

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**Лебедев Ю.М.**

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Методические указания к курсовому проектированию  
для студентов специальности 11.03.04

2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Цель курсового проекта .....	3
2. Задание на курсовой проект .....	3
2.1. Основные этапы выполнения проекта .....	3
2.2. Задание на проект .....	6
3. Структурные схемы ЭМС и их характеристики .....	10
3.1. Структурная схема обобщенной ЭМС .....	10
3.2. Передаточные функции элементов ЭМС и основные расчетные соотношения .....	12
4. Проведение анализа ЭМС .....	18
3.1. Анализ ЭМС, осуществляющих регулирование крутящего момента и скорости двигателя .....	19
3.2. Анализ ЭМС, следящих за перемещением .....	44
5. Синтез ЭМС .....	55
5.1. Общие сведения о синтезе систем .....	55
5.2. Оптимальный синтез ЭМС .....	57
5.3. Пример синтеза ЭМС .....	61
6. Электронное моделирование ЭМС .....	74
7. Рекомендации по оформлению курсового проекта .....	77
Список рекомендуемой литературы .....	80
Приложение. Пример выполнения курсового проекта .....	81

## **1. ЦЕЛЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Выполнение курсового проекта по ТАУ преследует следующие цели:

- демонстрацию применения методов и приемов, изученных в курсе ТАУ, к объекту, изучаемому в другой дисциплине, в частности, в курсе «Электрические машины» – электромеханической системе (ЭМС) различного назначения
- закрепление основных навыков анализа систем автоматического управления (САУ), полученных при изучении основного курса в предыдущем семестре, и применение этих навыков для решения конкретной задачи;
- овладение приемами и методикой настройки электромеханической системы электропривода с подчиненным регулированием на технический или симметричный оптимум;
- получение навыков правильного представления и оформления результатов работы.

## **2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

### **2.1. Основные этапы выполнения проекта**

Выполнение курсового проекта разделяется на следующие основные этапы:

- анализ технического задания (ТЗ);
- анализ характеристик заданной ЭМС и расчет ее характеристик;
- оптимальный синтез ЭМС и расчет характеристик настроенной на технический или симметричный оптимум ЭМС;
- электронное моделирование ЭМС;
- оформление результатов расчетов, формулирование выводов и рекомендаций по результатам проектирования, защита курсовой работы.

Перечень вопросов, решаемых при выполнении курсового проекта, и соответствующий им максимальный рейтинг приведены в табл. 2.1.

Оценка за проект выставляется по суммарному рейтингу как по любой другой дисциплине:

100 баллов и более – ОТЛИЧНО;

80 – 99 баллов – ХОРОШО;

60 – 79 баллов – УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО.

Защита промежуточных этапов проектирования (см. табл. 2.1, п.п. 2.5, 3.3) проводится в течение первой и второй контрольных недель (КТ1 и КТ2). Набранный при этом рейтинг прибавляется к рейтингу, полученному при окончательной защите проекта и стимулирует регулярную работу студента над курсовым проектом. Величина рейтинговой оценки определяется качеством проработки подлежащих решению вопросов. При неявке студента по неуважительной причине в указанный срок или неудовлетворительном решении вопросов, указанных в табл. 2.1, промежуточный рейтинг равен нулю.

Таблица 2.1.

Этапы выполнения работы и максимальный рейтинг

№ этапа	Наименование этапа	Перечень вопросов, подлежащих решению на этапе	Макс. рейтинг
1	2	3	4
1	Анализ технического задания (ТЗ) и дополнительные расчеты исходных данных для выполнения курсового работы	1.1. Исследуемая структурная схема ЭМС, полученная из обобщенной по условиям ТЗ из табл. 2.2, её звенья и обратные связи	1
		1.2. Параметры исследуемой структуры по ТЗ из табл. 2.3	1
		1.3. Параметры электродвигателя из табл. 2.4	1
		1.4. Расчет других параметров и величин	1

1	2	3	4
2	Анализ заданной нескорректированной САУ	2.1. Преобразование исследуемой структуры ЭМС с получением передаточных функций для каждого из ее контуров	5
		2.2. Проверка устойчивости ЭМС по критерию Гурвица, граничному коэффициенту передачи и логарифмическим частотным характеристикам	10
		2.3. Расчет переходных характеристик и определение показателей качества регулирования	10
		2.4. Расчет механических характеристик ЭМС	4
		2.5. Защита результатов этапов 1, 2 (КТ1)	12
Итого баллов за этап			45
3	Оптимальный синтез ЭМС и расчет характеристик скорректированной системы	3.1. Настройка ЭМС технический (симметричный) оптимум, выбор корректирующих устройств	8
		3.2. Расчет логарифмических частотных и переходных характеристик скорректированной ЭМС и определение показателей качества регулирования	8
		3.3. Защита результатов выполнения этапа 2 (КТ2)	8
Итого баллов за этап			24
4	Электронное моделирование ЭМС	Разработка электронной модели контура, снятие переходной характеристики и ее сравнение с расчетной	12

1	2	3	4
5	Оформление курсового проекта и его защита	5.1. Качество оформления работы	17
		5.2. Качество защиты	20
Итоговый рейтинг			120

Задание на электронное моделирование и творческое задание выдается преподавателем только после выполнения этапов 1 – 3 и не позднее, чем за неделю до назначенного срока сдачи курсового проекта.

Все расчеты проводятся в среде MathCAD.

## 2.2. Задание на проект

Вариант задания на курсовой проект состоит из трех цифр, соответствующих номеру варианта, указанного в таблицах 2.2, 2.3 и 2.4. Таблица 2.2 определяет вариант структурной схемы ЭМС относительно обобщенной, приведенной на рис 3.1, ее статическую точность (в процентах)  $\Delta\omega$  или  $\Delta L$ . При этом вариант структуры задается знаком “+”. В таблице 2.3 заданы отдельные параметры ЭМС и быстродействие  $t_{ПП}$ , которое нужно обеспечить при синтезе корректирующих устройств. В таблице 2.4 приведены параметры двигателя.

