочие характеристики двигателя?
7. Как можно регулировать частоту вращения двигателя?
8. Как изменить направление вращения якоря?
9. При каких обстоятельствах двигатель идет "в разнос"?
10. Какими достоинствами обладает двигатель, и каковы его недостатки?
11. Где применяются двигатели с параллельным (независимым) возбуждением?

### Практическое занятие 13

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Цель работы:** компьютерное моделирование системы регулирования скорости двигателя постоянного тока с использованием нейронных сетей.

Двигатель постоянного тока нашел широкое применение в различных областях деятельности человека. Электродвигатели постоянного тока применяют в тех электроприводах, где требуется большой диапазон регулирования скорости, большая точность поддержания скорости вращения привода, регулирования сверх номинальной скорости.

Целью данной работы является построение и исследование цифровой модели системы управления ДТП, взятой из [6].

Данные для расчетов автоматической системы регулирования скорости указаны в таблице.

$u_z,$ В	$k_{pc}$	$T_{pc},$ с	$k_{рт}$	$T_{рт},$ с	$k_y$	$r,$ Ом	$L,$ мГн	$c,$ В×с/рад	$J,$ кг×м <sup>2</sup>	$k_t,$ В/А	$k_c,$ В×с/рад	$M_0,$ Н×м	$\alpha,$ 1/А
5	10	0,1	8	0,02	40	0,3	40	0,9	0,4	0,01	0,04	20	0,1

Функциональная схема системы приведена на рис. 13.1. Система содержит: [6]

*ЗС* – задатчик скорости;

*РС* – регулятор скорости;

*РТ* – регулятор тока;

УМ – усилитель мощности;  
 ДТ – датчик тока;  
 ФП – функциональный преобразователь;  
 М – двигатель постоянного тока (ОВ – обмотка возбуждения,  $u_B$  – напряжение питания обмотки возбуждения);  
 ОР – объект регулирования;  
 ТГ – тахогенератор.

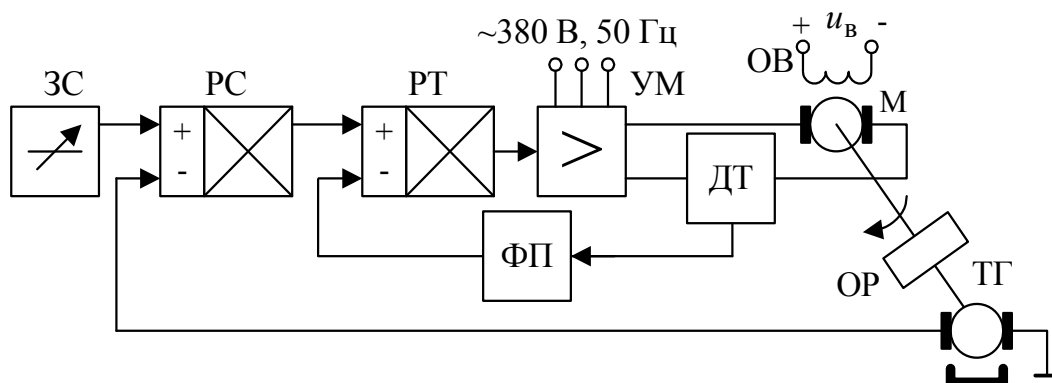


Рис. 13.1. Функциональная схема автоматической системы регулирования скорости с нелинейной обратной связью по току

Структурная схема системы показана на рис.13.2. [6]

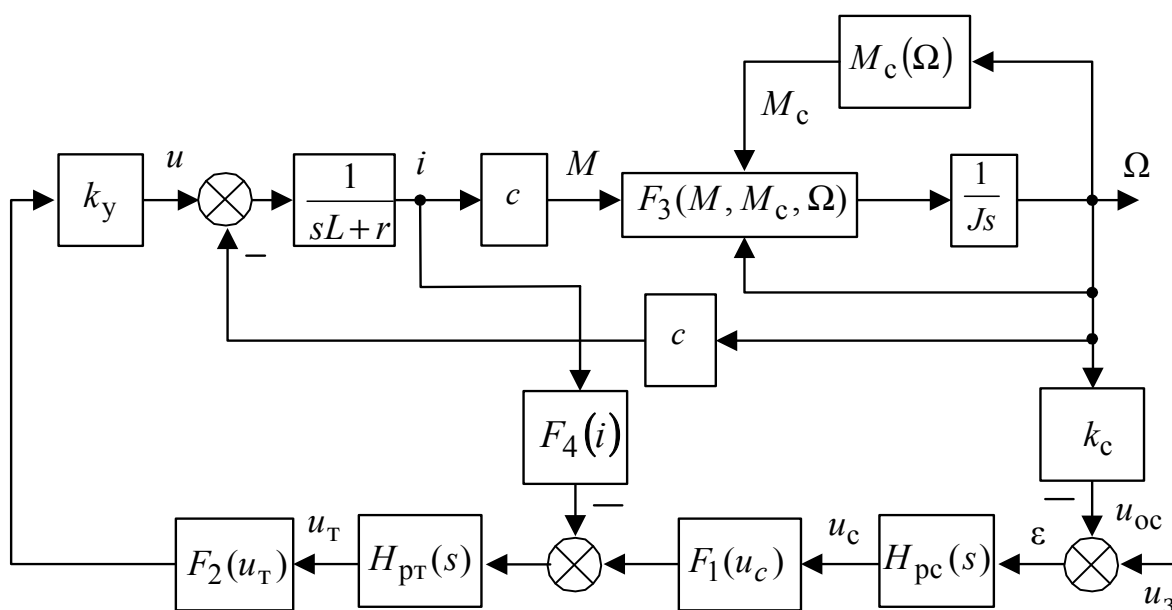


Рис. 13.2. Структурная схема системы регулирования скорости

На схеме, представленной на рис. 13.2, обозначено:

$u_3$  – сигнал задания;

$\varepsilon$  – ошибка регулирования;

$H_{pc}(s)$  – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости;

$$H_{pc}(s) = \frac{k_{pc}(T_{pc}s + 1)}{T_{pc}s};$$

$k_{pc}, T_{pc}$  – коэффициент передачи и постоянная времени регулятора скорости;

$u_c$  – выходной сигнал регулятора скорости без учета ограничения;

$F_1(u_c)$  – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$$F_1(u_c) = \begin{cases} u_c & \text{при } |u_c| \leq u_m; \\ -u_m & \text{при } u_c \leq -u_m; \\ +u_m & \text{при } u_c \geq u_m; \end{cases}$$

$u_m$  – максимальное значение выходного сигнала регулятора скорости

$u_m = 10\text{В}$ ;

$H_{pt}(s)$  – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$$H_{pt}(s) = \frac{k_{pt}(T_{pt}s + 1)}{T_{pt}s};$$

$k_{pt}, T_{pt}$  – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора тока;

$u_t$  – выходной сигнал регулятора тока без учета ограничения;

$F_2(u_t)$  – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$F_2(u_t) = \begin{cases} u_t & \text{при } |u_t| \leq u_m; \\ -u_m & \text{при } |u_t| \leq -u_m; \\ +u_m & \text{при } |u_t| \geq u_m; \end{cases}$$

$k_y$  – коэффициент передачи усилителя мощности;

$u$  – выходное напряжение усилителя мощности;

$r, L$  – активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

$i$  – Ток якорной обмотки;

$c$  – конструктивная постоянная двигателя;

$J$  – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу двигателя;

$k_c$  – коэффициент передачи датчика скорости;

$M_c(\Omega)$  – зависимость момента нагрузки от скорости;

$$M_c(\Omega) = M_0 \operatorname{sgn} \Omega ;$$

$M_0$  – момент трения покоя;

$M$  – электромагнитный момент двигателя;

$F_3(M, M_c, \Omega)$  – нелинейная зависимость, моделирующая торможение двигателя за счет сил трения;

$$F_3(M, M_c, \Omega) = \begin{cases} M - M_c & \text{при } \Omega \neq 0; \\ 0 & \text{при } |M| - |M_c| < 0 \text{ и } \Omega = 0; \end{cases}$$

$F_4(i)$  – статическая характеристика функционального преобразователя;

$$F_4(i) = k_T (i + \alpha i^2 \operatorname{sgn} i);$$

$k_T$  – коэффициент передачи датчика тока;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности. [4,6]

Модель системы регулирования скорости ДПТ построенная в среде MATLAB Simulink представлена на рис. 13.3.

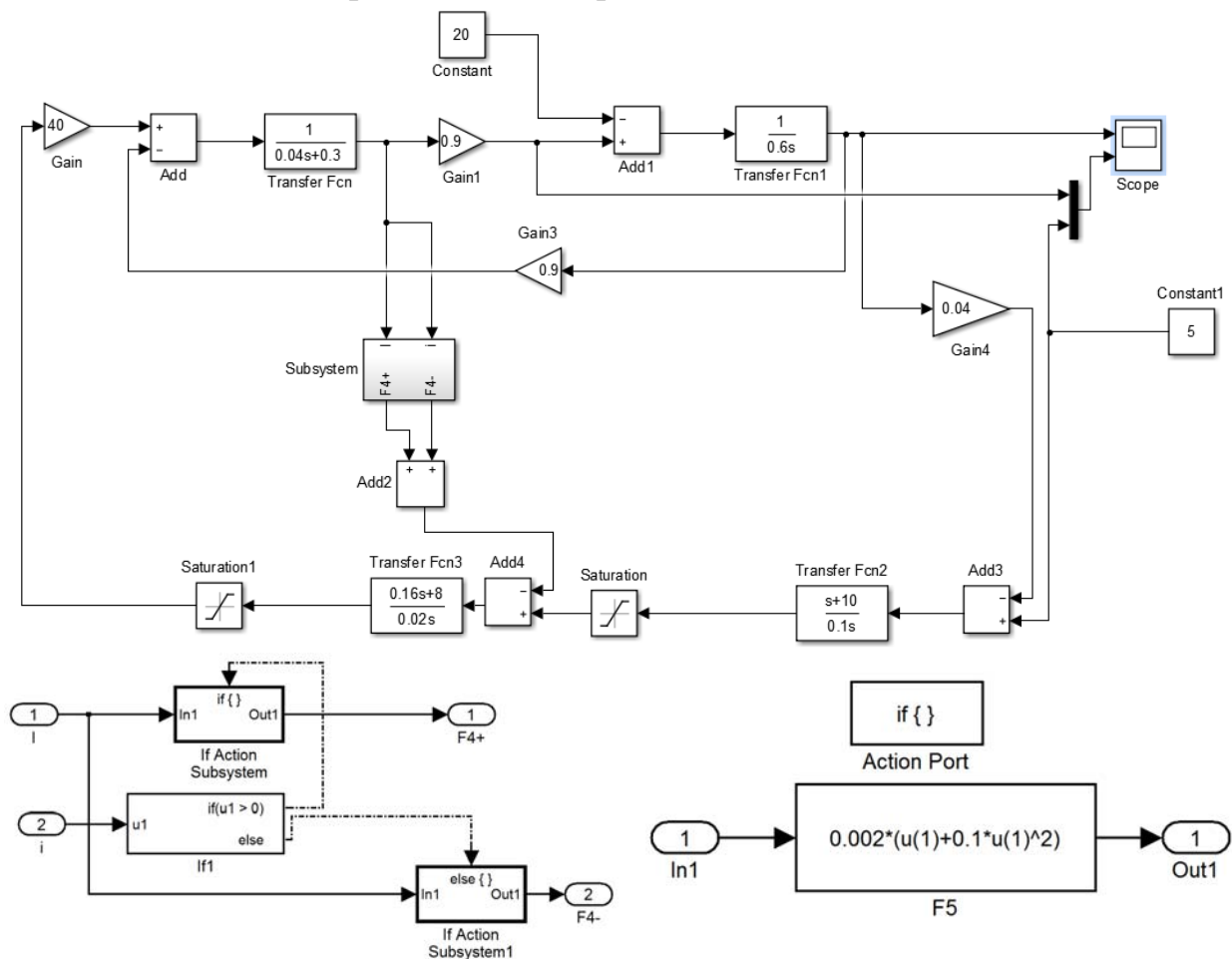


Рис. 13.3. Компьютерная модель системы регулирования скорости ДПТ

В результате моделирования системы был получен следующий переходный процесс:

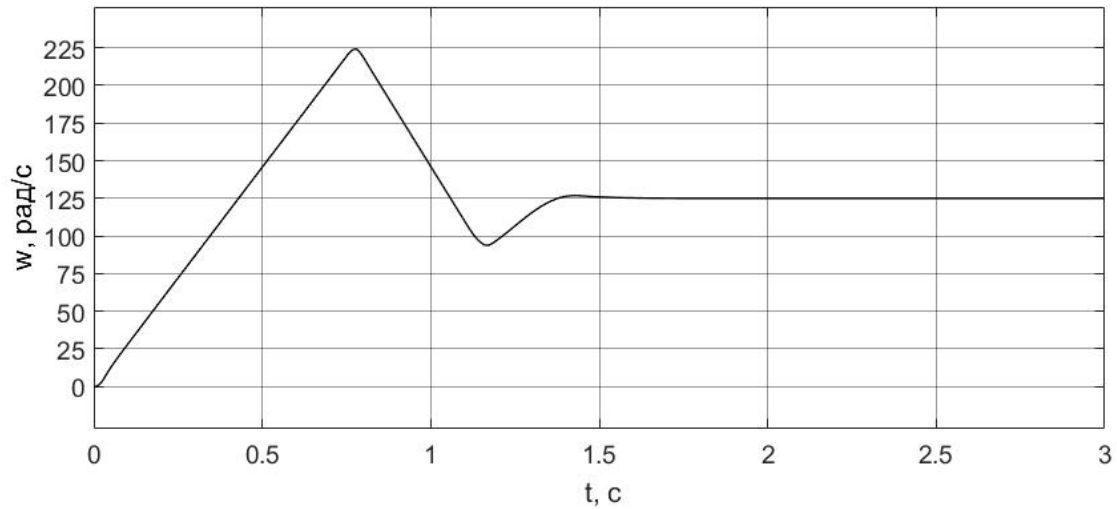


Рис. 13.4. Зависимость скорости ДПТ от времени

Анализ полученной характеристики показывает, что система выходит на необходимый уровень скорости, но переходный процесс имеет значительное перерегулирование и занимает много времени. Для того чтобы уменьшить время переходного процесса и перерегулирование проведем настройку ПИ-регулятора.

Для настройки ПИ-регулятора используется блок «Check Step Response Characteristics» [4]. Модель системы приведена на рис. 13.5.

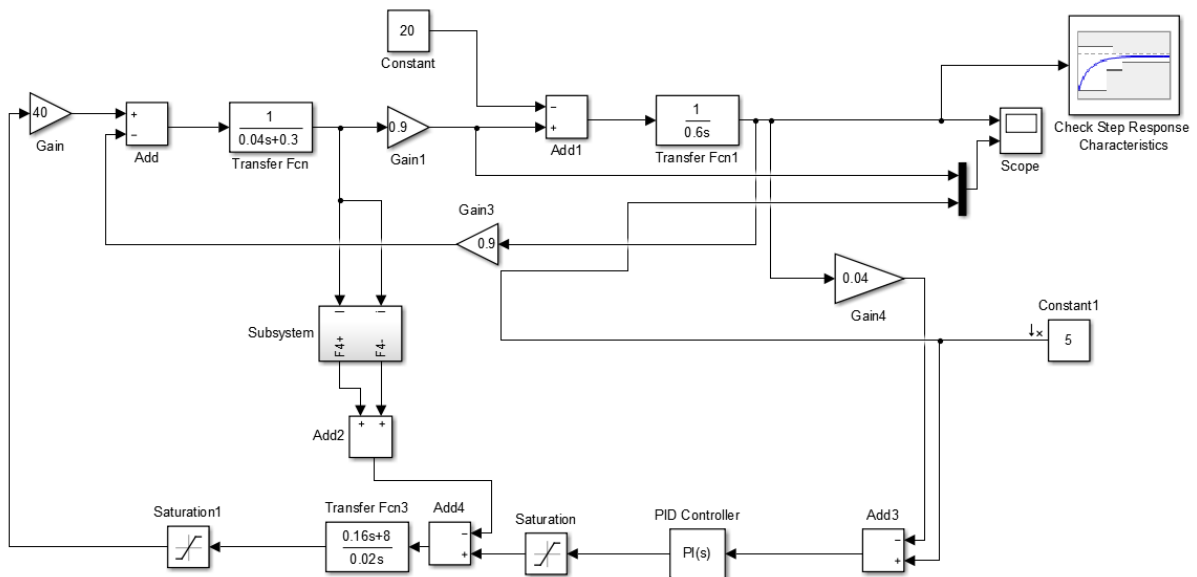


Рис. 13.5. Схема регулирования скорости ДПТ с ПИ регулятором

Зададим начальные параметры ПИ регулятора:  $K_p=1$ ,  $K_i=1$ .

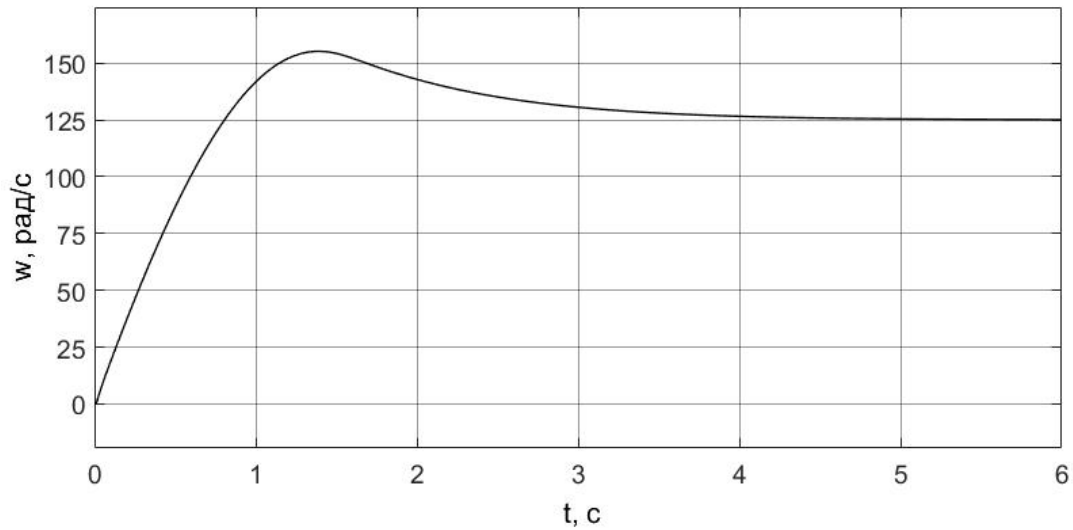


Рис. 13.6. Зависимость скорости ДПТ от времени с коэффициентами  $K_p=K_i=1$

Для настройки ПИ регулятора, откроем блок «Check Step Response Characteristics» и добавим в него изменяемые переменные  $K_p$  и  $K_i$ .

После настройки получаем оптимальные параметры ПИ регулятора  $K_p=4,9119$ ,  $K_i=0,2105$ . Результат оптимизации параметров регулятора приведен на рис. 13.7.

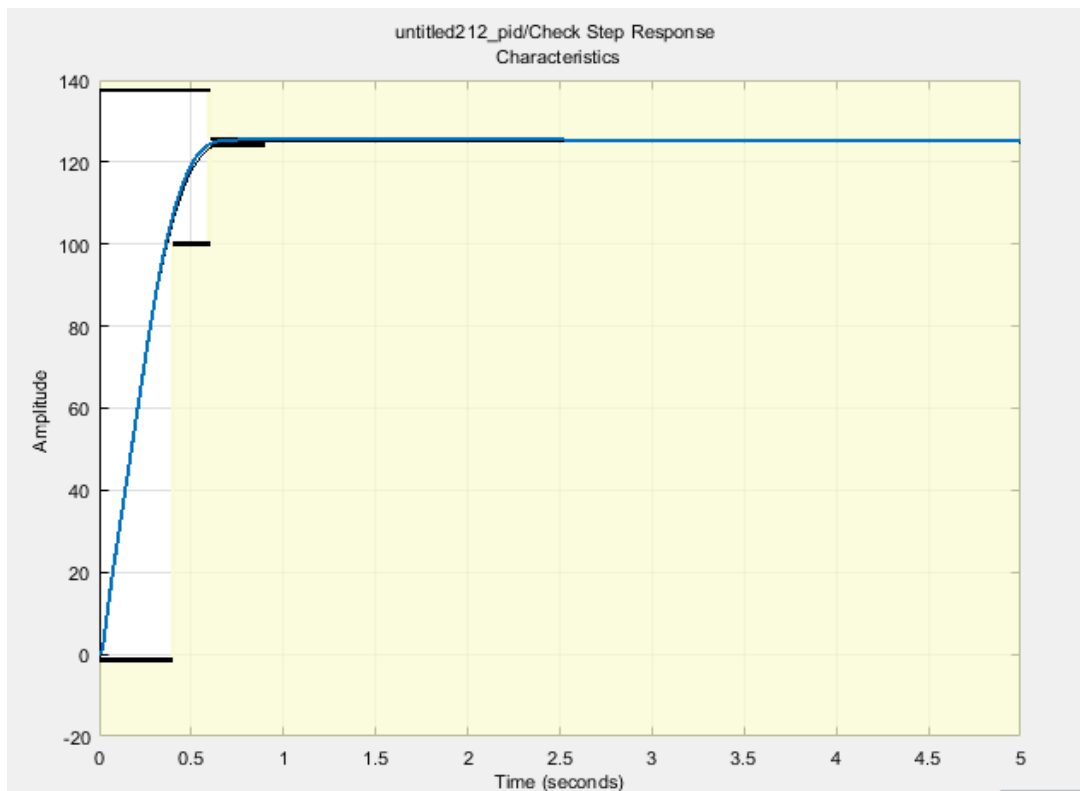


Рис. 13.7. Результат оптимизации параметров регулятора

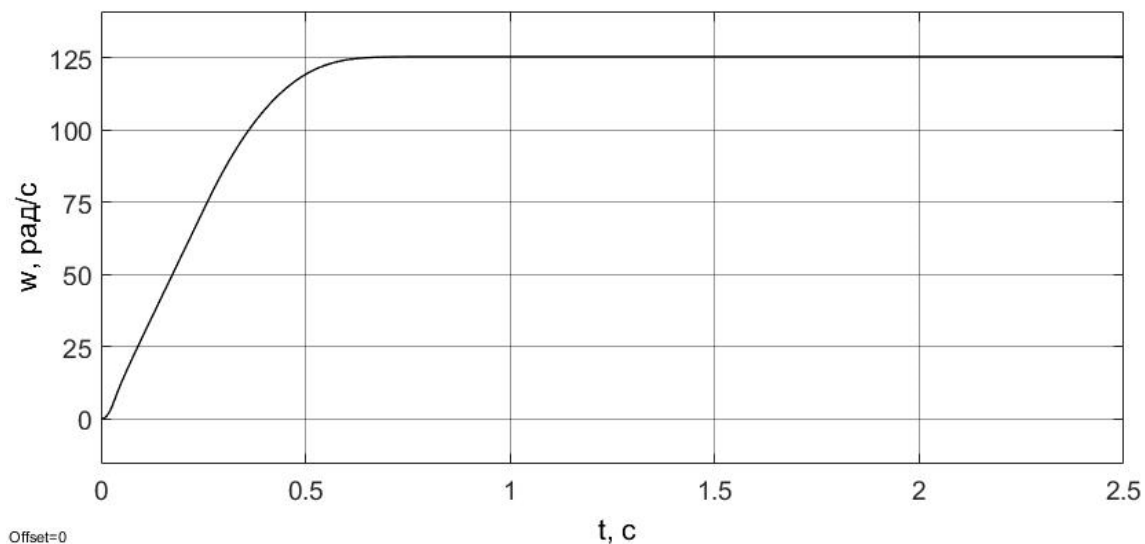


Рис. 13.8. Характеристика системы с коэффициентами  $K_p=4,9119$  и  $K_i=0,2105$

Исходная характеристика и оптимальная представлены на рис. 13.9.

