



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЭиАС  
С.И. Лукьянов

26.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ***

Направление подготовки (специальность)  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль/специализация) программы  
Электропривод и автоматика

Уровень высшего образования - бакалавриат

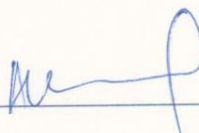
Форма обучения  
очная

Институт/ факультет	Институт энергетики и автоматизированных систем
Кафедра	Автоматизированного электропривода и мехатроники
Курс	3
Семестр	5

Магнитогорск  
2019 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 28.02.2018 г. № 144)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Автоматизированного электропривода и мехатроники 13.02.2020, протокол № 6

Зав. кафедрой  А.А. Николаев

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЭиАС 26.02.2020 г. протокол № 5

Председатель  С.И. Лукьянов

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры АЭПиМ, канд. техн. наук  С.А. Линьков

Рецензент:

зам. начальника ЦЭТЛ ПАО «ММК» по электроприводу, канд. техн. наук



 А.Ю. Юдин

### Лист актуализации рабочей программы

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2020 - 2021 учебном году на заседании кафедры Автоматизированного электропривода и

Протокол от 30.08 2020 г. № 1  
Зав. кафедрой А.А. Николаев

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры Автоматизированного электропривода и

Протокол от 08.10 2021 г. № 3  
Зав. кафедрой А.А. Николаев

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры Автоматизированного электропривода и

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ А.А. Николаев

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2023 - 2024 учебном году на заседании кафедры Автоматизированного электропривода и

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ А.А. Николаев

### **1 Цели освоения дисциплины (модуля)**

Целями освоения дисциплины «Математическое моделирование» является обучение будущих бакалавров знаниям существующих методов аналогового и цифрового моделирования современного электропривода, отработка навыков применения существующих программ моделирования работы электроприводов, приобретение практического опыта анализа работы современных электроприводов.

Задачи дисциплины – усвоение студентами:

- алгоритмов численных методов интегрирования линейных и нелинейных систем дифференциальных уравнений;
- принципов структурного моделирования элементов электропривода;
- методов аналогового и цифрового моделирования современного электропривода.

### **2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина Математическое моделирование входит в обязательную часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Математика

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Системы управления электроприводов

### **3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения**

В результате освоения дисциплины (модуля) «Математическое моделирование» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции
ОПК-4	Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
ОПК-4.1	Способен оценивать параметры нормальных и аварийных режимов электрических цепей и машин с использованием методов анализа и моделирования
ОПК-4.2	Разрабатывает мероприятия по улучшению показателей качества работы электрических цепей и машин

#### 4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц 108 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 73,9 акад. часов;
- аудиторная – 72 акад. часов;
- внеаудиторная – 1,9 акад. часов;
- самостоятельная работа – 34,1 акад. часов;
- в форме практической подготовки – 0 акад. час;

Форма аттестации - зачет

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек.	лаб. зан.	практ. зан.				
1. Раздел 1.								
1.1 Назначение, методы и принципы аналогового моделирования	5	2	2		4	Проработка конспекта лекций, изучение программной среды Матлаб	Выполнение практического задания по изучению программной среды Матлаб	ОПК-4.1
1.2 Математическое моделирование нелинейных блоков теории автоматического регулирования (ТАУ)		4	4		4	Проработка конспекта лекций и учебного пособия [1,2] по тематике	АКР № 1 (тестирование)	ОПК-4.1
1.3 Математическое моделирование структурных схем на ЭВМ в среде MatLab Simulink		8	8/2И		6	Проработка конспекта лекций и учебного пособия [1,2] по тематике	АКР № 2 (тестирование)	ОПК-4.1
1.4 Особенности программного структурного моделирования на ЭВМ		8	10/3И		8	Проработка конспекта лекций и учебного пособия [1,2] по тематике	АКР № 3 (тестирование)	ОПК-4.1
1.5 Математическое моделирование основных элементов систем автоматизированного электропривода		10	12/7И		10	Проработка конспекта лекций и учебного пособия [1,2] по тематике	АКР № 4 (тестирование)	ОПК-4.1
1.6 Перспективы развития аппаратных и программных средств ЭВМ для САПР		4			2,1	Проработка конспекта лекций и учебного пособия [1,2] по тематике	АКР № 5 (тестирование)	ОПК-4.2
Итого по разделу			36	36/12И		34,1		

Итого за семестр	36	36/12И		34,1		зачёт	
Итого по дисциплине	36	36/12И		34,1		зачет	

## **5 Образовательные технологии**

Для реализации предусмотренных видов учебной работы в качестве образовательных технологий в преподавании дисциплины «Моделирование в электроприводе» используются традиционная и модульно - компетентностная технологии.

Передача необходимых теоретических знаний и формирование основных представлений по курсу «Моделирование в электроприводе» происходит с использованием мультимедийного оборудования.

Лекции проходят в традиционной форме, в форме лекций-консультаций и проблемных лекций. Теоретический материал на проблемных лекциях является результатом усвоения полученной информации посредством постановки проблемного вопроса и поиска путей его решения. На лекциях – консультациях изложение нового материала сопровождается постановкой вопросов и дискуссией в поисках ответов на эти вопросы.

При проведении практических занятий используются работа в команде и методы ИТ.

Самостоятельная работа стимулирует студентов в процессе подготовки домашних заданий, при решении задач на лабораторных занятиях, при подготовке к контрольным работам (тестам) и итоговой аттестации.

## **6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Представлено в приложении 1.

## **7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации**

Представлены в приложении 2.

## **8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

### **а) Основная литература:**

1. Фурсов, В.Б. Моделирование электропривода : учебное пособие / В.Б. Фурсов. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 220 с. — ISBN 978-5-8114-3566-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/121467>

2. Алпатов, Ю. Н. Математическое моделирование производственных процессов : учебное пособие / Ю. Н. Алпатов. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 136 с. — ISBN 978-5-8114-3052-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107271> (дата обращения: 19.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### **б) Дополнительная литература:**

1. Линьков, С. А. Моделирование в электроприводе : учебное пособие / С. А. Линьков, А. А. Радионов ; МГТУ. - Магнитогорск, 2010. - 83 с. : ил., схемы, табл. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=302.pdf&show=dcatalogues/1/1068059/302.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог.

2. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов : учебное пособие / Н. В. Голубева. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 192 с. — ISBN 978-5-8114-1424-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/76825> (дата обращения: 19.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Затонский, А. В. Моделирование объектов управления в MatLab : учебное пособие / А. В. Затонский, Л. Г. Тугашова. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 144 с.

— ISBN 978-5-8114-3270-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/111915> (дата обращения: 19.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

**в) Методические указания:**

1. Линьков, С. А. Моделирование в электроприводе. Учебно-методические указания к л/р 1-6. URL: <https://newlms.magtu.ru/course/view.php?id=71863>.

**г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

**Программное обеспечение**

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
MS Windows 7 Professional(для классов)	Д-1227-18 от 08.10.2018	11.10.2021
MS Office 2007 Professional	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно
MathWorks MathLab v.2014 Classroom License	К-89-14 от 08.12.2014	бессрочно
7Zip	свободно распространяемое	бессрочно

**Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

Название курса	Ссылка
Электронная база периодических изданий East View Information Services, ООО «ИВИС»	<a href="https://dlib.eastview.com/">https://dlib.eastview.com/</a>
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И. Носова	<a href="http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp">http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp</a>
Поисковая система Академия Google (Google Scholar)	URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>
Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования	URL: <a href="https://elibrary.ru/project_risc.asp">https://elibrary.ru/project_risc.asp</a>

**9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

В качестве материально-технического обеспечения дисциплины используются:

Тип и название аудитории	Оснащение аудитории
Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа	мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации
Учебная аудитория для проведения лабораторных занятий: лаборатория автоматизированного электропривода постоянного и переменного тока	компьютеры Syntex mod-1+ LCD LG TFT19; лабораторный стенд №1; лабораторный стенд №2; стенд ШЭП-ПЧ «Исследование электроприводов постоянного тока»



Учебные аудитории для групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации	Доска, мультимедийный проектор, экран
Учебные аудитории для самостоятельной работы обучающихся	Персональные компьютеры с ПО из п. 8(г), выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета

## **Приложение 1.**

### **Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

#### **Примерные вопросы к контрольным работам:**

1. Какие существуют методы моделирования САР электропривода?
2. Каковы методы и принципы аналогового моделирования?
3. Каковы методы и принципы цифрового моделирования?
4. Каковы особенности структурного метода моделирования?
5. Каковы свойства идеального операционного усилителя? Его основные характеристики.
6. Перечислите основные свойства типовых линейных звеньев систем автоматического регулирования.
7. По какому принципу реализуется нелинейное звено в программе структурного моделирования?
8. Поясните методику составления и преобразования структурных систем.
9. Для чего нужен задатчик интенсивности (ЗИ) и из каких типовых звеньев он состоит?
10. Рассчитайте параметры ЗИ для ускорения (спадания) выходного сигнала с граничным темпом 10 В/с.
11. Как реализовать программно устройство для форсировки цепи возбуждения (УФВ).
12. Каким типовым звеном можно представить электрическую цепь обмотки возбуждения двигателя постоянного тока? Как рассчитать параметры звена?
13. Нарисуйте структурную схему цепи возбуждения электрической машины постоянного тока с учетом насыщения.
14. Как реализовать кривую намагничивания двигателя постоянного тока в среде MatLabSimulink?
15. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ с НВ) при  $k_{Фн} = \text{const}$ . Расчет параметров структурной схемы ДПТ с НВ, реализация в среде MatLabSimulink.
16. Как реализовать активную и реактивную статические нагрузки для ДПТ с НВ в среде структурного моделирования MatLabSimulink?
17. Структурная схема ДПТ с НВ при двухзонном регулировании скорости. Расчет параметров структурной схемы, реализация в среде MatLabSimulink.
18. Как вывести временные диаграммы требуемых координат электропривода на экран монитора в среде MatLabSimulink?
19. Каким образом в среде MatLabSimulink выбирается шаг и метод счета?

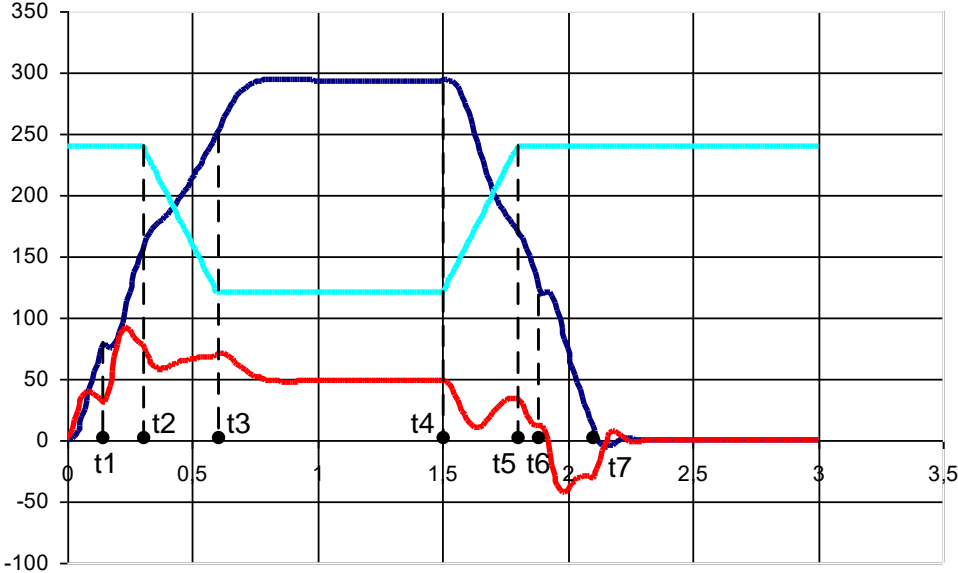
## Приложение 2.