Таблица 2.2.  
Варианты структурных схем ЭМС

Вариант	Наличие обратных связей			Наличие компенсационных связей		$\Delta\omega$ , %	$\Delta L$ , %
	ОСМ	ОСС	ОСП	$K_{км}$	$K_{к\omega}$		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	-	-	-	1	-
2	+	+	-	+	-	0	-
3	+	+	-	-	+	2,5	-
4	+	+	-	+	+	0	-
5	+	-	+	-	-	-	1

1	2	3	4	5	6	7	8
6	+	-	+	+	-	-	2
7	+	-	+	+	+	0	2,5
8	-	+	+	-	+	2,5	1,5
9	-	+	+	+	+	0	2,5
10	+	+	+	-	-	2,5	2

Таблица 2.3  
Варианты параметров структурной схемы

Вариант	$T_M / T_3$	$T_{II}, c$	$K_{II}$	$T_{OM}, c$	$T_{OC}, c$	$t_{III}, c$
1	8	0,01	40	0,005	0,005	0,1
2	6	0,02	40	0,004	0,005	0,15
3	5	0,05	40	0,003	0,004	0,2
4	4	0,005	40	0,002	0,004	0,25
5	5	0,1	25	0	0,005	0,3
6	6	0,15	25	0,002	0,006	0,4
7	8	0,2	40	0,004	0,007	0,5
8	4	0,25	25	0,005	0,01	0,8

Таблица 2.4  
Варианты параметров электродвигателя

Вариант	$P_H, кВт$	$n_H, об/мин$	$I_H, А$	$R_d, Ом$	$R_{цз}, Ом$	$J, кг \cdot м^2$
1	0,7	3000	4,3	5,3	10	0,015
2	0,45	1500	2,9	11,8	20	0,015
3	0,3	1000	2,0	16,6	24	0,042
4	1,5	2000	9,0	2,0	4,0	0,042
5	1,0	1500	6,0	4,0	8,0	0,056
6	7,0	750	42	0,54	1,0	1,4
7	10	1000	63	0,3	0,6	1,5
8	3,2	1500	18,4	1,0	2,0	0,15
9	10	3000	33	0,4	0,8	0,2
10	11	2000	80	0,2	0,4	0,8

Для всех вариантов принимается номинальное напряжение  
 $U_H = 220 \text{ В}$ .

Пример выбора исходных данных для заданного варианта. Пусть преподавателем задан вариант 138. Из этого следует, что:

- **согласно первой цифре**, соответствующей варианту 1 из табл. 2.2, задана структура ЭМС с обратными связями по моменты нагрузки (ОСМ) и скорости двигателя (ОСС), отсутствуют компенсации влияния момента на скорость ( $K_{KM}$ ) и скорости на момент ( $K_{K\Omega}$ ), статическая ошибка по скорости (статизм внешних характеристик САУ)  $\Delta\omega = 1\%$ ;
- **согласно второй цифре**, соответствующей варианту 3 из табл. 2.3, заданная ЭМС имеет следующие параметры:
  - отношение электромеханической и электромагнитной постоянных времени  $\frac{T_M}{T_\Sigma} = 5$ ;
  - постоянная времени преобразователя  $T_{\Pi} = 0,05 \text{ с}$ ;
  - коэффициент передачи преобразователя  $K_{\Pi} = 40$ ;
  - постоянная времени цепи обратной связи по моменту  
 $T_{\text{ом}} = 0,003 \text{ с}$ ;
  - постоянная времени цепи обратной связи по скорости  
 $T_{\text{ос}} = 0,004 \text{ с}$ ;
  - время переходного процесса (быстродействие) синтезированной ЭМС не более  $t_{\text{пп}} = 0,2 \text{ с}$ ;
- **согласно третьей цифре**, соответствующей варианту 8 из табл. 2.4, двигатель заданной ЭМС имеет следующие параметры:
  - номинальная мощность  $P_H = 3,2 \text{ кВт}$ ;



- номинальная скорость  $n_H = 1500$  об/мин;
- номинальный ток  $I_H = 18,4$  А;
- активное сопротивление двигателя  $R_d = 1$  Ом;
- активное сопротивление цепи якоря двигателя  $R_{\text{ця}} = 2$  Ом;
- момент инерции двигателя  $J = 0,15$  кг · м<sup>2</sup>.

Таким образом, вариант 138 курсового проекта выполняется в соответствии с приведенными исходными данными.

### 3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЭМС И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 3.1. Структурная схема обобщенной ЭМС

В курсовом проекте по ТАУ исследуются (анализируются и синтезируются) варианты структурной схемы обобщенной автоматизированной электромеханической системы (ЭМС), приведенной на рис. 3.1. В ней для упрощения опущена функциональная зависимость передаточных функций от оператора Лапласа  $p$ . Эта структура широко применяется на практике для обеспечения всех видов движения. Частные варианты такой ЭМС komponуются, исходя из поставленной задачи. Можно плавно регулировать скорость  $\omega$ , изменяя ее в десятки тысяч раз и стабилизируя на любом выбранном уровне с требуемой точностью, управлять крутящим моментом  $M$ , усилиями и мощностью рабочего механизма, отслеживать любые траектории движения, отслеживая перемещение  $L$  механизма с микронной точностью и т. д. Схемотехническое исполнение ЭМС включает в себя большое количество устройств и блоков: электрические двигатели, трансформаторы, дроссели, силовые и управляющие электронные устройства, датчики, микропроцессорные устройства, измерительные приборы, механические узлы различной кинематики и т. д.

Обобщенная ЭМС, приведенная на рис. 3.1, содержит следующие устройства (блоки):

ПП – преобразователь перемещения в напряжение;  
 РП – регулятор перемещения;  
 РС – регулятор скорости вращения двигателя;  
 РМ – регулятор крутящего момента двигателя;  
 П – преобразователь, управляющий двигателем (в дальнейшем – просто преобразователь);  
 Д1 – электрическая часть двигателя;  
 Д2 – механическая часть двигателя;  
 ИМ – исполнительный механизм (механическое звено);  
 ОСМ – отрицательная обратная связь по моменту;  
 ОСС – отрицательная обратная связь по скорости;  
 ОСП – отрицательная обратная связь по перемещению;  
 $K_{к\omega}$  – компенсатор влияния скорости  $\omega$  на момент  $M$ ;  
 $K_{кМ}$  – компенсатор влияния момента  $M$  на скорость  $\omega$ ;  
 $M_c$  – статический момент на валу электродвигателя;  
 $K_\delta = 25$  – коэффициент передачи усилителя сигнала ошибки (рассогласования);

$L_{вх}$ ,  $L_{вых}$  – входные и выходные значения перемещений.

В основном, структура, приведенная на рис 3.1, является (или может быть сведена к таковой) трехконтурной, непрерывной и линейной. При наличии в ней регуляторов РП, РС и РМ она относится к классу систем с подчиненным регулированием. При этом все контуры регулирования работают отдельно и всегда внутренний контур подчиняется внешнему. Например, при работе отрицательной обратной связи по перемещению ОСП, оба внутренних контура (контуры регулирования момента и скорости) отключены, следовательно, отрицательные обратные связи по моменту ОСМ и скорости ОСС должны быть разомкнуты. И, наоборот, если осуществляется регулирование крутящего момента двигателя, должны быть разомкнуты обратные связи по скорости ОСС и перемещению ОСП.

Контур регулирования момента выполняет функции защиты элементов ЭМС от чрезмерных перегрузок и включается только в пусковых или аварийных режимах работы ЭМС.

