



**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Автоматизированный электропривод»**

**В. В. Логвин, И. В. Дорощенко**

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
по курсовому проектированию  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
дневной формы обучения**

**Гомель 2024**

УДК 62-83-52(075.8)  
ББК 31.291я73  
Л69

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 10 от 27.06.2023 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Физика и электротехника» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *А. В. Козлов*

**Логвин, В. В.**  
Л69 Системы управления электроприводами : учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. формы обучения / В. В. Логвин, И. В. Дорощенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 39 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Мб RAM ; свободное место на HDD 16 Мб ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит варианты заданий с исходными данными к курсовому проекту по дисциплине «Системы управления электроприводами». Приведены требования по содержанию разделов расчетно-пояснительной записки и графического материала. Даны методические указания по выполнению основных этапов курсового проекта.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной формы обучения.

УДК 62-83-52(075.8)  
ББК 31.291я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024

## **Введение**

В данном пособии приводятся цель проекта и требования к нему. Варианты заданий для разработки систем автоматического управления (САУ) электроприводами (ЭП) рабочих машин составлены по данным конкретных промышленных установок.

Методические указания по выполнению соответствующих разделов дают направление работы над проектом, показывают взаимосвязь требований и условий, которую надо учитывать при решении определенных инженерных задач.

## **1. Цель и задачи проекта**

При подготовке инженеров, работающих в области автоматизации промышленных установок и технологических комплексов, существенную роль играет дисциплина «Системы управления электроприводами». Это объясняется тем, что основой САУ рабочими машинами является автоматизированный электропривод (АЭП). Поэтому основная цель данного проекта заключается в развитии, систематизации и закреплении теоретических навыков, необходимых при выборе структуры, синтезе и анализе САУ и систем автоматического регулирования (САР) ЭП рабочих машин.

Главными задачами, которые необходимо решить в процессе проектирования являются: выбор системы регулируемого ЭП, выбор структуры САУ и ее синтез. Эти задачи неотделимо связаны с вопросами выбора типоразмера электродвигателя, силового оборудования и элементной базы, выбора методов синтеза и анализа системы, которые рассматривались в дисциплинах «Теория автоматического управления», «Теория электропривода» и в других.

## **2. Задание на курсовой проект и требования к проекту**

Задание на разработку САУ ЭП содержит основные конструктивные параметры и технологические требования к механизму. Последние должны быть обеспечены системой ЭП. При необходимости в исходные данные могут быть внесены дополнительные требования, напряжение и род тока электродвигателя, а также их количество.

Курсовой проект выполняется в виде графической части и расчетно-пояснительной записки. Записка в общем случае содержит следующие разделы:

- Введение.
- 1. Технические характеристики механизма. Требования к САУ ЭП.
- 2. Выбор системы ЭП и типоразмера электродвигателя.
- 3. Выбор силового оборудования и расчет параметров ЭП.
- 4. Разработка структуры САУ.
- 5. Синтез САР и выбор элементов контуров регулирования.
- 6. Анализ статических показателей.
- 7. Анализ динамики ЭП.

- 8. Синтез и расчет узлов ограничений и защит.
- 9. Синтез схемы включения ЭП и выбор аппаратов. Составлении спецификации.
- Заключение.

Перечень разрабатываемых вопросов и содержание расчетно-пояснительной записки необходимо согласовать с руководителем и уточнять по мере выполнения проекта.

В расчетно-пояснительной записке должны быть серьезно обоснованы принятые технические решения по системе ЭП, системе управления и ее структуры. Если после проведения анализа статических и динамических показателей ЭП они оказываются неудовлетворительными, то необходимо повторно выбрать систему с более широкими техническими возможностями или изменить ее структуру и провести синтез и анализ. Весь объем работы, выполненный студентом, с учетом промежуточного (неудачного решения), приводится в записке.

В расчетно-пояснительной записке должны быть представлены необходимые принципиальные схемы или ее фрагменты, структурные схемы, графики и диаграммы, используемые при синтезе и анализе. При построении частотных характеристик по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе. Логарифмические частотные характеристики могут быть представлены асимптотами действительных.

В зависимости от применяемых методов синтеза и анализа некоторые разделы проекта могут разрабатываться одновременно, например разделы 2 и 6 или 3 и 4.

Графическая часть должна содержать:

1. Полную электрическую принципиальную схему САУ электроприводом (для аналоговых – включая схемы плат управления, для САУ с микропроцессорным управлением – только схема включения).
2. Структурную схему САУ (для САУ с микропроцессорным управлением выполняется на основе так называемой диаграммы управления, приводимой в документации на комплектный ЭП).
3. Номограммы, частотные и другие характеристики, используемые при синтезе систем автоматического регулирования (в случае использования таковых).
4. Статические характеристики САУ.
5. Временные диаграммы переходных процессов.

Оформляется проект в соответствии с требованиями ЕСКД к технической документации.

Выполнение проекта должно быть закончено на 12 неделе. Для равномерной загрузки в течение процесса проектирования и успешного его окончания необходимо придерживаться следующего графика:

1. Выполнение разделов 1, 2 – 1 – 2 недели;
2. Выполнение разделов 3, 4 – 2 – 3 недели;
3. Выполнение разделов 5, 6 – 4 – 5 недели;
4. Выполнение раздела 7 – 6 – 7 недели;
5. Выполнение разделов 8 – 10 – 8 – 10 недели;
6. Оформление проекта – 9 – 11 недели;
7. Сдача на проверку – 12 неделя;
8. Защита проекта – 13 неделя.

### **3. Варианты заданий**

#### **3.1. Задание № 1**

##### ***Система автоматического управления электроприводом центробежного вентилятора***

Механическая характеристика вентилятора представляется зависимостью

$$M_C = M_{C0} \cdot (1 + k \cdot \omega) + c \cdot \omega^a.$$

Для ограничений нагрузки на сеть пуск должен производиться с регулированием тока при допустимой погрешности не более +20 %. При колебаниях напряжения сети изменение производительности вентилятора не должно превышать  $\pm 3$  %.

Таблица 3.1

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Постоянные потери $M_{C0}$	Н · м	0,2	0,15	0,27	0,38	0,21
Коэффициенты характеристики:						
$k$	с/рад	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
$a$	-	2,2	2,3	2,2	2,6	2,4
$c$	$\frac{Н \cdot м \cdot с^2}{рад^2}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	0,012	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,012
Мощность двигателя	кВт	75	55	132	160	90
Частота вращения	об/мин	2960	990	2960	745	990
Приведенный момент инерции механизма	кг · м <sup>2</sup>	3,2	7,6	18	95	29
Допустимая кратность пускового тока	о.е.	2,0	2,1	1,8	1,8	2,0

### 3.2. Задание № 2

#### Система автоматического управления электроприводом механизма передвижения мостового крана

Таблица 3.2

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Грузоподъемность крана	т	5	40	12,5	25	20
Скорость передвижения	м/с	1,5	1,6	0,8	1,2	1,0
Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	0,3	0,35	0,25	0,35	0,2
Мощность двигателя	кВт	2,8	30	6,5	13	8,9
Частота вращения	об/мин	900	800	800	900	940
Приведенный статический момент:						
- при движении с грузом	Н · м	29,5	363	45	160,3	94,2
- при движении без груза	Н · м	19,3	175	27,9	78,1	49,6
Масса крана	т	7,5	38	16	24	21
Продолжительность включения	%	40	40	40	40	40

**3.3. Задание № 3**  
**Система автоматического управления**  
**электроприводом механизма подъема**  
**мостового крана**

Таблица 3.3

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Грузоподъемность	т	10	40	5	25	12,5
Скорость подъема	м/с	0,08	0,1	0,4	0,22	0,2
Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	0,1	0,25	0,35	0,35	0,3
Масса захвата	т	3,2	5,2	0,8	1,9	1,4
Мощность двигателя	кВт	13	47	23	70	35
Частота вращения	об./мин	700	550	1000	550	600
Приведенный статический момент:						
-максимальный	Н·м	240	1300	390	1850	830
-минимальный	Н·м	60	200	70	180	95
Точность остановки	мм	±50	±25	±50	±25	±50

Продолжительность включения – 40 %.

**3.4. Задание № 4**  
**Система автоматического управления**  
**электроприводом пассажирского лифта**

Таблица 3.4

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Грузоподъемность	т	2,2	1,5	0,75	1,0	1,5
Скорость кабины	м/с	1,5	2,5	2,5	1,5	2
Масса кабины	т	4	2,52	1,1	1,77	2,25
Масса противовеса	т	5,1	3,22	1,5	2,2	3,15
Масса канатов	т	1,04	0,95	0,8	1,1	0,78
Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	2	2	1,5	1,0	1,2
Допустимый рывок	м/с <sup>3</sup>	6	5	4	5	4
Мощность двигателя	кВт	47	35	17	47	15
Частота вращения	об./мин	780	600	1560	600	870
Приведенный статический момент:						
- максимальный	Н·м	570	440	48	510	174
- минимальный	Н·м	19	11	0,53	22	2,34
Точность остановки	мм	±15	±20	±35	±20	±25



### 3.5. Задание № 5

#### Система автоматического управления электроприводом ленточного конвейера-дозатора

Производится дозирование сыпавшей массы груза.