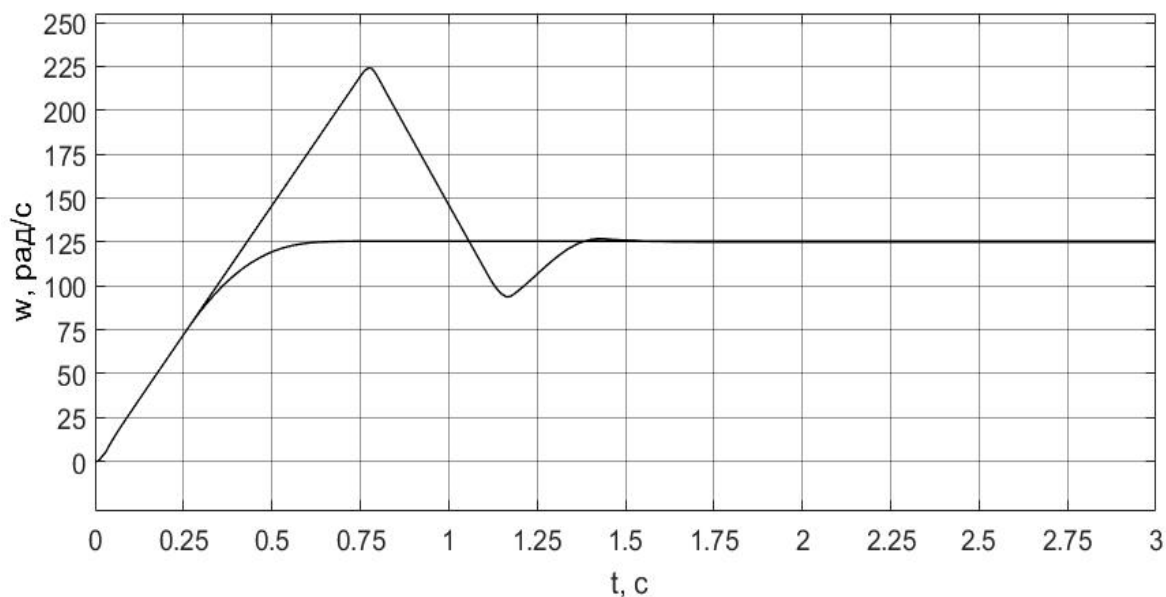


Рис. 13.9. Сравнение характеристик

Перерегулирование уменьшилось с  $\frac{225-125}{125} \cdot 100\% = 80\%$ . до  $\frac{125,01-125}{125} \cdot 100\% = 0,008\%$ . Время переходного процесса снизилось с 1,47 секунд до 0,58 секунд.



Для расчета статических характеристик системы, зависимости тока двигателя и ошибки регулирования от момента нагрузки составим модель (рис. 13.10) и программу (рис. 13.11).

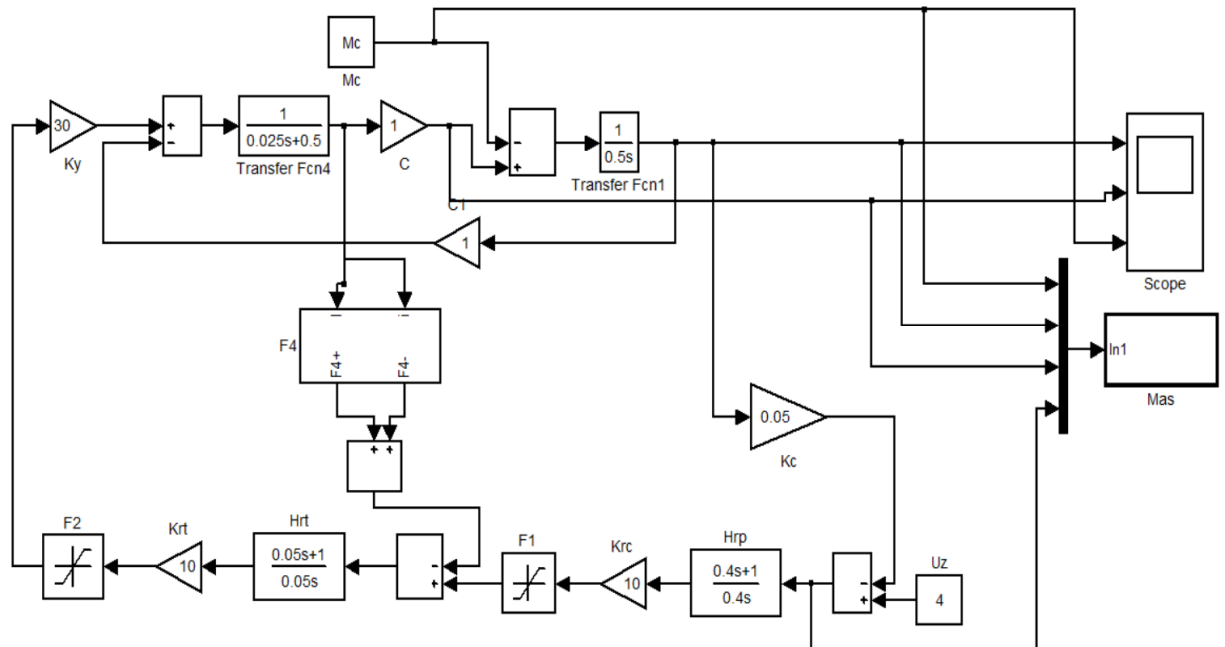


Рис. 13.10. Модель для расчета статических характеристик системы

Код программы.

```
for k=0:1:20;
    Mc=0+7.5*k; );% Диапазон изменения момента сопротивления.
    sim('temaMc1')
    A(k+1,1)=Out1(1);% Момент сопротивления.
    A(k+1,2)=Out1(2);% Скорость.
    A(k+1,3)=Out1(3);% Ток якоря.
    A(k+1,4)=Out1(4)*10e6;% ошибка
end
plot(A(1:k,1),A(1:k,2),['K','x','-.'])
hold on;
plot(A(1:k,1),A(1:k,3),['K','+','-.'])
grid on;
hold on;
plot(A(1:k,1),A(1:k,4),['K','*','-.'])
hold on;
```

Рис. 13.11. Программа для расчета статических характеристик системы

Зависимости скорости, тока якоря и ошибки регулирования от момента сопротивления представлены на рис. 13.12.

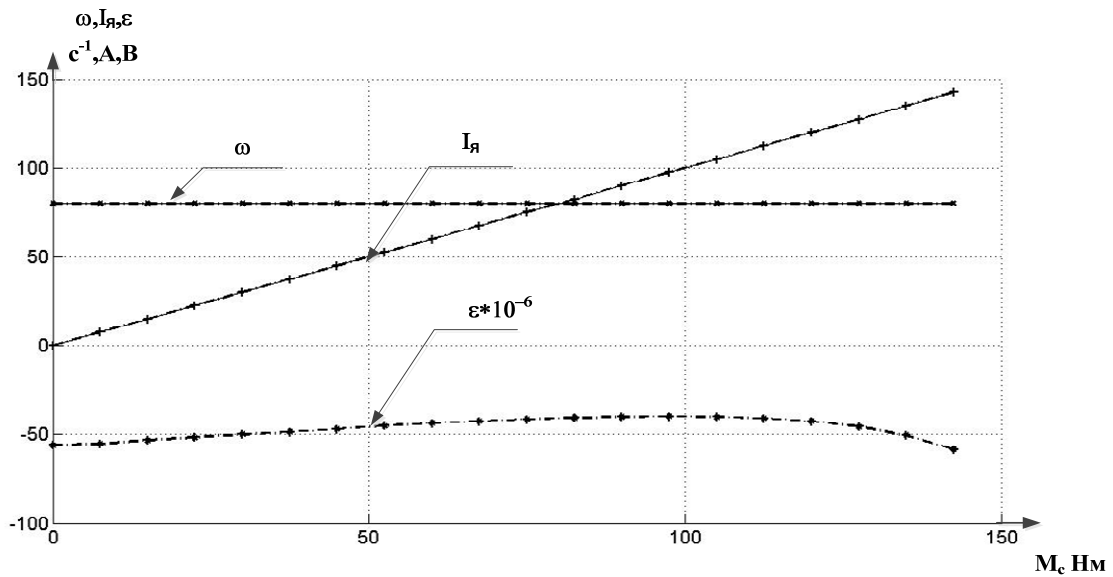


Рис. 13.12. Зависимости скорости, тока якоря и ошибки регулирования от момента сопротивления

Модель и программа расчета статических характеристик системы, зависимости скорости двигателя и ошибки регулирования от напряжения задания представлена на рис. 13.13.

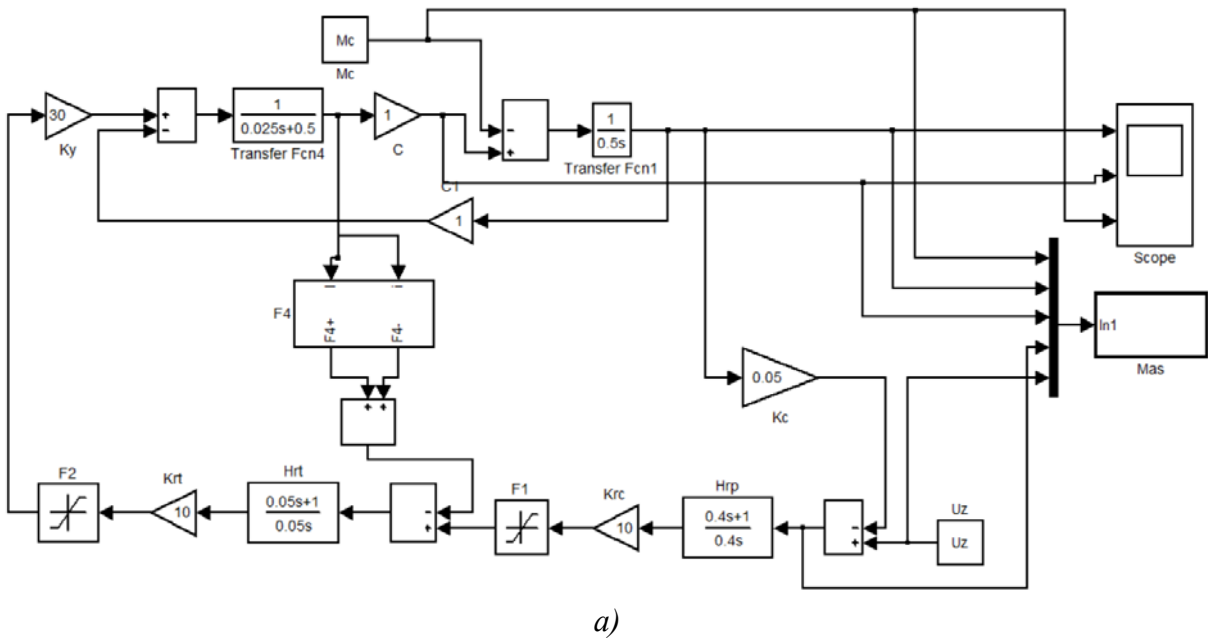


Рис. 13.13. Модель и программа для исследования статических характеристик системы от напряжения задания (начало)

```

Код программы
%for k1=0:1:2;
    %Mc=10*k1;
    Mc=0;
    for k=0:1:20;
        Uz=2+1*k;
        sim('temaUz1')
        A(k+1,1)=Out1(1);% Момент сопротивления.
        A(k+1,2)=Out1(2);% Скорость.
        A(k+1,3)=Out1(3);% Ток якоря.
        A(k+1,4)=Out1(4)*10e10;% ошибка
        A(k+1,5)=Out1(5);% Напряжение задания.
    end
plot(A(1:k,5),A(1:k,2),['K','x','-.'])
hold on;
%plot(A(1:k,5),A(1:k,3),['K','+','-.'])
grid on;
hold on;
plot(A(1:k,5),A(1:k,4),['K','*','-.'])
hold on;
%end

```

б)

Рис. 13.13. Модель и программа для исследования статических характеристик системы от напряжения задания (окончание)

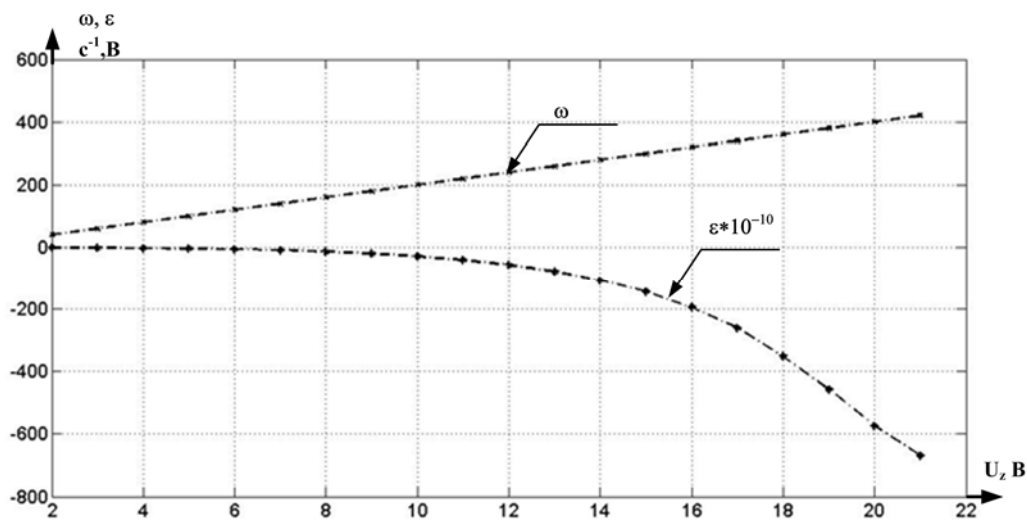


Рис.13.14. Зависимость скорости и ошибки от сигнала задания

Из полученных характеристик (рис. 13.14) видно, что с увеличением сигнал задания, увеличивается ошибка регулирования.

Для расчета частотных характеристик можно воспользоваться функцией Matlab «Analysis-Control Desing-Linear Analysis». С помощью этой

функции получаем частотные характеристики линеаризованной системы. Для этого необходимо указать точки входа и выхода системы, как показано на рис. 13.15.

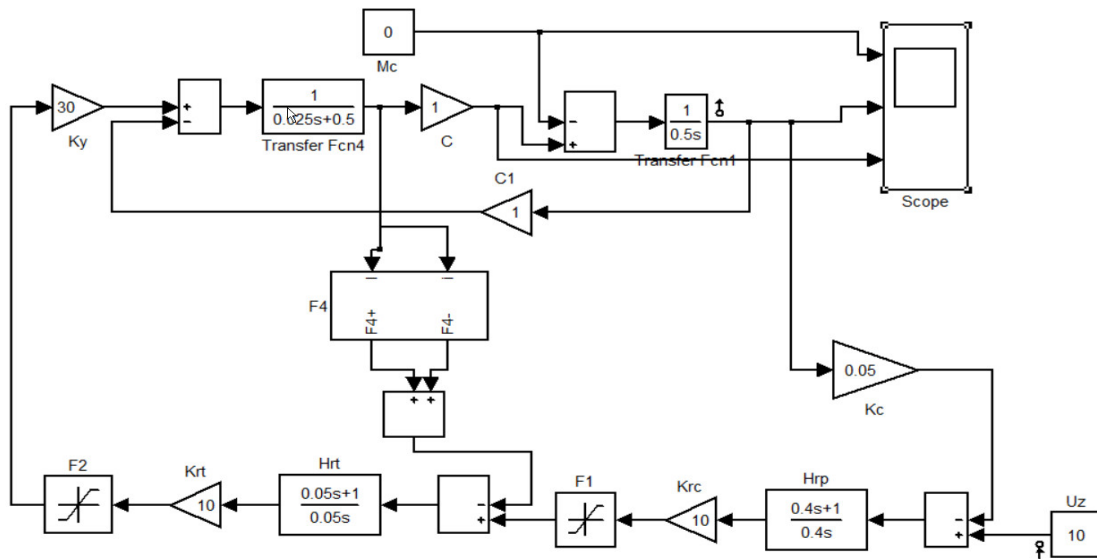


Рис. 13.15. Модель системы регулирования скорости ДПТ для расчета характеристик

После обозначения точек входа и выхода получаем переходную и логарифмические характеристики, годограф линеаризованной системы.

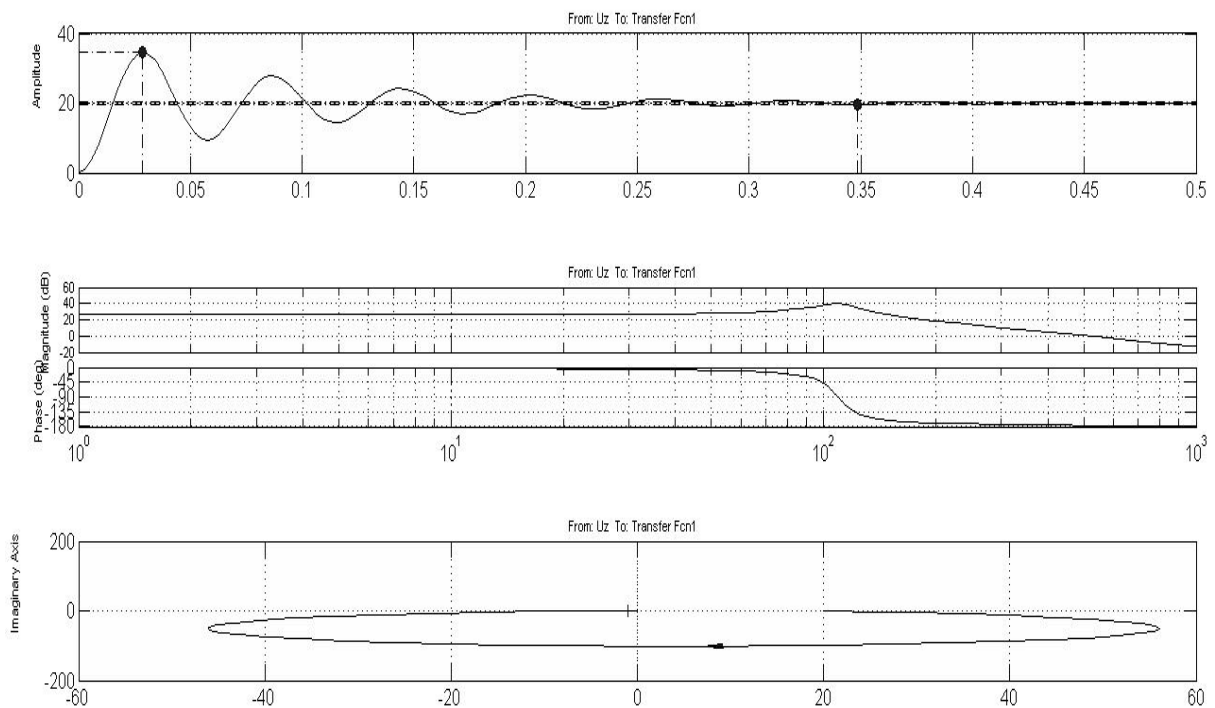


Рис. 13.16. Переходная, логарифмические характеристики и годограф линеаризованной системы

Рассмотрим нейросетевую модель системы управления электроприводом.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) — математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма [7]. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге, и при попытке смоделировать эти процессы. ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты (особенно в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах). Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. И, тем не менее, будучи соединёнными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Нейронные сети успешно применяются для синтеза систем управления динамическими объектами. Нейросети обладают рядом уникальных свойств, которые делают их мощным инструментом для создания систем управления: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, способностью адаптироваться к изменению свойств объекта управления и внешней среды, пригодностью для синтеза нелинейных регуляторов, высокой устойчивостью к повреждениям своих элементов в силу изначально заложенного в нейросетевую архитектуру параллелизма [7].

Смотрим обучение нейроконтроллера [5]. Обучение нейронной сети с учителем предполагает, что для каждого входного вектора из обучающего множества существует требуемое значение выходного вектора, называемого целевым. Эти вектора образуют обучающую пару. Веса сети изменяют до тех пор, пока для каждого входного вектора не будет получен приемлемый уровень отклонения выходного вектора от целевого.

Для того, чтобы обучить нейросеть, необходимо иметь эталонную систему (учителя), относительно которой будет проводиться тренировка. В качестве такой было выбрано апериодическое звено первого порядка (рис. 13.17).

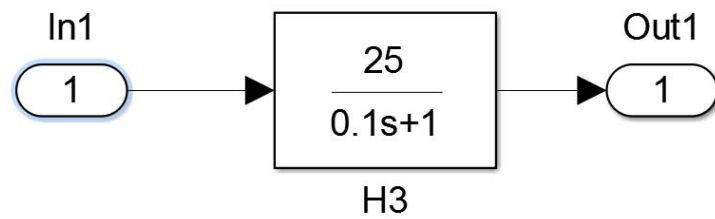


Рис. 13.17. Апериодическое звено первого порядка

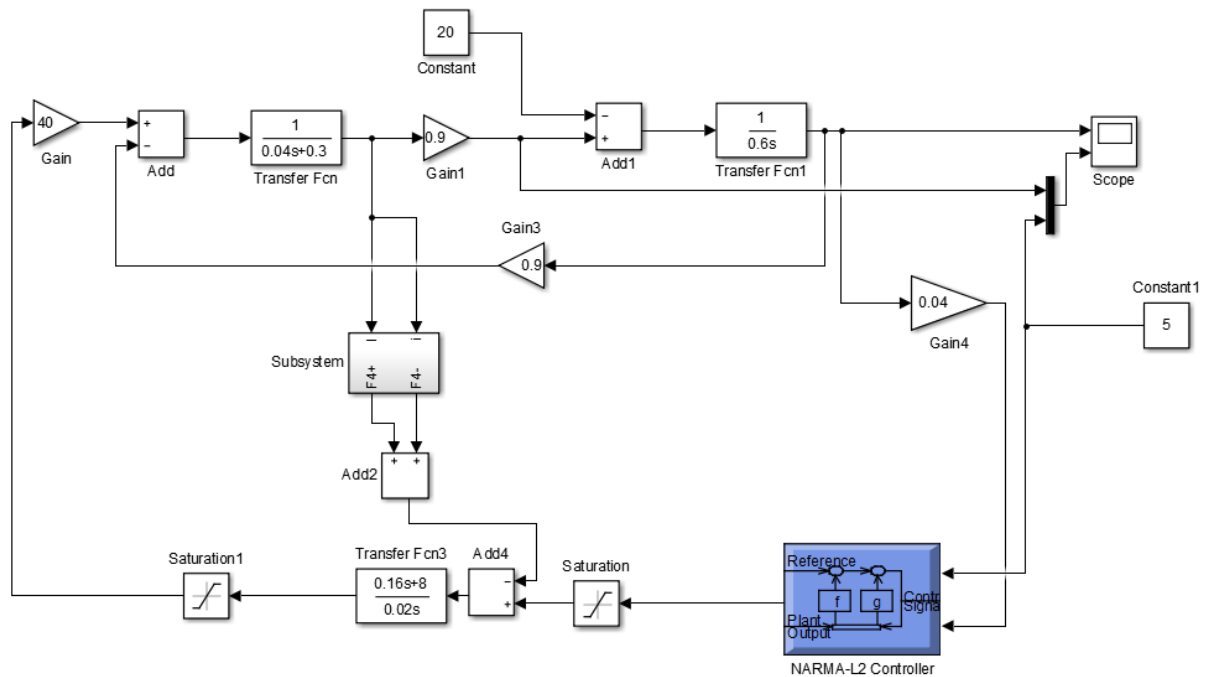


Рис. 13.18. Модель схемы, содержащая нейроконтроллер в качестве регулятора скорости

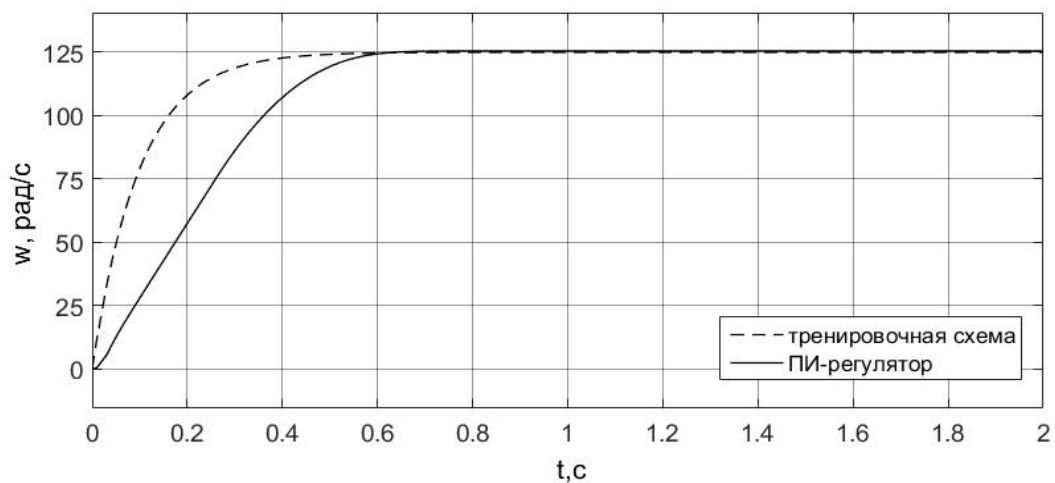


Рис. 13.19. Сравнение характеристик тренировочной схемы и ПИ-регулятора

Как видно из рис. 13.19, тренировочная схема имеет лучшее время переходного процесса. То есть система, при тренировке должна получить большее быстродействие.