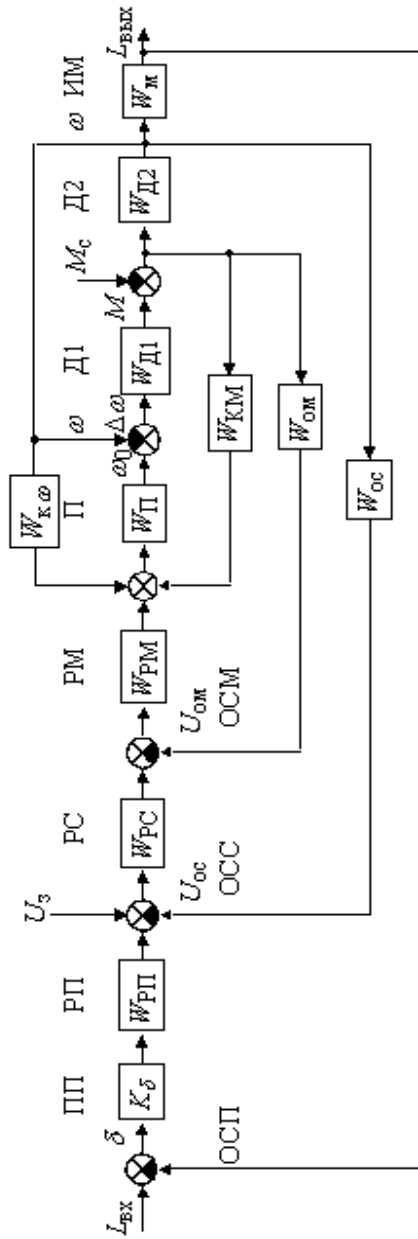


Рис. 3.1. Структурная схема обобщенной ЭМС

### 3.2. Передаточные функции элементов ЭМС и основные расчетные соотношения

Величины  $\omega$ ,  $L$  и  $M$  являются основными и в курсовой работе обеспечиваются электродвигателем постоянного тока с независимым возбуждением. Структурная схема такого электродвигателя приведена на рис. 3.2. На ней электродвигатель представлен звеньями с передаточными функциями  $W_{д1}(p)$  (она отражает процессы в электрической части двигателя) и  $W_{д2}(p)$  (она отражает процессы в механической части двигателя), охваченными отрицательной обратной связью с передаточной функцией  $W_{oc}(p)$ . На вход двигателя подается напряжение якорной цепи  $U_{я}$ . Выходной величиной электрической части электродвигателя является крутящий момент  $M_{д}$ , а на выходной величиной его механической части – скорость вращения  $\omega$ .

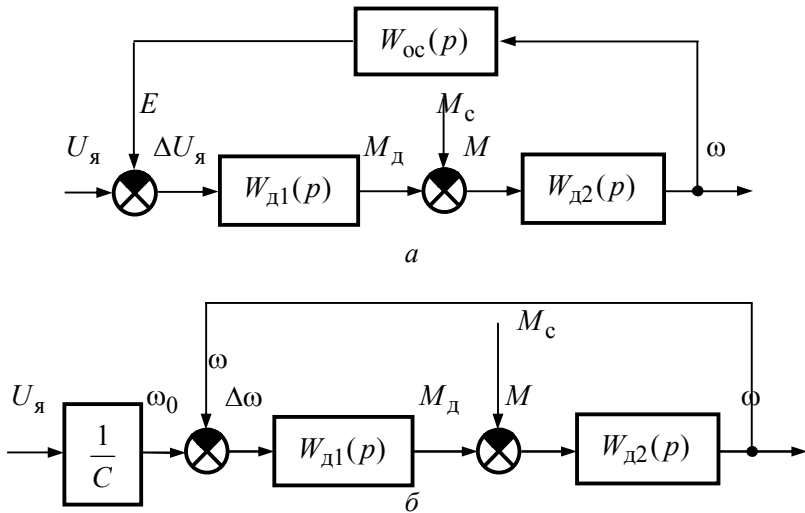


Рис. 3.2. Структурная схема электродвигателя

Передаточные функции  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$  без учета вязкого трения могут быть представлены выражениями:

$$W_{д1}(p) = \frac{K_{д1}}{T_э p + 1}, \quad W_{д2}(p) = \frac{K_{д2}}{T_м p}, \quad W_{ос}(p) = C$$

где  $K_{д1}$  – добротность механической характеристики,

$T_э$  – электромагнитная постоянная времени электродвигателя,

$K_{д2}$  – жесткость механической характеристики,

$T_м$  – электромеханическая постоянная времени электродвигателя.

$C$  – электромашинная постоянная двигателя.

Поскольку угловая скорость двигателя  $\omega = \frac{E}{C}$ , его скорость холостого хода  $\omega_0 = \frac{U_я}{C}$ , где  $E$  – противо э.д.с. двигателя,  $U_я$  – напряжение питания якорной цепи двигателя, структура, изображенная на рис. 3.2, а, может быть преобразована в структуру, показанную на рис. 3.2, б. Тогда параметры  $K_{д1}$  и  $K_{д2}$  в передаточных функциях  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$  при постоянном магнитном потоке в двигателе  $\Phi_* = 1$  могут быть рассчитаны по формулам  $K_{д1} = \frac{C^2}{R_{ця}}$  и  $K_{д2} = \frac{R_{ця}}{C^2}$ , где  $R_{ця}$  – сопротивление якорной цепи двигателя (включает в себя сопротивление его якоря  $R_д$  и сопротивление источника питания), т.е. всегда справедливо соотношение

$$K_{д1} \cdot K_{д2} = 1 \tag{3.1}$$

поэтому, зная одну величину, легко определить другую.

Добротность механической характеристики  $K_{д1}$ , согласно схеме, приведенной на рис. 3.2, б, при номинальном крутящем моменте двигателя  $M = M_H$  может быть также рассчитана по соотношению

$$K_{д1} = \frac{M_{н}}{\Delta\omega_{н}} \quad [\text{Нм} \cdot \text{с}], \quad (3.2)$$

где

$$M_{н} = I_{н} \cdot C \quad [\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}], \quad (3.3)$$

$I_{н}$  – номинальный ток двигателя.

Машинная постоянная  $C$ , в свою очередь, равна

$$C = \frac{U_{н} - I_{н} \cdot R_{д}}{\omega_{н}} \quad [\text{В} \cdot \text{с}], \quad (3.4)$$

где  $U_{н}$  – номинальное напряжение якоря (оно может быть различным, но для всех двигателей в работе принято  $U_{н} = 220 \text{ В}$ ),

$\omega_{н}$  – номинальная скорость вращения двигателя (в рад/сек), при этом

$$\omega_{н} = \frac{2\pi \cdot n_{н}}{60}, \quad (3.5)$$

$\Delta\omega_{н}$  – снижение скорости двигателя при номинальном моменте нагрузки относительно скорости холостого хода  $\omega_0$  (без нагрузки), при этом

$$\Delta\omega_{н} = (\omega_0 - \omega_{дв,н}) \frac{R_{цзя}}{R_{д}} \quad [\text{рад/с}], \quad (3.6)$$

$$\omega_0 = \frac{U_{н}}{C} \quad [\text{рад/с}]. \quad (3.7)$$

Таким образом, с использованием формул (3.2) – (3.7) может быть рассчитана добротность механической характеристики  $K_{д1}$ , а затем, с учетом соотношения (3.1), определена жесткость механической характеристики  $K_{д2}$ :

$$K_{д2} = \frac{1}{K_{д1}} \left[ \frac{1}{\text{Нм} \cdot \text{с}} \right]. \quad (3.8)$$

Величина электромеханической постоянной времени электродвигателя  $T_{м}$  при постоянном магнитном потоке в двигателе может быть рассчитана по формуле:

$$T_M = \frac{J}{K_{д1}} \text{ [с]}, \quad (3.9)$$

где  $J$  [кг · м<sup>2</sup>] – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя.