Таблица 3.5

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Длина конвейера	м	0,9	2,0	1,5	1,8	1,2
Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
Требуемый момент двигателя	Н·м	3,2	10	18	14	2,6
Приведенный момент инерции механизма	× 10 <sup>-4</sup> кг·м <sup>2</sup>	0,29	1,9	14	15,5	0,41
Приведенный момент инерции груза	× 10 <sup>-4</sup> кг·м <sup>2</sup>	0,69	1,1	8	13	0,31
Частота вращения	об/мин	2300	2000	1500	1500	2300
Рабочая скорость	м/с	0,2	0,4	0,25	0,4	0,2

### 3.6. Задание № 6

#### Система автоматического управления электроприводом стола продольно-строгального станка

Таблица 3.6

Параметр	Ед. изм.	Вариант				
		1	2	3	4	5
Диапазон регулирования скорости резания	о.е.	40	20	15	25	25
Приведенный статический момент:						
- максимальный (I ступень коробки скоростей)	Н·м	429	970	188	333	585
- минимальный (холостой ход на II ступени коробки скоростей)	Н·м	97	210	42	75	103
Приведенный момент инерции движущихся масс:						
- на I ступени коробки скоростей	кг·м <sup>2</sup>	0,934	2,9	0,234	0,554	0,713
- на II ступени коробки скоростей	кг·м <sup>2</sup>	0,14	0,322	0,071	0,095	0,078
Мощность двигателя	кВт	53	90	36	50	75
Частота вращения	об/мин	750	750	1000	1000	1000
Требуемая максимальная частота вращения (для обратного хода стола)	об/мин	2000	1500	3000	2000	1500
Погрешность скорости при изменении нагрузки	%	5	5	3	5	5

### 3.7. Задание № 7

#### Система автоматического управления

## **электроприводом шпинделя горизонтально-расточного станка**

Таблица 3.7

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Мощность двигателя	кВт	18	12,5	14	5,5	9
Частота вращения	об/мин	2000	1500	1500	1400	2000
Диапазон регулирования скорости:						
- в I-ой зоне	о.е.	10	16	20	32	15
- во II-ой зоне	о.е.	4	5	3	2,5	3
Погрешность скорости при изменении нагрузки	%	3	5	10	10	5
Приведенный момент инерции план-суппорта и вращающихся масс:						
- максимальный	кг · м <sup>2</sup>	0,06	0,0495	0,065	0,03	0,03
- минимальный	× 10 <sup>-3</sup> кг · м <sup>2</sup>	6,4	2,38	16,2	2,3	3,44

Максимальная мощность резания  $P_{P\ MAX} = 1,2 \cdot P_{PH}$ .

КПД станка  $\eta_H = 0,85$ .

### **3.8. Задание № 8**

#### **Система автоматического управления электроприводом подачи вертикально-фрезерного станка**

Таблица 3.8

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Мощность двигателя	кВт	9	14	7,2	2,5	4,4
Частота вращения	об/мин	2500	2000	2500	3000	3000
Погрешность скорости при изменении нагрузки от $0,4 \cdot M_H$ до $M_H$	%	5	10	5	10	5
Диапазон плавного регулирования подачи	о.е.	50	100	70	100	50
Точность позиционирования контура положения	мм	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05
Приведенный момент инерции	× 10 <sup>-3</sup> кг · м <sup>2</sup>	8,7	8,9	6,8	2,2	3,7
Радиус приведения скорости стола к валу двигателя	× 10 <sup>-3</sup> м	1,8	1,44	1,8	1,51	1,51

### 3.9. Задание № 9

#### Система автоматического управления электроприводом наматывающего устройства

Заправка полосы металла в наматывающий барабан производится при скорости 15 % от рабочей с ограничением натяжения (8 – 12)% от рабочего значения.

Таблица 3.9

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Натяжение полосы при намотке	$\times 10^{-3}$ Н	1,2	1	1,5	1,2	1
Толщина полосы	мм	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
Ширина полосы	мм	70	50	70	50	50
Скорость намотки	м/с	6	5	4	3,8	5
Диаметр барабана	м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Диаметр рулона	м	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0
Передаточное число редуктора	о.е.	9,19	4,71	8	9,19	7,35
КПД барабана и редуктора	%	80	82	79	80	82
Мощность двигателя	кВт	10	9	6,5	5	7,5
Частота вращения	об/мин	1300	950	750	1200	750
Момент инерции барабана	$\times 10^{-3}$ кг · м <sup>2</sup>	1,2	1,6	1,4	1,6	1,2

### 3.10. Задание № 10

#### Система автоматического управления электроприводом рольганга

Таблица 3.10

Параметр	Единица измерения	Вариант				
		1	2	3	4	5
Мощность двигателя	кВт	15	30	25	20	50
Частота вращения	об/мин	500	200	164	280	400
Передаточное число редуктора	о.е.	3,12	1,9	1	1,22	2,94
Диаметр ролика	м	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5
Приведенный статический момент:						
- с заготовкой	Н · м	18	120	17	103	50
- на холостом ходу	Н · м	6	35	10	32	27
Момент инерции ролика	кг · м <sup>2</sup>	25	43	8	20	110
Масса заготовки на один ролик	т	1,7	3,2	2,5	2,5	3
Диапазон регулирования скорости	о.е.	5	5,5	6	6	5,5
Допустимое ускорение заготовки	м/с <sup>2</sup>	4,2	3	3,5	3	4

### 3.11. Задание № 11

#### **Система автоматического управления электроприводами мостового сталеразливочного крана (ОАО «БМЗ»)**

Таблица 3.11

Параметр	Единица измерения	Механизм			
		Передв. крана	Передв. тележки	Подъем	Подъем вспом.
Грузоподъемность	т	180	180	180	50
Скорость передвижения (подъема) максимальная	м/мин	80	31	10	12,5
Скорость передвижения (подъема) минимальная	м/мин	8,28	3,34	1	1,36
Масса крана (тележки)	т	210	90		
Мощность двигателя (режим S1)	кВт	4 × 22	2 × 11	2 × 255	132
Частота вращения	об/мин	1500	1500	1000	1500

Дополнительная информация доступна на образовательном портале <http://edu.gstu.by/> (паспорт, принципиальная электрическая схема электрооборудования).

### 3.12. Задание № 12

#### **Система автоматического управления электроприводами машины непрерывного литья заготовок (ОАО «БМЗ»)**

Таблица 3.12

Параметр	Ед. изм.	Механизм
		Поворотный стол
Мощность двигателя	кВт	2 × 30
Частота вращения	об/мин	1500
Частота вращения механизма	об/мин	1
Масса ковша	т	65
Масса металла	т	120

Дополнительная информация доступна на образовательном портале <http://edu.gstu.by/> (принципиальная электрическая схема электрооборудования, перечень элементов, расположение электрооборудования в шкафах).

### 3.13. Задание № 13

#### **Система автоматического управления**

## **электроприводом вагоноопрокидывателя (ОАО «БМЗ»)**

Параметр	Ед. изм.	Механизм
		Поворот
Мощность двигателя (S3, ПВ = 40%)	кВт	2 × 100
Частота вращения	об/мин	600
Передаточное число:		
- открытой передачи	о.е.	13,05
- редуктора	о.е.	60,7
Масса вагона	т	21 – 32,4
Грузоподъемность вагона	т	58 – 94

Дополнительная информация доступна на образовательном портале <http://edu.gstu.by/> (паспорт, принципиальная электрическая схема электрооборудования).

### **4. Методические указания**

В данных методических указаниях приводятся требования к содержанию разделов проекта и даются рекомендации по их выполнению.

#### **4.1. Введение**

Перед выполнением проекта формулируются цель и задачи с точки зрения выполнения проекта САУ ЭП, а не с точки зрения учебной деятельности студента. Целью проектирования САУ является обеспечение ЭП требуемых с точки зрения технологического процесса показателей при одновременном обеспечении наиболее экономически эффективного решения. Задачи – это поэтапные действия для достижения поставленной цели.

#### **4.2. Технические характеристики и требования к системе автоматического управления электроприводом**

Для выбора системы электропривода и структуры САУ, синтеза контуров регулирования необходимо провести с точки зрения технологического процесса анализ назначения и характеристик механизма с целью выявления конкретных требований:

- регулируемые координаты ЭП;
- диапазон и точность регулирования координат, их ограничения;
- законы регулирования скорости;
- динамические показатели ЭП.

Некоторые показатели могут быть представлены в неявном виде. Например, диапазон регулирования скорости крановых ЭП определяется точностью остановки, которая в свою очередь зависит от назначения крана, грузоподъемности и рабочей скорости. Иногда для отдельных механизмов рабочей машины не указаны конкретные показатели. Тогда можно использовать средние или обобщенные значения для группы, в которую можно отнести рассматриваемый механизм.

Исходя из конструкции рабочей машины, ее технологического процесса требуется также выявить:

- наличие вспомогательных режимов работы ЭП (наладочный, быстрое перемещение, заправочная скорость и др.);
- способы управления (ручное, автоматическое, от управляющей машины или ЧПУ и др.);
- блокировки и защиты ЭП и рабочей машины, воздействующие на данную САУ.

#### **4.3. Выбор системы электропривода**

Правильный выбор системы ЭП связан с технико-экономическим анализом нескольких вариантов систем. Причем, основных показателей или критериев обычно несколько. Чаще к ним относятся следующие:

- диапазон и точность регулирования скорости;
- регулирование положения, ускорения, рывка или других координат ЭП и механизма;
- быстродействие и перерегулирование при переходных процессах по управлению;
- закон регулирования скорости;
- надежность САУ;
- стоимость ЭП и эксплуатационные расходы.

В данном проекте два последних показателя используются в обобщенной форме.

При отборе возможных вариантов систем ЭП используются критерии, в отношении которых невыполнение не допустимо, например точность. Окончательный выбор из отобранных к рассмотрению систем производится на основе сравнения взвешенных сумм оценок остальных показателей.

При анализе вариантов следует иметь в виду, что обычно к основным ЭП технологических машин (металлорежущие станки, про-

катные станы и др.) предъявляются более жесткие технические требования, чем к ЭП вспомогательных механизмов и общепромышленных машин (вентиляторы, насосы подъемно-транспортные машины и т.д.). Поэтому для первой группы чаще применяются системы позволяющие получить более высокие показатели по точности и диапазону регулирования.

Системы регулируемых ЭП, которые применяются для второй группы более разнообразны.