Рассмотрим панель настройки нейроконтроллера (рис. 13.20).

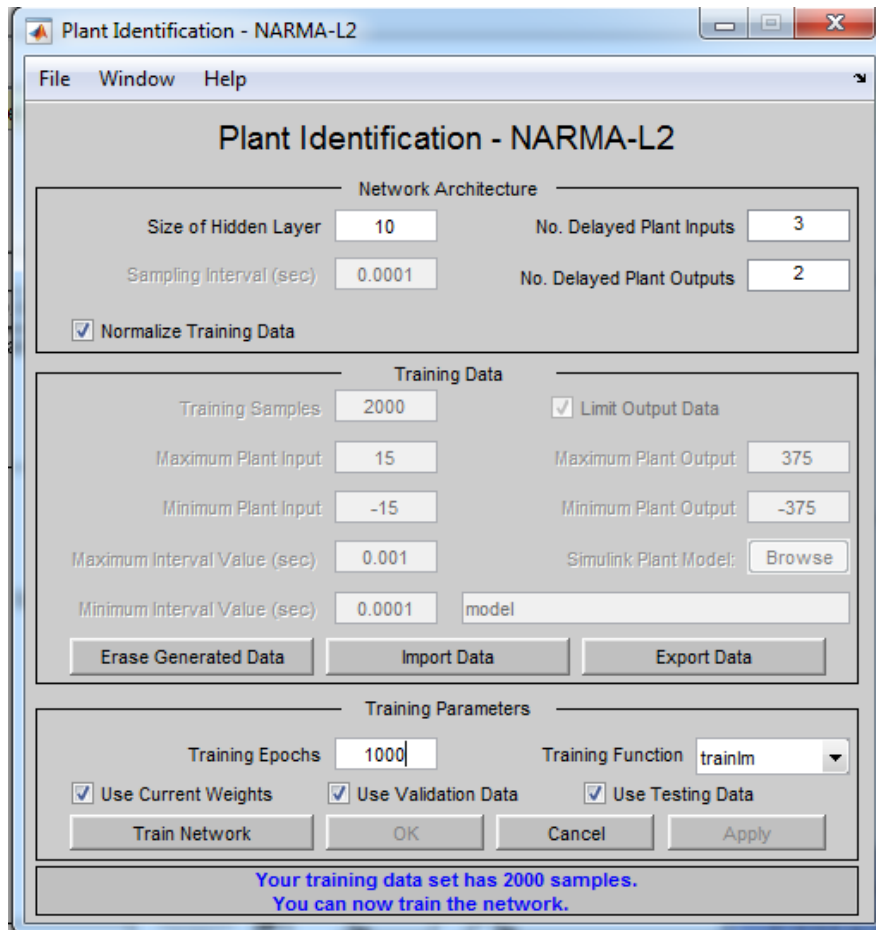


Рис. 13.20. Окно настройки нейросети

Процедура идентификации нейроконтроллера требует задания следующих параметров (рис.13.20):

- Size of Hidden Layer – размер скрытого слоя определяется количеством используемых нейронов;
- Sampling Interval – такт дискретности в секундах между двумя последовательными моментами съема данных;
- No. Delayed Plant Inputs – количество элементов запаздывания на входе модели;
- No. Delayed Plant Outputs – количество элементов запаздывания на выходе модели;

- Normalize Training Data – окно контроля нормирования обучающих данных к диапазону [0 1].
- Параметры обучающей последовательности:
- Training Samples – длина обучающей выборки (количество точек съема информации);
- Maximum Plant Input – максимальное значение входного сигнала;
- Minimum Plant Input – минимальное значение входного сигнала;
- Maximum Interval Value (sec) – максимальный интервал идентификации в секундах;
- Minimum Interval Value (sec) – минимальный интервал идентификации в секундах;
- Limit Output Data – окно контроля, позволяющее ограничить объем выходных данных (только при включенном окне контроля будут доступны два следующих окна редактирования текста);
- Maximum Plant Output – максимальное значение выходного сигнала;
- Minimum Plant Output – минимальное значение выходного сигнала;
- Simulink Plant Model – задание модели Simulink с указанием входных и выходных портов, используемых при нейросетевой модели управляемого процесса;

Параметры обучения:

- Training Epochs – количество циклов обучения;
- Training function – задание обучающей функции;
- Use Current Weights – окно контроля, позволяющее подтвердить использование текущих весов нейронной сети;
- Use Validation/Testing for Training – выбор этих окон контроля означает, что 25 % данных из обучающей последовательности будет использовано для формирования контрольного и тестового множеств соответственно.



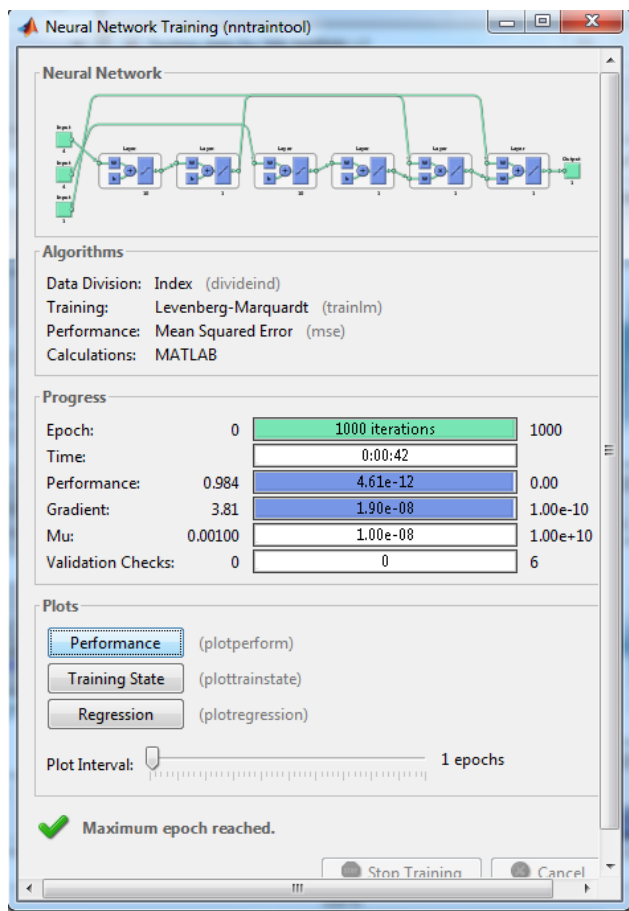
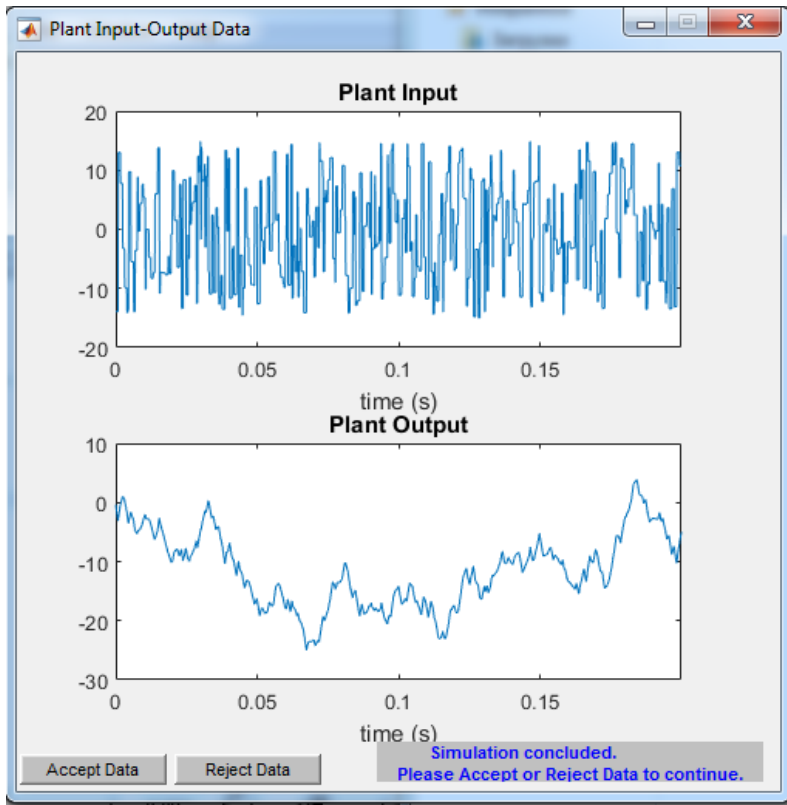


Рис. 13.21. Тестовые сигналы

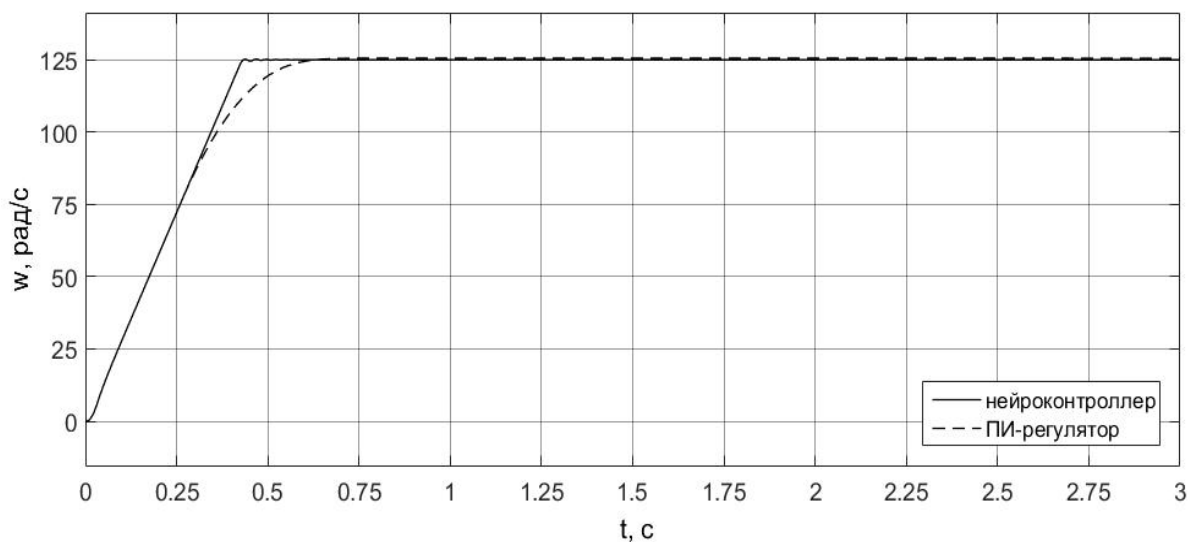


Рис. 13.22. Сравнение характеристик схемы с нейроконтроллером и с ПИ регулятором

Из рис. 13.22 видно, что при использовании нейрорегулятора время переходного процесса стало меньше, чем при использовании ПИ-регулятора.

Проведем сравнение характеристик трех рассмотренных схем.

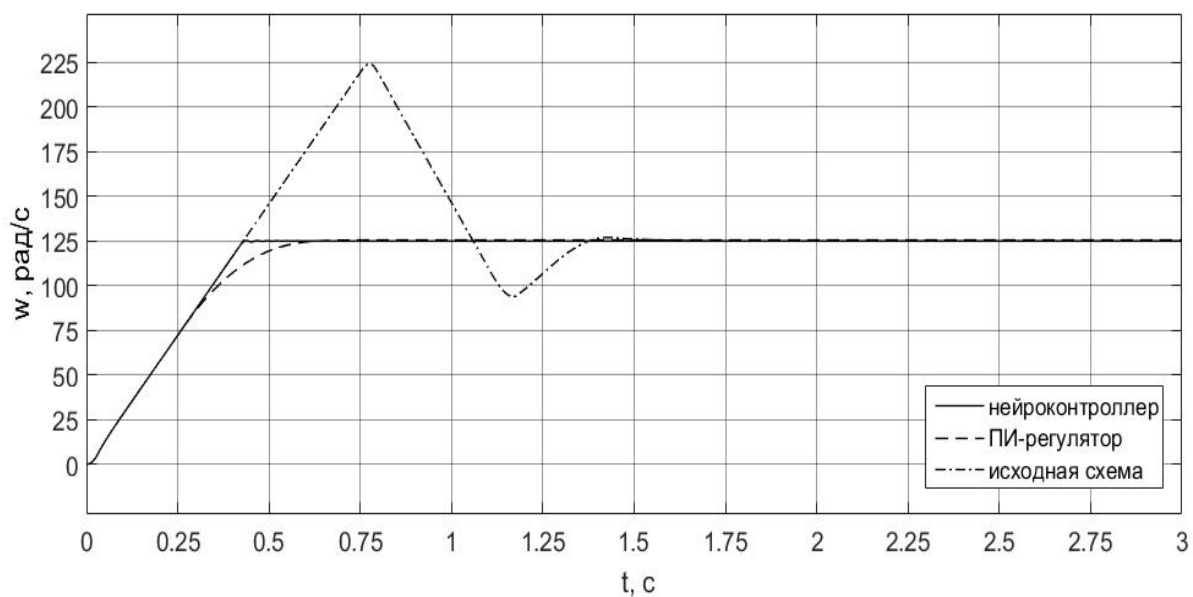


Рис. 13.23. Сравнение работы трех схем

Как видно из рис.13.23, схема с нейрорегулятором имеет самое высокое быстродействие, по сравнению с остальными системами.

### **1. Порядок выполнения работы**

1. Собрать и исследовать модель, представленную на рис. 13.3.
2. Провести настройку ПИ регулятора. Сравнить полученные характеристики с исходными.
3. Составить модель и программу расчета статических характеристик системы (рис. 13.10).
4. Заменить ПИ регулятор нейроконтроллером и провести его настройку.
5. Сравнить полученные характеристики с характеристиками п.1 и п.2. Сделать выводы.

### **2. Содержание отчёта**

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

### **3. Контрольные вопросы**

1. В чем различие статических и динамических характеристики системы?
2. Как зависит момента двигателя от потока возбуждения в установившемся режиме и почему?
3. Назовите преимущества и недостатки использования нейросетей в системах управления.

## **Практическое занятие 14**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**Цель работы:** исследование и расчет характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

На рис. 14.1 представлена модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя.

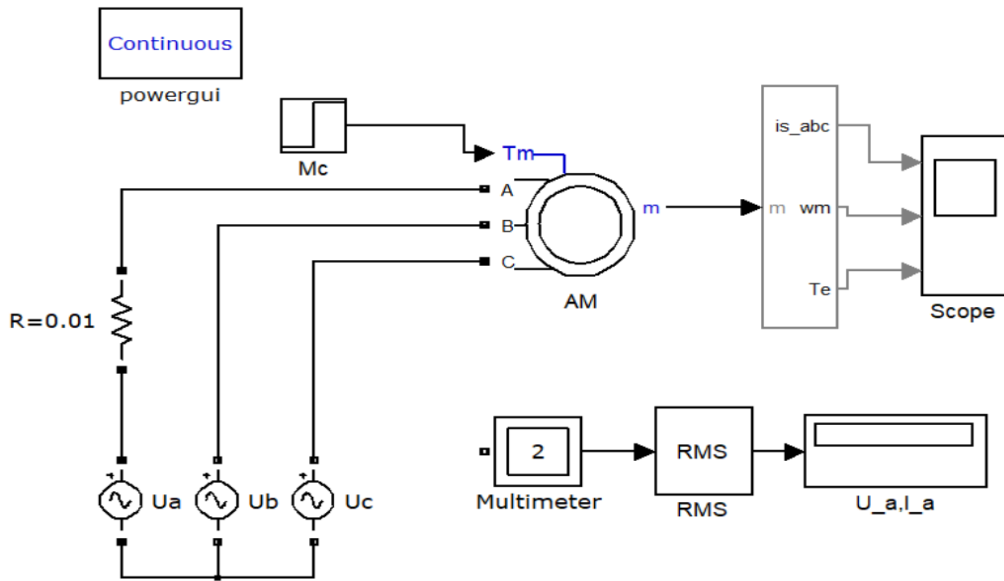


Рис. 14.1. Модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя

Данная модель содержит следующие блоки:

- источник переменного трехфазного напряжения  $U_a, U_b, U_c$ ;
- датчик тока  $R = 0,01$  Ом;
- исследуемая трехфазная асинхронная машина АМ;
- блок RMS для вычисления действующих значений напряжения и тока фазы А;
- блок “Multimeter” для измерения значений напряжения и тока фазы А;
- Осциллограф.

Параметры асинхронного двигателя представлены на рис.14.2.

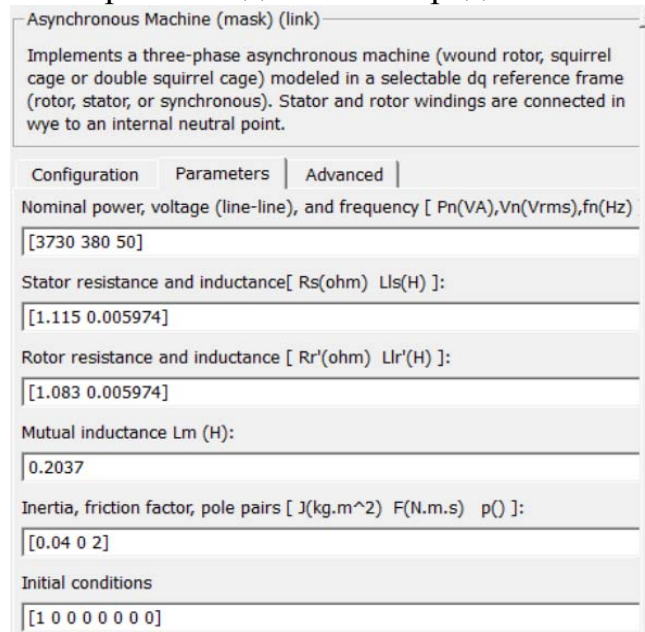


Рис. 14.2. Окно параметров асинхронного двигателя

Окно настройки параметров измерения переменных асинхронного двигателя показано на рис.14.3. В выпадающем меню поля «Machine type» задается тип машины. Флажками выбираются переменные для измерения.

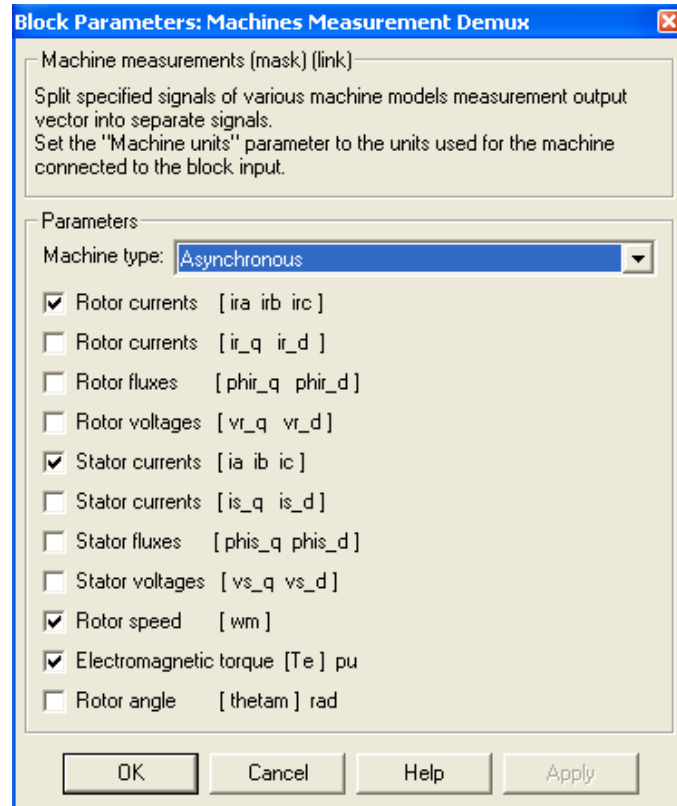


Рис. 14.3. Окно настройки параметров блока измерения

Результаты моделирования представлены на рис. 14.4.

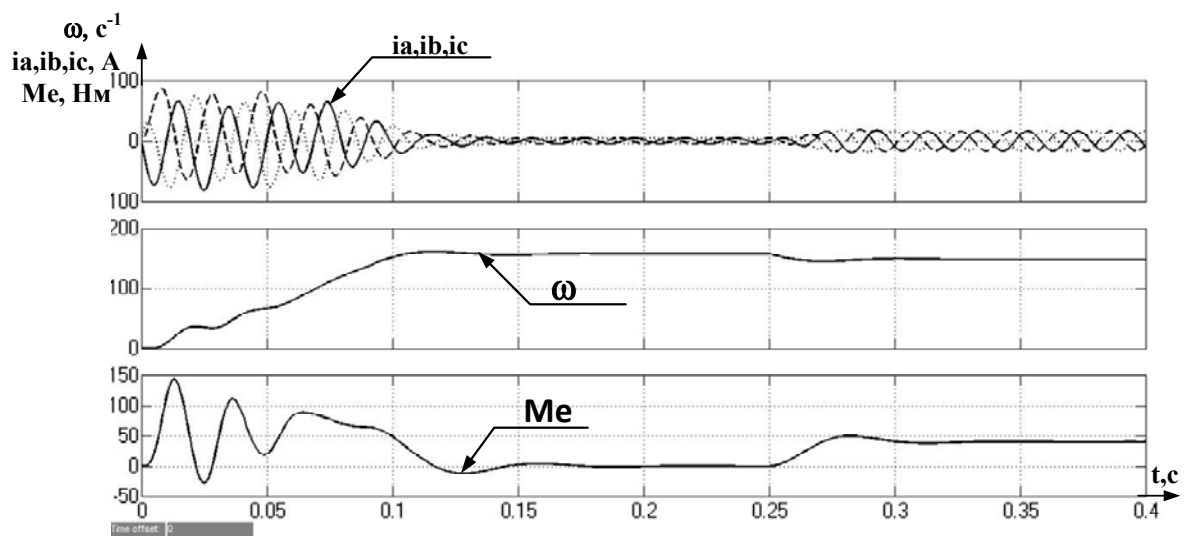


Рис. 14.4. Результаты моделирования процесса пуска

Модель для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя, приведена на рис. 14.5.