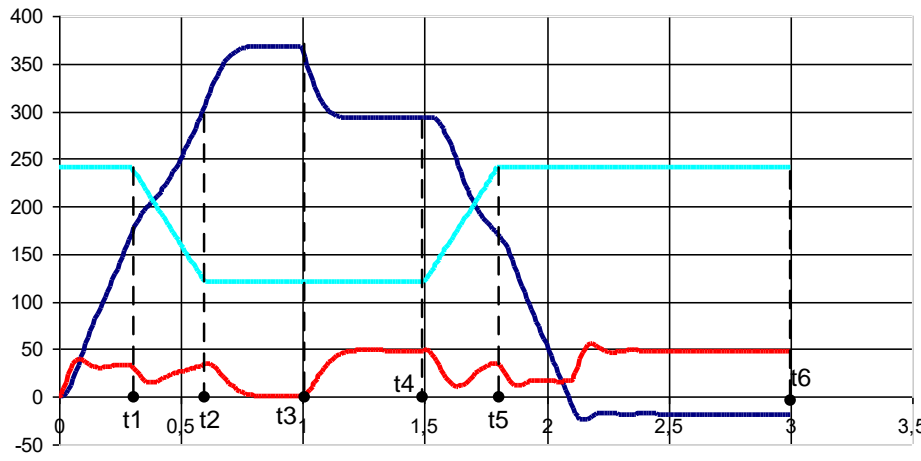
### Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

#### а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
ОПК-4: Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин		
ОПК-4.1	Способен оценивать параметры нормальных и аварийных режимов электрических цепей и машин с использованием методов анализа и моделирования	<p><i>Примерные вопросы к защите лабораторных работ:</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Какие существуют методы моделирования САР электропривода?</li><li>2. Каковы методы и принципы аналогового моделирования?</li><li>3. Каковы методы и принципы цифрового моделирования?</li><li>4. Каковы особенности структурного метода моделирования?</li><li>5. Каковы свойства идеального операционного усилителя? Его основные характеристики.</li><li>6. Перечислите основные свойства типовых линейных звеньев систем автоматического регулирования.</li><li>7. По какому принципу реализуется нелинейное звено в программе структурного моделирования?</li></ol> <p><i>Примеры тестового задания для контрольной работы:</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Двигатель независимого возбуждения работает в номинальном режиме. Как изменятся ток якоря <math>I_a</math>, скорость двигателя <math>\omega_{дв}</math> и электромагнитный момент двигателя <math>M_{дв}</math>, если напряжение на обмотке возбуждения <math>U_{ов}</math> увеличили в 2 раза?</li></ol> <ol style="list-style-type: none"><li>а) Практически не изменятся</li><li>б) Увеличатся в 2 раза</li><li>в) Уменьшатся в 2 раза</li><li>г) <math>I_a</math> увеличится в 2 раза <math>\omega_{дв}</math> и <math>M_{дв}</math> не изменятся</li><li>д) <math>I_a</math> уменьшится в 2 раза <math>\omega_{дв}</math> и <math>M_{дв}</math> не изменятся</li></ol>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>2. Двигатель независимого возбуждения работает в номинальном режиме (точка А, см. рис.). Как изменятся ток якоря <math>I_{я}</math>, скорость двигателя <math>W_{дв}</math> и электромагнитный момент двигателя <math>M_{дв}</math>, если напряжение на обмотке возбуждения <math>U_{ов}</math> уменьшили в 2 раза?</p> <p>а) <math>I_{я}</math>, <math>W_{дв}</math> увеличатся, <math>M_{дв}</math> останется неизменным</p> <p>б) <math>W_{дв}</math> увеличится, <math>M_{дв}</math> и <math>I_{я}</math> останутся неизменными</p> <p>в) <math>I_{я}</math> уменьшится, <math>W_{дв}</math> увеличится, <math>M_{дв}</math> останется неизменным</p> <p>г) <math>I_{я}</math>, <math>W_{дв}</math> и <math>M_{дв}</math> останутся неизменными</p> <p>Пример вопроса контрольной работы:</p> <p>16) В какой момент времени произошел наброс нагрузки? В какой момент времени произошел сброс нагрузки?</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		
ОПК-4.2	Разрабатывает мероприятия по улучшению показателей качества работы электрических цепей и машин	<p><i>Примерные вопросы к защите практических работ:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поясните методику составления и преобразования структурных систем.</li> <li>2. Для чего нужен задатчик интенсивности (ЗИ) и из каких типовых звеньев он состоит?</li> <li>3. Рассчитайте параметры ЗИ для ускорения (спадания) выходного сигнала с граничным темпом 10 В/с.</li> <li>4. Как реализовать программно устройство для форсировки цепи возбуждения (УФВ).</li> <li>5. Каким типовым звеном можно представить электрическую цепь обмотки возбуждения двигателя постоянного тока? Как рассчитать параметры звена?</li> </ol>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>6. Нарисуйте структурную схему цепи возбуждения электрической машины постоянного тока с учетом насыщения.</p> <p>Пример вопроса контрольной работы:  В каком режиме двигатель работает в момент времени <math>t_6</math>?</p> <p>а) Двигательный  б) Рекуперативное торможение  в) Динамическое торможение  г) Противовключение</p>  <p><i>Примерные вопросы к защите лабораторных работ:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Как реализовать кривую намагничивания двигателя постоянного тока в среде MatLabSimulink?</li> <li>2. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ с НВ) при <math>k_{Фн} = \text{const}</math>. Расчет параметров структурной</li> </ol>

<b>Код индикатора</b>	<b>Индикатор достижения компетенции</b>	<b>Оценочные средства</b>
		<p>схемы ДПТ с НВ, реализация в среде MatLabSimulink.</p> <p>3. Как реализовать активную и реактивную статические нагрузки для ДПТ с НВ в среде структурного моделирования MatLabSimulink?</p> <p>4. Структурная схема ДПТ с НВ при двухзонном регулировании скорости. Расчет параметров структурной схемы, реализация в среде MatLabSimulink.</p> <p>5. Как вывести временные диаграммы требуемых координат электропривода на экран монитора в среде MatLabSimulink?</p> <p>6. Каким образом в среде MatLabSimulink выбирается шаг и метод счета?</p>

**б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:**

Изучение учебной дисциплины «Математическое моделирование» длится 1 семестр, завершается зачетом.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Математическое моделирование» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме зачета.

Показатели и критерии аттестации (зачет):

Обучающийся получает отметку «зачтено» при условии выполнения и защиты всех предусмотренных лабораторных работ на оценку не ниже «удовлетворительно».



## Приложение 3. Методические указания

### Введение

Исследование свойств элементов автоматизированного электропривода с помощью методов цифрового моделирования является совершенно необходимым этапом при разработке и проектировании.

В данных методических указаниях даётся программа проведения, цели и задачи исследований на цифровой модели для каждого рассматриваемого элемента электропривода. Для каждого исследуемого объекта предусмотрены до 12 вариантов параметров.

Целью проведения данных лабораторных занятий является обучение будущих специалистов знаниям существующих методов аналогового и цифрового моделирования современного электропривода, отработка навыков применения существующих программ моделирования работы электроприводов, приобретение практического опыта анализа работы современных электроприводов.

В результате изучения дисциплины студенты должны уметь применять специальные программные средства для решения на ЭВМ и АВМ задач проектирования систем управления современными электроприводами. Студенты должны так же получить представление о перспективах развития аппаратных и программных специальных средств ЭВМ в решении вопросов САПР, при проектировании систем управления современным электроприводом и анализе режимов работы современных электроприводов.

### Лабораторная работа № 1

#### Исследование свойств типовых линейных звеньев систем автоматического регулирования

В данной работе должны быть получены кривые переходных процессов на выходах  $U_{\text{вых}}(t)$  следующих звеньев:

а) интегрирующего с передаточной функцией

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p}.$$

б) инерционного или апериодического с передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{K}{T_2 \cdot p + 1}.$$

в) пропорционально–интегрирующего с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{T_3 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p}.$$

г) реально дифференцирующего с передаточной функцией

$$W_4(p) = \frac{T_1 \cdot p}{T_2 \cdot p + 1}.$$

Параметры звеньев приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Парам.												
K	2	3	6	7	9	11	13	15	17	19	20	22
T <sub>1</sub>	1	1.5	1.7	2.0	2.5	3.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
T <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.3
T <sub>3</sub>	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	0.8	0.6	0.4	0.2	0.35	0.45

Напряжения на выходах исследуемых звеньев должны быть получены для двух основных режимов входных воздействий (рисунок):

- скачкообразное изменение (рис. 1.1, а);
- линейный закон изменения (рис. 1.1, б).

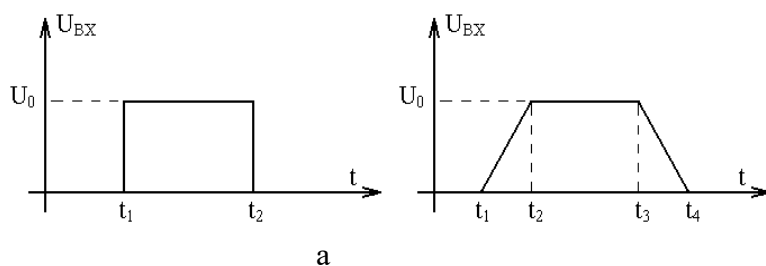


Рис. 1.1. Скачкообразный (а) и линейный (б) закон изменения входного воздействия

Параметры входных сигналов по вариантам представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
U <sub>0</sub>	5	7	9	13	15	14	12	10	8	6	4	2
t <sub>1</sub>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
t <sub>2</sub>	7	11	15	9	13	10	8	12	7	16	17	19
t <sub>3</sub>	10	15	20	11	17	13	14	15	11	19	20	17
t <sub>4</sub>	12	18	23	14	19	17	16	19	13	24	23	20

Данные зависимости моделируются в среде визуального программирования **MatLabSimulink** с помощью блоков:

- блока построения сигналов **SignalBuilder**;
- блока **TransferFcn**;
- блока **Mux**;
- осциллографа **Scope**.

Для каждого исследуемого звена необходимо получить зависимости  $U_{вх}(t)$  и  $U_{вых}(t)$  для двух видов входных воздействий, как на экране дисплея, так и на бумаге с помощью принтера. При необходимости регистрации на одном графике, как  $U_{вх}(t)$ , так и  $U_{вых}(t)$  возможно введение масштабов с использованием пропорционального звена. Также необходимо получить и распечатать частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) каждого звена, отметить на них частоты среза и сопряжения, если таковые имеются.

В отчёте по лабораторной работе по результатам моделирования установить, как зависят величина и характер изменения  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  от:

- а) характера изменения входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}(t)$  (величины скачка, установившегося значения, темпов нарастания, спадания);
- б) параметров исследуемого звена ( $K_i$ ,  $T_i$ ).

### **Выборка и редактирование универсального блока TransferFcn**

Программа **Simulink** является приложением к пакету **MATLAB**. При моделировании с использованием **Simulink** реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области в которой он работает.

**Simulink** является достаточно самостоятельным инструментом **MATLAB** и при работе с ним совсем не требуется знать сам **MATLAB** и остальные его приложения. С другой стороны доступ к функциям **MATLAB** и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в **Simulink**. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в **Simulink** (например, **LTI-Viewer** приложения **Control System Toolbox** – пакета для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, **Power System Blockset** – моделирование электротехнических устройств, **Digital Signal Processing Blockset** – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д).

При работе с **Simulink** пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки **Simulink**. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет **MATLAB**. Основное окно пакета **MATLAB** показано на рис. 1.2. Там же показана подсказка появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык **Simulink** в панели инструментов.