Основные технические сведения ряда устройств приведены в справочниках [8, 13, 15, 27, 28, 30] и технической документации. Однако не следует забывать об ограничениях использования систем ЭП, вызванных их принципом действия. Например, в каталогах на частотные преобразователи может быть указана возможность регулирования скорости от нулевой. Но, при частотах ниже 40 – 30% от номинальной максимально допустимый момент асинхронного электродвигателя существенно снижается. При более низких скоростях снижается также длительно допустимый момент.

После выбора системы ЭП производится выбор электродвигателя. Приводятся его паспортные данные. Выбор электродвигателя производят из серий предназначенных для соответствующей рабочей машины, т.к. они обладают конструктивными особенностями, учитывающими условия эксплуатации.

#### **4.4. Выбор силового оборудования и расчет параметров электропривода**

В данном разделе производят выбор комплектного ЭП (преобразователя), элементов силовой части для согласования ЭП с сетью, уменьшения пульсаций выходного напряжения (тока) ЭП (преобразователя). При необходимости выбираются датчики регулируемых координат. Осуществляется расчет параметров неизменяемой части электропривода: силовых цепей, преобразователя и т.д.

Так же, как и электродвигатели, комплектные устройства разрабатываются для определенной группы машин или механизмов. Поэтому их конструктивное исполнение, технические показатели, структура САУ, узлы защит блокировок наиболее полно отвечают характерным требованиям. Однако при необходимости устройства используют и для других целей.

При выборе комплектного преобразователя или ЭП необходимо проанализировать его возможность обеспечить заданные показатели,

требуемые режимы работы и другие особенности эксплуатации. Если предъявляемым требованиям отвечают несколько серий устройств, то естественно, что выбор должен останавливаться на наиболее простом и надежном.

Отдельные серии преобразователей постоянного тока и ЭП имеют два исполнения силовой части: с трансформатором или с реакторами. При выборе соответствующего варианта учитывают следующие условия:

- техника безопасности;
- номинальные напряжения двигателя и сети;
- влияние друг на друга устройств подключенных к одной сети через высшие гармоники, просадки напряжений (например, при пуске двигателей переменного тока) и т.п.;
- капитальные затраты.

Весьма желательно применять трансформатор, когда:

- к сети подключены помехочувствительные устройства (автоматики, программного управления, технологических датчиков и др.);
- от сети питаются другие регулируемые ЭП.

При отсутствии трансформатора для ограничения аварийных и коммутационных токов применяют коммутационные реакторы (до 100 А) или токоограничивающие при больших значениях.

Применение сглаживающего дросселя или реактора для электропривода постоянного тока обусловлен ограничением пульсаций тока (расчет параметров рассмотрен в [2]), или уменьшением зоны прерывистого тока [1]. Первый случай вызван энергетическими характеристиками отдельных серий электродвигателей, а второй – линеаризацией характеристик электропривода. Например, при использовании высокомоментных двигателей даже с комплектными устройствами, имеющими звенья компенсации нелинейности в области прерывистого тока.

В ЭП переменного тока обычно применяются коммутационные дроссели и выходные фильтры. Как правило, в каталогах производители приводят рекомендованные модели дросселей и фильтров.

Расчет коэффициентов передач и других параметров отдельных элементов и узлов проводят по принципиальным и структурным схемам или определяют их требуемые значения. Методика расчета большинства из них для ЭП постоянного и переменного тока можно найти



в [9]. При этом необходимо учитывать влияние элементов на процессы и на значение координат в соответствующих режимах. Так, к примеру, в ЭП постоянного тока падение напряжения на силовых вентилях, на щеточном контакте можно не учитывать в динамических процессах. Но оно учитывается при расчете статических характеристик и при определении требуемого значения ЭДС преобразователя.

Следует обратить внимание и на нелинейные элементы. Определение их параметров должно учитывать наличие узлов адаптации или компенсации нелинейностей, область изменения переменных. К примеру, для тиристорных преобразователей без узлов компенсации нелинейностей регулировочной и внешней характеристик (и без адаптивного регулятора тока) могут потребоваться ряд значений его коэффициентов передачи:

- максимальное значение при угле  $\alpha=\pi/2$  ( $\alpha=90$  эл. град.) для обеспечения заданного качества процессов пуска и торможения;
- значения при углах открывания, соответствующих установившимся режимам для синтеза или для проверки точности регулирования скорости;
- значение в режиме прерывистого тока при предыдущем условии, если нагрузка допускает этот режим.

Для электроприводов с преобразователями частоты значения емкости на входе автономного инвертора напряжения (АИН) или индуктивности сглаживающего реактора на входе автономного инвертора тока (АИТ) выбирают по рекомендациям из технического описания, а при их отсутствии, производят расчет [21]. При использовании расчетных формул необходимо учитывать возможное отличие режимов проектируемого ЭП от рассматриваемых в литературе, что в отдельных случаях требует коррекции значений величин, используемых при расчетах. Так, к примеру, расчет емкостного фильтра на входе АИН может проводиться с учетом реактивной энергии накопленной в индуктивностях рассеяния или во всей магнитной цепи машины.

#### **4.5. Разработка структуры системы автоматического управления**

В общем случае структура САУ определяется требуемыми статическими и динамическими характеристиками ЭП, регулируемые координатами и типом ЭП.

Комплектные ЭП, как правило, имеют узлы и звенья, позволяющие реализовать структуру наиболее полно отвечающую требованиям определенной группы рабочих машин. Однако в отдельных случаях, из-за соотношения параметров или при более жестких требованиях, ее приходится корректировать. При этом следует оценить возможность практической реализации. Обычно трудно осуществить на готовых платах управления дополнительные связи, или вывести на разъем дополнительные сигналы. Поэтому желательно ограничиваться исключением связей, исключением или заменой пассивных элементов схемы (резисторы, конденсаторы, диоды), разработкой дополнительных узлов размещаемых на отдельных платах, использующих сигналы уже выведенные на разъемы. Когда регулирующая часть отсутствует или она позволяет реализовать разнообразные связи между узлами, то необходимо полностью разрабатывать структуру. Что бы наиболее точно удовлетворять требованиям, желательно на основании анализа, проведенного в первом разделе:

1. Выделить основные требования и отнести систему к одному из следующих видов:
  - система регулирования скорости с частыми пусками, торможением и реверсом, обеспечивающая высокое быстродействие и достаточно высокие статические показатели;
  - система стабилизации (скорости, натяжения), основной задачей которой является получение минимальной ошибки управляемой величины в статических режимах и переходных процессах по возмущению;
  - система регулирования положения, массы или другой координаты, требующая внешнего контура регулирования по отношению к контуру скорости.
2. Выделить промежуточные и дополнительные координаты подлежащие регулированию и определить необходимость их ограничения.

Рекомендации по выбору структур САУ электроприводов постоянного тока и особенности их синтеза для указанных систем приведены в [2, 4, 16].

Для общепромышленных механизмов (краны, вентиляторы и насосы) при невысоких требованиях к диапазону и точности регулирования широко применяется асинхронный электропривод с АИН, а, при малых мощностях – с параметрическим регулированием (измене-

нием напряжения на статоре, автоматическое реостатное регулирование и др.). Рекомендации для таких приводов рассмотрены в [6, 30].

При выборе частотного электропривода с асинхронными двигателями следует учитывать, что при использовании АИН или НПЧ наиболее просто реализуются системы регулирования скорости с получением заданной перегрузочной способности. Применение АИТ или АИН с векторным управлением позволяет получить электропривод с регулированием момента двигателя в переходных процессах. Для выбора структуры САУ можно воспользоваться выводами для частотного управления в [17, 18] и для частотно-токового в [29].

При необходимости, если это не было сделано в предыдущем разделе, в этом же разделе производят выбор датчиков обратных связей и рассчитывают постоянные времени, коэффициенты передачи обратных связей и узлов, входящих в схему контуров регулирования.

#### **4.6. Синтез систем**

Выбор методики для проведения синтеза систем автоматического регулирования связан с выбранной структурой САУ и предъявляемыми требованиями. К примеру, структура имеет вид системы подчиненного регулирования координат. Стандартный подход в таком случае заключается в использовании метода оптимизации контуров регулирования [2, 4, 9, 16, 19]. Однако, при определенных соотношениях значений требуемых показателей (быстродействие, точность регулирования, диапазон) их можно не обеспечить. Тогда приходится использовать другие методы. Аналогичная ситуация обычно возникает при синтезе взаимосвязанных САУ (к примеру, двухзонный ЭП постоянного тока) при развязке систем по быстродействию. Наиболее часто в таких случаях проводят синтез по желаемым частотным характеристикам.

Главные ЭП основных технологических машин в основной массе представляют системы стабилизации. Основное требование к ним заключается в высокой точности регулирования в статических и динамических режимах при действии возмущений. Для таких систем иногда эффективным оказывается метод желаемых частотных характеристик при синтезе по возмущающему воздействию [1, 2]. Причем в [1] метод изложен с пояснениями.

При высоких требованиях к динамическим показателям и высоком порядке системы автоматического регулирования хорошие результаты дает метод аналитического конструирования регуляторов

[2]. В его основе лежит выбор желаемого распределения корней характеристического уравнения. Обеспечение статических показателей при данном методе производится выбором структуры САУ, коэффициентом усиления контура регулирования, т.е. синтезом системы по статическим характеристикам.

#### **4.7. Анализ показателей электропривода**

После синтеза САУ производят проверку по выполнению предъявляемых требований и ограничений на процессы преобразования энергии в электроприводе. Для этого рассчитывают статические и динамические показатели.

Статические показатели для линейной САУ можно получить по статическим характеристикам, либо по передаточным функциям, в зависимости от структуры системы и методов синтеза контуров регулирования. Для нелинейных систем обязательно построение статических характеристик в зоне рабочих режимов электропривода.

Определение динамических показателей производят по результатам расчета переходных процессов. Выбор же процессов для анализа обусловлен технологическими требованиями к режимам работы электропривода. К примеру, если основными являются требования, предъявляемые к стабилизации скорости или других координат в установившихся режимах, а процессы пуска и торможения относятся к вспомогательным, то подлежащими расчету будут процессы от возмущений со стороны сети и нагрузки. Расчет вспомогательных процессов по управлению для линейных систем необходим при отсутствии задатчика интенсивности для проверки ограничений на преобразование энергии и получения информации для расчета защит и блокировок. При выборе процессов следует также учитывать изменение параметров нагрузки и кинематической цепи.