Электромагнитная постоянная времени электродвигателя

$$T_э = \frac{L_я}{R_{ця}}, \text{ где } L_я \text{ – индуктивность якорной обмотки двигателя.}$$

В работе задано соотношение  $\frac{T_M}{T_э} = k$ , поэтому при известной величине  $T_M$

$$T_э = \frac{T_M}{k} \text{ [с]}. \quad (3.10)$$

Скоростью вращения электродвигателя и его крутящим моментом управляет преобразователь параметров электрической энергии  $\Pi$ , который может иметь различное исполнение. Он может быть электромеханическим (электромашинным, магнитным усилителем и т. д.) или электронным (управляемым выпрямителем, высокочастотным преобразователем и т. д.) и описывается передаточной функцией инерционного звена

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1}, \text{ где } K_{\Pi} \text{ – коэффициент передачи преобразователя, } T_{\Pi} \text{ – его постоянная времени.}$$

С учетом последовательного соединения преобразователя и двигателя эта передаточная функция может быть преобразована к виду

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi}/C}{T_{\Pi}p + 1}. \quad (3.11)$$

При таком представлении передаточной функции преобразователя его коэффициент передачи  $K_{\Pi}/C$  будет иметь размерность угловой скорости (рад/с), а величина постоянной времени  $T_{\Pi}$  зависит от варианта исполнения преобразователя.

Обратные связи по моменту и скорости, как правило, инерционные, и эта инерционность учтена в их передаточных функциях, т.е.

$$W_{\text{ом}}(p) = \frac{K_{\text{ом}}}{T_{\text{ом}}p + 1}, \quad (3.12)$$

$$W_{\text{ос}}(p) = \frac{K_{\text{ос}}}{T_{\text{ос}}p + 1}, \quad (3.13)$$

Постоянные времени  $T_{\text{ом}}$  и  $T_{\text{ос}}$  заданы, а коэффициенты передачи рассчитываются по формулам:

$$K_{\text{ом}} \leq \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot M_{\text{н}}} \left[ \frac{1}{A \cdot c} \right], \quad (3.14)$$

$$K_{\text{ос}} \geq \frac{U_{\text{л}}}{\omega_{\text{н}}} [B \cdot c], \quad (3.15)$$

где  $U_{\text{л}} = 10$  В – максимальное напряжение, при котором операционный усилитель, применяемый для усиления сигнала обратной связи, работает в линейном режиме.

Регуляторы скорости РС и момента РМ, являющиеся корректирующими устройствами определенного назначения, выполняются на основе стандартных регуляторов типа П, ПД, И, ПИ, ПИД. Они могут также содержать в своей структуре однозвенные фильтры, описываемые, в общем случае, передаточной функцией инерционного форсирующего звена с единичным коэффициентом передачи:

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{\tau_{\text{ф}}p + 1}{T_{\text{ф}}p + 1}.$$

Получение передаточных функций регуляторов осуществляется на этапе синтеза ЭМС. На этапе анализа нескорректированной системы их передаточные функции принимаются равными единице, то есть.  $W_{\text{рп}}(p) = W_{\text{рс}}(p) = W_{\text{рм}}(p) = 1$ .

В качестве примера рассчитаем параметры структурной схемы ЭМС для следующих исходных данных:



$$k = \frac{T_M}{T_3} = 7, T_{II} = 0,04 \text{ с}, K_{II} = 50, T_{OM} = 0,004 \text{ с}, T_{oc} = 0,008 \text{ с},$$

$$S = 1 \%, t_{III} = 0,4 \text{ с}, P_H = 3,2 \text{ кВт}, n_H = 1500 \text{ об/мин},$$

$$I_H = 18,4 \text{ А}, R_d = 1 \text{ Ом}, R_{ця} = 2 \text{ Ом}, J = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В соответствии с приведенными выше соотношениями, получим:

- номинальная скорость вращения двигателя (согласно формуле 3.5):

$$\omega_{дв,н} = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} \approx 157 \text{ рад/с};$$

- машинная постоянная двигателя (согласно формуле 3.4):

$$C = \frac{U_H - I_H \cdot R_d}{\omega_{дв,н}} \approx 1,28 \text{ В} \cdot \text{с};$$

- скорость холостого хода двигателя (согласно формуле 3.7):

$$\omega_0 = \frac{U_H}{C} \approx 171,4 \text{ рад/с};$$

- снижение скорости двигателя при номинальном моменте нагрузки относительно скорости холостого хода (согласно формуле 3.6):

$$\Delta\omega_{дв,н} = (\omega_0 - \omega_{дв,н}) \frac{R_{ця}}{R_d} \approx 28,7 \text{ рад/с};$$

- номинальный крутящий момент двигателя (согласно формуле 3.3):

$$M_H = I_H \cdot C = 23,6 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с};$$

- добротность механической характеристики (согласно формуле 3.2):

$$K_{д1} = \frac{M_H}{\Delta\omega_{дв,н}} \approx 0,82 \text{ Нм} \cdot \text{с};$$

- жесткость механической характеристики (согласно формуле 3.8):

$$K_{д2} = \frac{1}{K_{д1}} \approx 1,2 \frac{1}{\text{Нм} \cdot \text{с}};$$

- электромеханическая постоянная времени двигателя (согласно формуле 3.9):

$$T_M = \frac{J}{K_{д1}} \approx 0,18 \text{ с};$$

- электромагнитная постоянная времени электродвигателя (согласно формуле 3.10):

$$T_э = \frac{T_M}{k} = 0,026 \text{ с};$$

- максимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования момента (согласно формуле 3.14):

$$K_{ом, \max} = \frac{U_{л}}{2 \cdot M_H} = \frac{10}{2 \cdot 23,6} = 0,212 \frac{1}{\text{А} \cdot \text{с}}, \text{ принимаем}$$

$$K_{ом} = 0,2 \frac{1}{\text{А} \cdot \text{с}};$$

- минимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования скорости (согласно формуле 3.15):

$$K_{ос} = \frac{U_{л}}{\omega_{дв,н}} = \frac{10}{157} = 0,064 \text{ В} \cdot \text{с}, \text{ принимаем}$$

$$K_{ос} = 0,1 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

#### 4. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ЭМС

В зависимости от заданного варианта, в обобщенной схеме ЭМС, представленной на рис. 3.1, можно выделить следующие основные типы систем:

- регулирования и стабилизации крутящего момента и скорости двигателя;
- обработки перемещения.

В обеих группах ЭМС могут присутствовать или отсутствовать компенсационные обратные связи. Ниже рассмотрим конкретные структуры ЭМС и их статические характеристики.