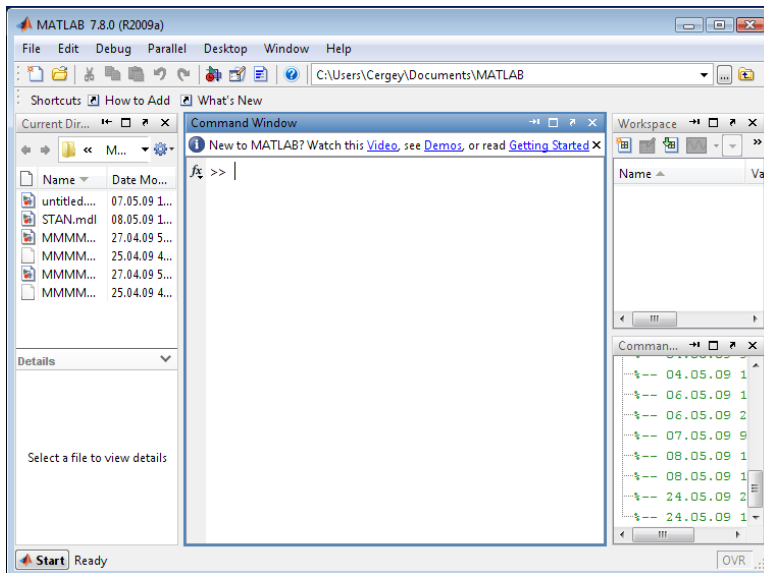



Рис. 1.2. Основное окно программы **MATLAB**

После открытия основного окна программы **MATLAB** нужно запустить программу **Simulink**. Это можно сделать одним из трех способов (рис. 1.3):

- Нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов командного окна **MATLAB**.
- В командной строке главного окна **MATLAB** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре.
- В меню **File** открыть вкладку **New - Model**.

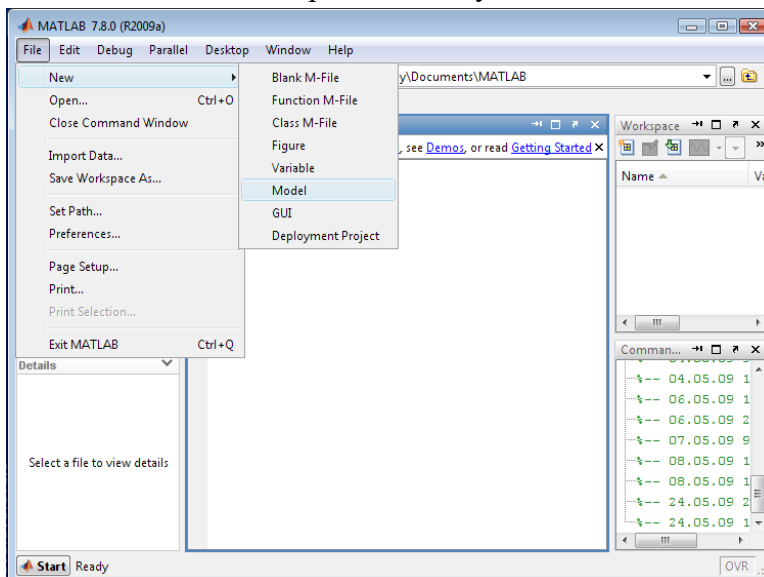


Рис. 1.3. Основное окно программы **MATLAB**

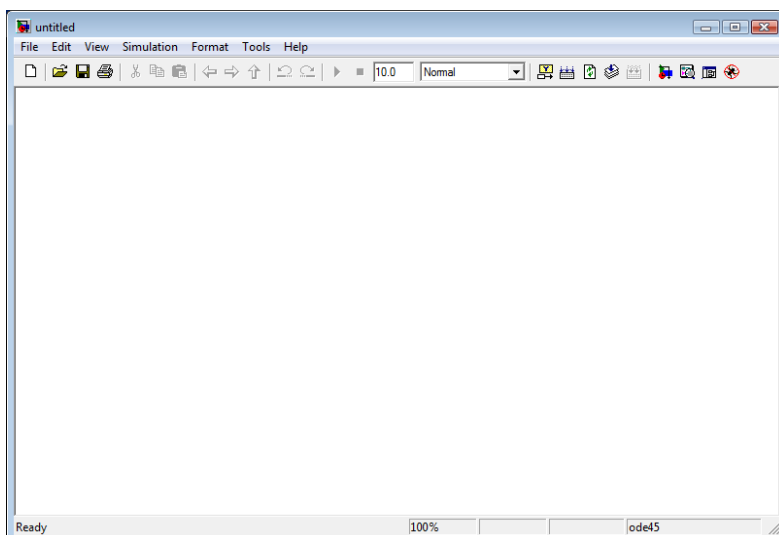



Рис. 1.4. Окно рабочей области

Появившееся окно – окно рабочей области, в которой можно собирать структурные схемы динамических систем.

Все динамические блоки находятся в библиотеке, которая открывается нажатием клавиши  на панели окна рабочей области (рис. 1.5).

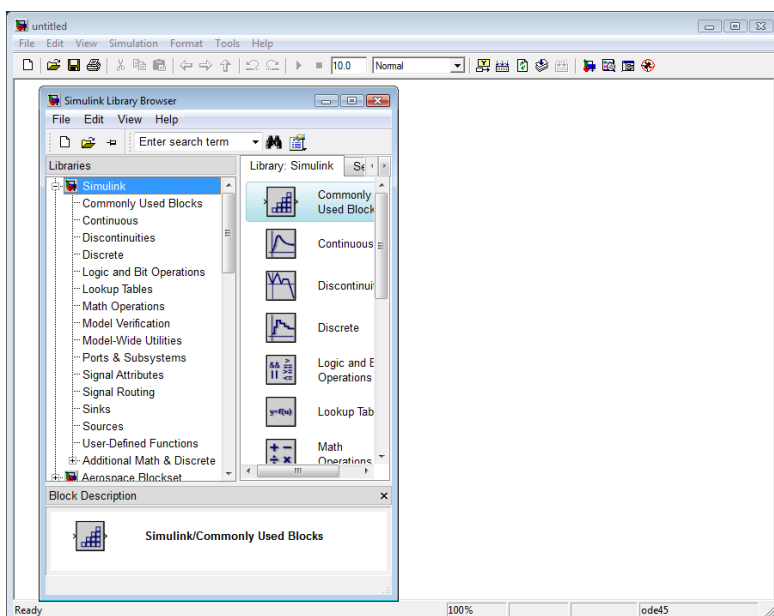


Рис. 1.5. Библиотека MATLAB

Выбрать и расположить в окне необходимые для модели блоки можно указав курсором на требуемый блок в выбранном разделе (например **Continuous – TransferFcn**) и нажав на левую клавишу “мыши” – “перетащить” блок в созданное окно (рис. 1.6). *Клавишу мыши нужно держать нажатой.*

Выбранный блок является универсальным и в него можно записать передаточную функцию любого известного и ТАУ динамического звена, любого порядка.

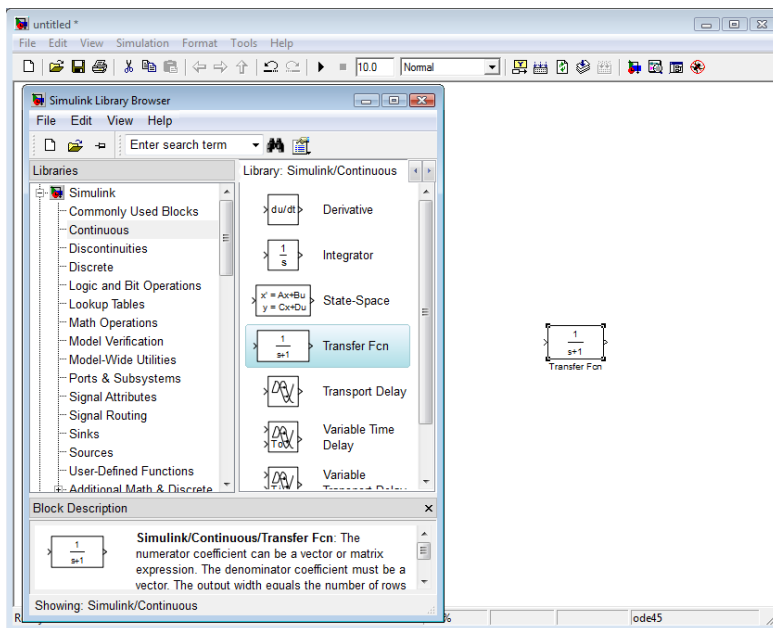


Рис. 1.6. Выборка блоков библиотеки MATLAB

Например, необходимо реализовать апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{5}{2 \cdot p + 1}$$

Для этого нужно дважды щелкнуть мышью блок **TransferFcn** в рабочем окне (рис. 1.7).

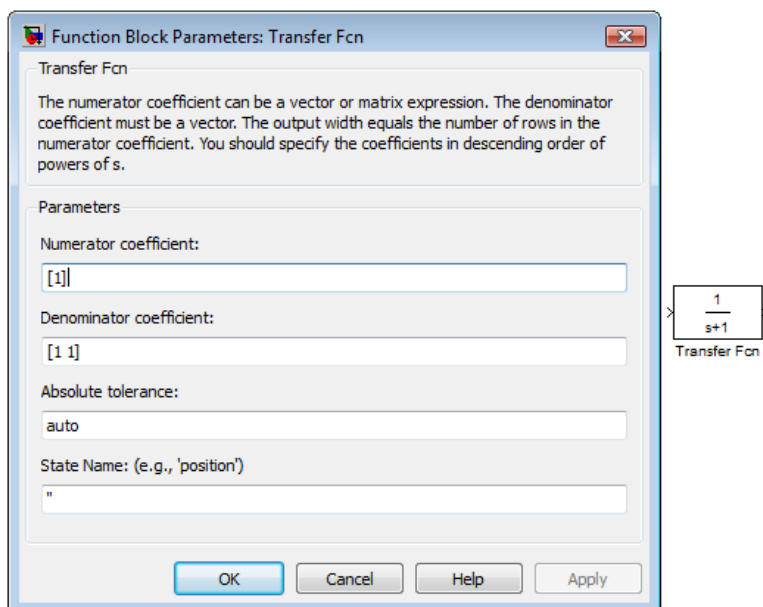


Рис. 1.7. Функциональное окно блока **TransferFcn**

В появившемся функциональном окне в строке **Numeratorcoefficient** в квадратных скобках через пробел указываются коэффициенты полинома числителя передаточной функции, а в строке **Denominatorcoefficient** коэффициенты полинома знаменателя. В данном случае для

выбранного апериодического звена заполненный функциональный блок представлен на рис. 1.8.