Обычно для облегчения синтеза контуров регулирования и получения более простых схем регуляторов используют различного рода упрощения, линеаризацию и другие подходы. Так, в отдельных ЭП, используют компенсационные связи для исключения влияния нелинейностей, взаимного влияния между разными контурами регулирования (например, в электроприводах ЭПУ, ЭТУ применяется функциональный преобразователь ЭДС, в системах векторного управления асинхронным двигателем – компенсационные связи между каналами управления потокосцеплением и моментом). Неправильный выбор коэффициентов передач этих связей приводит к существенному от-

клонению процессов от ожидаемого вида. Это требует проведения расчета процессов в САУ на основе исходной модели с учетом нелинейностей и в соответствии с полной структурой системы управления.

Таким образом, в соответствующих разделах пояснительной записки необходимо:

- обосновать методы получения статических показателей и выбор процессов для анализа;
- рассчитать (если не было сделано в предыдущих разделах) коэффициенты передач и нелинейности компенсационных устройств, связей функциональных преобразователей;
- провести расчет статических показателей.

Должна быть приведена исходная система уравнений или структурная схема САУ, которые используются для анализа переходных процессов. В том случае, если программа для расчетов процессов разрабатывается автором проекта, то ее текст приводится в приложении с пояснениями основных блоков программы. После расчета и построения диаграмм переходных процессов должны быть определены динамические показатели. В конце необходимо сравнить полученные показатели и их требуемые значения.

Рассмотрим пример анализа динамических показателей модели двухзонной САУ скоростью ДПТ НВ, структурная схема и модель в Matlab Simulink которой представлены на рис. 4.1 и рис.4.2 соответственно.

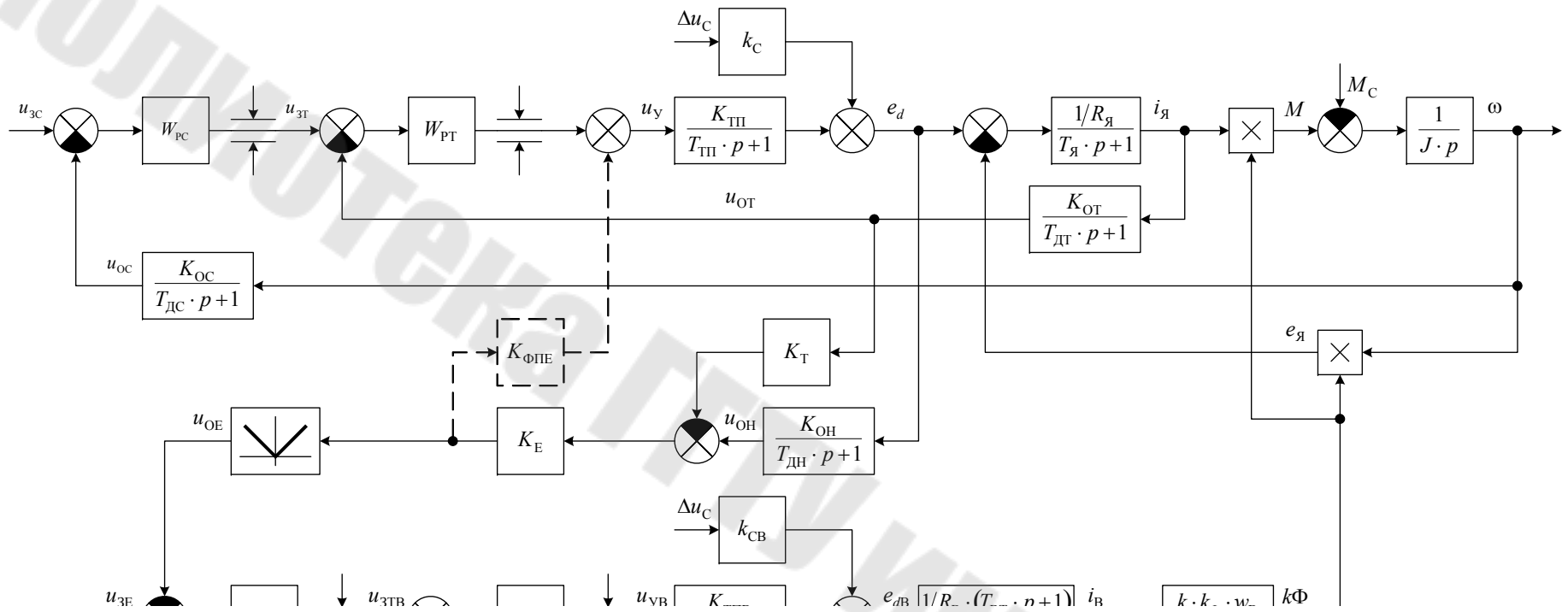


Рис. 4.1. Полная структурная схема непреобразованной нелинеаризованной модели двухзонной системы автоматического управления скоростью

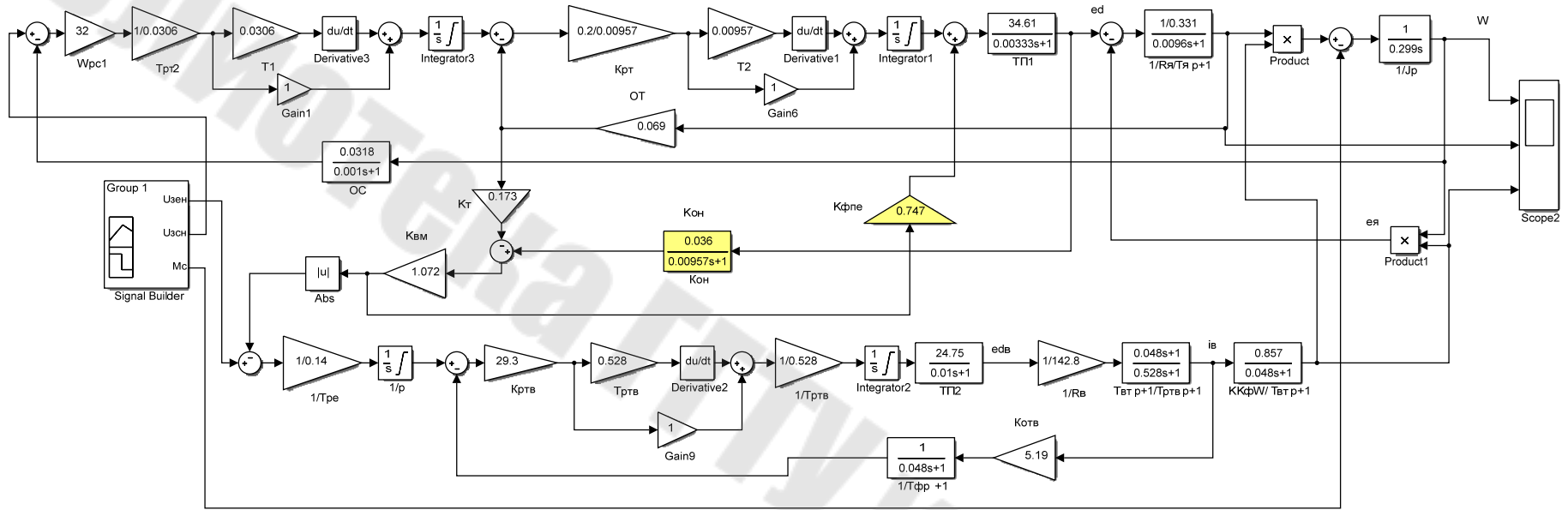


Рис. 4.2. Схема непробразованной модели двухзонной системы автоматического управления скоростью в Matlab

Сигналы задания изменяем в следующем порядке:

- 1) Подача возбуждения,  $u_{3e} = U_{3EH} = 8 \text{ В}$  (0–5,3 с);
- 2) Задание скорости  $u_{3c} = 0,01 \cdot U_{3CH} = 0,05 \text{ В}$  (2–2,7 с);
- 3) По моменту сопротивления  $M_c = 0,01 \cdot M_H$  (2,5–2,7 с);
- 4) Пуск на холостом ходу  $u_{3c} = U_{3CH} = 5 \text{ В}$ ,  $M_c = 0,1 \cdot M_H$  (2,5–3,2 с);
- 5) Задание номинального момента сопротивления  $M_c = M_H$  (3,2–3,5 с);
- 6) Переход во вторую зону  $u_{3c} = 1,2 \cdot U_{3CH} = 6 \text{ В}$ , (3,8–4,8 с);
- 7) По заданию скорости  $u_{3c} = 1,3 \cdot U_{3CH} = 6,5 \text{ В}$  (4,8–6 с);
- 8) По заданию ЭДС  $u_{3e} = 0,9 \cdot U_{3EH} = 7,2 \text{ В}$  (5,2–7 с);
- 9) По моменту сопротивления  $M_c = 0,2 \cdot M_H$  (5,5–5,8 с);
- 10) Останов  $u_{3c} = 0 \text{ В}$ ,  $M_c = 0 \text{ Нм}$  (6–7 с).

Вышеперечисленные сигналы задаем в блок Signal Builder, задание сигналов которого представлены на рис. 4.3.