#### 4.1. Анализ ЭМС, осуществляющих регулирование крутящего момента и скорости двигателя

Структуры ЭМС, осуществляющие регулирование крутящего момента и скорости двигателя, условно можно разбить на два типа:

- ЭМС, в которых отсутствуют компенсационные обратные связи;
- ЭМС с компенсационными обратными связями.

Наличие или отсутствие компенсационных обратных связей определяет форму механической характеристики (МХ) ЭМС. Эти характеристики ЭМС должны удовлетворять следующим требованиям;

- скорость холостого хода (при отсутствии нагрузки) должна регулироваться плавно в широком диапазоне от  $\omega_{0_{\max}}$  до  $\omega_{0_{\min}}$ , который задается технологическим процессом;
- изменение скорости  $\Delta\omega$  под воздействием нагрузки должно быть минимальным или вообще отсутствовать;
- максимальный момент двигателя должен ограничиваться, исходя из электрической и механической прочности ЭМС допустимым для ее пуска значением  $M_{\Pi}$ ; желательно, чтобы этот момент был не более  $2,5M_{\Pi}$ .

Идеальные МХ обеспечиваются либо посредством введения в ЭМС компенсационных положительных обратных связей, либо установкой регуляторов, содержащих интегрирующие звенья.

Рассмотрим варианты ЭМС, осуществляющих регулирование электромагнитного момента и скорости двигателя без регуляторов.

Структурная схема такой ЭМС без компенсационных обратных связей (вариант 1 в табл. 2.2) приведена на рис. 4.1, а. На ней действуют следующие величины:

$U_{3\omega}$ ,  $U_{3M}$  – задающее напряжение для контуров регулирования скорости и момента;

$U_{\text{ом}}$ ,  $U_{\text{ос}}$  – напряжения обратных связей по моменту и скорости двигателя соответственно;

$M$  – крутящий момент двигателя;

$M_{\text{с}}$  – статический момент на валу двигателя.

Изменение скорости холостого хода до минимальной осуществляется изменением величины задающего напряжения  $U_{3\omega}$ . Ограничение и стабилизация крутящего момента электродвигателя задается напряжением  $U_{3M}$  и должна осуществляться на уровне его значений  $M_{\text{п}} = 2,5M_{\text{н}}$ . Стабилизирующие скорость и момент по величинам  $\omega_0$  и  $M_{\text{п}}$  отрицательные обратные связи (ОСС и ОСМ соответственно) не должны работать одновременно. Стремление ОСМ понизить скорость будет противодействовать ОСС, главная задача которой – удержать скорость на заданном уровне. Следовательно, при работе контура регулирования момента контур регулирования скорости должен быть отключен, и, наоборот, при работе контура регулирования скорости должен быть отключен контур регулирования момента. Эта задача достигается автоматически путем реализации в ЭМС подчиненного регулирования. При его имитации (а именно это делается на этапе анализа ЭМС) принудительно размыкаются соответствующие отрицательные обратные связи. ЭМС анализируется по контурно, то есть при анализе контура регулирования скорости двигателя размыкается обратная связь по его крутящему моменту и, наоборот, при анализе контура регулирования крутящего момента двигателя размыкается обратная связь по его скорости.

Анализ ЭМС, структура которой изображена на рис. 4.1, а, начнем с контура регулирования момента. Для этого разомкнем обратную связь по скорости и перенесем сумматор, к которому подводится единичная обратная связь по скорости  $\omega$ , охватывающая звенья с передаточными функциями  $W_{\text{д1}}(p)$  и  $W_{\text{д2}}(p)$ , через преобразователь. Тогда получим структуру, изображенную на рис. 4.1, б. Ее характерной особенностью является то,

что, несмотря на размыкание обратной связи по скорости, контур все равно оказывается замкнутым по скорости.

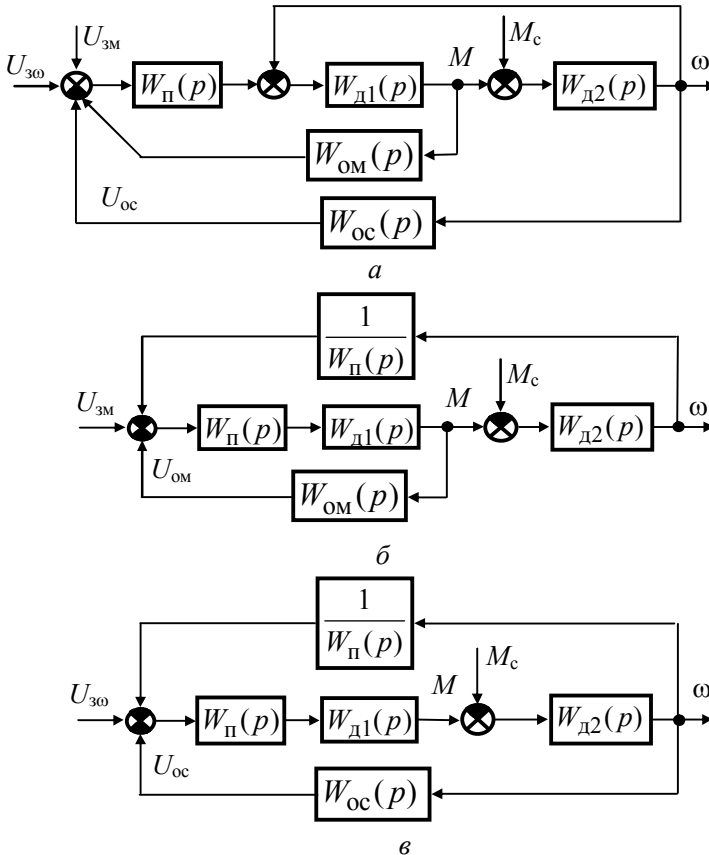


Рис. 4.1. Структурные схемы для анализа ЭМС без компенсационных обратных связей (а), контура регулирования момента (б) и скорости (в)

По схеме, приведённой на рис. 4.1, б получим передаточные функции для контура регулирования момента по задающему  $W_{3г,м}(p)$  и возмущающему воздействию  $W_{3ф,м}(p)$  с учётом того что  $K_{д1}K_{д2} = 1$ , далее положим в них  $p = 0$  :

$$\begin{aligned}
W_{3g,M}(p) &= \frac{\frac{W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{OM}(p)}}{1 + \frac{W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{OM}(p)}} \cdot \frac{1}{W_{\Pi}(p)}}} \\
&= \frac{\frac{W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{OM}(p)}}{1 + \frac{W_{\Delta 1}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{\Delta 1}(p)W_{OM}(p)}}} \\
&= \frac{\frac{K_{\Pi}/C}{T_{\Pi}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 1}}{T_{\Delta}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 2}}{T_M p}}{1 + \frac{K_{\Pi}/C}{T_{\Pi}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 1}}{T_{\Delta}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 2}}{T_M p} \cdot \frac{K_{OM}}{T_{OM}p + 1}} = \\
&= \frac{\frac{K_{\Delta 1}}{T_{\Delta}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 2}}{T_M p}}{1 + \frac{K_{\Delta 1}}{T_{\Delta}p + 1} \cdot \frac{K_{\Delta 2}}{T_M p} \cdot \frac{K_{OM}}{T_{OM}p + 1}} = \\
&= \frac{K_{\Pi}/C (T_{OM}p + 1)}{a_{M4}p^4 + a_{M3}p^3 + a_{M2}p^2 + a_{M1}p + a_{M0}},
\end{aligned}$$