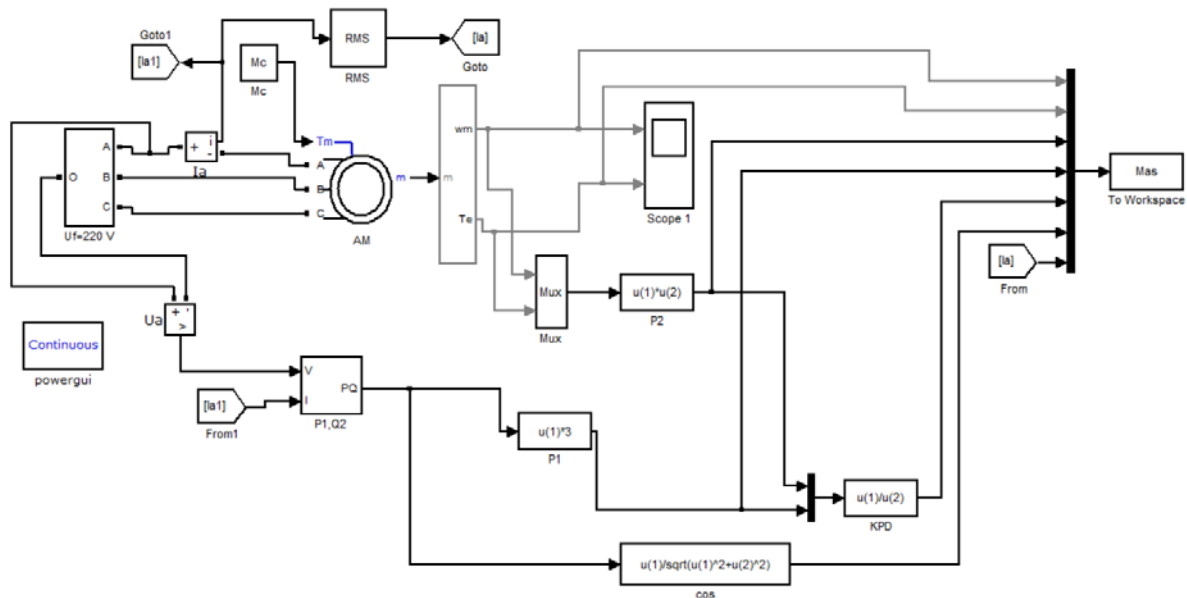


Рис. 14.5. Модель для расчета рабочих характеристик

Программа расчета рабочих характеристик представлена на рис. 14.6.

```

for k=0:1:45;
    Mc=1*(k+1);% величина момента нагрузки;
    sim('ADcarac') % команда обращения к модели;
    A(k+1,1)=Mas(1);% w-частота вращения;
    A(k+1,2)=Mas(2);% Me-Электромагнитный момент;
    A(k+1,3)=Mas(3);% P2-мощность на валу двигателя;
    A(k+1,4)=Mas(4)*0.01;%P1- потребляемая мощность;
    A(k+1,5)=Mas(5)*100;%КПД;
    A(k+1,6)=Mas(6)*100;%cos;
    A(k+1,7)=Mas(7);% Ia-ток в фазе A обмотки двигателя;
end

plot(A(1:k,3),A(1:k,1),'k',A(1:k,3),A(1:k,2),'k',A(1:k,3),A(1:k,7),'k');
hold on;

plot(A(1:k,3),A(1:k,4),'k',A(1:k,3),A(1:k,5),'k',A(1:k,3),A(1:k,6),'k');
hold on;
grid on;

```

Рис. 14.6. Программа расчета рабочих характеристик

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.14.7) показывают зависимость его эксплуатационных параметров от мощности на валу  $P_2$ . К этим параметрам относят ток  $I_a$ , активную мощность  $P_1$ , КПД, частоту вращения ротора и коэффициент мощности двигателя.

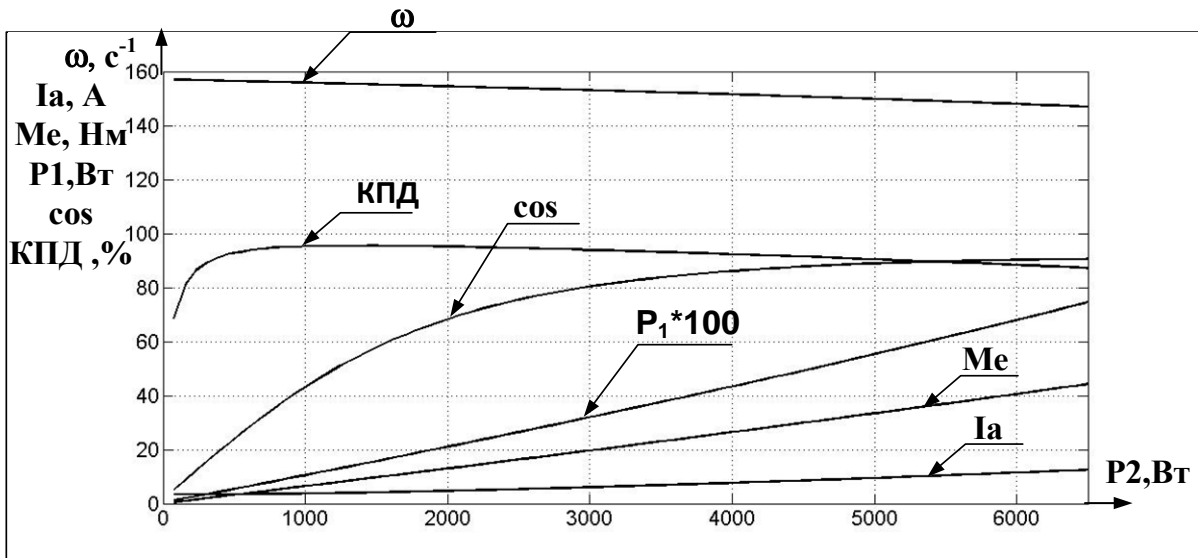


Рис. 14.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

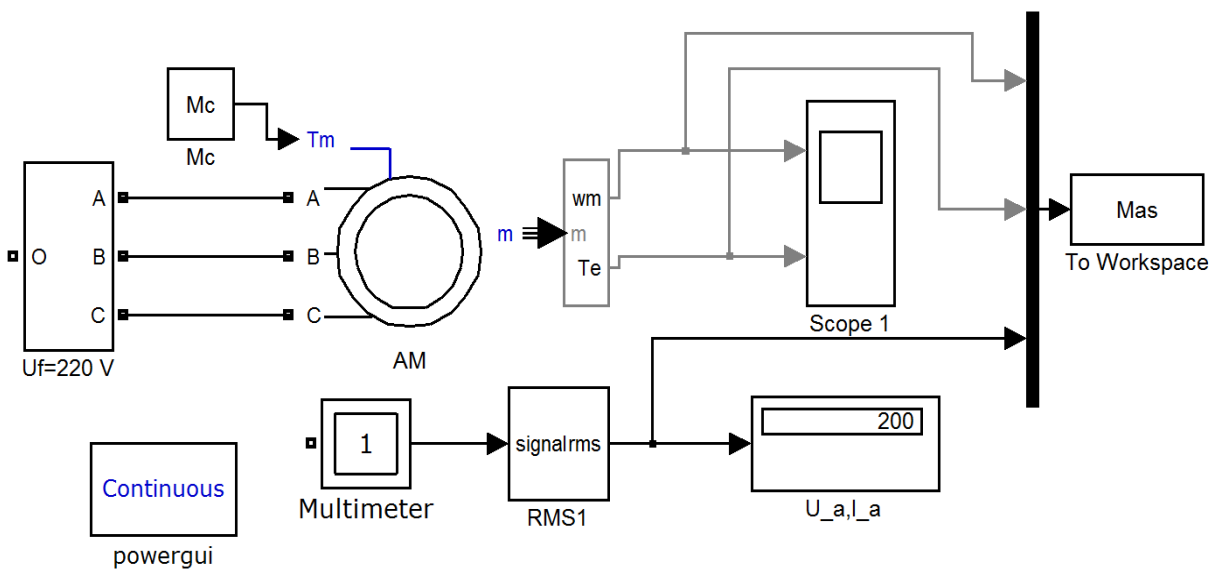


Рис. 14.8. Модель для расчета механических характеристик

Программа расчета механических характеристик асинхронного двигателя представлена на рис. 14.9.

```

for k1=0:1:2;
    U=220-k1*10; );% U-напряжение в фазах статорной обмотки
двигателя;
    for k=0:1:79;
        Mc=0.5*(k+1);% величина момента нагрузки;
        sim('ADcaracM') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Mas(1);% w-частота вращения;
        A(k+1,2)=Mas(2);% Me-Электромагнитный момент;
        A(k+1,3)=Mas(3);% Ua-напряжение в фазе A обмотки двига-
теля;
    end
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k');
    hold on;
end
grid on;

```

Рис. 14.9. Программа расчета механических характеристик

Механические характеристики асинхронного двигателя для разных величин напряжения питания представлены на рис. 14.10.

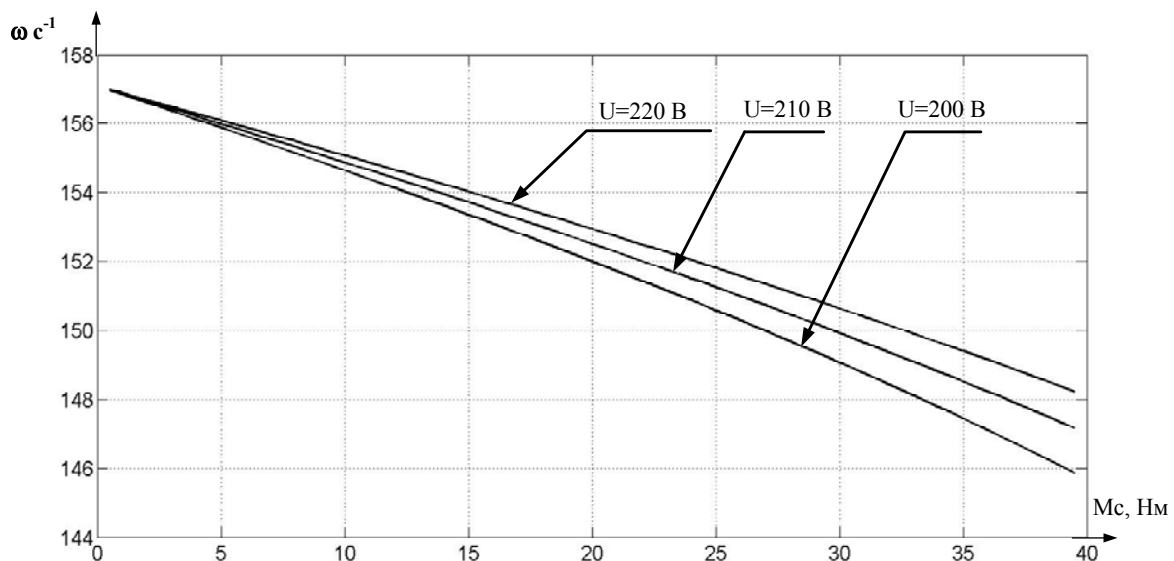


Рис. 14.10. Механическая характеристика асинхронного двигателя при  $U = \text{var}$

Рассмотрим построение механических характеристик асинхронного двигателя при выполнении условия  $U/f = \text{const}$ . Модель представлена на рис. 14.11.



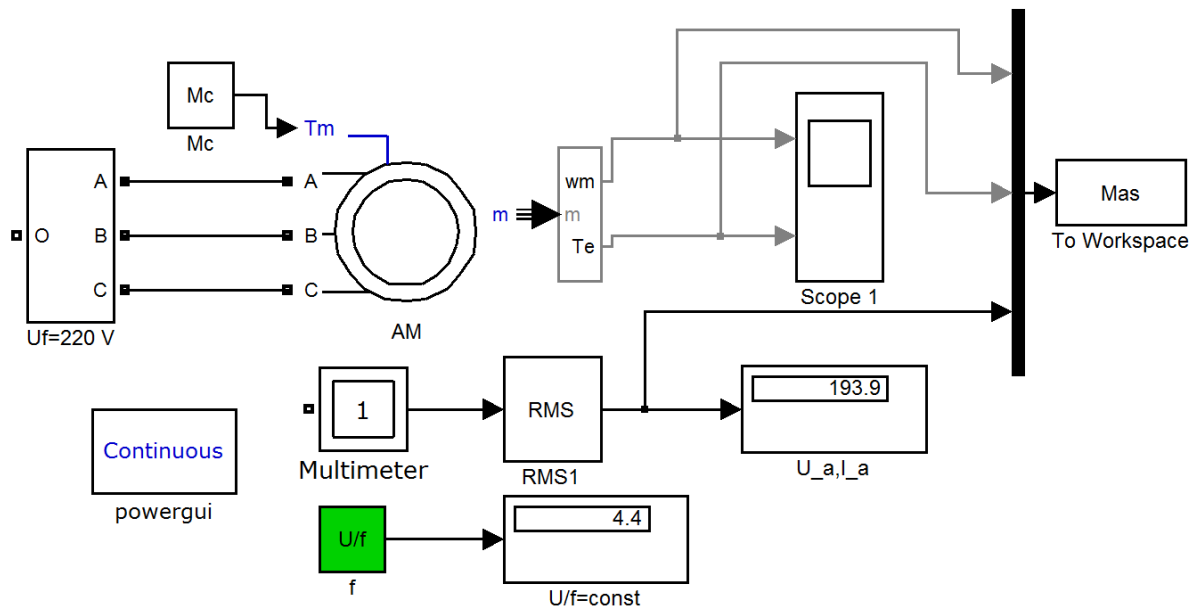


Рис. 14.11. Модель для расчета механических характеристик АД при выполнении условия  $U/f = \text{const}$

В блоках модели (рис. 14.11)  $U_f$ , AM, RMS1 вместо частоты 50 Гц необходимо поставить переменную  $f$ . Программа расчета механических характеристик при выполнении условия  $U/f = \text{const}$  представлена на рис. 14.12.

```

for k1=0:1:2;
    U=220-k1*10;
    f=U/4.4;
    for k=0:1:99;
        Mc=0.5*(k+1); % величина момента нагрузки;
        sim('ADcaracMF') % команда обращения к модели;
        A(k+1,1)=Mas(1); % w-частота вращения;
        A(k+1,2)=Mas(2); % Me-Электромагнитный момент;
        A(k+1,3)=Mas(3); % Ua-напряжение в фазе A обмотки двигателя;
    end
    plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k');
    hold on;
end
grid on;

```

Рис. 14.12. Программа расчета механических характеристик при  $U/f = 4.4$

При изменении частоты ( $f$ ) тока значение максимального вращающего момента будет постоянным, а механическая характеристика двигателя-жесткой (рис. 14.13) при выполнении условия  $U/f = \text{const}$ .

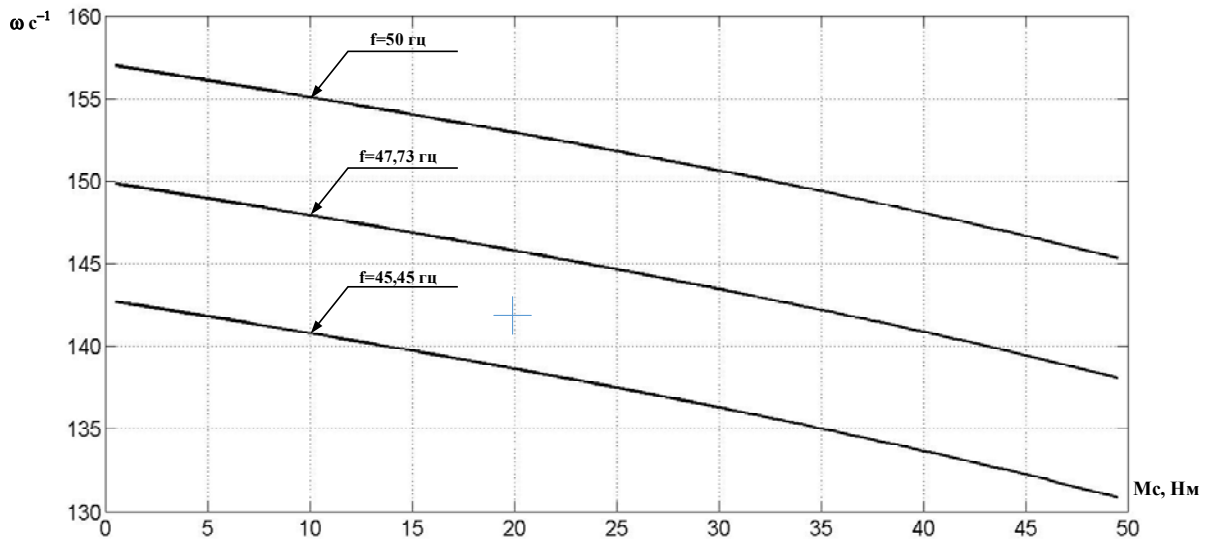


Рис. 14.13. Механических характеристик при выполнении условия  $U/f = 4.4$ ;  $U = 220$  В

### 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать рассмотренные модели
2. Провести расчет характеристик системы
3. Сделать выводы.

### 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

### 3. Контрольные вопросы

1. В чем различие статических и динамических характеристик асинхронного двигателя?
2. Назовите преимущества и недостатки асинхронного двигателя.
3. С какой целью в АД проводят регулирование частоты вращения при выполнении условия  $U/f = \text{const}$ ?

## Практическое занятие 15

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

**Цель работы:** исследование и расчет магнитной цепи в Matlab.

Участок магнитной цепи характеризуется вебер-амперной характеристикой, т.е. зависимостью магнитного потока  $\Phi$  от магнитного напряжения на этом участке  $Hl$ , где  $H$  – напряжённость магнитного поля, а  $l$  – длина участка. В замкнутом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных напряжений всех участков равна алгебраической сумме намагничивающих (магнитодвижущих) сил всех катушек  $iw$ ,

$$\sum Hl = \sum iw,$$

где  $i$  – ток в катушке, а  $w$  – число витков [1].

Вебер-амперная характеристика неразветвлённой магнитной цепи представляет собой зависимость  $\Phi(iw)$ . Её можно построить, если известны кривая намагничивания  $B(H)$  ферромагнитного материала, из которого сделан магнитопровод и его геометрические размеры: площадь поперечного сечения  $S$  и длина средней линии  $l$  каждого участка.

Задаваясь рядом произвольных значений магнитной индукцией  $B_1$  для одного из участков магнитной цепи, находим по кривой намагничивания напряжённость  $H_1$  на этом участке, магнитный поток  $\Phi = B_1 S_1$  и магнитное напряжение  $H_1 l_1$  на этом участке. Считая магнитный поток вдоль всей неразветвленной цепи одинаковым находим далее магнитную индукцию на втором участке  $B_2$  и находим аналогично  $H_2$ , и  $H_2 l_2$ . Повторяем этот расчёт для всех участков замкнутой магнитной цепи, находим  $\sum Hl = iw$  и строим график  $\Phi(iw)$ . Для воздушных зазоров магнитной цепи при определении  $H$  вместо кривой намагничивания используем зависимость  $H = B/\mu_0$ , где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  – магнитная проницаемость пустоты.

Необходимые для расчёта размеры сердечника приведены на рис. 15.1, а кривая намагничивания феррита М2000НМ – на рис. 15.2.

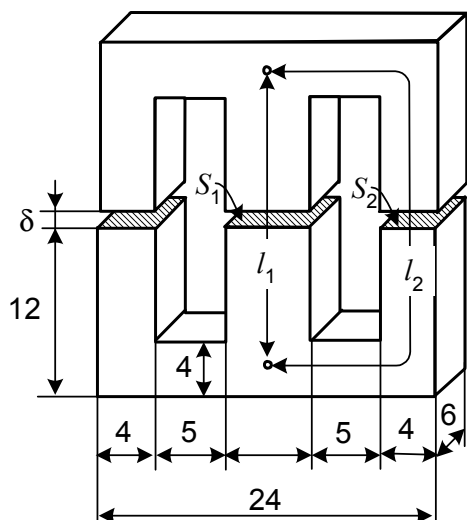


Рис. 15.1. Размеры сердечника

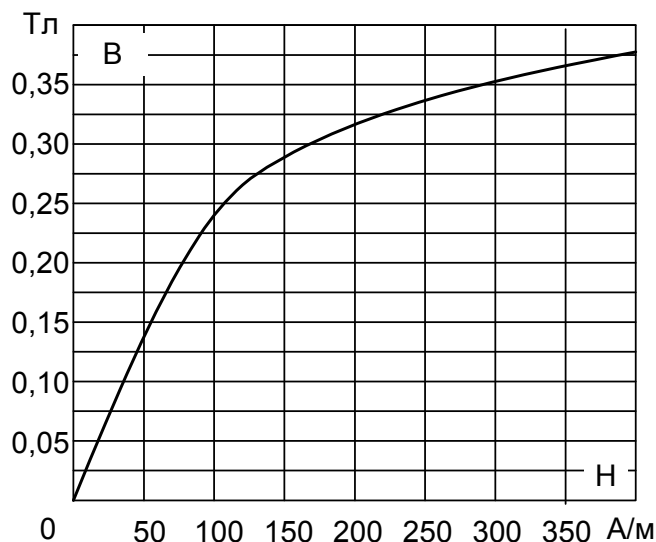


Рис. 15.2. Кривая намагничивания феррита

При расчёте магнитной цепи в силу её симметрии две крайних ветви объединяются в одну ветвь удвоенного сечения. Порядок расчёта следующий: По размерам, указанным на рис. 15.1 определяем длины средних линий участков магнитной цепи  $l_1$  и  $l_2$  (при  $\delta = 0$ ), а также их сечения  $S_1$  и  $S_2$ .

Расчёт вебер-амперных характеристик магнитной цепи без зазора и с одним из зазоров можно представить в форме следующей таблицы.

$B_1$ , Тл	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35
$H_1$ , А/м (по рис. 15.2)					
$H_1 l_1$ , А					
$\Phi = B_1 S_1$ , Вб					
$B_2 = \Phi / S_2$ , Тл					
$H_2$ , А/м (по рис. 15.2)					
$H_2 l_2$ , А					
$I_w = H_1 l_1 + H_2 l_2$ , А (при $\delta = 0$ )					
$H_{\delta 1} = B_1 / \mu_0$ , А/м					
$H_{\delta 2} = B_2 / \mu_0$ , А/м					
$I_w = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\delta 1} \delta + H_{\delta 2} \delta$ , А					

Для расчета необходимо провести аппроксимацию функции  $V = f(H)$ . Программа представлена на рис. 15.3.

```
%Рассмотрим аппроксимацию функции V=f(H)
H=[0 25 50 100 150 200 250 300 350 400]';
V=[0 0.075 0.125 0.2375 0.2875 0.325 0.3375 0.35 0.3625
0.375]';
p=polyfit(V,H,5) %вычислим коэффициенты аппроксимирующего по-
линома степени 5
f=polyval(p,V); %вычислим значения полинома в точках сетки
f=polyval(p,V);
plot(V,H,'ob',V,f,'-k')
grid
```

Рис. 15.3. Программа аппроксимации функции  $V = f(H)$  полиномом пятой степени

Для использования алгоритма расчета необходимо получить зависимость  $H = f(V)$ . Результат расчета представлен на рис. 15.4.