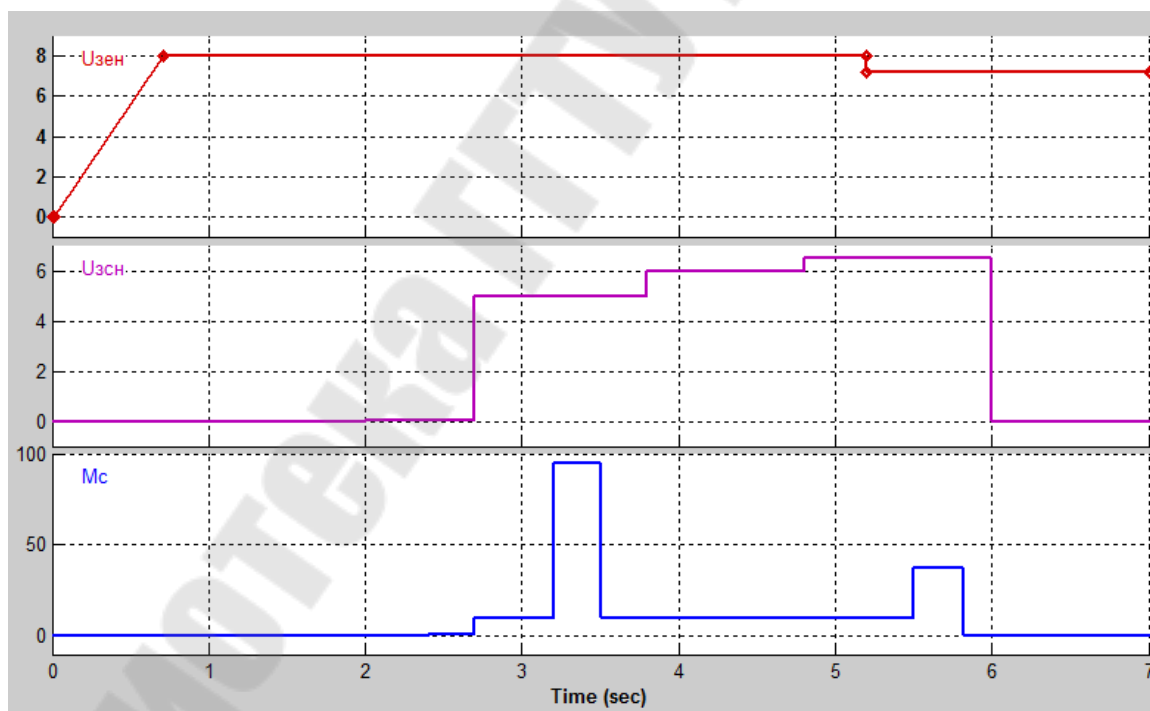


Рис. 4.3. Параметры блока задания сигналов Signal Builder

Переходные процессы двухзонной САУ скоростью ДПТ НВ представлены на рис. 4.4–4.10.