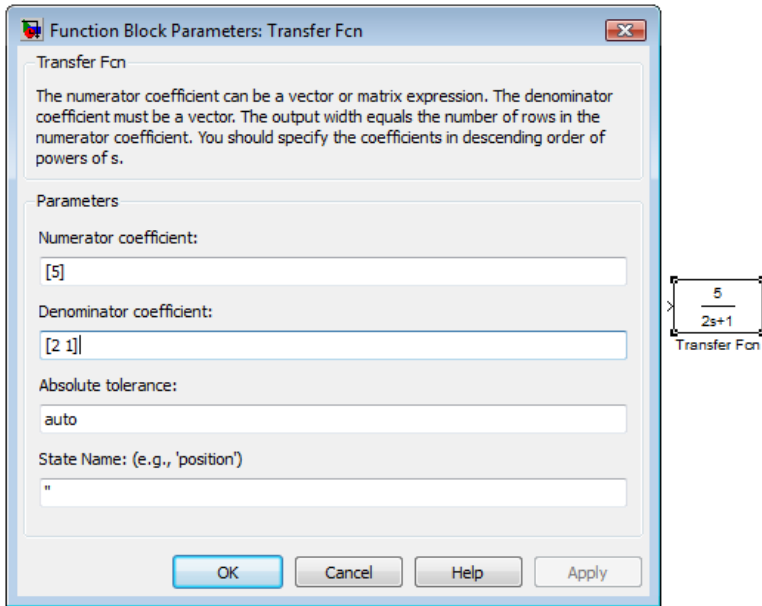


Рис. 1.8. Функциональное окно блока **TransferFcn**

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу “мыши”), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

**Любая динамическая система предполагает исследования её с помощью управляющих и возмущающих воздействий. Изменяющийся во времени сигнал любой формы можно получить с помощью универсального блока построения сигналов SignalBuilder, который находится в списке библиотеки Simulink – Sources. Для снятия переходных процессов в среде MatLab можно воспользоваться многофункциональным осциллографом (список Sinks - Scope). В осциллограф можно завести несколько сигналов с помощью блока Mux в списке Commonly Used Blocks (рис. 1.9). Соединение двух блоков (вход - выход) осуществляется удерживанием и соединением входа с выходом левой кнопкой мыши. При подведении мыши ко входу курсор меняет форму на крест.**

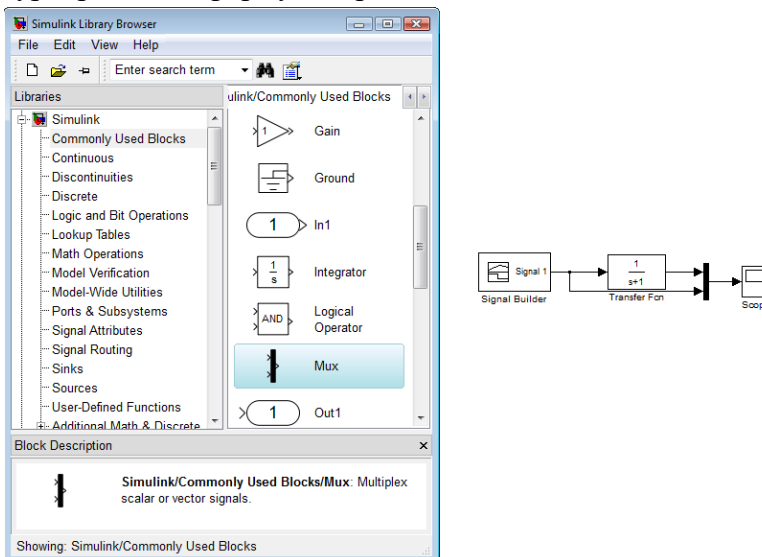


Рис. 1.9. Выборка блока Mux

## Блок построения сигналов SignalBuilder

Построение сигнала любой формы осуществляется в специальной области. Область построения сигнала появляется при двойном щелчке по блоку SignalBuilder в рабочем окне (рис. 1.10).

В окне построения сигналов красным цветом показан ломаный сигнал в масштабе времени. За угол излома можно ухватиться мышью и изменить его форму. Также есть возможность изменять уровень сигнала по амплитуде. Для этого необходимо щелкнуть мышью на угол сигнала, точка угла выделится красным кругом. Внизу окна (LeftPoint, RightPoint) можно вручную изменить координаты этой точки. Если не хватает точек для построения нужного сигнала, то можно добавить необходимое количество точек, щелкнув в нужное место правой кнопкой мыши, удерживая клавишу Shift (рис. 1.11).

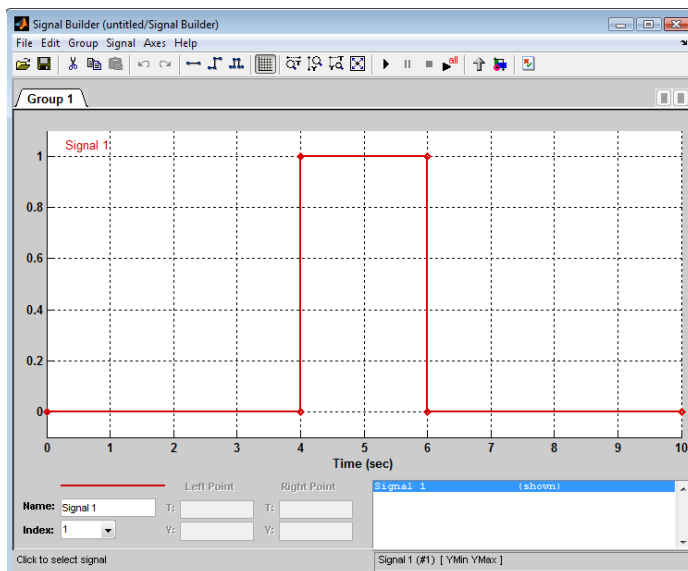
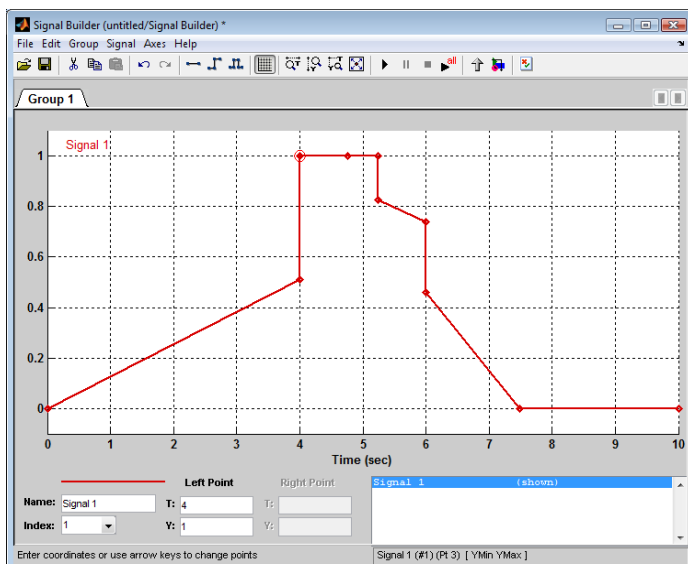


Рис.1.10. Окно построения сигнала SignalBuilder





### Рис.1.11. Окно построения сигнала

Для того, чтобы открыть окно просмотра сигналов необходимо выполнить двойной щелчок левой клавишей “мыши” на изображении блока **Scope**, появится окно осциллографа (рис. 1.12). Это можно сделать на любом этапе расчета (как до начала расчета, так и после него, а также во время расчета). В том случае, если на вход блока поступает векторный сигнал, то кривая для каждого элемента вектора строится отдельным цветом.

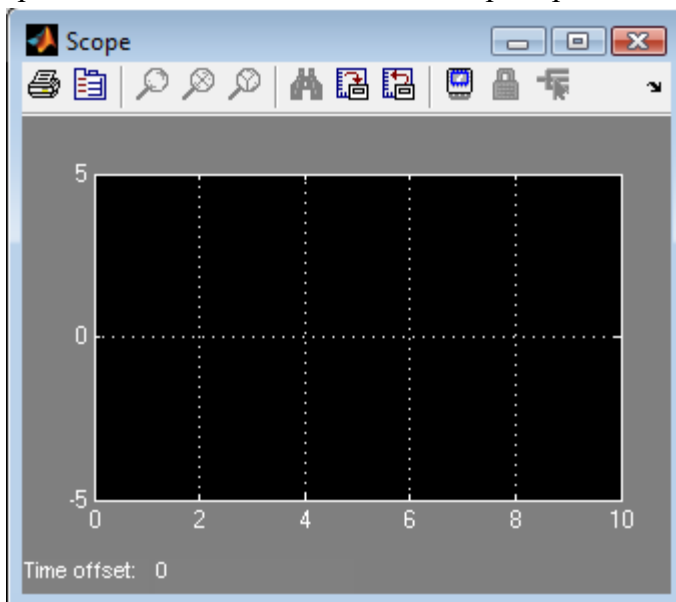


Рис. 1.12. Окно осциллографа

Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 1.13).

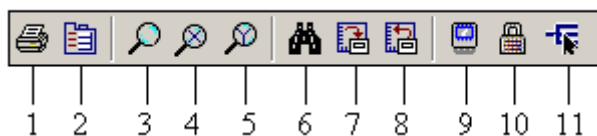








Рис. 1.13. Панель инструментов блока **Scope**

Панель инструментов содержит 11 кнопок:

1. **Print** – печать содержимого окна осциллографа.
2. **Parameters** – доступ к окну настройки параметров.
3. **Zoom** – увеличение масштаба по обеим осям.
4. **ZoomX-axis** – увеличение масштаба по горизонтальной оси.
5. **ZoomY-axis** – увеличение масштаба по вертикальной оси.
6. **Autoscale** – автоматическая установка масштабов по обеим осям.
7. **Savecurrentaxessettings** – сохранение текущих настроек окна.
8. **Restoresavedaxessettings** – установка ранее сохраненных настроек окна.
9. **Floating scope** – перевод осциллографа в “свободный” режим.
10. **Lock/Unlockaxesselection** – закрепить/разорвать связь между текущей координатной системой окна и отображаемым сигналом. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.
11. **Signalselection** – выбор сигналов для отображения. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

Изменение масштабов отображаемых графиков можно выполнять несколькими способами:

1. Нажать соответствующую кнопку ( ,  или  ) и щелкнуть один раз левой клавишей “мыши” в нужном месте графика. Произойдет 2,5 кратное увеличение масштаба.
2. Нажать соответствующую кнопку ( ,  или  ) и, нажав левую клавишу “мыши”, с помощью динамической рамки или отрезка указать область графика для увеличенного изображения. На рис. 1.14 изображено окно просмотра сигналов осциллографа.

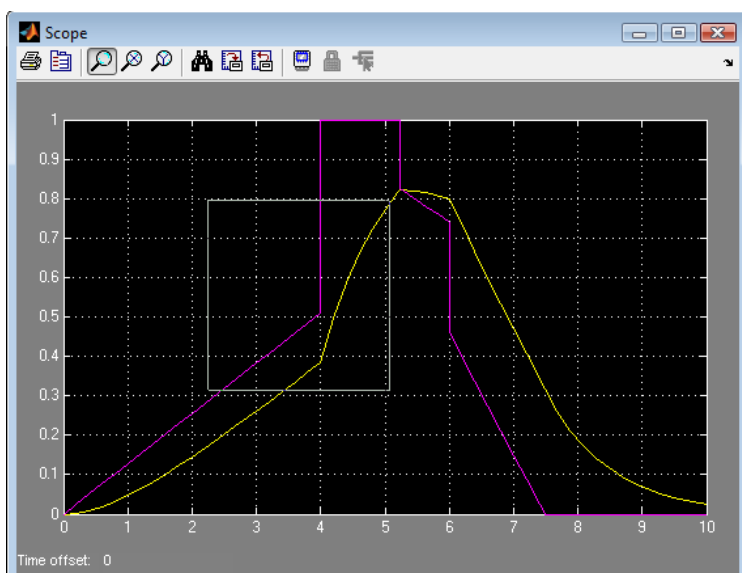


Рис. 1.14. Окно просмотра сигналов осциллографа

3. Щелкнуть правой клавишей “мыши” в окне графиков и, выбрать команду **Axes properties...** в контекстном меню. Откроется окно свойств графика, в котором с помощью параметров **Y-min** и **Y-max** можно указать предельные значения вертикальной оси. В этом же окне можно указать заголовок графика (**Title**), заменив выражение **%<SignalLabel>** в строке ввода. Окно свойств показано на рис. 1.15.