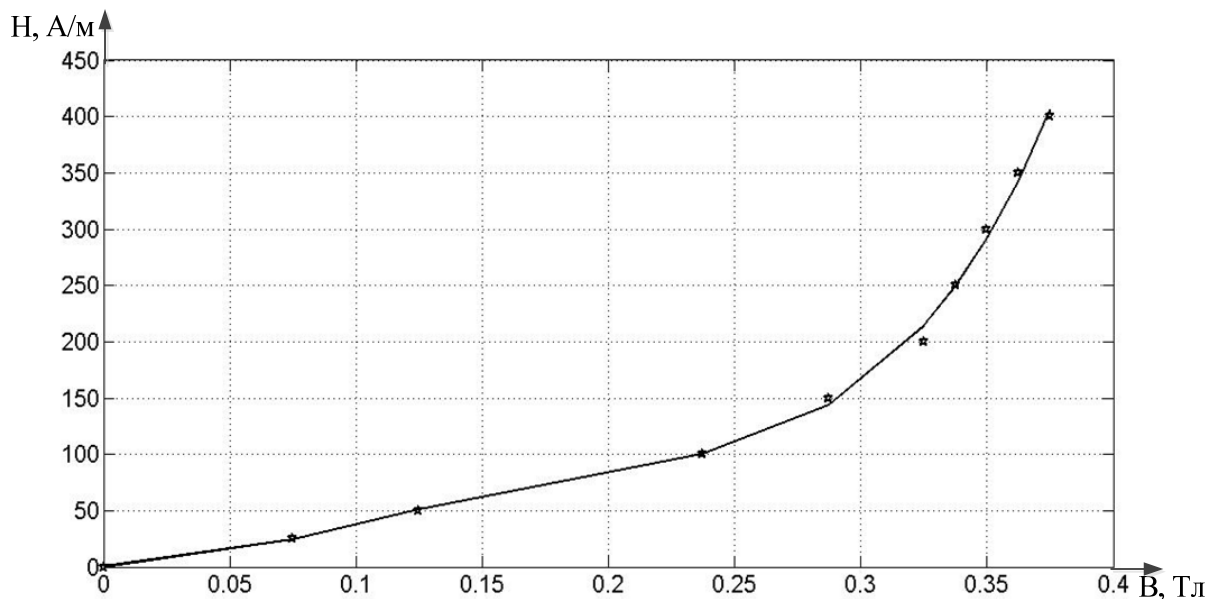


Рис. 15.4. Аппроксимация функции  $H = f(V)$  полиномом пятой степени

Программа расчета вебер-амперной характеристики магнитной цепи, представляющая собой зависимость  $\Phi(iw)$ , представлена на рис. 15.5.

```

%Расчет вебер-амперной характеристики  $\Phi = f(IW)$ 
H=[0 25 50 100 150 200 250 300 350 400]';
V=[0 0.075 0.125 0.2375 0.2875 0.325 0.3375 0.35 0.3625
0.375]';
p=polyfit(V,H,5) %вычислим коэффициенты аппроксимирующего по-
линома степени 5
f=polyval(p,V); %вычислим значения полинома в точках сетки
table=[V H f H-f] %сформируем следующую таблицу данных
f=polyval(p,V);
l1=24e-3; l2=l1+10e-3; S1=6e-3*6e-3; S2=4e-3*6e-3;
m0=4*3.14e-7;
B1=[0.1 0.2 0.25 0.3 0.35]';
H1=polyval(p,B1);
F=B1*S1;
B2=F/S2;
H2=polyval(p,B2);
IW=H1*l1+H2*l2;
HD1=B1/m0; HD2=B2/m0; d1=0.1e-3;
IW1=H1*l1+H2*l2+HD1*d1+HD2*d1;
plot(IW,F,IW1,F)
grid

```

Рис. 15.5. Программа расчета вебер-амперной характеристики  $\Phi = f(IW)$

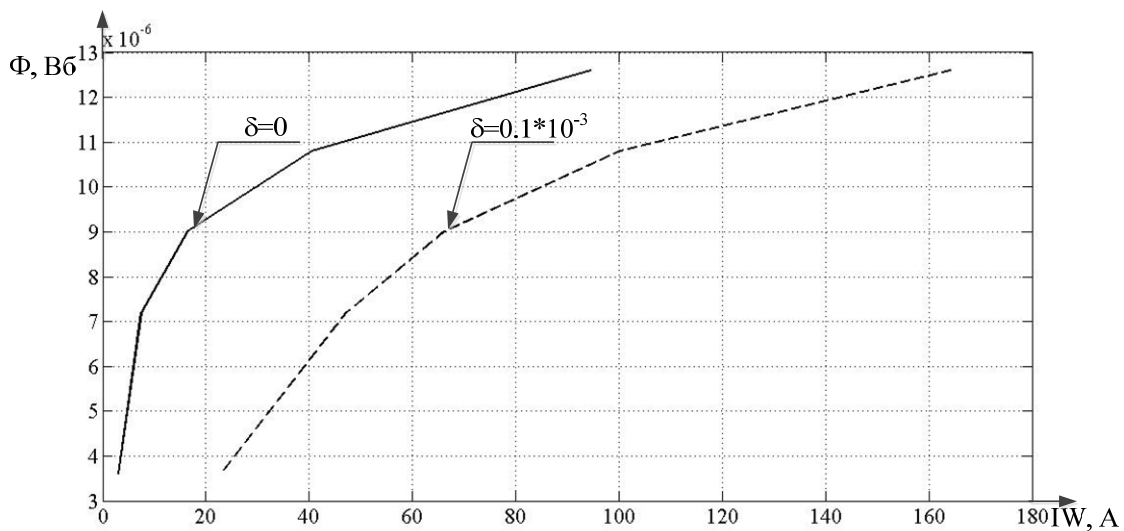


Рис. 15.6. Вебер-амперная характеристика магнитной цепи

## 1. Порядок выполнения работы

1. Составить необходимые программы.
2. Провести аппроксимацию и расчет характеристик
3. Сделать выводы.

## 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Программы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

## 3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон полного тока для магнитной цепи.
2. С какой целью необходимо выполнять магнитную цепь с наименьшим зазором?
3. Что называется магнитодвижущей силой цепи (МДС)?
4. Как определить направление МДС?

## Практическое занятие 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Цель работы:** исследование и моделирование тормозных режимов в Matlab.

Помимо основного (двигательного) режима работы в двигателях постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения возможны тормозные режимы [8].

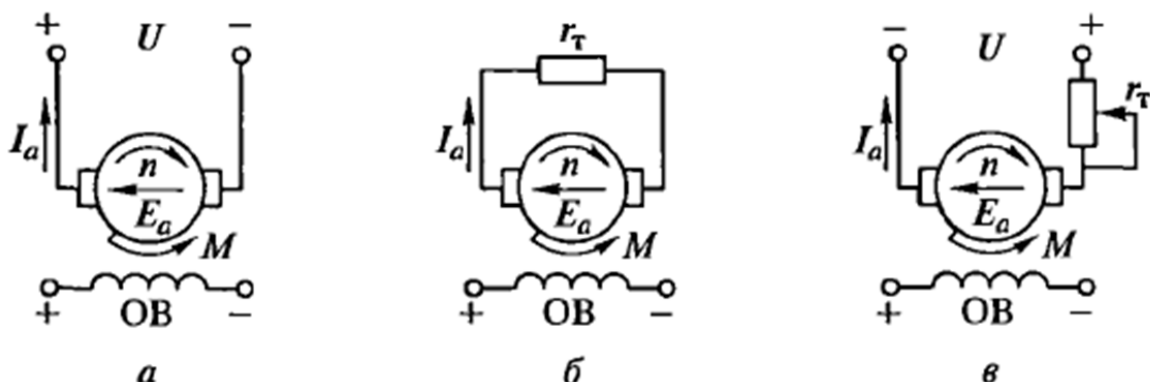


Рис. 16.1. Тормозные режимы двигателя постоянного тока независимого возбуждения: а – генераторный рекуперативный; б – динамический; в – противоключением

Генераторное рекуперативное торможение наступает, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения холостого хода  $n_0$ .

В этих условиях ЭДС машины  $E_a = C_e \Phi n_0$  превышает напряжение питающей сети ( $E_a > U_n$ ), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление на противоположное. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть. Электромагнитный момент двигателя становится тормозящим и противодействует внешнему вращающему моменту, создаваемому силами инерции вращающегося с прежней скоростью якоря (рис. 16.1а). Этот процесс торможения будет продолжаться до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения  $n_0$ .

Таким образом, для перехода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется изменений в схеме включения двигателя.

Генераторное рекуперативное торможение является наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в электроприводе. Он целесообразен в электро-транспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

Возможен способ перевода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения и при установившейся частоте вращения якоря. Для этого необходимо увеличить в двигателе магнитный поток возбуждения, т.е. ток в обмотке возбуждения.

Из выражения ЭДС якоря  $E_a = C_e \Phi n_0$  следует, что с ростом магнитного потока возбуждения  $\Phi$  при неизменной частоте вращения  $n$  ЭДС якоря  $E_a$  увеличивается, что ведет к уменьшению тока в цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_{яц} + R_{доб}} = \frac{U - C_e \Phi n}{r_{яц} + R_{доб}}$$

При ЭДС  $E_a = U$  ток якоря  $I_a = 0$ , а частота вращения якоря достигает значения  $n = n_0$ . При дальнейшем увеличении потока возбуждения  $\Phi$ , а следовательно, возрастании ЭДС якоря  $E_a$  пограничная частота вращения снижается, а частота вращения якоря, оставаясь практически неизменной за счет сил инерции вращающихся частей электропривода, начинает превышать пограничную частоту  $n_0$ . При этом ЭДС якоря превышает напряжение сети и двигатель переходит в режим генераторного рекуперативного торможения.



Необходимость в динамическом торможении возникает в том случае, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться. Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор  $R_f$ , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не возвращается в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении

$$R = r_{яц} + R_f$$

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не меняет своего направления, но поскольку якорь отключен от сети ( $U = 0$ ), то ток якоря изменит направление, так как будет создаваться ЭДС  $E_a$

$$I_a = \frac{U - E_a}{R} = \frac{-E_a}{R}$$

т.е. станет отрицательным. В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет тормозящим (рис. 16.1, б). Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ( $n = 0$ ).

Рассмотрим торможение противовключением. Допустим, что двигатель работает в основном (двигательном) режиме с номинальной нагрузкой. При отключении двигателя от сети вращающий момент  $M = 0$ , но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т.е. произойдет выбег двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют торможение противовключением. С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ( $-U$ ). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря  $E_a$  также не меняет своего направления и действует согласно напряжению ( $-U$ ), при этом ток якоря создается суммой напряжения сети  $U$  и ЭДС якоря  $E_a$  (рис. 16.1, в):

$$I_a = \frac{-U - E_a}{r_{яц} + R_{доб}}$$

где  $R_{доб}$  – сопротивление резистора в цепи якоря двигателя.

В этих условиях электромагнитный момент станет отрицательным.

Под действием тормозящего момента –  $M_T$ , частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения. Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет реверсирование двигателя и его якорь под действием момента, который прежде был тормозным, начнет вращение в противоположную сторону. При этом двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента. Модель для этого режима представлена на рис. 16.2.

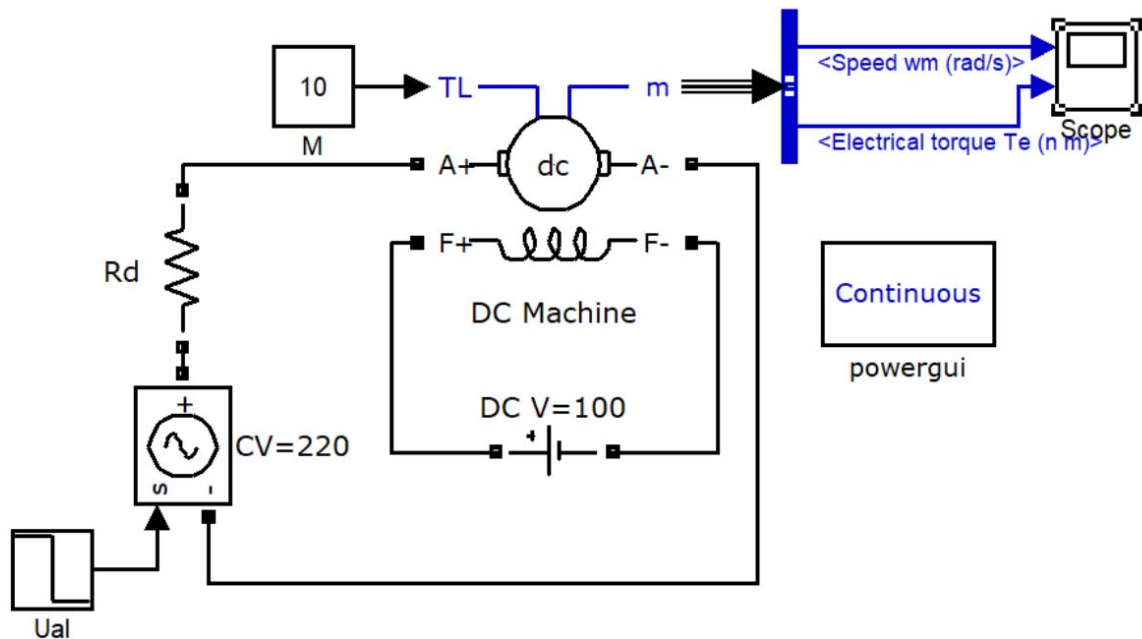


Рис. 16.2. Модель режима торможения противовключением с переходом в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения

Результаты моделирования (рис. 16.2), показывают, что двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

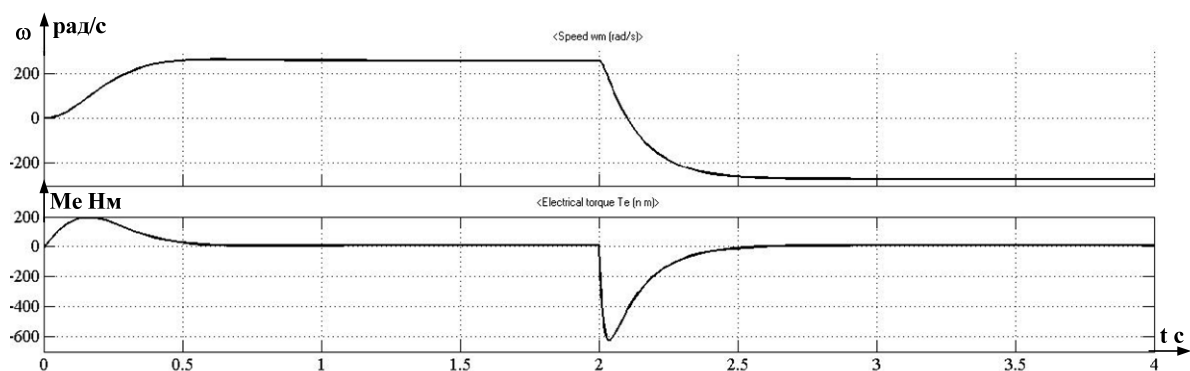


Рис. 16.3. Результаты моделирования режима торможения противовключением

Во избежание нежелательного реверсирования операцию торможения противовключением автоматизируют, чтобы при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключалась от сети.

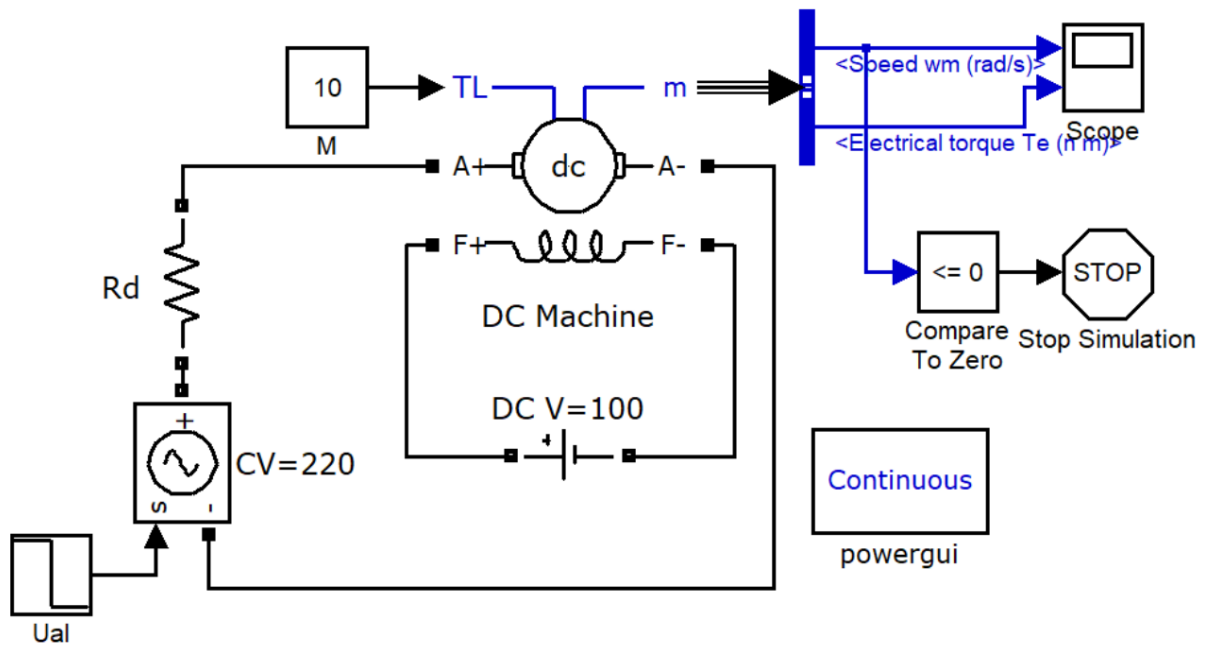


Рис. 16.4. Модель режима торможения противовключением без перехода в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения

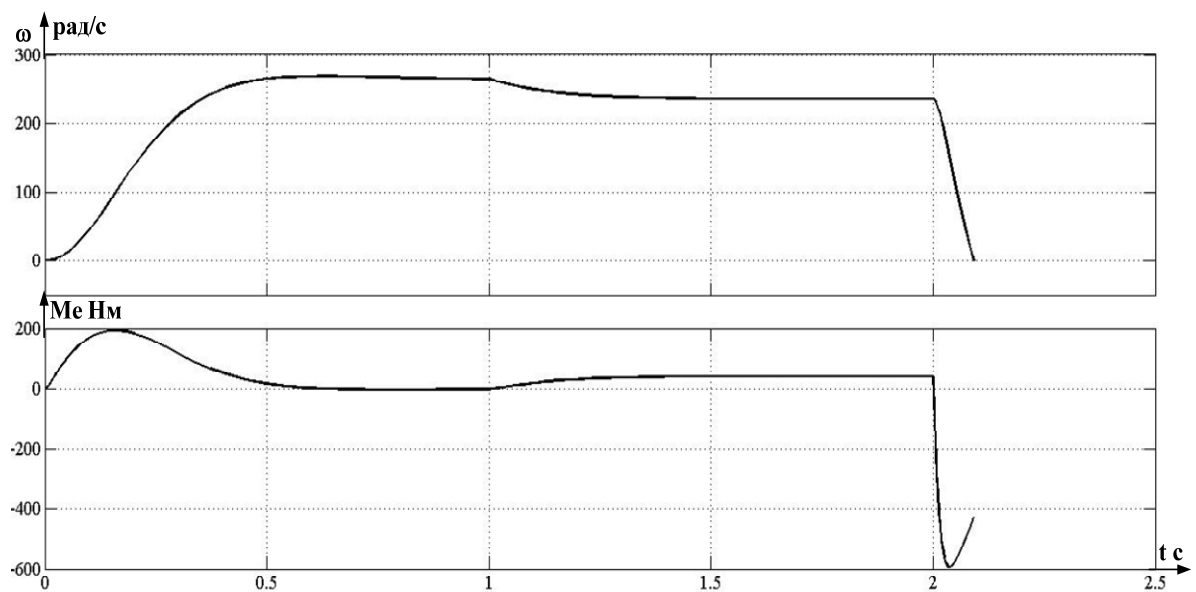


Рис. 16.5. Результаты моделирования режима торможения противовключением

Анализ рисунка 16.5 показывает, что максимальный момент (ток) при торможении противовключением увеличивается примерно в три раза. Для ограничения тока при торможении составим модель с введением дополнительного сопротивления  $R_f$  в цепь якоря.

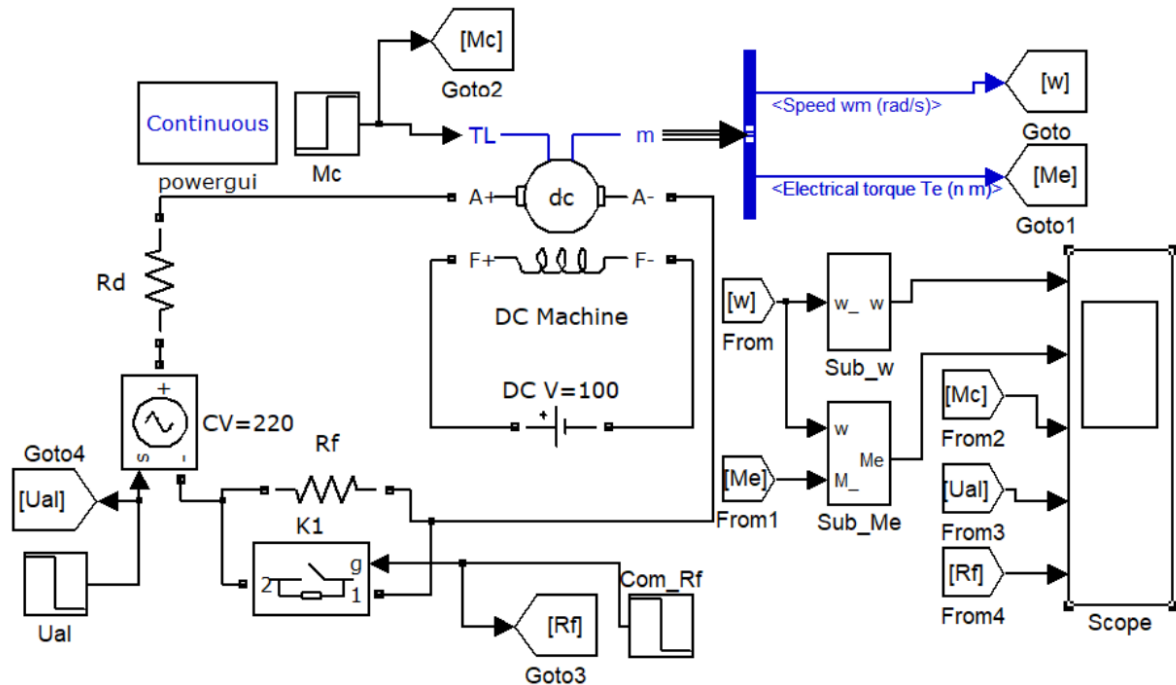


Рис. 16.6. Модель режима торможения противовключением с включением  $R_f$

В модели используются две подсистемы схемы которых, представлены на рис. 16.7.