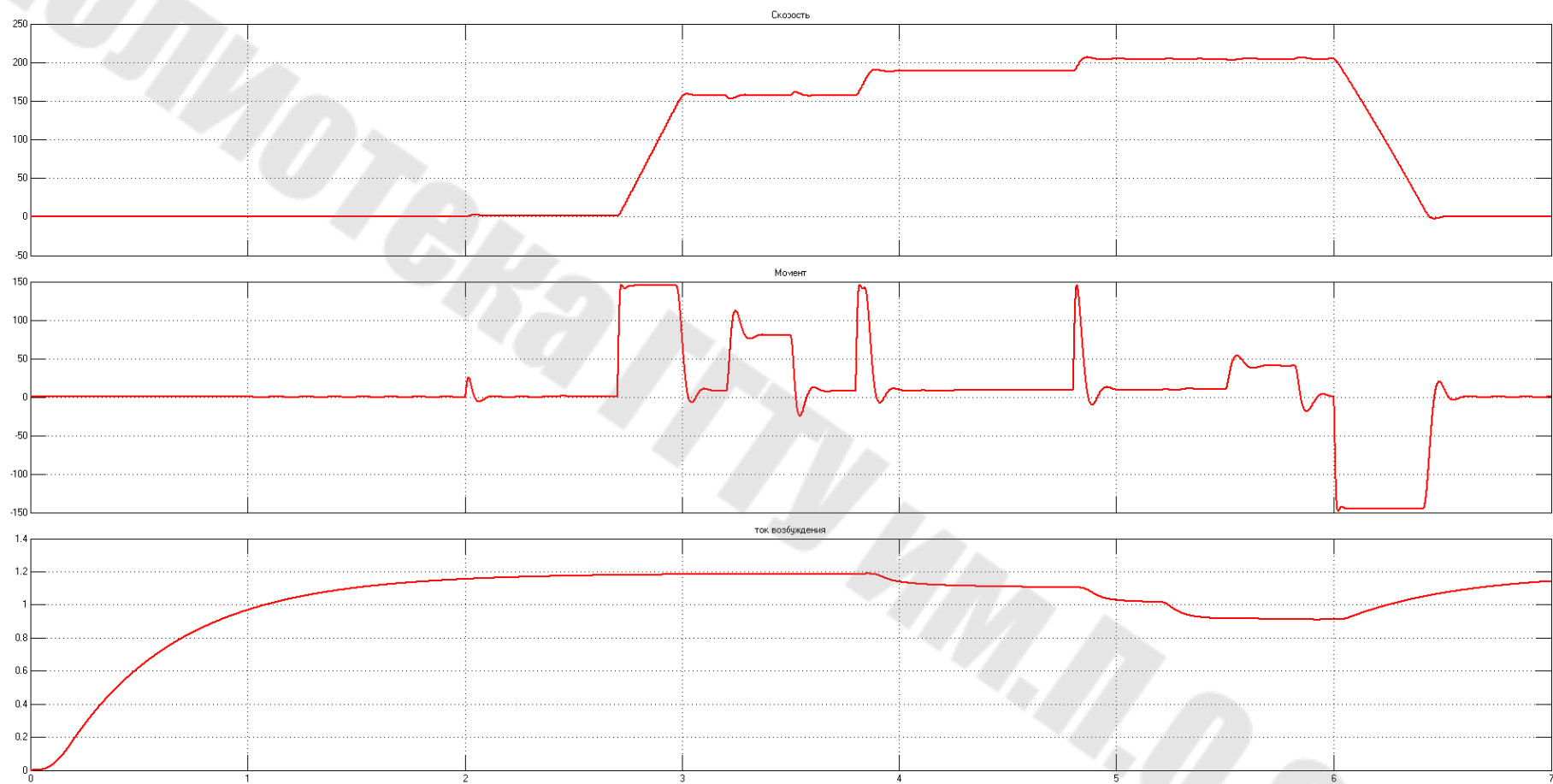


Рис. 4.4. Общий вид переходных процессов

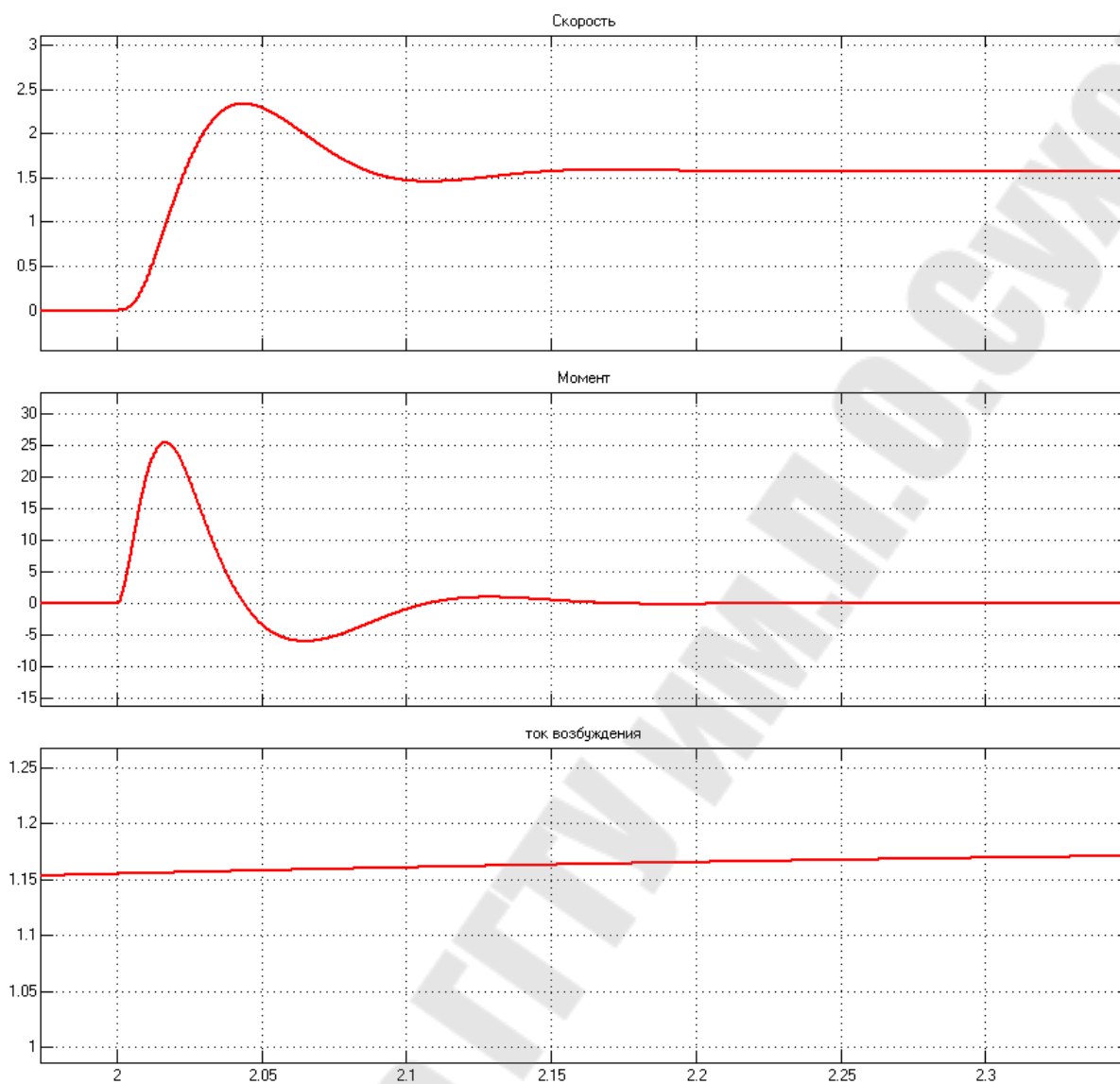


Рис. 4.5. Переходные процессы по заданию скорости

Из рис. 4.5 определим перерегулирование по скорости и быстродействию

$$\sigma = \frac{2,35 - 1,57}{1,57} \cdot 100\% = 49,6\% ,$$

$$t_{\text{пер}} = 0,15 \text{ с.}$$

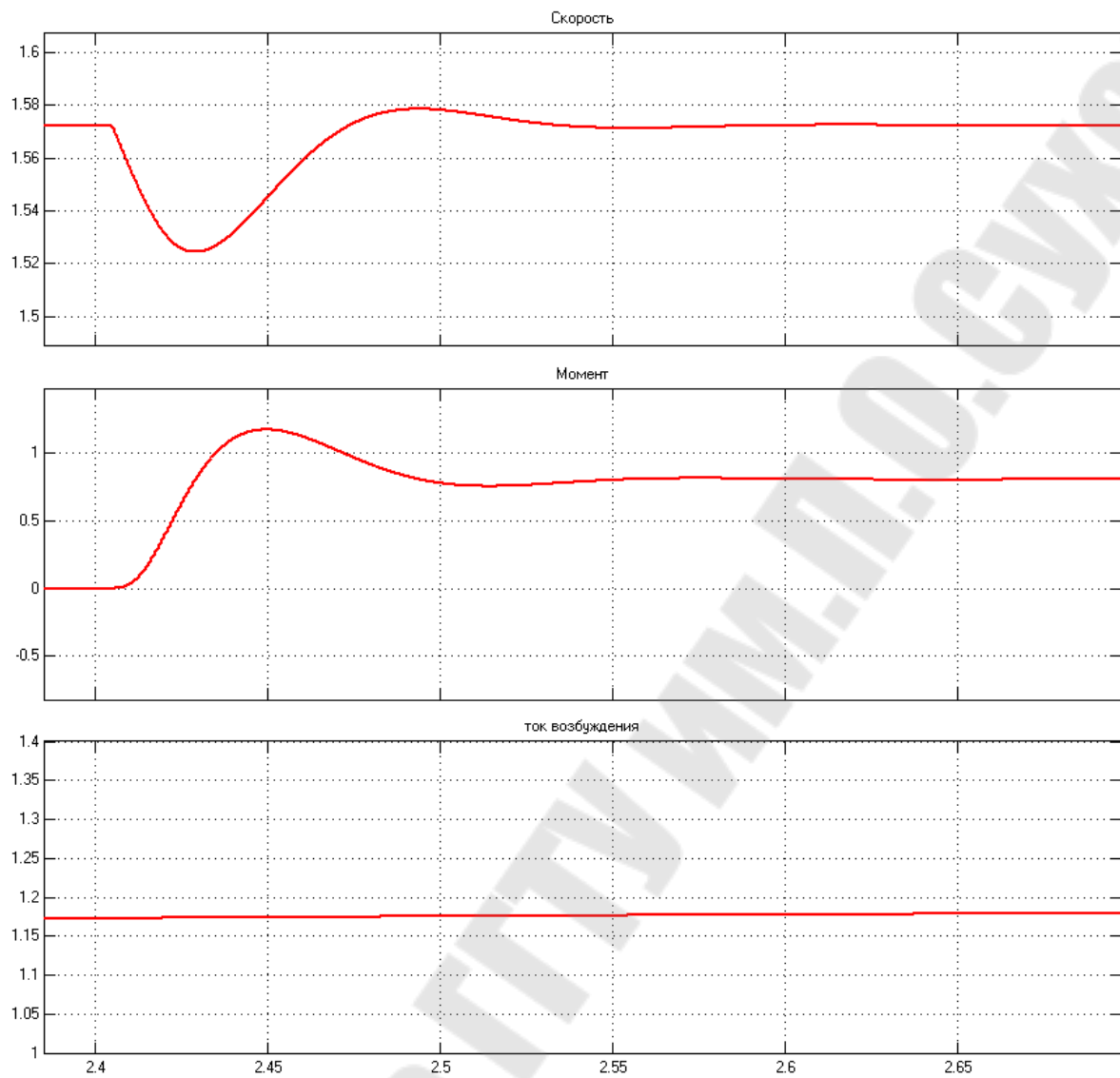


Рис. 4.6. Переходные процессы по моменту сопротивления

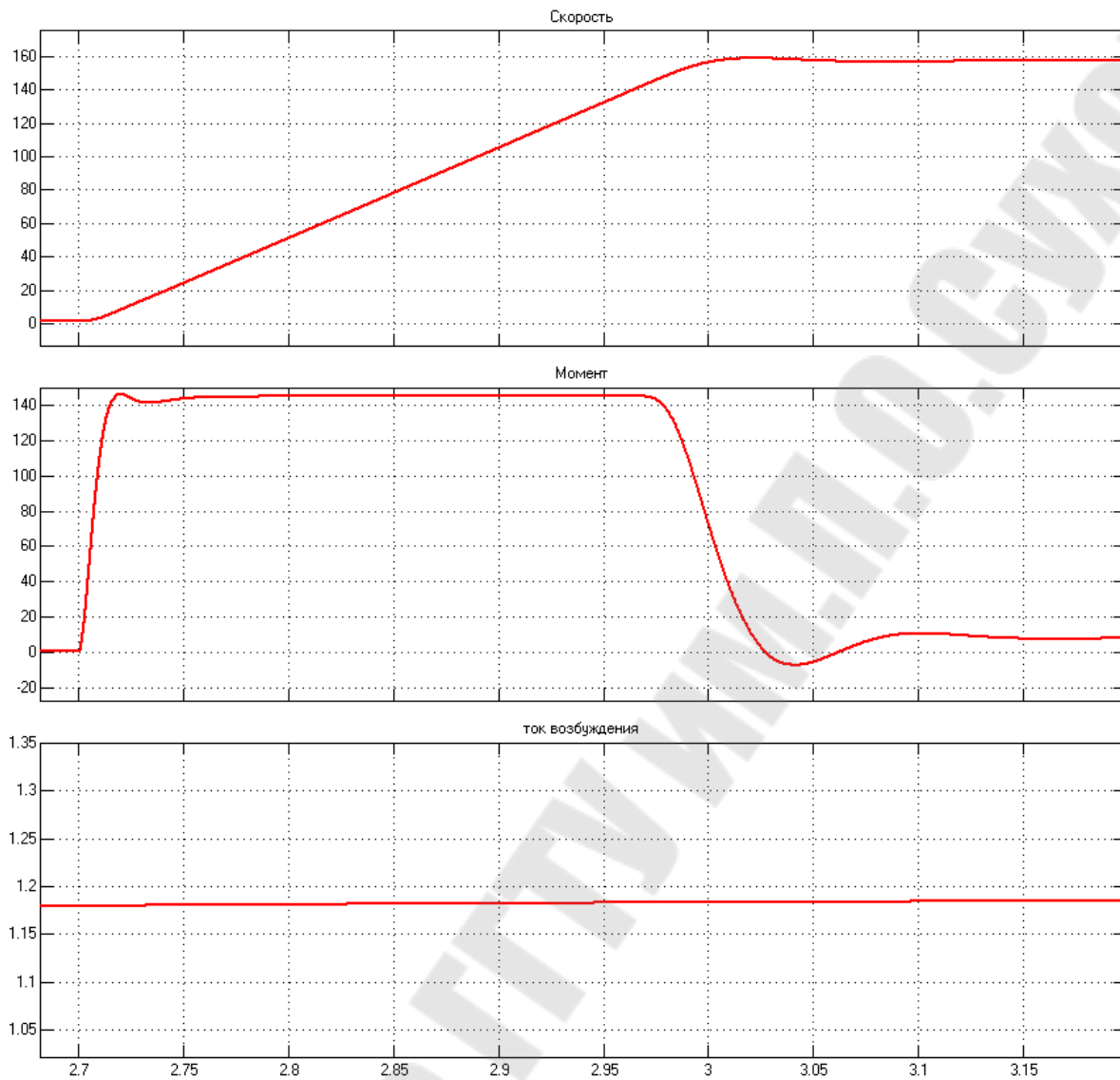


Рис. 4.7. Переходные процессы при пуске на холостом ходу

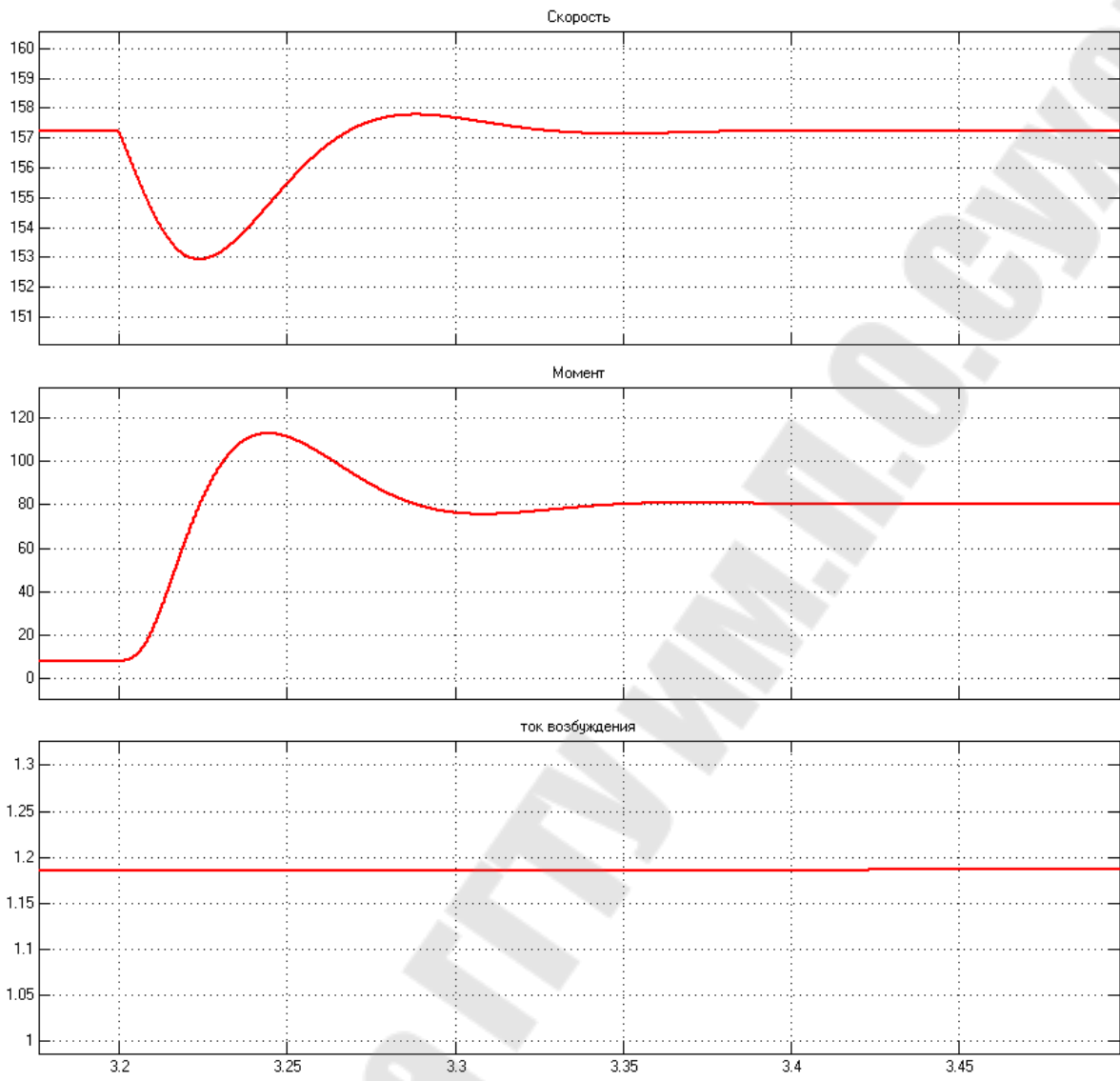


Рис. 4.8. Переходные процессы при номинальном моменте сопротивления

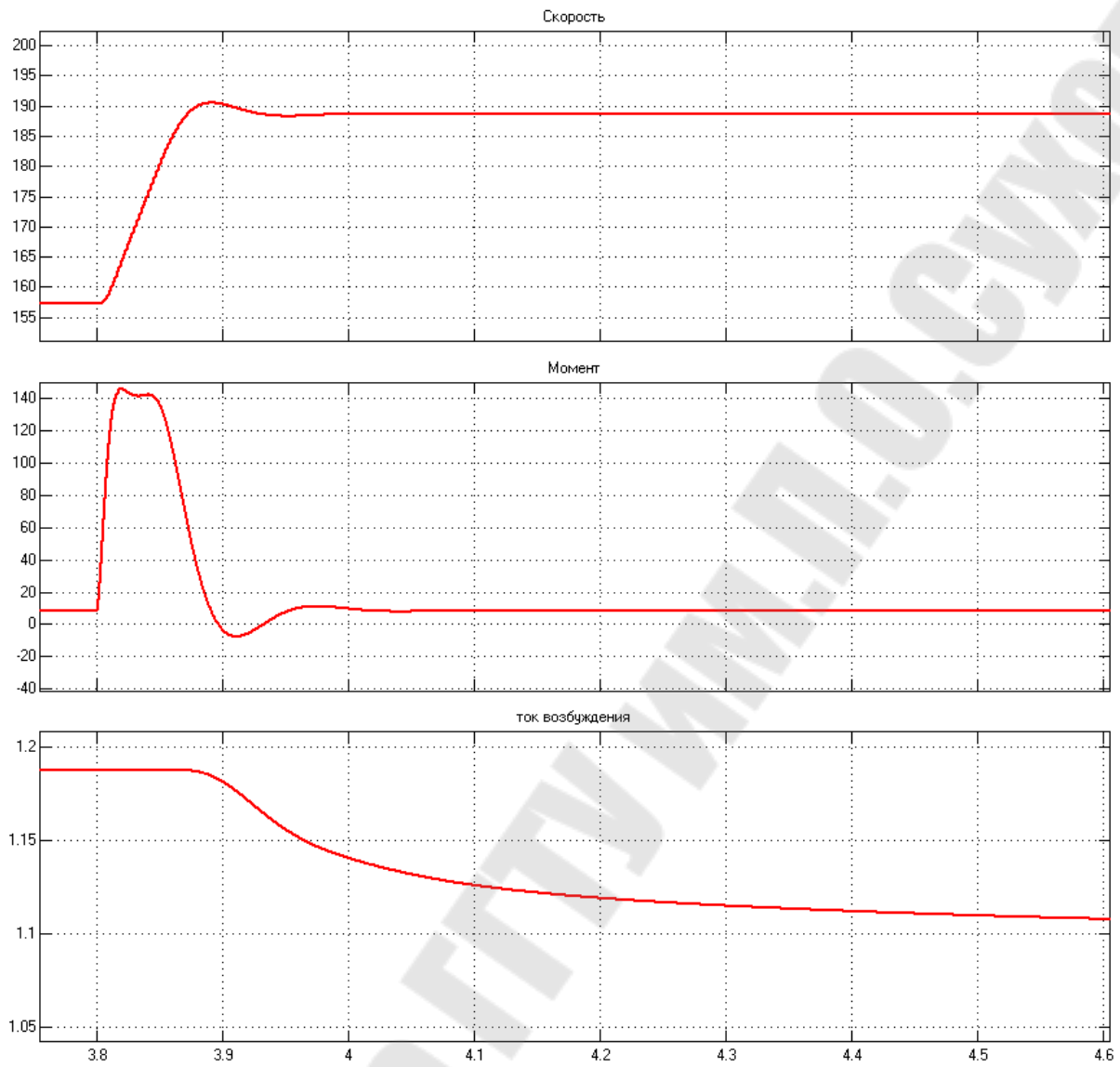


Рис. 4.9. Переходные процессы при переходе во вторую зону

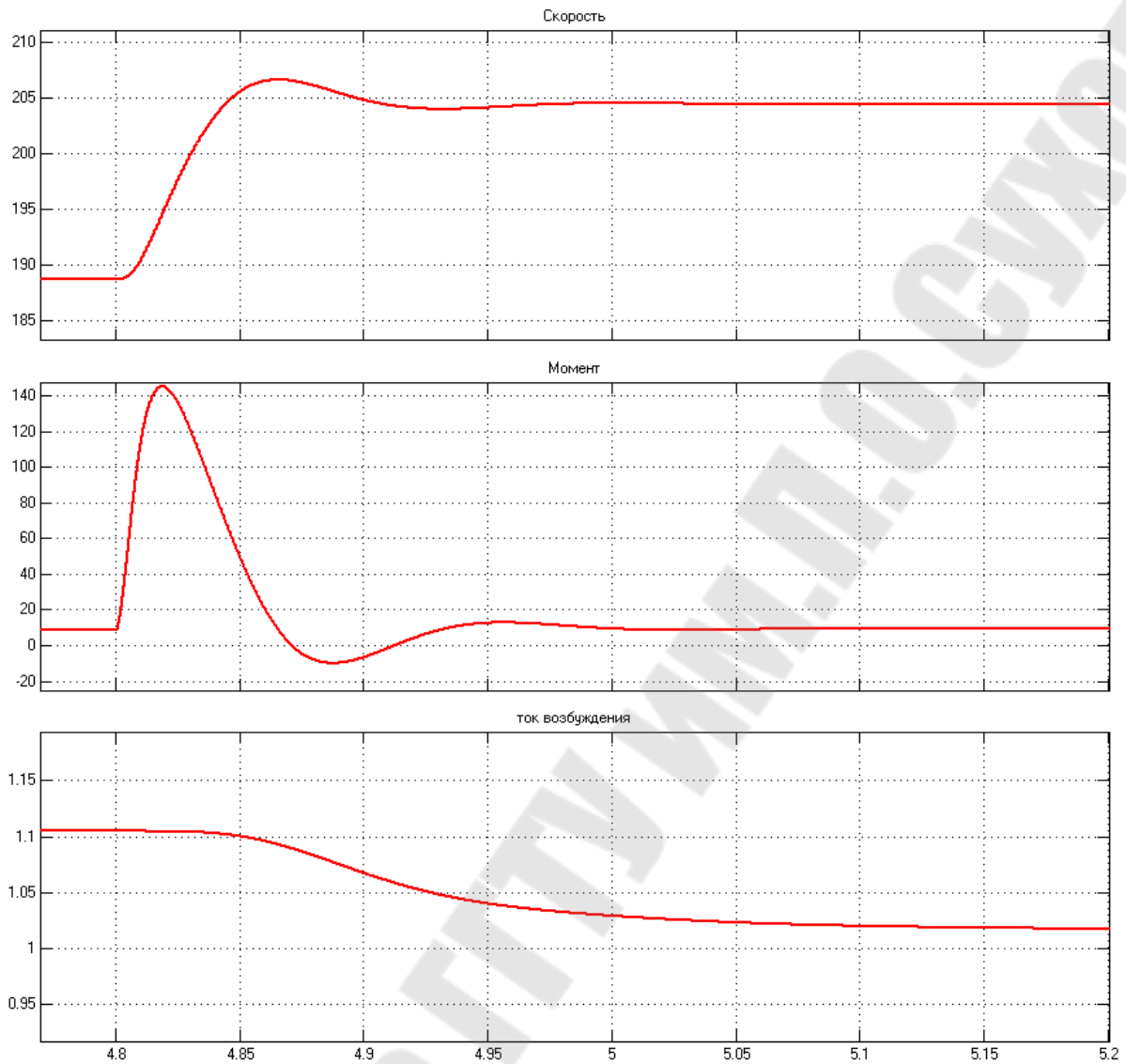


Рис. 4.10. Переходные процессы по заданию скорости во второй зоне

Из рис. 4.10 определим перерегулирование по скорости и быстродействие

$$\sigma = \frac{206,2 - 204,4}{204,4 - 188,7} \cdot 100 \% = 11,4 \% ,$$

$$t_{\text{пер}} = 0,2 \text{ с.}$$

#### 4.8. Синтез и расчет узлов ограничений и защит

Выбор узлов ограничения, их схем определяется способом реализации и точностью ограничения необходимых координат, а также наличием соответствующих узлов в структуре выбранного комплект-

ного ЭП. В общих и местных обратных связях используют нелинейные элементы с зоной нечувствительности, а в прямом канале воздействия – элементы с ограничением уровня. При построении узлов на стабилитронах и транзисторах точность ограничения ниже, чем при использовании операционных усилителей.