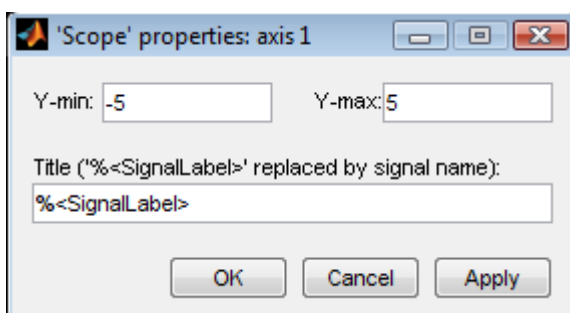



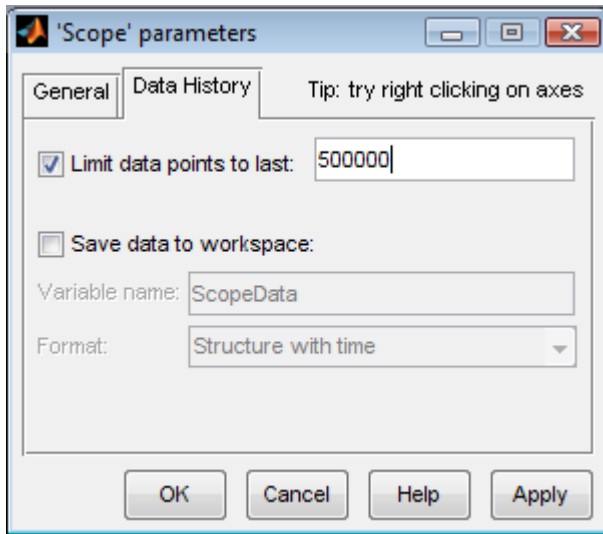
Рис. 1.15. Окно свойств графика

*Параметры:*

Параметры блока устанавливаются в окне **'Scope' parameters**, которое открывается с помощью инструмента  (**Parameters**) панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

**General** – общие параметры.

**Data history** – параметры сохранения сигналов в рабочей области **MATLAB** (рис. 1.16).



**Рис. 1.16.** Окно свойств осциллографа

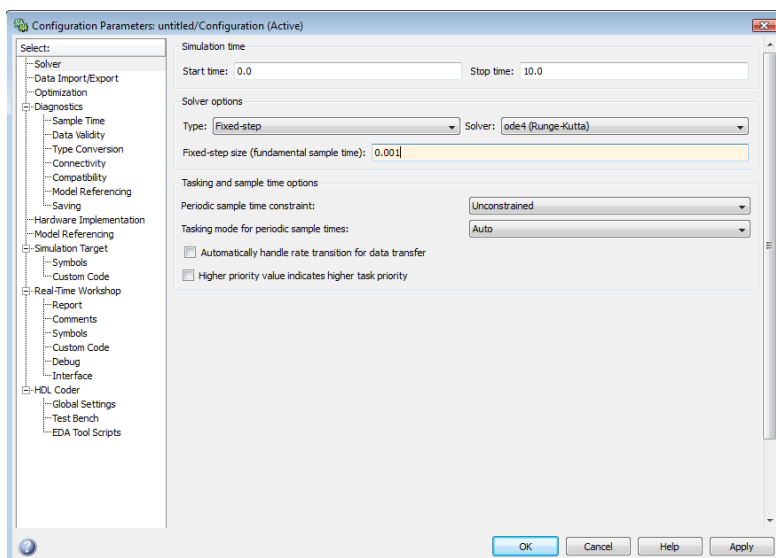
Во вкладке **Limitdatapointstolast** можно указать нужное количество точек осциллографа. Если точек не будет хватать для построения всех переходных процессов, то графики будут «урезаны» во временном диапазоне.

### Выбор метода счета

Для различных структурных схем применяются различные методы счета. Если структурная схема состоит из динамических звеньев, то удобен метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом счета.

Для его установки в окне рабочей области нужно щелкнуть меню **Simulation / Configuration**.

В строке **Simulationtime** выставляются время начала и время конца счета. В разделе **Solveroptions** выставляется метод счета **Solver: ode4 (Runge-Kutta)**, тип счета **Type: Fixed-step**. В строке **Fixed-step size (fundamental sample time)** выставляется шаг счета. Окно настроек метода счета представлен на рис. 1.17.

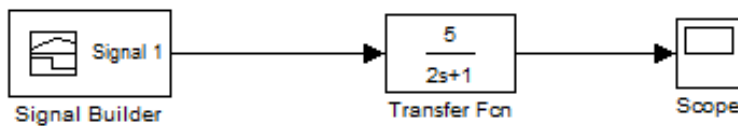


**Рис. 1.17. Окно конфигурации**

### **Снятие частотной характеристики звена или динамической системы в MatLab**

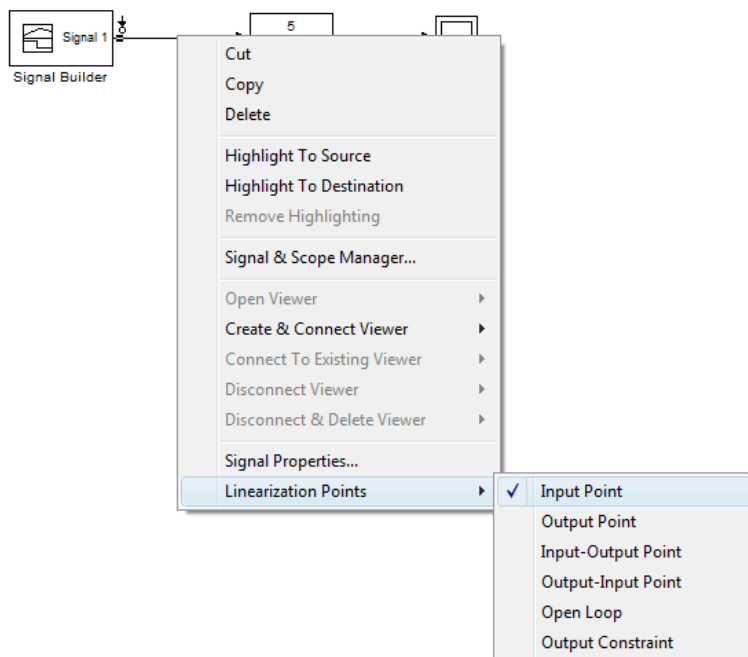
Пусть необходимо снять логарифмическую амплитудную и фазовую частотную характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) инерционного звена с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{5}{2 \cdot p + 1}, \text{ (рис. 1.18).}$$



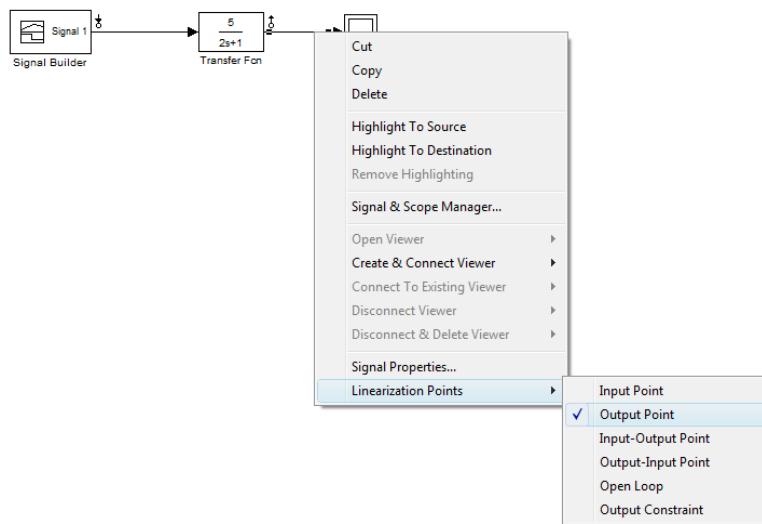
**Рис. 1.18. Инерционное звено**

Сначала нужно установить точки входа (Inputpoint) и выхода (Outputpoint) для снятия частотной характеристики. Для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на линию входа в блок и выбрать LinearizationPoints / Input Point, (рис. 1.19).



**Рис. 1.19. Установка точки входа**

Затем необходимо установить точку выхода частотной характеристики, щелкнув правой кнопкой на соединительную линию выхода инерционного звена и выбрав LinearizationPoints / OutputPoint, (рис.1.20).

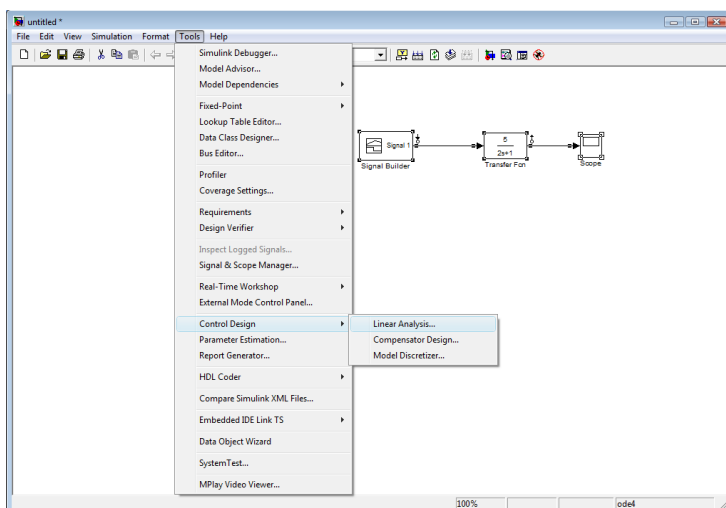


**Рис. 1.20. Установка точки выхода**

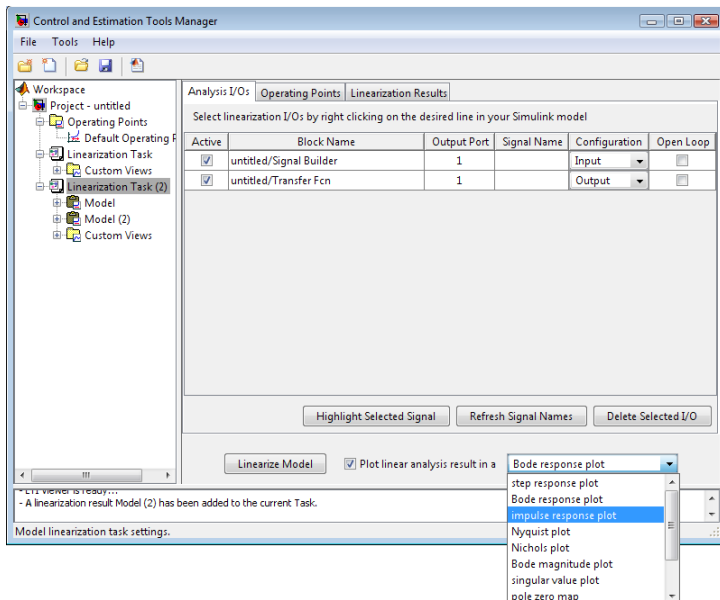
На пиктограмме структурной схемы должны появиться стрелки точек входа и выхода (рис. 1.20).

Далее в меню рабочего окна Tools нужно выбрать вкладку ControlDesign / LinearAnalysis, рис. 1.21.

В появившемся окне ControlandEstimationToolsManager необходимо установить тип осциллографа Boderesponseplot. Данного типа осциллограф является логарифмическим и показывает амплитудную и фазовую характеристики, рис. 1.22.

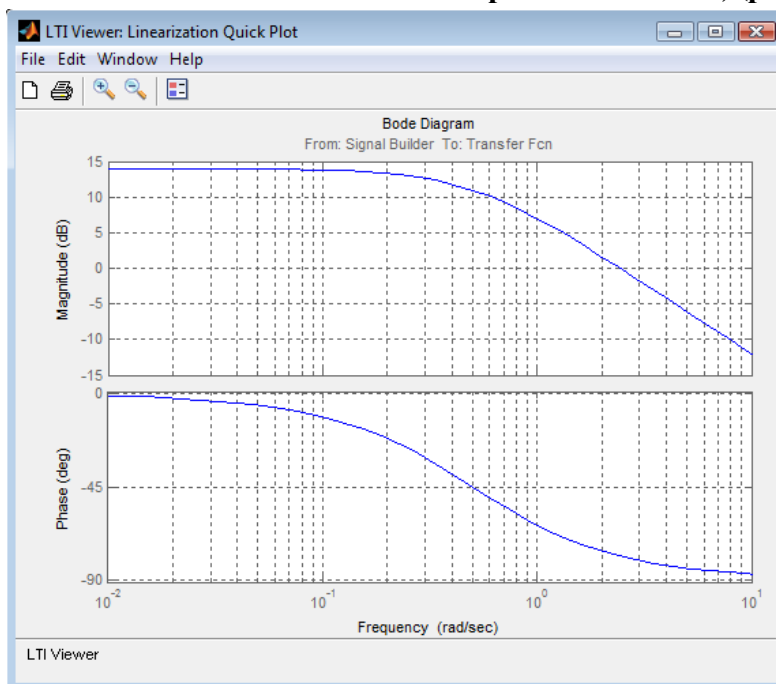


**Рис. 1.21. Открытие окна частотного анализа**



**Рис. 1.22. Окно свойств частотного анализа**

Далее в окне Control and Estimation Tools Manager нужно нажать кнопку Linearize Model. Появится окно ЛАЧХ и ЛФЧХ инерционного звена, (рис. 1.23).