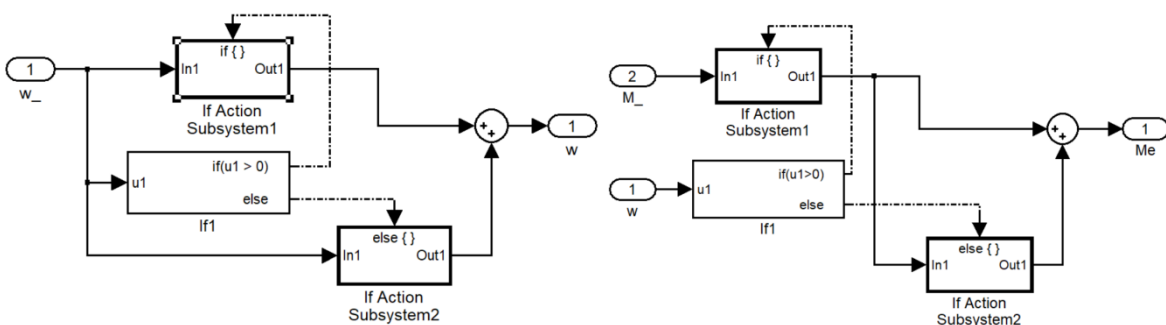


Рис. 16.7. Модели подсистем

Первая подсистема  $Sub\_w$  осуществляет отключение модели при отрицательной частоте вращения. Вторая  $Sub\_Me$  обнуляет значение электромагнитного момента при  $\omega = 0$ .

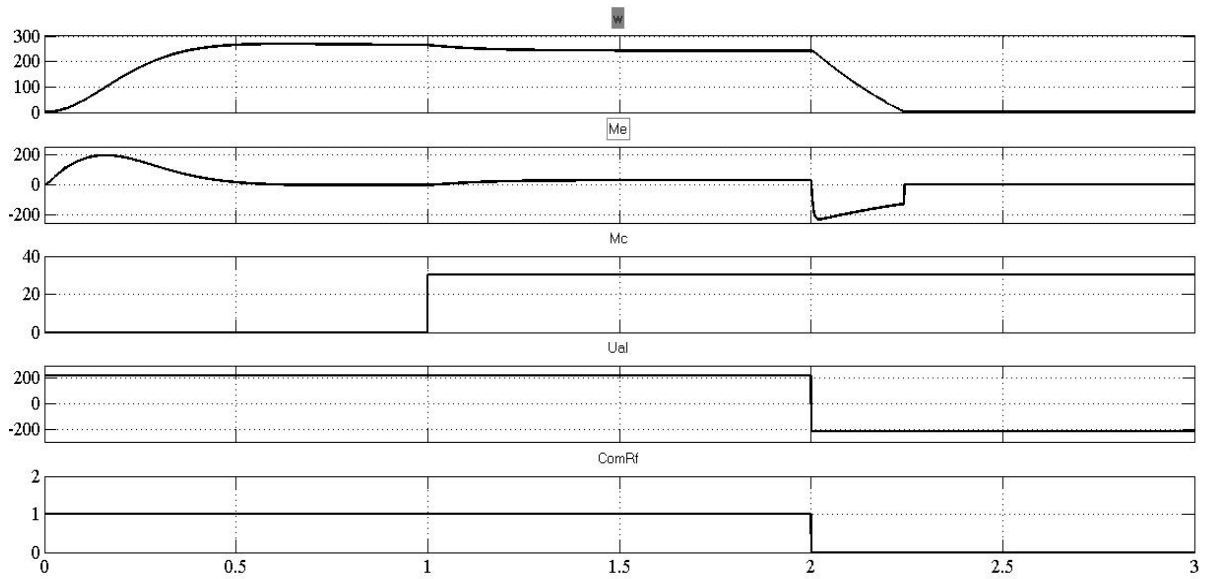


Рис.16.8.Результаты моделирования режима торможения противовключением с включением  $R_f$

Для исследования влияния величины дополнительного сопротивления  $R_f$  на время торможения служит модель, представленная на рис. 16.9.

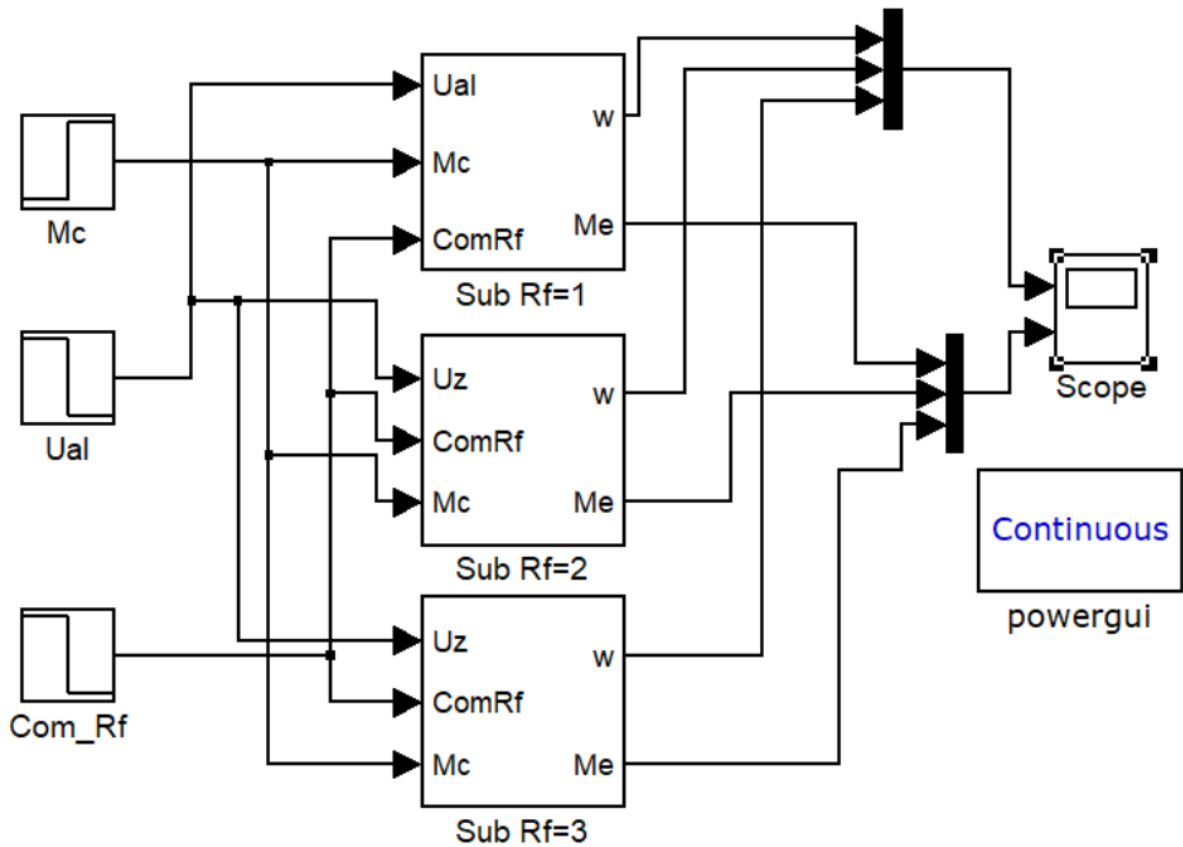


Рис. 16.9. Модель исследования влияния величины дополнительного сопротивления  $R_f$  на время торможения

Модель подсистемы «Sub Rf=1» представлена на рис. 16.10. Величина  $R_f=1$  Ом. В подсистеме «Sub Rf=2»  $R_f=2$  Ом, и в подсистеме «Sub Rf=3»  $R_f=3$  Ом.

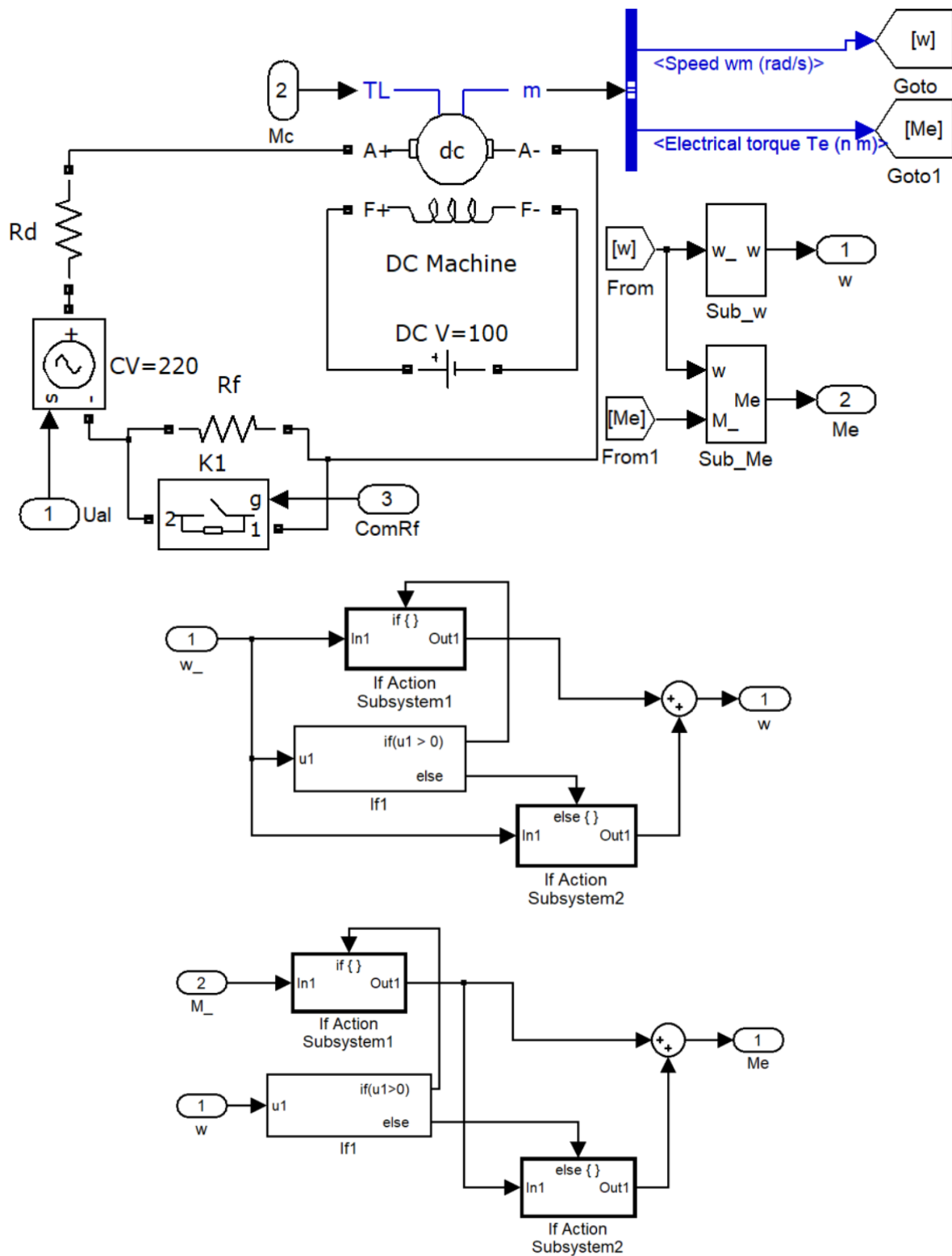


Рис. 16.10. Модель подсистемы для исследования влияния величины дополнительного сопротивления  $R_f$  на время торможения

Результаты моделирования представлены на рис. 16.11.

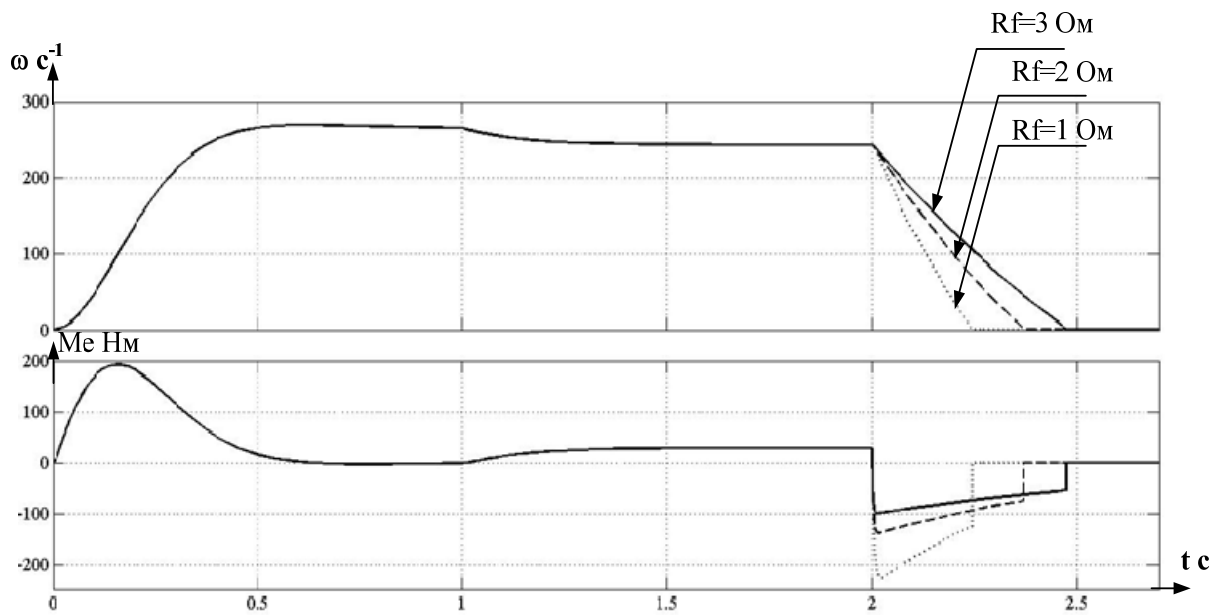


Рис. 16.11. Исследования влияния величины дополнительного сопротивления  $R_f$  на время торможения

### 1. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать модели.
2. Провести моделирование
3. Сделать выводы.

### 2. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

### 3. Контрольные вопросы

1. В чем различие двигательного режима от режимов торможения?
2. Как изменить направление момента двигателя?
3. В каких случаях необходимо использовать торможение двигателя?

## Практическое занятие 17

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕРА

**Цель работы:** исследование и моделирование системы управления электропривода с асинхронным двигателем при использовании нейроконтроллера в Matlab.

Структурная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением изображена на рис. 17.1 [2].

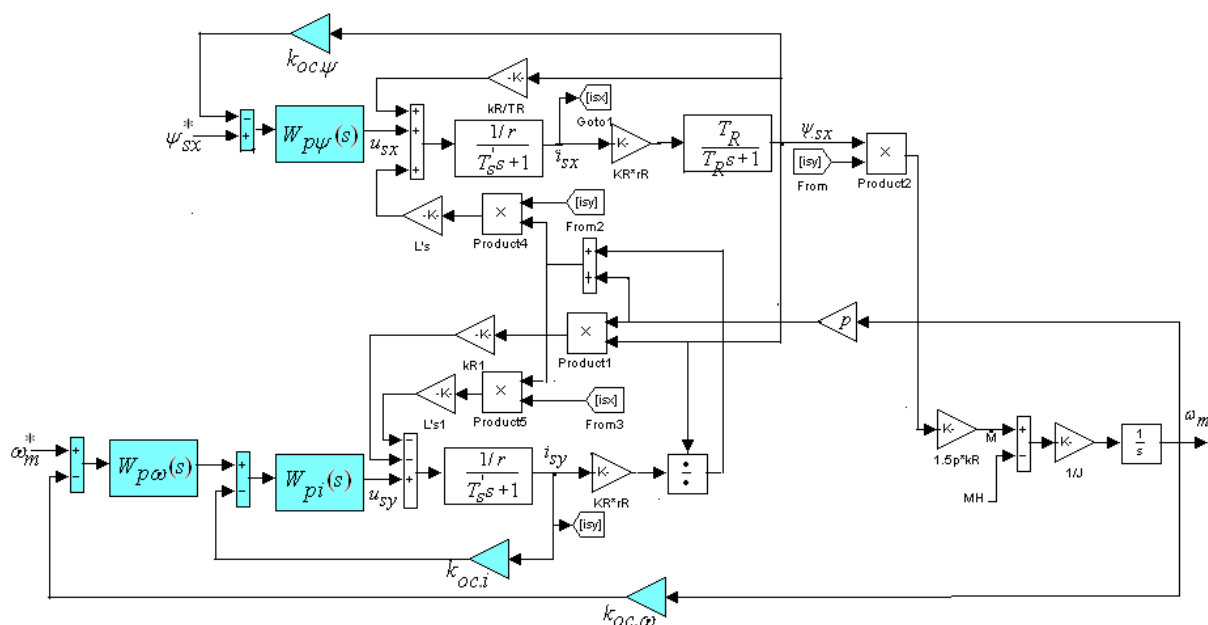


Рис. 17.1. Структурная схема замкнутой асинхронной системы с векторным управлением

В канале регулирования потокосцепления ротора, обычно,  $T_R \gg T'_s$ , поэтому в роли регулятора потокосцепления логично выбрать ПИ – регулятор, обладающий следующей передаточной функцией :

$$H_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s} \quad (17.1),$$

тогда для исполнения в этом канале оптимума по модулю коэффициент усиления регулятора определяется из уравнения:

$$k_{p\psi} = \frac{r}{2T'_s k_r R_r k_{oc,\psi}} \quad (17.2)$$



Подсчитанный таким методом ПИ – регулятор компенсирует перекрестные связи в канале  $x$  [2].

Для компенсации влияния перекрестных связей в канале  $y$  надо также выбрать ПИ -регулятор ,обладающий передаточной функцией

$$H_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_s + 1)}{T'_s s} \quad (17.3)$$

В таком случае передаточная функция замкнутого токового контура в канале  $y$  будет рассчитываться по следующему закону:

$$H_i(s) = \frac{1}{k_{oc.i}} \frac{1}{\frac{T'_s r}{k_{pi} k_{oc.i}} s + 1} \approx \frac{1}{k_{oc.i}} \quad (17.4)$$

при  $k_{pi} \gg 1$ .

При компенсированных перекрестных связях канал  $y$ , который отвечает за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока. Для того, чтобы придать этой системе свойство астатизма по скорости необходимо выбрать ПИ - регулятор скорости со следующей передаточной функцией :

$$H_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega} s + 1)}{T_{p\omega} s} \quad (17.5)$$

Следовательно, передаточная функция системы по возмущению станет равна:

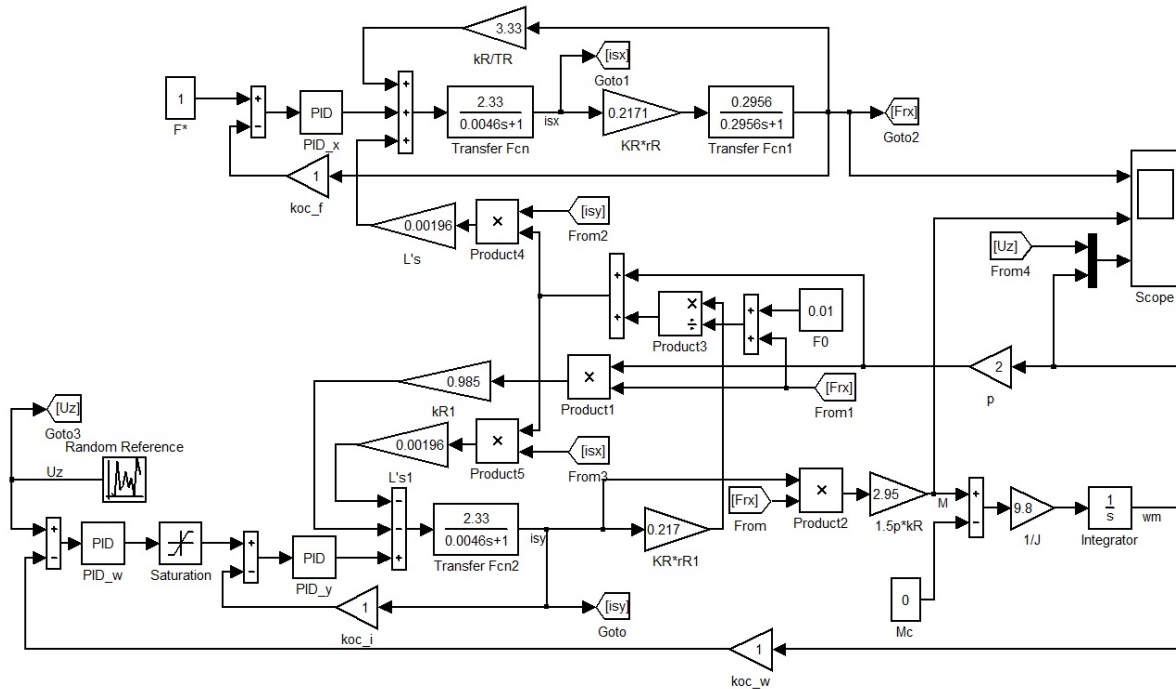
$$\begin{aligned} H'(s) &= \frac{-k_{oc.i}}{1.5pk_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{\frac{T_{p\omega} J k_{oc.i}}{k_{oc.\omega} k_{p\omega}} s^2 + T_{p\omega} s + 1} \approx \\ &\approx \frac{-k_{oc.i}}{1.5pk_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{T_{p\omega} s + 1} \end{aligned} \quad (17.6)$$

при  $k_{p\omega} \gg 1$ .

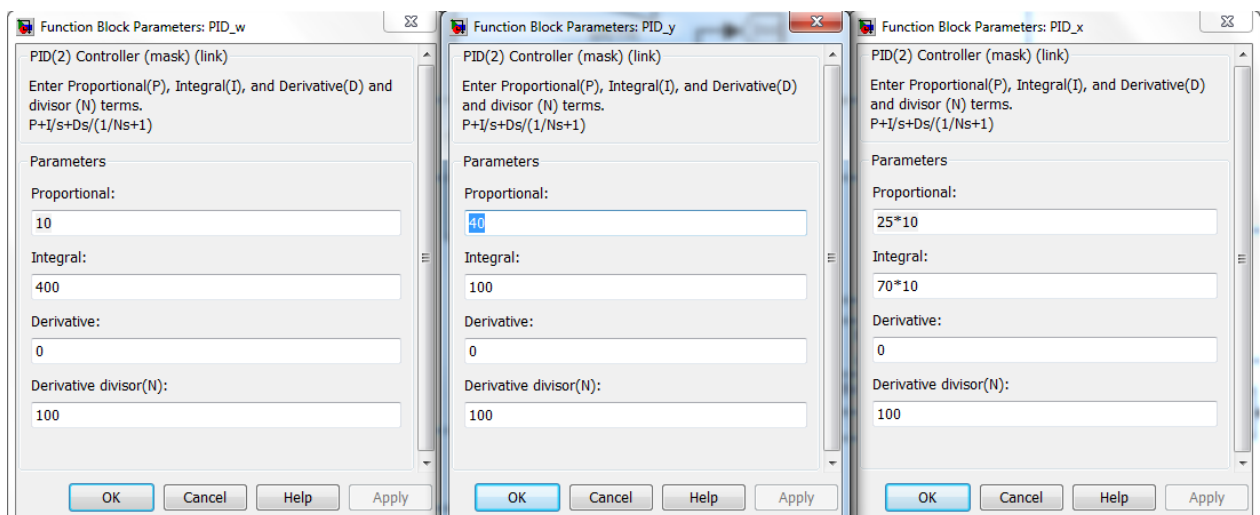
Для моделирования системы управления асинхронным двигателем выберем АК3 20HP (15kW) из библиотеки Sim Power System с такими паспортными данными и параметрами:  $U_{AB} = 400V$ ,  $f = 50Гц$ ,  $R_S = 0.2147$  Ом.,  $R_R = 0.2205$  Ом.,  $L_S = L_R = 0.06518$  Гн,  $L_m = 0.06419$  Гн,  $J = 0.102$  кгм<sup>2</sup>,  $p=2$ .