где  $a_{M0} = 1$ ,  $a_{M1} = T_{\Pi} + T_{OM} + T_M \left( 1 + \frac{K_{\Pi}K_{\Delta 1}K_{OM}}{C} \right)$ ,

$$a_{M2} = (T_{\Pi} + T_{\Delta} + T_{OM})T_M + T_{\Pi}T_{OM}, \quad a_{M3} = [T_{\Pi}(T_{\Delta} + T_{OM}) + T_{\Delta}T_{OM}]T_M,$$

$$a_{M4} = T_{\Pi}T_{\Delta}T_MT_{OM}.$$

$$\boxed{W_{3g,M}(0) = \frac{K_{\Pi}}{C}}.$$

$$\begin{aligned}
 W_{3g,f}(p) &= \frac{W_{д2}(p)}{1 + \frac{W_{д1}(p)W_{д2}(p)}{1 + W_{п}(p)W_{д1}(p)W_{ом}(p)}} = \\
 &= \frac{\frac{K_{д2}}{T_{м}p}}{1 + \frac{\frac{K_{д1}}{T_{э}p+1} \cdot \frac{K_{д2}}{T_{м}p}}{\frac{K_{д1}}{T_{э}p+1} \cdot \frac{K_{п}/C}{T_{п}p+1} \cdot \frac{K_{ом}}{T_{ом}p+1}}} = \\
 &= \frac{K_{д2} \left[ (T_{ом}p+1)(T_{э}p+1)(T_{п}p+1) + \frac{K_{п}K_{д1}K_{ом}}{C} \right]}{a_{м4}p^4 + a_{м3}p^3 + a_{м2}p^2 + a_{м1}p + a_{м0}}. \\
 \boxed{W_{3g,f}(0) = K_{д2} \left( 1 + \frac{K_{п}K_{д1}K_{ом}}{C} \right) = K_{д2} + \frac{K_{п}K_{ом}}{C}}.
 \end{aligned}$$

Уравнение механической характеристики на участке работы контура регулирования момента будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 \omega(M) &= U_{3м} W_{3g,m}(0) - M W_{3g,f}(0) = \\
 &= U_{3м} \cdot \frac{K_{п}}{C} - M \cdot \left( K_{д2} + \frac{K_{п}K_{ом}}{C} \right). \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

При пусковом моменте ( $M = M_{п} = 2,5M_{н}$ ) скорость ЭМС  $\omega = 0$  и уравнение (4.1) приобретает вид  $U_{3м} \cdot \frac{K_{п}}{C} - M_{п} \cdot \left( K_{д2} + \frac{K_{п}K_{ом}}{C} \right) = 0$ , откуда задающее воздействие для контура регулирования момента рассчитывается по формуле

$$U_{3м} = M_{п} \cdot \left( \frac{K_{д2} + \frac{K_{п}K_{ом}}{C}}{\frac{K_{п}}{C}} \right) = M_{п} \left( \frac{K_{д2}C + K_{п}K_{ом}}{K_{п}} \right). \quad (4.2)$$

Теперь в структуре по рис. 4.1, а разомкнем обратную связь по моменту и так же перенесем сумматор, к которому

подводится единичная обратная связь по скорости  $\omega$ , охватывающая звенья с передаточными функциями  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$ . В этом случае получится структура, приведенная на рис. 4.1. в. Здесь обратная связь по скорости складывается из двух параллельных ветвей, т.е.

$$W_{ос,эКВ}(p) = \frac{1}{W_{п}(p)} + W_{ос}(p) = \frac{T_{п}p+1}{\frac{K_{п}}{C}} + \frac{K_{ос}}{T_{ос}p+1} =$$

$$= \frac{C \cdot \left[ (T_{п}p+1)(T_{ос}p+1) + \frac{K_{п}}{C} K_{ос} \right]}{K_{п}(T_{ос}p+1)}.$$

Получим передаточные функции для контура регулирования скорости (рис. 4.1, в) по задающему  $W_{зг,\omega}(p)$  и возмущающему воздействию  $W_{зф,\omega}(p)$  также с учётом того что  $K_{д1}K_{д2} = 1$  и далее положим в них  $p = 0$ :

$$W_{зг,\omega}(p) = \frac{W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p)}{1 + W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p) \cdot W_{ос,эКВ}(p)} =$$

$$= \frac{\frac{K_{п}}{C} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{п}p+1} \cdot \frac{K_{д2}}{T_{м}p}}{1 + \frac{K_{п}}{C} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{п}p+1} \cdot \frac{K_{д2}}{T_{м}p} \cdot \frac{C \cdot \left[ (T_{п}p+1)(T_{ос}p+1) + \frac{K_{п}}{C} K_{ос} \right]}{K_{п}(T_{ос}p+1)}}} =$$

$$= \frac{\frac{K_{п}}{C} \cdot (T_{ос}p+1)}{T_{м}p(T_{п}p+1)(T_{ос}p+1) + (T_{п}p+1)(T_{ос}p+1) + \frac{K_{п}}{C} K_{ос}}$$

$$W_{зг,\omega}(0) = \frac{\frac{K_{п}}{C}}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{ос}}$$



$$\begin{aligned}
 W_{3f,\omega}(p) &= \frac{W_{д2}(p)}{1 + W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p) \cdot W_{oc,эKB}(p)} = \\
 &= \frac{\frac{K_{д2}}{T_M p}}{1 + \frac{K_{п}/C}{T_{п} p + 1} \cdot \frac{K_{д1}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{д2}}{T_M p} \cdot C \cdot \left[ (T_{п} p + 1)(T_{oc} p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{oc} \right]}{K_{п}(T_{oc} p + 1)} = \\
 &= \frac{K_{д2} \cdot (T_3 p + 1)(T_{п} p + 1)(T_{oc} p + 1)}{T_M p (T_3 p + 1)(T_{п} p + 1)(T_{oc} p + 1) + (T_{п} p + 1)(T_{oc} p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}}. \\
 W_{3f,\omega}(0) &= \frac{K_{д2}}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}}.
 \end{aligned}$$

Уравнение механической характеристики на участке работы контура регулирования скорости будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 \omega(M) &= U_{3\omega} W_{3g,\omega}(0) - M W_{3f,\omega}(0) = \\
 &= U_{3\omega} \cdot \frac{K_{п}/C}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}} - M \cdot \frac{K_{д2}}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}}. \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

При  $M = 0$  на выходе ЭМС будет иметь место скорость холостого хода, т.е.  $\omega = \omega_0$ , и уравнение (4.3) приобретает вид

$$U_{3\omega} \cdot \frac{K_{п}/C}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}} = \omega_0, \text{ откуда задающее воздействие для конту-}$$