**Рис. 1.23. Окно просмотра частотных характеристик**

## Лабораторная работа № 2

### Исследование свойств задатчика интенсивности

Задатчик интенсивности (ЗИ), применяемый широко в современных САР электропривода, обеспечивает преобразование быстроменяющегося входного напряжения в выходное напряжение, изменяющееся с заданным темпом. Если темп изменения входного напряжения ниже, чем заданный темп изменения выходного напряжения, то выходное напряжение повторяет по форме входное напряжение.

Структурная схема задатчика интенсивности представлена на рис. 2.1.

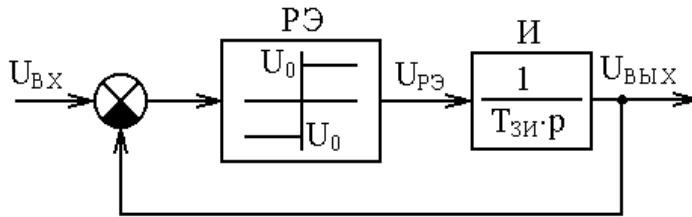


Рис. 2.1. Структурная схема ЗИ

В режиме отработки заданного темпа выходное напряжение изменяется по следующей зависимости (релейный элемент РЭ не насыщен):

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_0}{T_{\text{ЗИ}}} t$$

Таким образом темп изменения выходного напряжения можно регулировать либо изменением напряжения ограничения релейного элемента РЭ  $-U_0$ , либо – постоянной интегрирования интегратора И –  $T_{\text{ЗИ}}$ .

Время нарастания выходного напряжения до уровня входного можно определить

$$t_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_0} T_{\text{ЗИ}}$$

Моделирование процессов в ЗИ на основе цифровой модели по программе MatLabSimulink целесообразно осуществлять методами Рунге–Кутты или Эйлера с постоянным шагом интегрирования, так как реализация идеального релейного элемента методами Фельдберга и Кутта–Мэрсона с автоматическим выбором шага интегрирования дают значительные погрешности. Рекомендуется без больших погрешностей в расчётах характеристику релейного элемента реализовать в следующем приближённом виде (рис. 2.2):

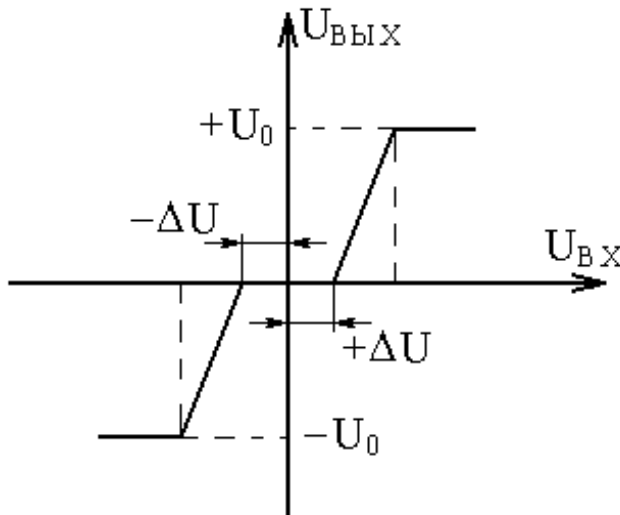


Рис. 2.2

При этом величина зоны нечувствительности в статической характеристике  $\pm\Delta U \geq h$ . Здесь  $h$  – шаг интегрирования. Коэффициент усиления на линейной части характеристики  $K = 200 \div 500$ .

Параметры ЗИ по вариантам приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$U_0, В$	10	12	14	16	15	16	17	18	10	12	11	14
$T_{зи}, с$	0.5	0.6	0.4	0.3	0.7	0.5	0.8	0.6	0.7	0.5	0.4	0.6

Свойства ЗИ исследуются при двух типах входных воздействий:

- ступенчатое воздействие (рис. 2.3, а);
- линейно изменяющееся напряжение (рис. 2.3, б).

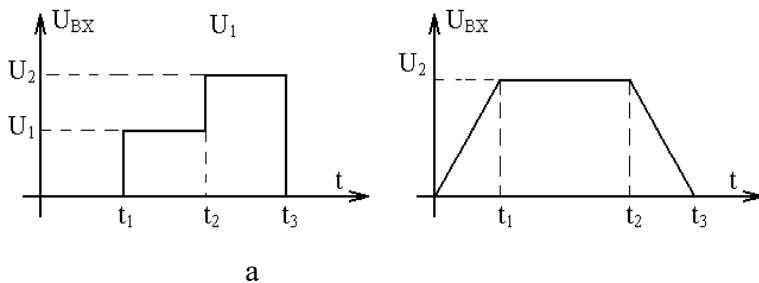


Рис. 2.3

Параметры входных воздействий по вариантам приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$U_1, В$	5	7	10	12	15	17	15	13	10	8	6	7
$U_2, В$	10	15	20	25	30	35	30	25	20	15	10	13
$t_1, с$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.6	0.9	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
$t_2, с$	1.2	2.0	3.2	3.5	4.0	5.0	3.6	2.7	2.6	1.7	1.1	1.2
$t_3, с$	2.0	3.3	5.0	5.5	6.5	8.5	6.0	5.0	4.5	3.0	2.5	2.2

Законы изменения входного напряжения формируются в программе MatLabSimulink с помощью блока построения сигналов **SignalBuilder** и блока одномерной матрицы **Look-UpTable**.

### Блок одномерной матрицы Look-Up Table

С помощью блока одномерной матрицы **Look-Up Table** можно задать график любой математической функции, либо нелинейную характеристику (блоки ограничения, блок зоны нечувствительности и др.). Данный блок находится в библиотеке **Simulink / Look-Up Table / Look-Up Table**. Окно и блок одномерной матрицы приведены на рис. 2.4.



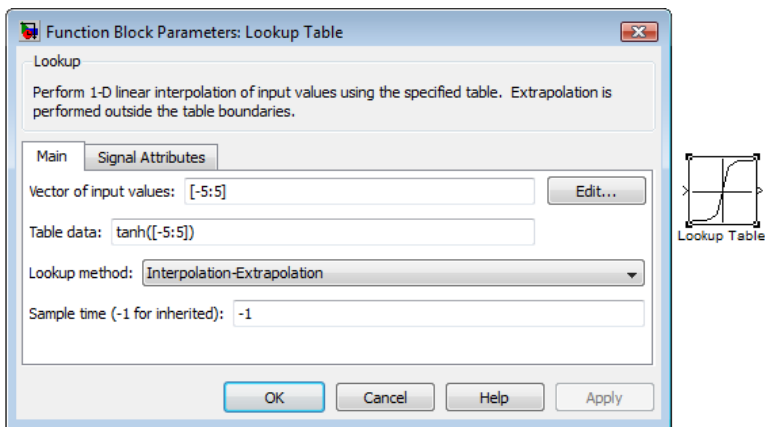


Рис. 2.4. Окно свойств блока **Look-UpTable**

В строке **Vectorofinputvalues** в квадратных скобках через пробел задаются координаты необходимого графика функции по оси абсцисс. В строке **Tabledata** в квадратных скобках задаются координаты графика функции по оси ординат. Заданный график отразится на пиктограмме блока.

**Например, необходимо реализовать блок ограничения с зоной нечувствительности и линейным участком (рис. 2.5).**

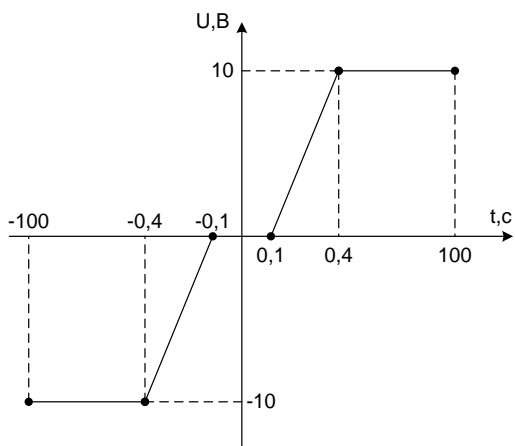


Рис. 2.5. Характеристика блока ограничения

Окно и блок одномерной матрицы с введенными координатами блока ограничения приведены на рис. 2.6.

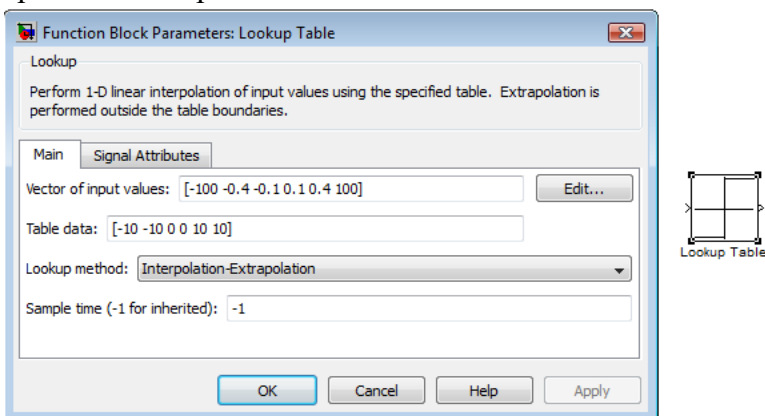


Рис. 2.6. Окно свойств блока **Look-UpTable**

В отчёте по лабораторной работе необходимо представить:

- 1) кривые переходных процессов  $U_{ВХ}(t)$ ,  $U_{РЭ}(t)$ ,  $U_{ВЫХ}(t)$  при заданных для данного варианта параметрах ЗИ и двух режимах изменения входного напряжения;
- 2) оценку влияния на свойства ЗИ параметров  $U_0$  и  $T_{зи}$ ;
- 3) анализ полученных результатов и выводы по ним.

### Лабораторная работа № 3

#### Исследование переходных процессов в линейных цепях возбуждения электрических машин при форсировке

Цепь возбуждения электрических машин, если пренебречь нелинейностью кривой намагничивания, потоками рассеяния и вихревых токов, описывается дифференциальным уравнением:

$$U_B = I_B \cdot R_B + L_B \frac{dI_B}{dt} \quad (3.1)$$

и может быть представлена апериодическим или инерционным звеном вида

$$W(p) = \frac{I_B(p)}{U_B(p)} = \frac{1/R_B}{T_B \cdot p + 1}$$

Здесь  $R_B$ ,  $L_B$  – соответственно сопротивление и индуктивность, а  $T_B$  – электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения.

Для крупных электрических машин  $T_B = (1 \div 5)$  с, поэтому при включении обмотки возбуждения на номинальное напряжение длительность нарастания тока возбуждения  $t_H = (3 \div 4) T_B$  и составляет от 3 до 20 с.

Для сокращения длительности нарастания тока возбуждения применяется форсированное возбуждение, суть которого состоит в том, что на период нарастания тока до номинального значения к обмотке возбуждения прикладывается напряжение  $\alpha U_{ВН}$ , где  $\alpha$  – коэффициент форсировки (рис. 3.1).