Ограничение координат электропривода выбирается независимым или зависимым от каких-либо переменных исходя из требований к САУ и режимов работы. Так, к примеру, ограничение максимального тока якоря двигателя постоянного тока в двухзонном электроприводе должно быть зависимым от степени уменьшения магнитного потока. Для этой цели можно использовать сигналы обратной связи по скорости, или задания тока возбуждения. Вторым вариантом оказывается менее точным из-за нелинейности кривой намагничивания.

Обычно в структуре комплектных ЭП заложен принцип подчиненного регулирования координат. Причем, в технических описаниях не всегда корректно указываются количество контуров регулирования и другие особенности. Поэтому, в первую очередь, следует руководствоваться принципиальными электрическими схемами или диаграммами управления (для САУ с микропроцессорным управлением). При использовании подчиненного регулирования координат в схемах заложены независимые узлы ограничения регуляторов для ограничения промежуточных координат. В этом случае расчет указанных устройств производят с учетом рекомендаций, приведенных в технических описаниях.

Когда отсутствуют необходимые устройства, то следует разработать их схемы, учитывая возможность реализации и согласования с конкретными узлами на платах управления. При этом могут возникнуть некоторые особенности. Например, после синтеза САУ и расчета переходных процессов оказалось, что скорость изменения тока якоря двигателя постоянного тока превысило допустимое значение. Но в выбранном устройстве не предусмотрен задатчик интенсивности для тока. Реализовать его можно, если между выходом регулятора скорости и входом регулятора тока имеется несколько промежуточных или контрольных выводов на разъем платы управления, или регуляторы размещаются на отдельных платах. Когда такой вариант не реализуем, то следует оценить возможность установки в цепи задания тока фильтр. Если это допустимо, то после расчета его параметров корректируют структурную схему контура скорости и проводят перерасчет переходных процессов.



При разработке схем следует ориентироваться на типы и серии комплектующих элементов, используемых в электроприводе. Этим достигается согласование по уровню сигналов и уменьшаются затраты на ремонтно-восстановительные работы.

Узлы защиты электропривода от аварийных и аномальных режимов, вызванных изменением нагрузки и напряжения сети, обычно присутствуют в комплектных устройствах. А в техническом описании приводятся рекомендации по их настройке. Перед расчетом узлов необходимо дополнительно уточнить значения переменных с учетом технологических требований.

Если по условиям работы механизма или всей рабочей машины требуются дополнительные блокировки и защиты, то необходимо синтезировать их принципиальные схемы и согласовать их подключение к платам управления.

#### **4.9. Синтез схемы включения электропривода и выбор аппаратов, составление спецификации**

При разработке схемы включения должны быть учтены:

- режимы работы электропривода (рабочие, вспомогательные, наладочные);
- требования, определяемые конструкцией механизма и рабочей машины (блокировка, последовательность включения отдельных ЭП и т.д.);
- порядок и фазировка подключения к сети отдельных частей ЭП.

Обычно блокировки между разными механизмами, режимы работы обеспечиваются с помощью релейно-контакторных схем. Однако при частых включениях для повышения надежности стараются использовать бесконтактные аппараты и логические устройства.

После разработки схемы включения и управления ЭП, описанием ее работы, производят выбор аппаратуры, причем конкретного типоразмера.

Спецификация на проект оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД. В ней указываются:

- типоразмер электродвигателя с основными техническими данными;
- типоразмер выбранного комплектного устройства с основными техническими данными;

- так называемые переменные данные для комплектного устройства, т.е. элементы принципиальной схемы, параметры которых изменены в соответствии с проектом;
- электрические машины, аппараты и элементы всех синтезированных в проекте схем.

### **Заключение**

Заключение на проект включает в себя:

- назначение и общую характеристику разработанной САУ ЭП соответствующего механизма;
- сравнительную оценку требуемых и полученных статических и динамических показателей;
- анализ причин, не позволивших удовлетворить отдельные вспомогательные требования, если это имеет место;
- оценку технической реализуемости данного проекта и перечень вопросов, подлежащих проработке, необходимых для технической реализации.

## Литература

1. Анхимюк, В. Л. Проектирование систем автоматического управления электроприводами : учеб. пособие / В. Л. Анхимюк, О. П. Ильин. – Минск : Выш. шк., 1971. – 336 с.
2. Анхимюк, В. Л. Проектирование систем автоматического управления электроприводами : учеб. пособие / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко. – Минск : Выш. шк., 1986. – 142 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А.Э. Кравчик [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
4. Башарин, А. В. Управление электроприводами : учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
5. Борисов, Ю. М. Электрооборудование подъемно-транспортных машин: учебник для вузов / Ю. М. Борисов, М. М. Соколов. – Изд. 2-е. – М. : Машиностроение, 1971. – 375 с.
6. Браславский, И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И. Я. Браславский. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
7. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2008. – 321 с.
8. Евзеров, И. Х. Тиристорные электроприводы серии КТЭУ мощностью до 2000 кВт. / И. Х. Евзеров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 94 с.
9. Захаренко, В. С. Системы автоматического управления скоростью электроприводов постоянного и переменного тока : пособие / авт.-сост. В. С. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 45 с.
10. Захаренко, В. С. Системы управления электроприводами : пособие / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко ; под ред В. С. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2009. – 154 с.
11. Иванов, Г. М. Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 223 с.
12. Ключев, В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учебник / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.

13. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И. Х. Евзеров [и др.] ; под ред. В. М. Перельмутера. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
14. Кузнецов, В. Г. Приводы станков с программным управлением: учеб. пособие / В. Г. Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1983. – 247 с.
15. Лебедев, А. М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / А. М. Лебедев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 222 с.
16. Перельмутер, В. М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В. М. Перельмутер. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 302 с.
17. Сабинин, Ю. А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю. А. Сабинин. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. – 126 с.
18. Сандлер, А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 328 с.
19. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
20. Соколов, М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов: учебник для вузов / М. М. Соколов. – Изд. 3-е. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
21. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. – М. а: Энергоатомиздат, 1983. – 615 с.
22. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
23. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / под ред. Р. С. Сарбатова. – М. : Энергия, 1980. – 327 с.
24. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А. А. Усольцев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006 – 94 с.
25. Фираго, Б. И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов : учеб. пособие / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
26. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.

27. Чернов, Е. А. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ : Справочное пособие / Е. А. Чернов, В. П. Кузьмин. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1989. – 320 с.
28. Электротехнический справочник: В 3 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – Т. 2. – 640 с.
29. Эпштейн, И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И. И. Эпштейн. – М. : Энергоиздат, 1982. – 192 с.
30. Яуре, А. Г. Крановый электропривод : Справочник / А.Г. Яуре, Е. М. Певзнер. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

## Содержание

Введение.....	3
1. Цель и задачи проекта .....	4
2. Задание на курсовой проект и требования к проекту.....	4
3. Варианты заданий.....	6
3.1. Задание № 1 САУ электроприводом центробежного вентилятора .....	6
3.2. Задание № 2 САУ электроприводом механизма передвижения мостового крана .....	7
3.3. Задание № 3 САУ электроприводом механизма подъема мостового крана .....	8
3.4. Задание № 4 САУ электроприводом пассажирского лифта .....	8
3.5. Задание № 5 САУ электроприводом ленточного конвейера-дозатора.....	9
3.6. Задание № 6 САУ электроприводом стола продольно-строгального станка .....	9
3.7. Задание № 7 САУ электроприводом шпинделя горизонтально-расточного станка .....	90
3.8. Задание № 8 САУ электроприводом подачи вертикально-фрезерного станка .....	100
3.9. Задание № 9 САУ электроприводом наматывающего устройства .....	11
3.10. Задание № 10 САУ электроприводом рольганга .....	11
3.11. Задание № 11 САУ электроприводами мостового сталеразливочного крана (ОАО «БМЗ»).....	12
3.12. Задание № 12 САУ электроприводами машины непрерывного литья заготовок (ОАО «БМЗ») .....	12
3.13. Задание № 13 САУ электроприводом воганоопрокидывателя (ОАО «БМЗ»).....	12
4. Методические указания .....	13
4.1. Введение .....	13
4.2. Технические характеристики и требования к САУ электроприводом .....	13
4.3. Выбор системы электропривода.....	14
4.4. Выбор силового оборудования и расчет параметров электропривода .....	15
4.5. Разработка структуры САУ .....	17

4.6. Синтез систем.....	19
4.7. Анализ показателей электропривода .....	20
4.8. Синтез и расчет узлов ограничений и защит.....	31
4.9. Синтез схемы включения электропривода и выбор аппаратов, составление спецификации .....	33
4.10. Заключение.....	34
Литература .....	35

**Логвин Владимир Васильевич  
Дорощенко Игорь Васильевич**

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

**Учебно-методическое пособие  
по курсовому проектированию  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 11.07.24.

Per. № 130E.  
<http://www.gstu.by>