ра регулирования скорости рассчитывается по формуле

$$\boxed{U_{3\omega} = \frac{K_{п}/C}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}} = \frac{\omega_0}{\frac{K_{п}/C}{1 + \frac{K_{п}}{C} K_{oc}}} = \omega_0 \left( \frac{C}{K_{п}} + K_{oc} \right)}. \tag{4.4}$$

Выражения (4.1), (4.3) представляют собой уравнения спадающих и пересекающихся между собой прямых. Момент отсечки  $M_{отс}$ , соответствующий точке пересечения этих прямых, находится путём приравнивания уравнений (4.1) и (4.3) друг другу при  $M = M_{отс}$ , то есть

$$U_{з\omega} \cdot \frac{K_{п}}{C} - M_{отс} \cdot \left( K_{д2} + \frac{K_{п}K_{ом}}{C} \right) = U_{з\omega} \cdot \frac{K_{п}/C}{1 + \frac{K_{п}}{C}K_{ос}} - M_{отс} \cdot \frac{K_{д2}}{1 + \frac{K_{п}}{C}K_{ос}},$$

отсюда

$$M_{отс} = \frac{U_{з\omega} \left( 1 + \frac{K_{п}K_{ос}}{C} \right) - U_{з\omega}}{K_{д2}K_{ос} + K_{ом} \left( 1 + \frac{K_{п}K_{ос}}{C} \right)} \quad (4.5)$$

На рис. 4.2 изображена механическая характеристика (МХ), соответствующая структуре, приведённой на рис. 4.1, а, и построенная по формулам (4.1) – (4.5). Участок **1** на ней соответствует работе контура регулирования момента при  $K_{ос} = 0$ ,  $K_{ом} \neq 0$ , а участок **2** – работе контура регулирования скорости при  $K_{ом} = 0$ ,  $K_{ос} \neq 0$ . Под действием номинального момента  $M_{н}$  скорость холостого хода двигателя  $\omega_0$  уменьшается на величину  $\Delta\omega$  до номинальной скорости  $\omega_{н}$ , а моменту отсечки соответствует скорость  $\omega_{отс}$ .

Рассмотрим системы с компенсационными положительными обратными связями, введение которых позволяет улучшить механическую характеристику ЭМС, приблизив ее к идеальной.

На рис. 4.3 приведена структурная схема системы (вариант 2), в которой, благодаря положительной обратной связи, осуществляется компенсация влияния момента на скорость. Рассмотрим подробно влияние этой положительной обратной связи.

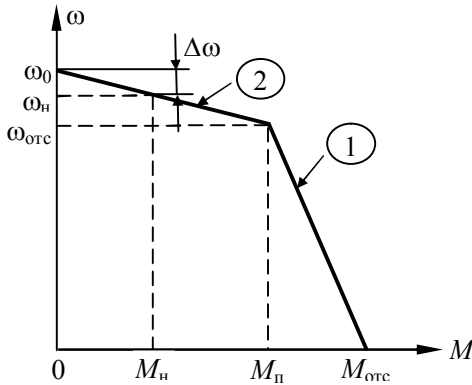


Рис. 4.2. МХ системы без компенсационных обратных связей

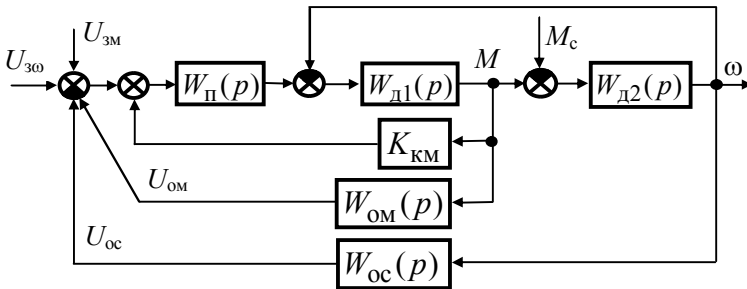


Рис. 4.3. Структурная схема ЭМС с компенсацией влияния момента на скорость

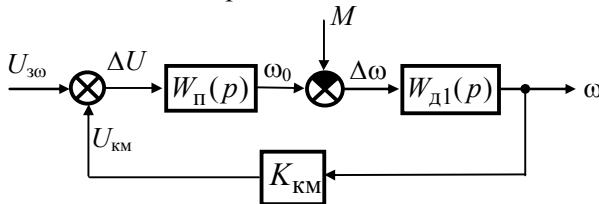


Рис. 4.4. Компенсационная обратная связь к коэффициентом передачи  $K_{кМ}$

На рис. 4.4 приведена структурная схема, на которой звенья с передаточными функциями  $W_{\Pi}(p)$  и  $W_{Д1}(p)$  охвачены положительной обратной связью с коэффициентом передачи  $K_{\text{км}}$ .

Получим эквивалентную передаточную функцию по возмущающему воздействию системы, приведённой на рис. 4.4:

$$\begin{aligned} W_{3,f}(p) &= \frac{W_{Д1}(p)}{1 - W_{\Pi}(p)W_{Д1}(p)K_{\text{км}}} = \frac{\frac{K_{Д1}}{T_3 p + 1}}{1 - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot \frac{K_{Д1}}{T_3 p + 1} \cdot K_{\text{км}}} = \\ &= \frac{K_{Д1}(T_3 p + 1)}{T_{\Pi} T_3 p^2 + (T_{\Pi} + T_3)p + 1 - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{\text{км}}}. \end{aligned}$$

В статическом режиме работы, т. е. при  $p = 0$

$$W_{3f}(0) = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{K_{Д1}}{1 - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{\text{км}}},$$

откуда

$$\Delta \omega = \Delta M \frac{C - K_{\Pi} \cdot K_{Д1} \cdot K_{\text{км}}}{K_{\Pi} \cdot K_{Д1}}.$$

На рис. 4.5 изображен участок механической характеристики ЭМС, соответствующий работе контура регулирования скорости. Вид этого участка будет зависеть от величины коэффициента передачи  $K_{\text{км}}$ . При  $K_{\text{км}} = 0$  (линия 1 на рис. 4.5) компенсационная связь отключена и скорость стабилизируется с максимальным отклонением  $\Delta \omega_1 = \omega_0 - \omega_1 = \frac{\Delta M \cdot C}{K_{\Pi} \cdot K_{Д1}}$ . При

$K_{\text{км}} < \frac{C}{K_{\Pi} \cdot K_{Д1}}$  (линия 2 на рис. 4.5) отклонение

$\Delta \omega_2 = \omega_0 - \omega_2 < \Delta \omega_1 \neq 0$ , т. е. полной компенсации влияния момента на скорость нет (недокомпенсация). При  $K_{\text{км}} = \frac{C}{K_{\Pi} \cdot K_{Д1}}$

(линия 3 на рис. 4.5) отклонение  $\Delta \omega = 0$  и происходит полная

компенсация влияния момента нагрузки на скорость, т.е.  $\omega = \omega_0$ . При  $K_{\text{км}} > \frac{C}{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}}}$  (линия 4 на рис. 4.5) скорость двигателя с увеличением момента возрастает  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega_3 > \omega_0$  и происходит перекомпенсация влияния момента нагрузки на скорость.