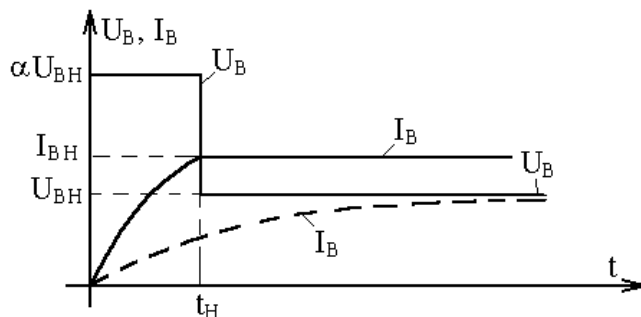


Рис. 3.1

Структурная схема модели по исследованию процессов в обмотках возбуждения может быть представлена в виде, представленном на рис. 3.2.

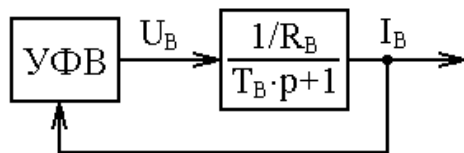


Рис. 3.2

Устройство для форсировки возбуждения (УФВ) обеспечивает изменение  $U_B(t)$ , соответствующее рис. 3.1. В программе MatLabSimulink УФВ может быть реализовано либо на **блокт построения сигналов SignalBuilder**, либо с помощью блока **одномерной матрицы Look-UpTable**.

Параметры исследуемой цепи возбуждения по вариантам приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$I_{BH}, A$	22	23	24	27	30	35	33	31	29	26	23	21
$R_B, Ом$	10	9.5	9.16	8.15	7.33	6.28	6.66	7.09	7.58	8.46	9.56	10.5
$T_B, с$	3	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5

В соответствии с уравнением (3.1) можно получить зависимость  $U_B=f(t)$ , обеспечивающую линейный закон нарастания и спадания тока возбуждения электрических машин за заданное время (рис. 3.3).

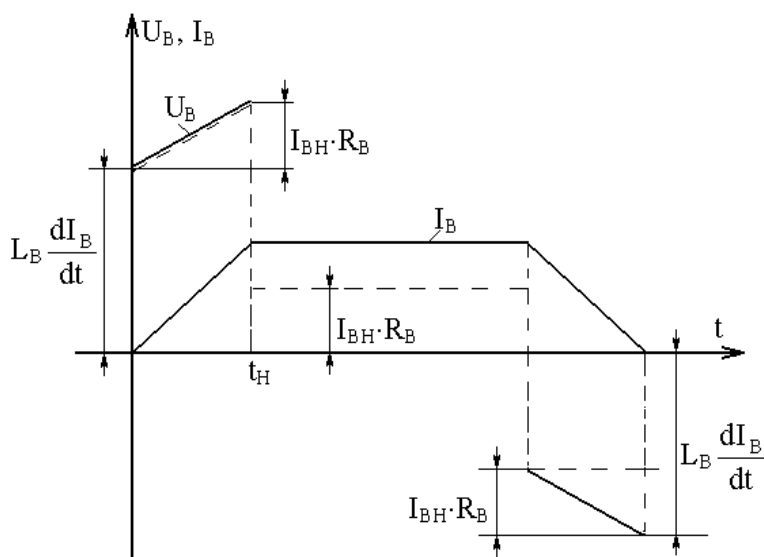


Рис. 3.3

В отчёте по лабораторной работе необходимо:

1. Получить кривые переходных процессов  $U_B = f(t)$ ,  $I_B = f(t)$  при коэффициенте форсировки  $\alpha = 3$ .
2. Получить зависимость длительности нарастания тока возбуждения от коэффициента форсировки ( $t_H=f(\alpha)$ ).

3. С учётом того, что  $\frac{dI_B}{dt} = \frac{I_{BH}}{t_H}$ , рассчитать и реализовать необходимый закон  $U_B(t)$  при  $t_H = 1$  с.
4. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

#### Лабораторная работа № 4

##### Исследование переходных процессов в цепях возбуждения электрических машин с учётом насыщения

Процессы в цепи возбуждения электрической машины без учёта влияния реакции якоря, потоков рассеяния и вихревых токов можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

$$U_B = I_B \cdot R_B + W_B \frac{d\Phi_B}{dt}; \quad (4.1)$$

$$\Phi_B = f(I_B), \quad (4.2)$$

где  $U_B, I_B$  – соответственно напряжение и ток возбуждения;

$R_B$  – суммарное сопротивление цепи возбуждения с учётом силовой цепи возбудителя;

$W_B$  – суммарное число витков обмотки возбуждения;

$\Phi_B$  – поток возбуждения;

$f(I_B)$  – нелинейная зависимость, не имеющая аналитического выражения, называемая кривой намагничивания электрической машины.

На рис. 4.1, приведена обобщённая кривая намагничивания двигателя в относительных единицах.

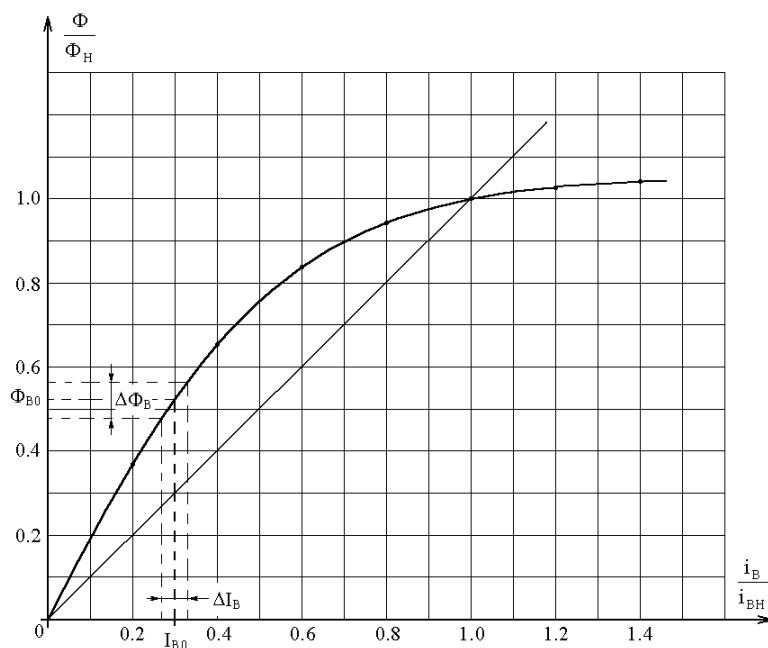


Рис. 4.1

Вводим оператор дифференцирования в уравнение (4.1)

$$U_B = I_B \cdot R_B + W_B \cdot \Phi_B \cdot p. \quad (4.1)$$

Отсюда

$$\Phi_B = \frac{R_B}{W_B \cdot p} \left( \frac{U_B}{R_B} - I_B \right). \quad (4.2)$$

Преобразуем выражение за скобками в (4.2) к виду

$$\frac{R_B}{W_B \cdot p} = \frac{R_B \cdot \Phi_{BH} \cdot I_{BH}}{W_B \cdot \Phi_{BH} \cdot I_{BH} \cdot p} = \frac{K_{BH}}{T_{BH} \cdot p},$$

$$\text{где } K_{BH} = \frac{\Phi_{BH}}{I_{BH}} \text{ и } T_{BH} = \frac{W_B \cdot \Phi_{BH}}{I_{BH} \cdot R_B}.$$

Соответственно коэффициент и электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения электрической машины для спрямлённой характеристики намагничивания рис. 4.1 (прямая 2).

Тогда выражение (4.2) преобразуется к виду

$$\Phi_B = \frac{R_B}{W_B \cdot p} \left( \frac{U_B}{R_B} - I_B \right). \quad (4.2)$$

На основе (4.2) и обратной кривой намагничивания

$I_B = f_1(\Phi_B)$  нелинейная цепь возбуждения может быть представлена структурной схемой вида (рис. 4.2).

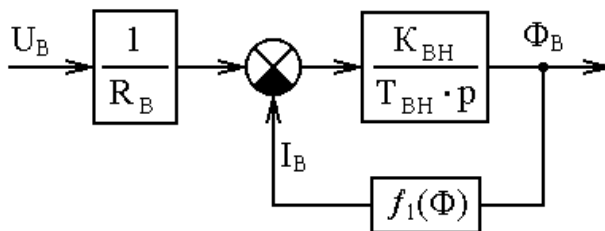


Рис. 4.2

Если провести линейную аппроксимацию кривой намагничивания для какого-либо конкретного значения потока  $\Phi_{B0}$ , то структурная схема на рис. 4.2 может быть преобразована к виду (рис. 4.3).

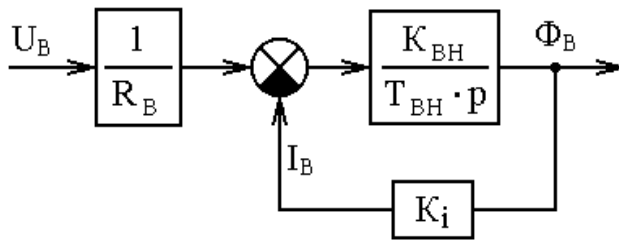


Рис. 4.3

Здесь  $K_i = \frac{\Delta I_B}{\Delta \Phi_B}$ , причём  $\Delta I_B$  и  $\Delta \Phi_B$  относительно небольшие приращения тока и потока возбуждения, полученные по кривой намагничивания в окрестности аппроксимируемой точки  $I_{B0}$  (см. рис. 4.1). После эквивалентных преобразований структурная схема на рис. 4.3 может быть представлена на рис. 4.4.

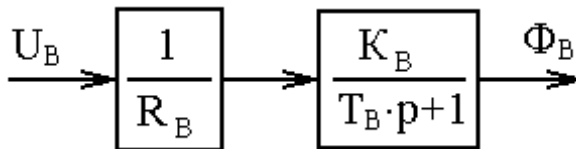


Рис. 4.4

Здесь  $K_B = \frac{1}{K_i}$  и  $T_B = \frac{T_{BH}}{K_{BH} \cdot K_i}$  соответственно коэффициент и электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения для выбранной точки аппроксимации. Очевидно, что по мере возрастания тока возбуждения растёт и величина коэффициента  $K_i$ , а это, в свою очередь, снижает значения  $K_B$  и  $T_B$  по мере насыщения магнитной системы электрической машины.

Параметры исследуемой цепи возбуждения по вариантам приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$\Phi_H, \text{В} \cdot \text{с}$	0.146	0.2	0.11	0.12	0.16	0.18	0.22	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12
$I_{BH}, \text{А}$	22	23	24	27	30	35	33	31	29	26	23	21
$R_B, \text{Ом}$	10	9.5	9.1	8.15	7.33	6.28	6.66	7.09	7.58	8.46	9.56	10.5
$T_{BH}, \text{с}$	3	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5

**Внимание!** До того, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо рассчитать реальную кривую намагничивания двигателя для своего варианта, используя для этого рис. 4.1 и номинальные данные из таблицы. Кривая намагничивания моделируется с помощью блока **Look-UpTable**.

После этого рассчитать параметры и реализовать цифровую модель в соответствии со структурной схемой на рис. 4.2.

В отчёте по лабораторной работе необходимо:

- 1) проанализировать переходные процессы в цепи возбуждения, обусловленные изменением напряжения возбуждения  $\Delta U_B = +0.1 U_{BH}$  при условии, что к обмотке возбуждения уже приложено напряжение  $U_{B0} = 0.3 U_{BH}$ ,  $0.6 U_{BH}$  и  $0.9 U_{BH}$ . Для того, чтобы исключить переходные процессы, связанные с приложением к обмотке возбуждения начального напряжения  $U_{B0}$ , необходимо в интегрирующем звене на модели задать начальное значение потока возбуждения, рассчитанное для этого режима с учётом кривой намагничивания;
- 2) для трех начальных значений проточка возбуждения построить частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ), входной сигнал для частотной характеристики  $U_B$ , выходной  $\Phi_B$ .
- 3) по полученным кривым переходных процессов рассчитать значения  $K_B$  и  $T_B$  для каждого режима;

- 4) построить зависимости  $K_B$  и  $T_B$  от величины  $\frac{U_{B0}}{U_{BH}}$ ;
- 5) сделать выводы по полученным результатам.