Система обладает двумя каналами, один из которых определяет поток в машине, тогда как другой – момент. Синтез регуляторов при синтезировании подчиненной системы в каждом канале сделаем в соответствии с положениями, изложенными выше. В канале потока был выбран ПИ-регулятор с коэффициентом усиления  $k_{\psi x} = 700$ , в канале скорости синтезирован ПИ регулятор с параметрами  $k_{p\omega} = 10$ ,  $k_{и\omega} = 400$ .

Коэффициенты передач регуляторов выбираем таким образом, чтобы постоянная времени в канале управления потоком была бы по крайней мере на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью [2]. Модель электропривода, содержащая регуляторы скорости и потока, а также ограничения, представлена на рис.17.2а. На рисунке 17.2б показана настройка PID-регуляторов скорости, канала x и канала y. На выходе PID-регулятора скорости включен блок «Saturation». Ограничения в этом блоке  $\pm 80$ .



а)



б)

Рис. 17.2. Модель асинхронной системы с частотно-векторным управлением

Результат моделирования системы представлен на рис. 17.3.

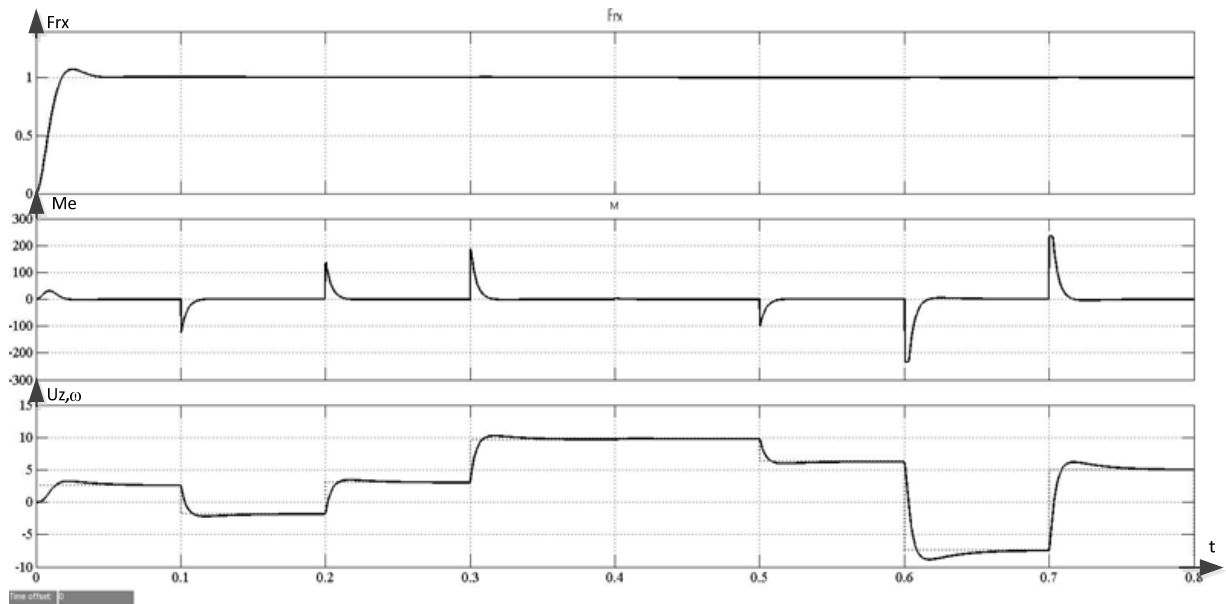


Рис. 17.3. Графики работы системы при случайном задающем воздействии

Рассмотрим работу системы, на вход которой подадим ступенчатое воздействие.

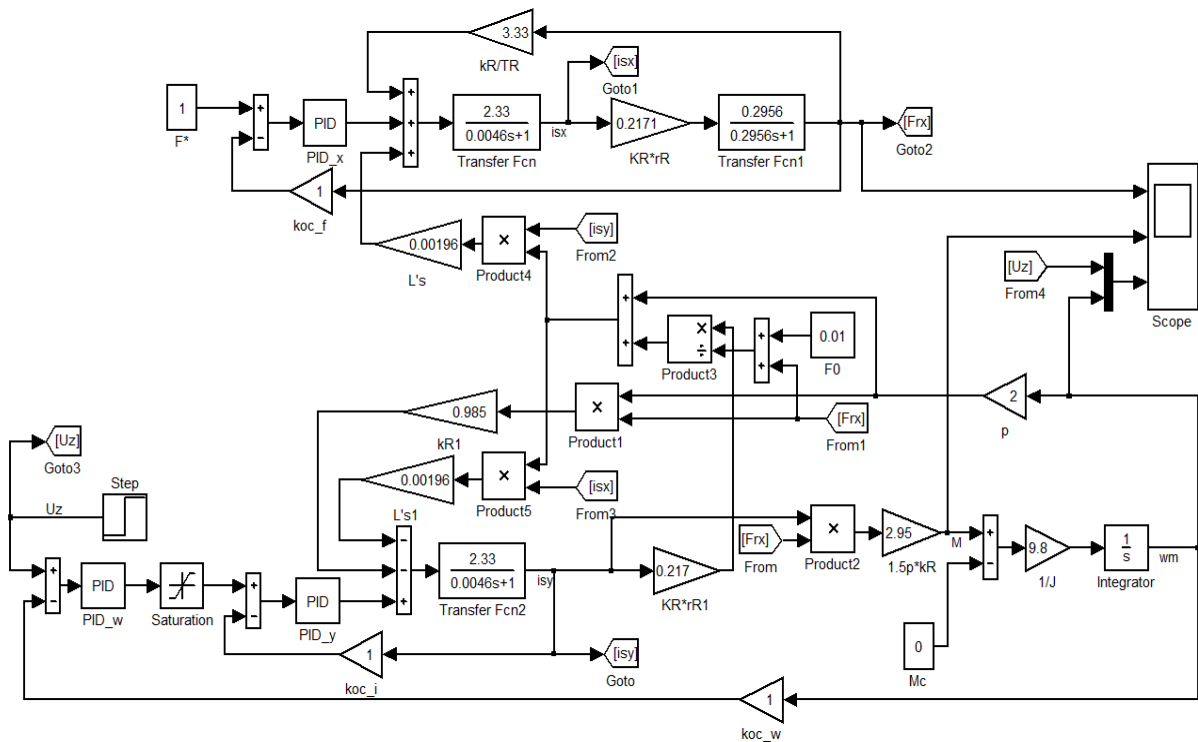


Рис. 17.4. Модель системы со ступенчатым входным сигналом

Результаты моделирования представлены на рис.17.5.

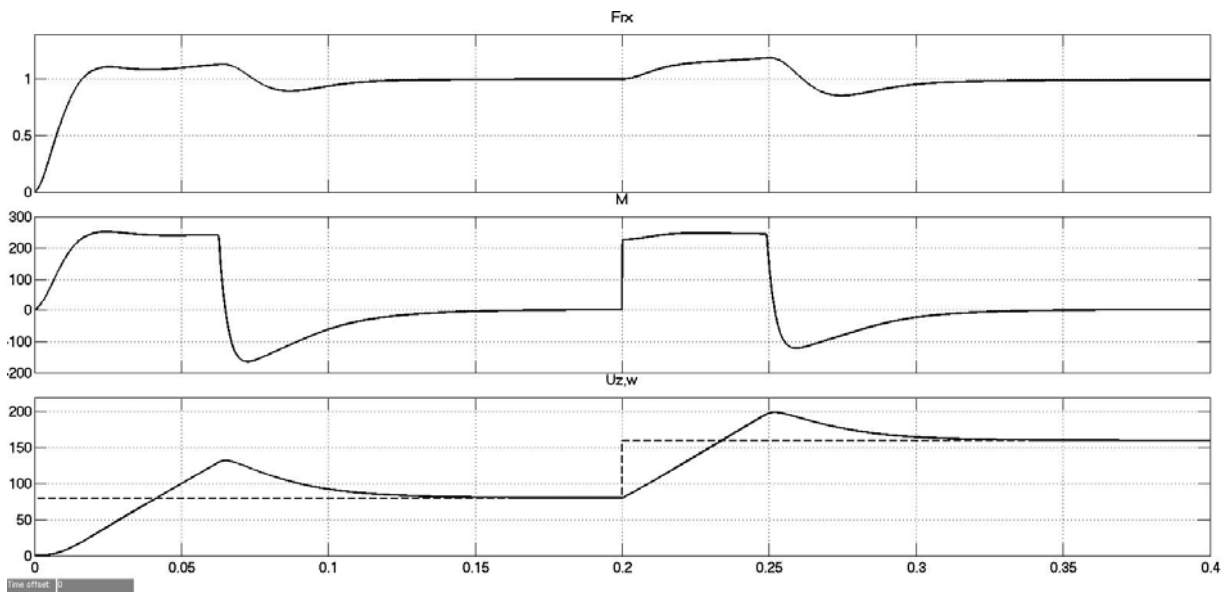


Рис. 17.5. Графики работы системы при ступенчатом входном сигнале и  $M_c = 0$

На третьем графике показан переходной процесс, из которого следует, что величина перерегулирования 63%, время переходного процесса около 0.15 секунды.

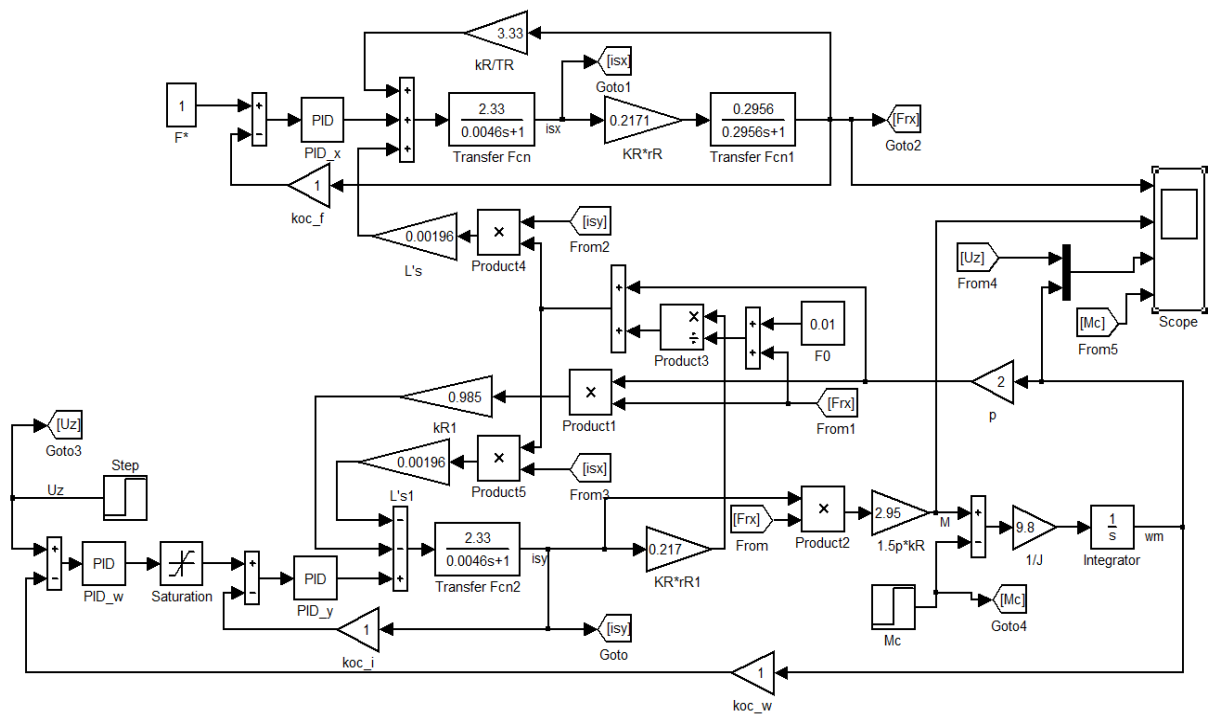


Рис. 17.6. Модель системы с постоянным входным сигналом и изменяющимся моментом сопротивления

Результат моделирования представлен на рис. 17.7.

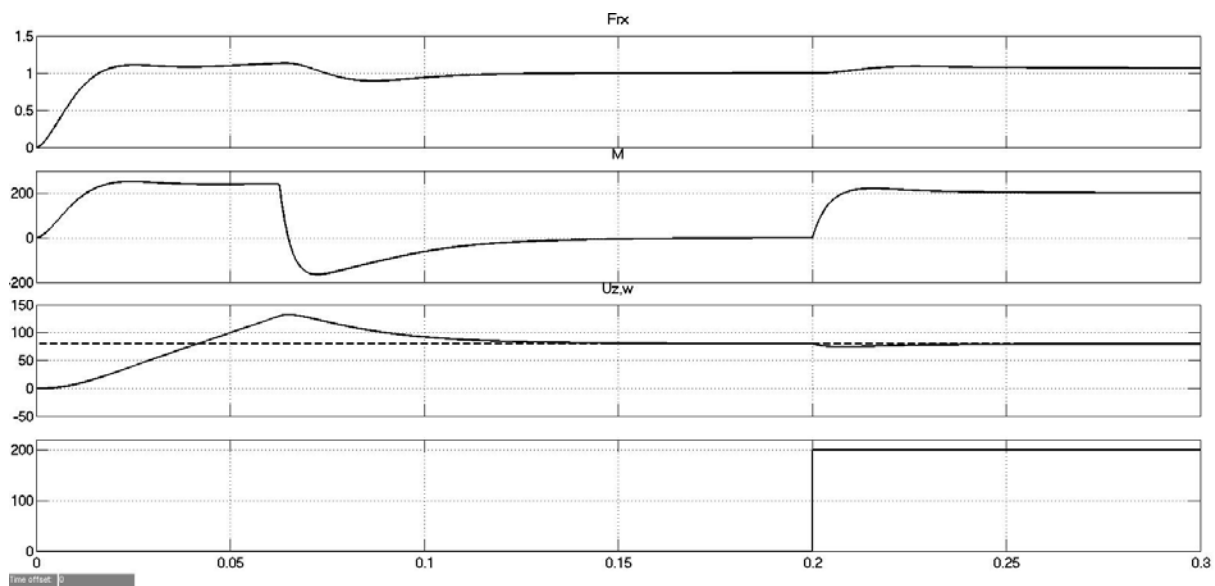


Рис. 17.7. Графики работы системы при постоянном входном сигнале и изменении момента сопротивления

Из рис. 17.7 следует, что при  $t = 0.2$  секунды момент нагрузки скачком изменяется от 0 до 200 Нм. При этом частота вращения уменьшается до 75 рад/с и через 0.05 секунды восстанавливается до заданной (80 рад/с).

Заменим в исходной системе PID-регулятор скорости на нейрорегулятор NARMA L-2 [5].

Процедура идентификации нейроконтроллера требует задания следующих параметров:

- Size of Hidden Layer – размер скрытого слоя определяется количеством используемых нейронов;
- Sampling Interval – такт дискретности в секундах между двумя последовательными моментами съема информации;
- No. Delayed Plant Inputs – количество элементов запаздывания на входе модели;
- No. Delayed Plant Outputs – количество элементов запаздывания на выходе модели;
- Normalize Training Data – окно контроля нормирования обучающих данных к диапазону [0 1].
- Параметры обучающей последовательности:
- Training Samples – длина обучающей выборки (количество точек съема информации);

- Maximum Plant Input – максимальное значение входного сигнала;
- Minimum Plant Input – минимальное значение входного сигнала;
- Maximum Interval Value (sec) – максимальный интервал идентификации в секундах;
- Minimum Interval Value (sec) – минимальный интервал идентификации в секундах;
- Limit Output Data – окно контроля, позволяющее ограничить объем выходных данных (только при включенном окне контроля будут доступны два следующих окна редактирования текста);
- Maximum Plant Output – максимальное значение выходного сигнала;
- Minimum Plant Output – минимальное значение выходного сигнала;
- Simulink Plant Model – задание модели Simulink с указанием входных и выходных портов, используемых при нейросетевой модели управляемого процесса;

Параметры обучения:

- Training Epochs – количество циклов обучения;
- Training function – задание обучающей функции;
- Use Current Weights – окно контроля, позволяющее подтвердить использование текущих весов нейронной сети;

Use Validation/Testing for Training – выбор этих окон контроля означает, что 25 % данных из обучающей последовательности будет использовано для формирования контрольного и тестового множеств соответственно.

Запуск процедуры Generate Training Data приведет к тому, что будет запущена программа создания обучающей последовательности на интервале «Training Samples»/«Sampling Interval» секунд для модели объекта управления. При этом программа создает обучающие данные путем воздействия ряда случайных ступенчатых сигналов на модель Simulink управляемого процесса. Графики входного и выходного сигналов объекта управления показываются на экране. По завершении генерации обучающей последовательности пользователь может сделать выбор и отказаться от сгенерированных данных (Reject Data) или их принять (Accept Data).

Рассмотрим параметры настройки регулятора NARMA-L2. Окно настройки параметров регулятора NARMA-L2 представлено на рис. 17.8.

Рис. 17.8. Окно настройки параметров регулятора NARMA-L2

После выполнения операции идентификации часть окон недоступны, а кнопка **Generate Training Data** заменена кнопкой **Erase Generated Data**, что позволяет удалить сгенерированные данные. В окне фрейма содержится сообщение: «Обучающая последовательность состоит из 2000 замеров. Можно начинать обучение нейронной сети». Для обучения нейронной сети следует воспользоваться кнопкой **Train Network** (обучить сеть). Начнется обучение нейросетевой модели.

Текущее состояние отмечено в окне **Plant Identification** сообщением «Обучение завершено. Можно сгенерировать или импортировать новые данные, продолжить обучение или сохранить полученные результаты, выбрав кнопки **OK** или «**Apply**». В результате параметры нейросетевой модели управляемого процесса будут введены в блок **NN NARMA - L2 – Controller** системы **Simulink**.

Для того, чтобы задать регулятору желаемую характеристику необходимо:

1. Выбрать желаемый график переходного процесса.
2. Подобрать передаточную функцию, описывающую желаемый переходной процесс.

Желаемый график переходного процесса приведён на рис. 17.9.

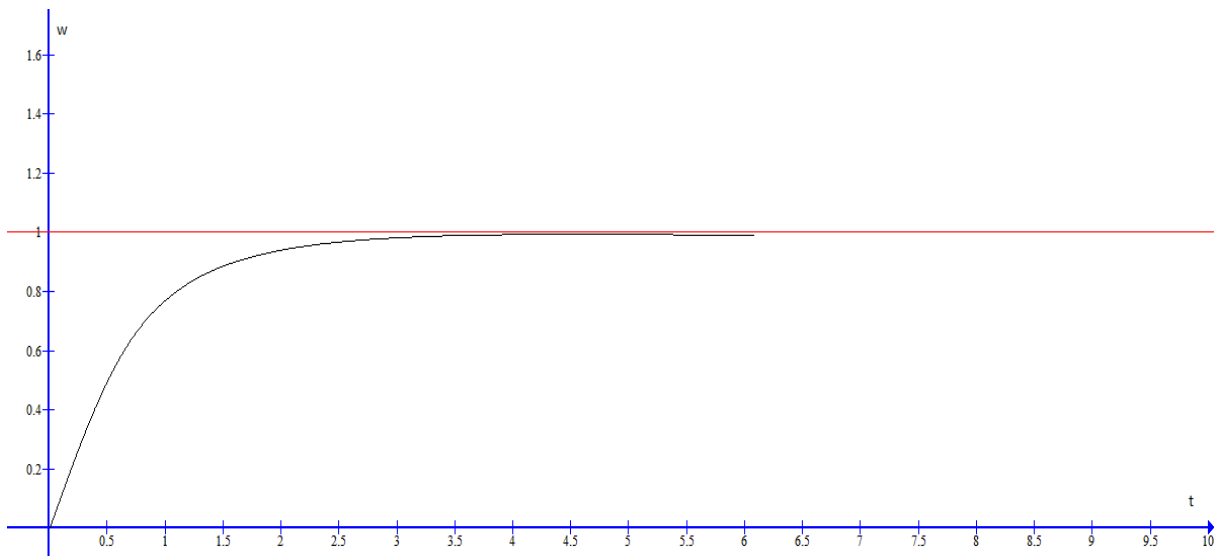


Рис. 17.9.График функции желаемого переходного процесса

Подберем передаточные функции, с помощью которых можно реализовать кривую, представленную на рис. 17.9 в среде моделирования Matlab. Субсистема из последовательного соединения этих передаточных функций представлена на рис. 17.10.

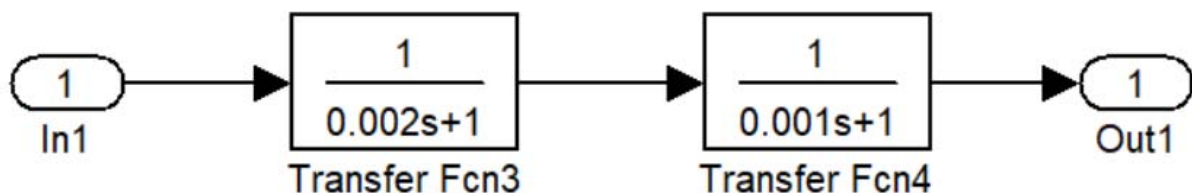


Рис. 17.10.Субсистема, реализующая желаемый процесс в Matlab

Далее необходимо сохранить этот файл в папке с моделями системы.

В настройках нейрорегулятора укажем путь к этому файлу в поле «Simulink Plant Model», как показано на рис. 17.11.