## Лабораторная работа № 5

### Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при однозонном регулировании скорости

Структурная схема двигателя постоянного тока при постоянном потоке возбуждения наиболее часто представляется в виде, изображённом на рис. 5.1.

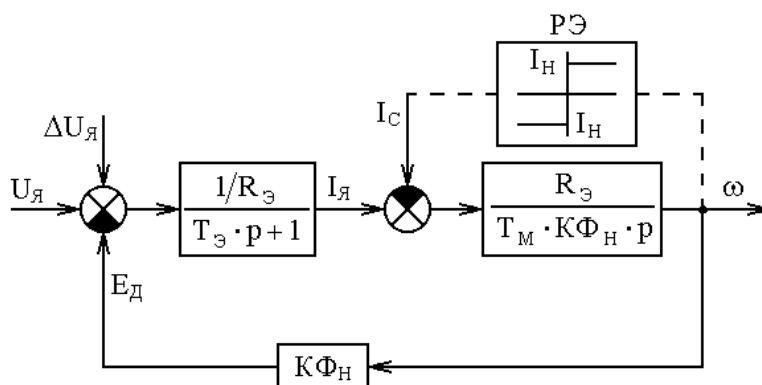


Рис. 5.1

Здесь  $R_э$ ,  $T_э$  – эквивалентное сопротивление и постоянная времени якорной цепи двигателя;  $K\Phi_H$  – коэффициент двигателя;

$T_M = J_\Sigma \frac{R_\Delta}{(K\Phi_H)^2}$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, а  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции электропривода.

Исходные параметры по структурной схеме для каждого варианта приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$U_H, В$	220	220	220	220	220	220	440	440	440	440	440	440
$K\Phi_H, В\cdot с$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
$R_\Delta, Ом$	1.1	0.73	0.55	0.44	0.36	0.31	0.62	0.72	0.88	1.1	1.46	2.2
$T_M, с$	0.02	0.017	0.015	0.013	0.012	0.011	0.011	0.015	0.025	0.035	0.045	0.046
$I_H, А$	20	30	40	50	60	70	70	60	50	40	30	20

Для всех вариантов  $T_\Delta = 0.03 с$ .

В отчёте по лабораторной работе на основе реализованной модели необходимо рассчитать и проанализировать переходные процессы  $U_\Delta(t)$ ,  $I_\Delta(t)$ ,  $\omega(t)$  в следующих режимах:

- 1) разгон и торможение двигателя на холостом ходу при изменении напряжения якоря в соответствии с рис. 5.2.;
- 2) для данной структурной схемы построить частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) для трёх случаев:
  - а) входной сигнал для частотной характеристики  $U_\Delta$ , выходной  $\omega_{ДВ}$ ;
  - б) входной сигнал для частотной характеристики  $I_\Delta$ , выходной  $\omega_{ДВ}$ ;
  - в) входной сигнал для частотной характеристики  $I_C$ , выходной  $I_\Delta$ ;
- 3) разгон и торможение двигателя при приложении  $I_C = I_H$ :
  - а) активного статического момента (тока) в интервале времени  $0 \div t_5$ ;
  - б) реактивного статического момента, появляющегося при  $\omega \neq 0$ , (на модели реализуется с помощью релейного элемента РЭ с уровнем ограничения, равным  $I_C = I_H$ );
  - в) статического момента, прикладываемого в период разгона двигателя ( $t = t_1$ ) и снимаемого в период торможения ( $t = t_4$ );
- 4) приложения скачка напряжения якоря  $\Delta U_\Delta = 0.1 U_{\Delta H}$  при  $U_{\Delta 0} = (0.5 \div 0.8) U_{\Delta H} = const$ ;
- 5) приложение  $I_C = I_H$  при  $U_{\Delta 0} = (0.5 \div 0.8) U_{\Delta H}$ .



Внимание! В двух последних режимах для исключения переходных процессов, вызванных начальным изменением напряжения якоря при  $U_{я0}$ , необходимо в звене, моделирующем электромеханическую инерцию двигателя, задать начальное значение скорости  $\omega_0 =$

$$\frac{U_{я0}}{K\Phi_H}$$

Величины и характер изменения  $U_{я}(t)$  и  $I_c(t)$  для каждого варианта представлены на рис. 5.2 и в табл. 5.2.

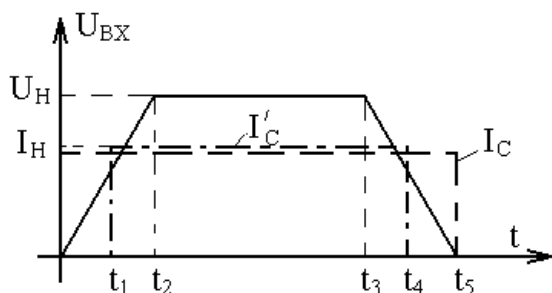


Рис. 5.2

Таблица 5.2

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$t_1, c$	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.2	0.2
$t_2, c$	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
$t_3, c$	1.45	1.4	1.5	1.4	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.6	1.45	1.35
$t_4, c$	1.7	1.6	1.65	1.55	1.45	1.5	1.6	1.4	1.65	1.8	1.6	1.6
$t_5, c$	1.9	1.8	1.85	1.7	1.55	1.6	1.7	1.55	1.8	1.95	1.85	1.8

В отчёте по лабораторной работе необходимо:

- 1) проанализировать переходные процессы для всех, указанных выше, режимов;
- 2) проанализировать полученные частотные характеристики для всех, указанных выше, режимов
- 3) установить влияние на характер переходных процессов и установившихся режимов:
  - изменения напряжения якоря;
  - характера статического момента;
- 4) сделать необходимые выводы по полученным результатам.

## Лабораторная работа № 6

### Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при двухзонном регулировании скорости

Структурная схема двигателя постоянного тока при регулировании скорости в двух зонах может быть представлена в виде, изображённом на рис. 6.1.

Все параметры исследуемого двигателя должны быть взяты из предыдущей лабораторной работы, а величина суммарного момента инерции рассчитывается из выражения

$$J_{\Sigma} = \frac{T_M (K\Phi_H)^2}{R_{\Sigma}}$$

Для более полного использования двигателя по мощности и моменту, ослабление потока возбуждения двигателя осуществляется только после того, как будет достигнуто номинальное значение напряжения якоря.

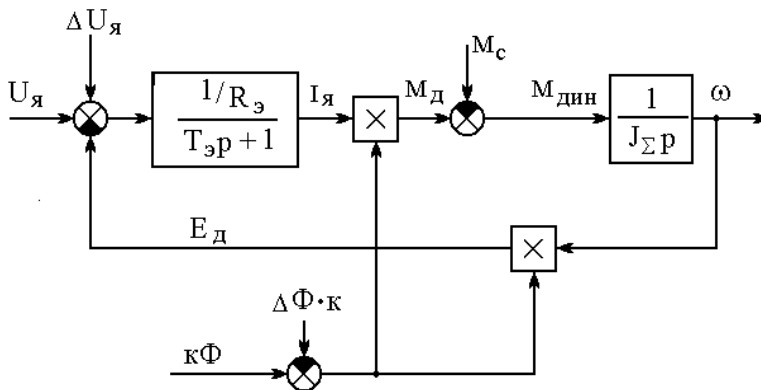


Рис. 6.1

В отчёте по лабораторной работе на основе цифровой модели необходимо рассчитать и проанализировать переходные процессы  $U_{\text{я}}(t)$ ,  $I_{\text{я}}(t)$ ,  $\omega(t)$  в следующих режимах:

- 1) разгон двигателя на холостом ходу до максимальной скорости и торможение до нуля;
- 2) разгон до максимальной скорости и торможение, при приложении  $M_{\text{с}} = K\Phi_{\text{н}} \cdot I_{\text{ян}}$  при разгоне и снятии статического момента при торможении;
- 3) приложение скачка напряжения якоря  $U_{\text{я}}$  при:
  - а)  $K\Phi_0 = K\Phi_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{я}0} = U_{\text{ян}}$ ,
  - б)  $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$ ;
- 4) приложение скачком  $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$  при:
  - а)  $K\Phi_0 = K\Phi_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{я}0} = U_{\text{ян}}$ ,
  - б)  $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$ ;
- 5) изменение скачком потока возбуждения двигателя  $\Delta K\Phi_0 = +0.1K\Phi_{\text{н}}$  при  $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$ ,  $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$ .
- 6) Для структурной схемы (рис. ) построить частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) для двух случаев:

- а) входной сигнал для частотной характеристики  $M_{\text{с}}$ , выходной  $I_{\text{я}}$ , при  $k\Phi = k\Phi_{\text{н}}$ ;
- б) входной сигнал для частотной характеристики  $M_{\text{с}}$ , выходной  $I_{\text{я}}$ , при  $k\Phi = k\Phi_{\text{min}}$ .

Величина и характер изменения  $U_{\text{я}}(t)$ ,  $K\Phi(t)$  и  $M_{\text{с}}(t)$  для реализации режимов 1 и 2 приведены на рис. 6.2 и в таблице 6.1.

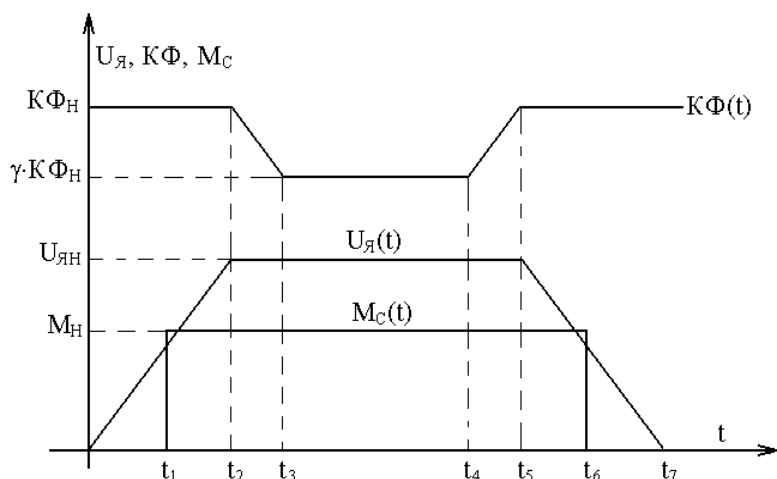


Рис. 6.2

Таблица 6.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$\gamma$	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
$t_1$	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$t_2$	0.3	0.3	0.35	0.4	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.35	0.35
$t_3$	0.6	0.6	0.65	0.75	0.7	0.7	0.75	0.7	0.75	0.75	0.7	0.7
$t_4$	1.5	1.5	1.55	1.6	1.6	1.55	1.6	1.55	1.6	1.55	1.55	1.55
$t_5$	1.8	1.8	1.85	1.9	1.9	1.85	1.9	1.85	1.9	1.85	1.85	1.85
$t_6$	1.9	1.9	1.95	2.1	2.1	2.0	2.1	2.0	2.1	2.0	2.0	2.0
$t_7$	2.1	2.1	2.15	2.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2

Внимание! Для исключения переходных процессов, вызванных начальным изменением напряжения якоря  $U_{я0}$ , необходимо, как и в предыдущем случае, в звене, моделирующем электромеханическую инерцию двигателя, задать начальное значение скорости  $\omega_0 =$

$$\frac{U_{я0}}{K\Phi_0}$$

В отчёте по лабораторной работе необходимо:

- 1) проанализировать переходные процессы для всех рассмотренных выше режимов;
- 2) установить влияние на характер переходных процессов и установившихся режимов:
  - изменения напряжения якоря;
  - ударного приложения статического момента;
  - изменения потока возбуждения двигателя;
- 3) провести сравнительный анализ переходных процессов в режимах 3, 4 при полном и ослабленном значениях потока возбуждения двигателя;
- 4) проанализировать частотные характеристики, снятые по возмущающему воздействию, при полном и ослабленном значениях потока возбуждения двигателя;
- 5) сделать выводы по полученным результатам.