Начнем обучение нейроконтроллера со следующих параметров (рис. 17.13):

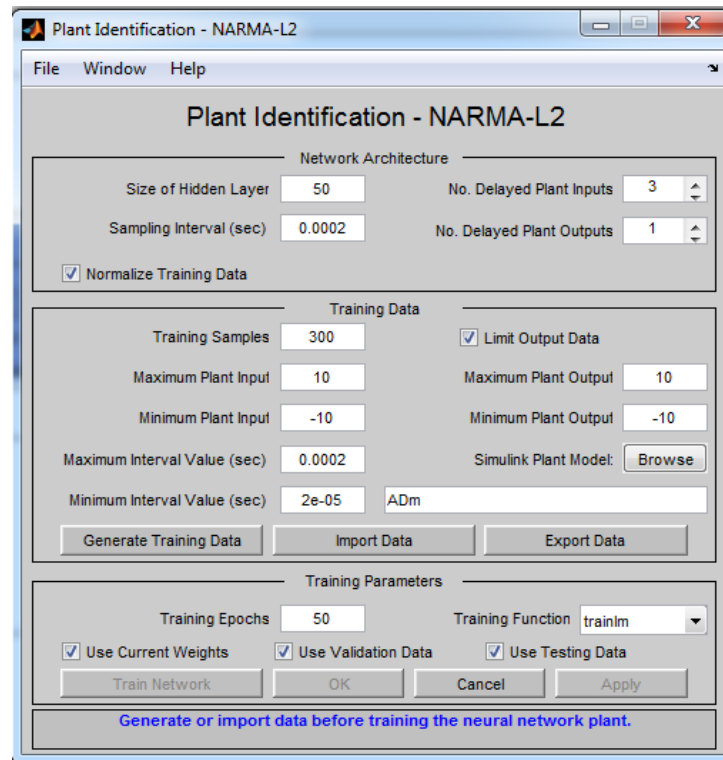


Рис. 17.13. Параметры нейроконтроллера

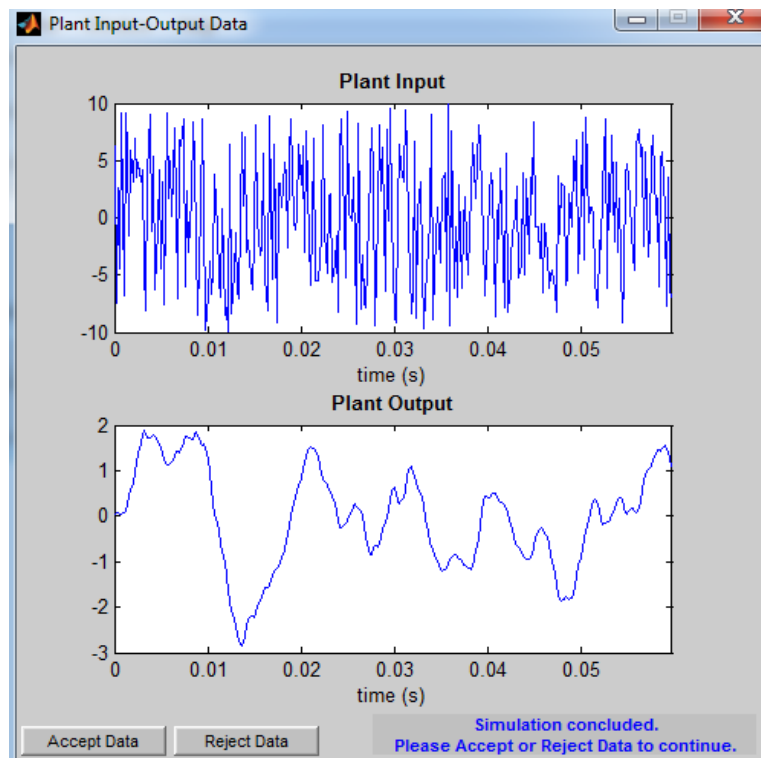


Рис. 17.14. Процесс обучения нейроконтроллера

Нажимаем «Accept Data», после чего начинаем тренировать сеть. Для этого нажимаем «Train Network». Процесс обучения сети показан на рис. 17.15.

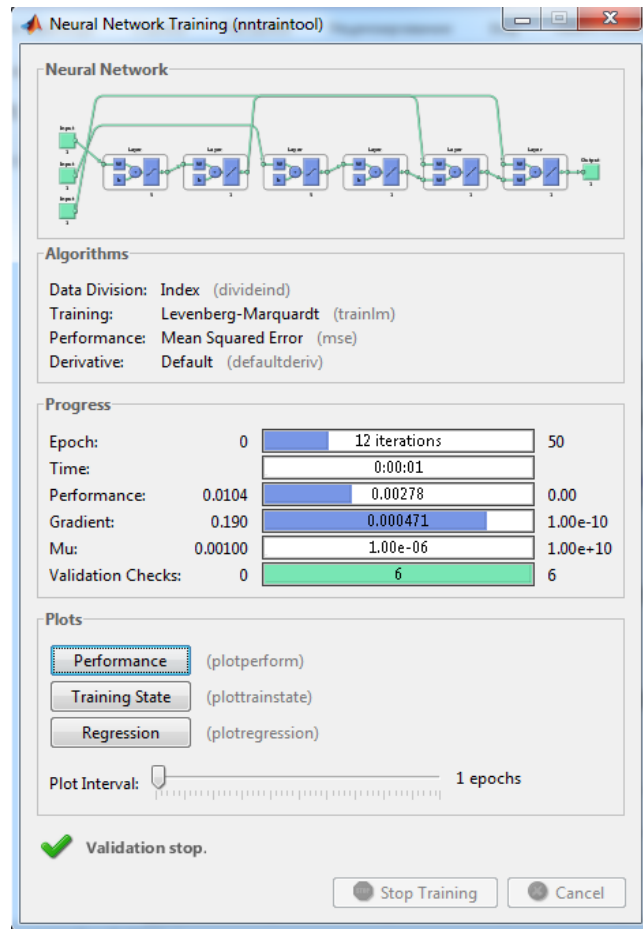


Рис. 17.15. Процесс обучения сети

Далее проведем моделирование работы системы при данных параметрах. Результат моделирования представлен на рис. 17.16.

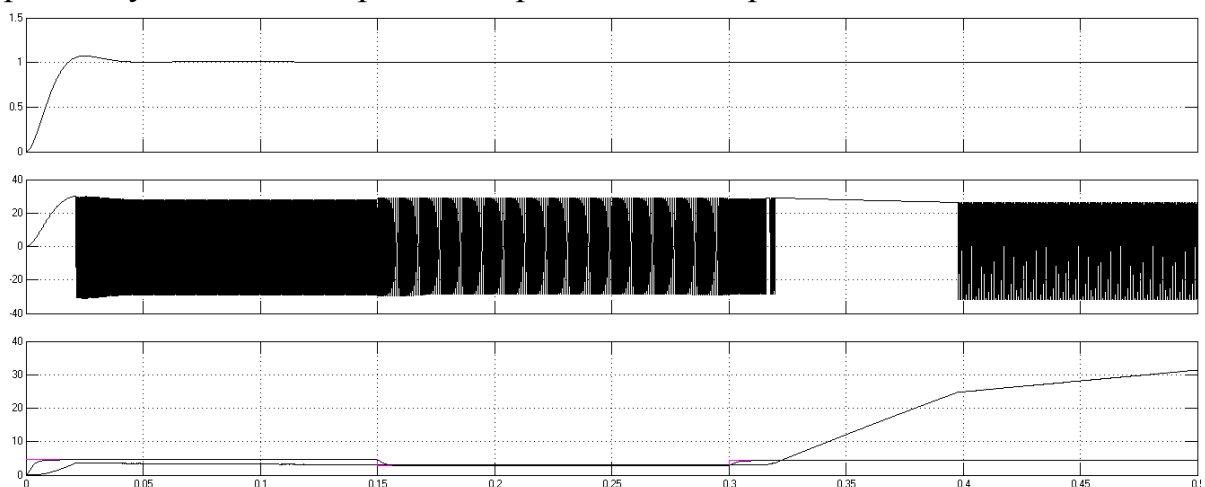


Рис. 17.16. Результат моделирования системы

Как видно их графика, система обрабатывает заданное воздействие некорректно, поэтому необходимо изменить параметры настройки нейрорегулятора. Уменьшим размер скрытого слоя (Size of Hidden Layer) с 50 до 5, так же изменим количество элементов запаздывания на входе модели с 3 до 1 и уберем элементы запаздывания с выхода модели. При этом были заданы следующие параметры нейрорегулятора:

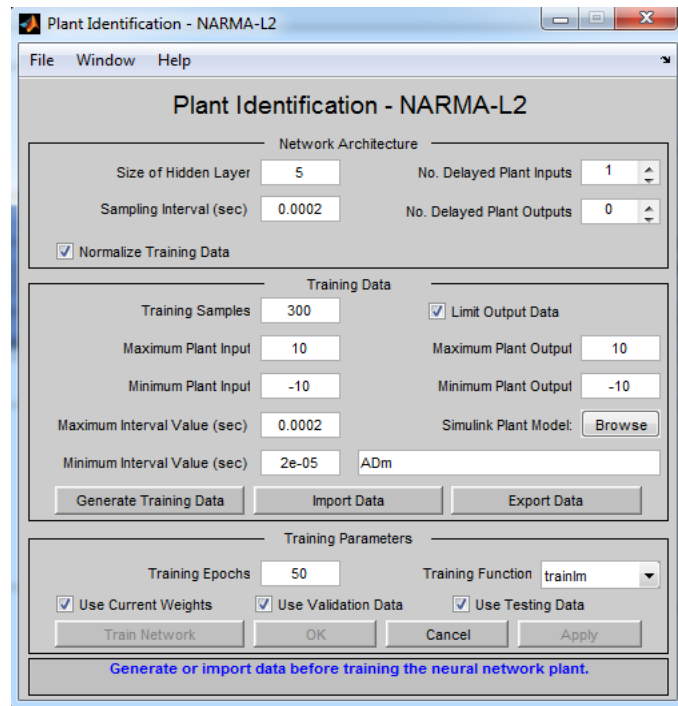


Рис. 17.17. Параметры обучения нейроконтроллера

После обучения сети проведем запуск модели с новыми параметрами нейрорегулятора. Результаты моделирования представлены на рис. 17.18.

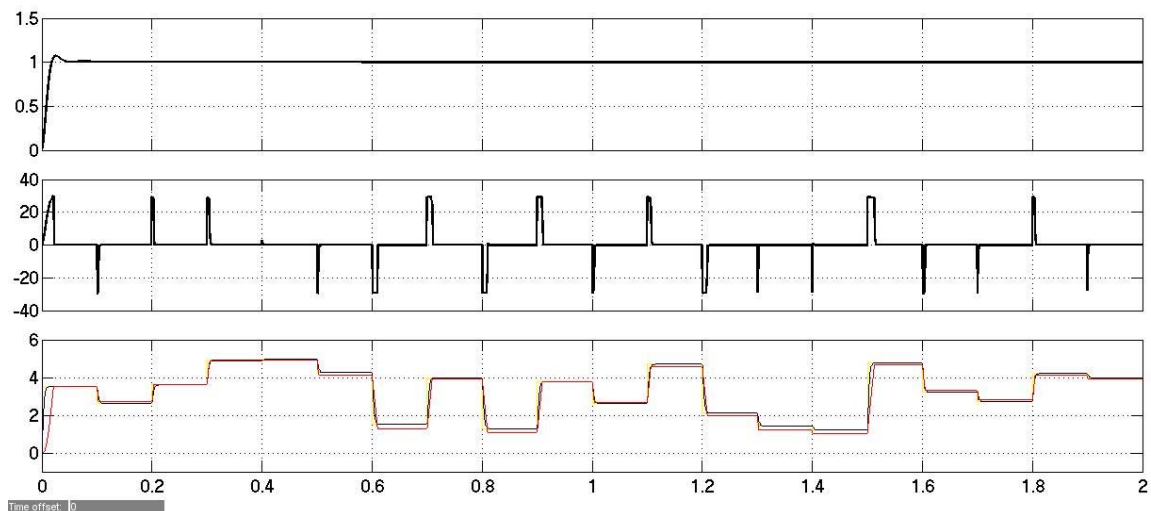


Рис. 17.18. Графики работы системы с нейрорегулятором

Как видно из графика (рис.17.18), представленного выше, при таких настройках регулятора система корректно обрабатывает случайное воздействие на входе.

Проведем сравнение работы системы с нейрорегулятором NARMA L-2 и PID-регулятором. Для этого создадим две подсистемы, представленные на рис. 17.19 для более наглядного представления о работе модели с нейрорегулятором и без него:

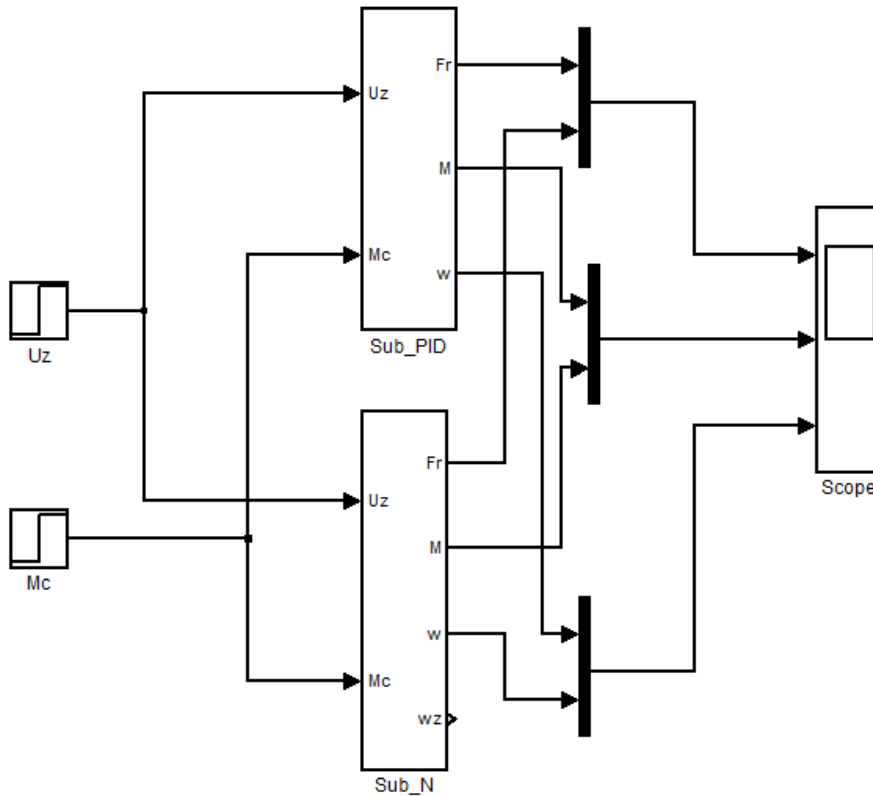


Рис. 17.19. Модель, объединяющая в себе 2 подсистемы: Sub\_N с нейрорегулятором, Sub\_PID- с ПИД регулятором

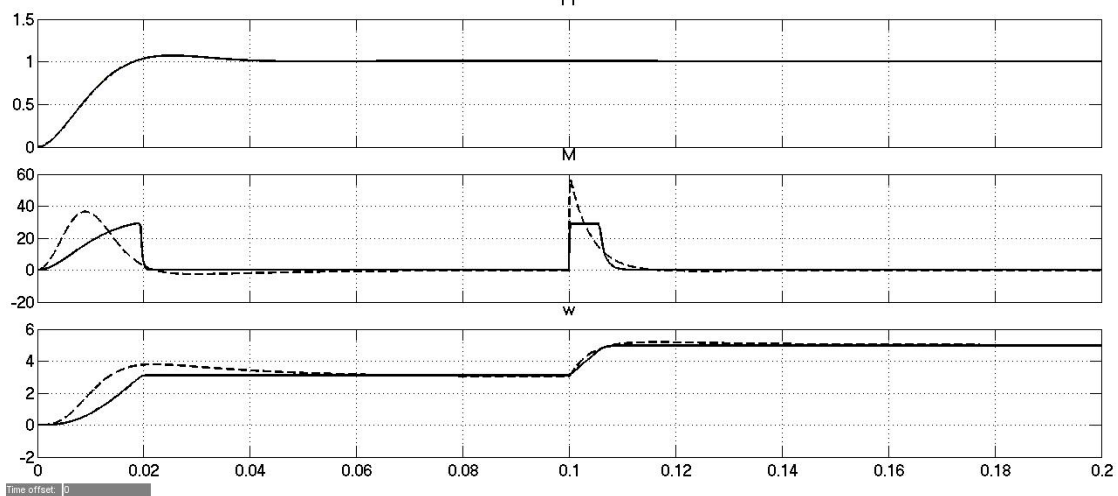


Рис. 17.20. Сравнительный график работы 2-х систем при  $Mc=0$ .  $Uz=3$  при  $0 \leq t \leq 0.1$  сек. и  $Uz=5$  вольт при  $t>0.1$

Так же создадим подобную модель из 2-х subsystem для анализа работы 2-х моделей при подаче на вход случайного задающего воздействия. Схема представлена на рис. 17.21.

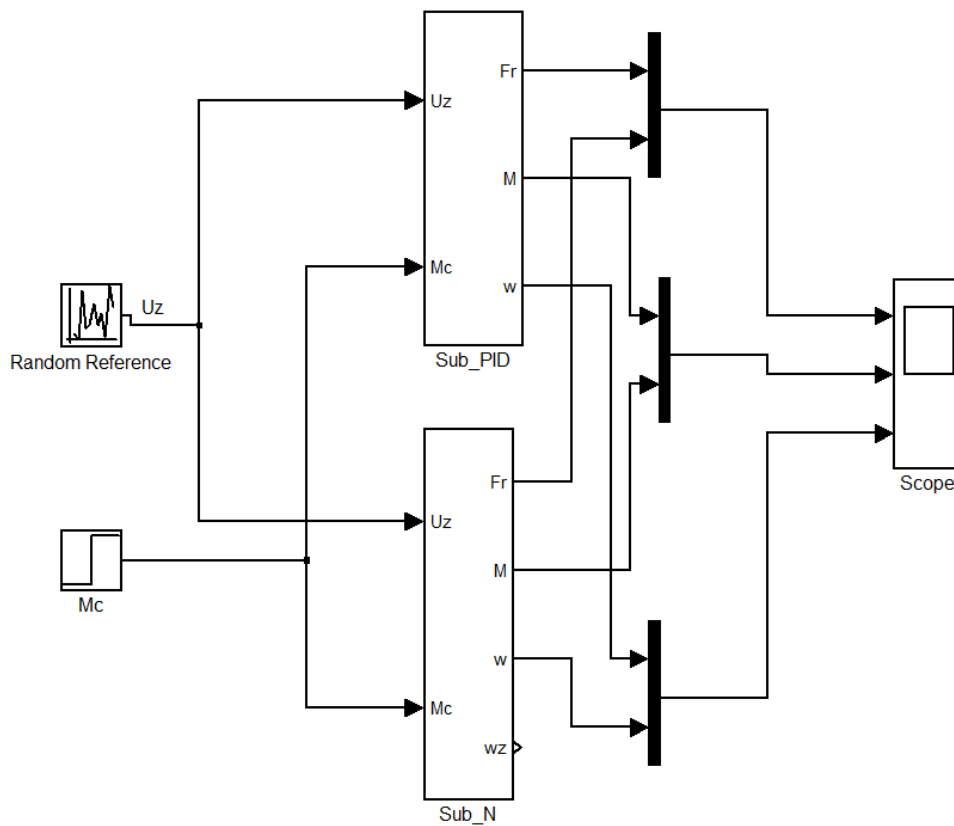


Рис. 17.21. Модель из 2-х subsystem для сравнения отработки случайного входного сигнала

Результаты моделирования представлены на рис. 17.22.

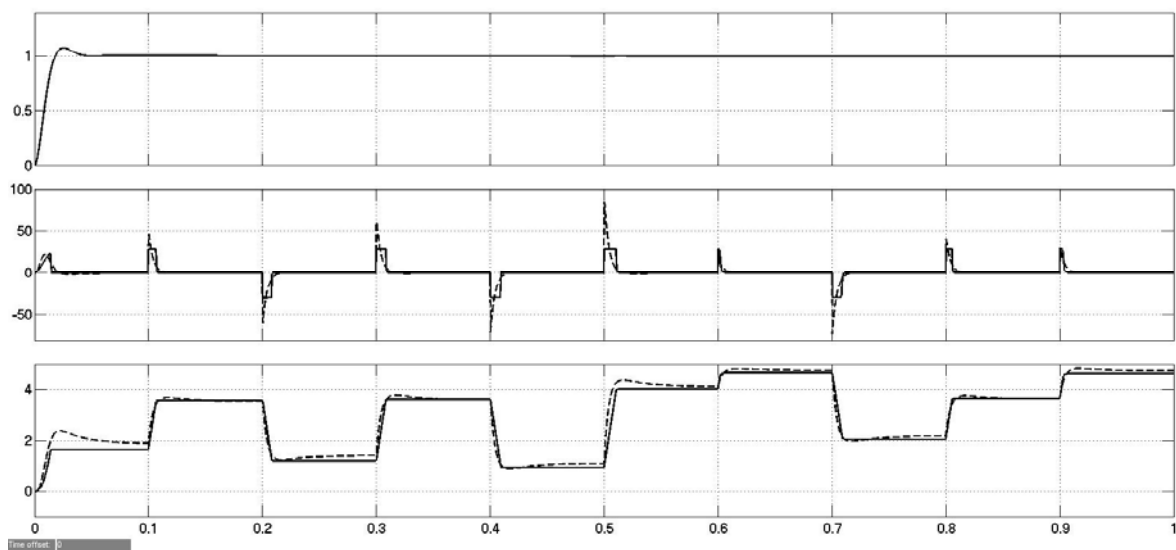


Рис. 17.22. Характеристики работы 2-х систем управления асинхронным двигателем при случайном входном воздействии

Как следует из графика, представленного выше, система управления асинхронным двигателем с нейрорегулятором (на графике обозначена сплошной линией) более эффективно обрабатывает случайное входное воздействие, чем система с ПИД-регулятором. Система с нейрорегулятором обладает гораздо меньшим перерегулированием, а при отдельных набросах сигнала оно вообще отсутствует, также время переходного процесса с ПИД – регулятором заметно больше.

### **1. Порядок выполнения работы**

1. Собрать и исследовать модели.
2. Провести моделирование
3. Сделать выводы.

### **2. Содержание отчёта**

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в MATLAB.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?
2. Назовите преимущества и недостатки использования нейросетей в системах управления.
3. Что такое векторное управление?
4. Как выбирается желаемый переходной процесс для настройки нейроконтроллера?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без базовых знаний электротехники и электроники достаточно сложно обеспечить эффективное использование современного оборудования. Изучение электротехники и электроники напрямую связано с экспериментальными исследованиями, а перспективное развитие – с виртуальным моделированием.

Согласно основным разделам курса «Электротехника и электроника» в пособии рассмотрено моделирование процессов, происходящих в электротехнических и электронных устройствах: электрические цепи постоянного и переменного токов; магнитные цепи; переходные процессы в электрических цепях; электрические измерения; трансформаторы и электрические машины; электропривод, электрические и магнитные устройства автоматики; передача и распределение электрической энергии; основы электроники – полупроводниковые приборы и электронные устройства.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : «Высшая школа». 1996. – 638 с.
2. Герман-Галкин. С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 468 с. – ISBN 978-5-904484-49-9.
3. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. В. Дьяконов. – СПб. : Питер. 2001. – ISBN 5-318-00359-1.
4. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. в математике и моделировании. В. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс. 2005. – 806 с. – ISBN 5-98003-181-2.
5. MATLAB 7. Ануариёв И. Е. Санк-Петербург. «БХВ-Петербург». 2005. – 1097 с. – ISBN 5-94157-494-0.
6. Моделирование и расчет автоматических систем: С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. Учеб. пособие / Издательство «Посад»; Владимир, 2003. – 200 с. – ISBN 5-86953-132-2.
7. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейроруправления. Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79 – 94.
8. Брускин Д. Э. Зорохович А. Е. Хвостов Е. С. Электрические машины и микромашины. Издательство «Высшая школа». 1990. – 529 с. – ISBN 5-06-000725-1.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Практическое занятие 1 ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ .....	4
Практическое занятие 2 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	10
Практическое занятие 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	12
Практическое занятие 4 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	15
Практическое занятие 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА .....	23
Практическое занятие 6 РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ.....	32
Практическое занятие 7 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ .....	34
Практическое занятие 8 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭДС .....	41
Практическое занятие 9 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ .....	49
Практическое занятие 10 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОДНОФАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ.....	53

Практическое занятие 11 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	57
Практическое занятие 12 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	65
Практическое занятие 13 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	73
Практическое занятие 14 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	90
Практическое занятие 15 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ .....	98
Практическое занятие 16 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ .....	102
Практическое занятие 17 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕРА.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	128

*Учебное электронное издание*

ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

*Издается в авторской редакции*

**Системные требования:** Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader; диск-код DVD-ROM.

Тираж 7 экз.

Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Изд-во ВлГУ

[rio.vlgu@yandex.ru](mailto:rio.vlgu@yandex.ru)