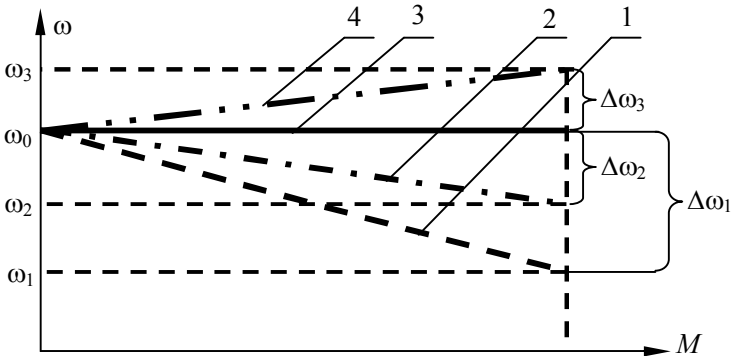


Рис. 4.5. Пояснения к действию компенсации влияния момента на скорость

В курсовом проекте принимается **полная** компенсация влияния момента на скорость, то есть  $K_{\text{км}} = \frac{C}{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}}}$ , и структура, приведенная на рис. 4.4, эквивалентуруется звеном (рис. 4.6) с передаточной функцией

$$W_{\text{п}}(p) = \frac{K_{\text{п}} / C \cdot K_{\text{д1}}}{T_{\Sigma} p (T_{\text{п}}' p + 1)}, \quad (4.6)$$

где

$$T_{\Sigma} = T_{\text{п}} + T_{\text{э}}, \quad (4.7)$$

$$T_{\text{п}}' = \frac{T_{\text{п}} \cdot T_{\text{э}}}{T_{\text{п}} + T_{\text{э}}}. \quad (4.8)$$

Таким образом, рассмотренная положительная обратная связь приводит к структурным изменениям в ЭМС, если

$K_{км} = \frac{C}{K_{п} \cdot K_{д1}}$ . В этом случае в структуре появляется интегри-

рующее звено, включенное между точками приложения задающего и возмущающего воздействий. Поэтому система относительно скорости двигателя становится астатической и происходит полная компенсация влияния момента нагрузки на скорость.

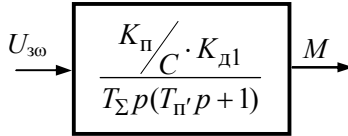


Рис. 4.6. Звено, эквивалентное структуре, изображенной на рис. 4.4

Описанная компенсационная связь должна работать только с контуром регулирования скорости. Но, поскольку она не оказывает серьезного влияния на работу контура регулирования момента, то, для упрощения процесса синтеза корректирующих устройств, будем считать ее постоянно включенной.

Таким образом, если в структуре ЭМС задана компенсация влияния момента на скорость, то она полная и постоянно включенная.

Таким образом, рассмотренная положительная обратная связь приводит к структурным изменениям в ЭМС, если

$K_{км} = \frac{C}{K_{п} \cdot K_{д1}}$ . В этом случае в структуре появляется интегри-

рующее звено, включенное между точками приложения задающего и возмущающего воздействий. Поэтому система относительно скорости двигателя становится астатической и происходит полная компенсация влияния момента нагрузки на скорость.

Описанная компенсационная связь должна работать только с контуром регулирования скорости. Но, поскольку она не оказывает серьезного влияния на работу контура регулирования момента, то, для упрощения процесса синтеза корректирующих устройств, будем считать ее постоянно включенной.

Таким образом, если в структуре ЭМС задана компенсация влияния момента на скорость, то она полная и постоянно включенная.

На рис. 4.7 приведены структурные схемы контура регулирования момента (рис. 4.7, а) и скорости (рис. 4.7, б) для ЭМС с положительной компенсационной связью, исключающей влияние момента на скорость (вариант 2 в табл. 2.2). Ввиду полной и постоянно действующей компенсации влияния момента на скорость, звенья с передаточными функциями  $W_{\Pi}(p)$  и  $W_{д1}(p)$  заменены звеном с передаточной функцией  $W_{\Pi'}(p)$  (см. формулы (4.6) – (4.8)).

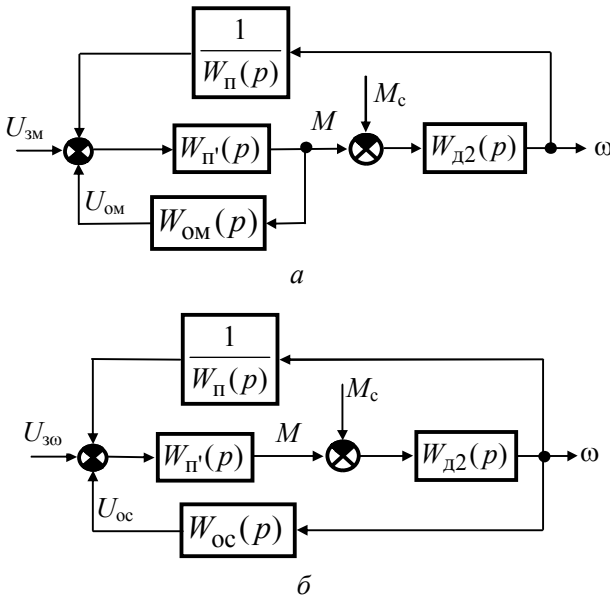


Рис. 4.7. Структурные схемы для анализа контура регулирования момента (а) и скорости (б) в ЭМС с компенсацией влияния момента на скорость

По схеме, приведённой на рис. 4.7, а получим передаточные функции для контура регулирования момента по задающему  $W_{3g,M}(p)$  и возмущающему воздействиям  $W_{3f,M}(p)$ :

$$W_{3g,M}(p) = \frac{\frac{W_{\Pi'}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi'}(p)W_{OM}(p)}}{1 + \frac{W_{\Pi'}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi'}(p)W_{OM}(p)} \cdot \frac{1}{W_{\Pi}(p)}} =$$

$$= \frac{K_{\Pi} / C (T_{OM}p + 1)}{a_{M4}p^4 + a_{M3}p^3 + a_{M2}p^2 + a_{M1}p + a_{M0}},$$

где  $a_{M0} = 1$ ,  $a_{M1} = T_{\Pi} + T_{OM} + T_M \frac{K_{\Pi} K_{OM}}{C}$ ,  $a_{M2} = T_{\Pi} T_{OM} + T_M T_{\Sigma}$ ,  
 $a_{M3} = T_{\Sigma} T_M (T_{\Pi'} + T_{OM})$ ,  $a_{M4} = T_{\Pi'} T_{\Sigma} T_M T_{OM}$ .

$$W_{3g,M}(0) = \frac{K_{\Pi}}{C}.$$

$$W_{3f,M}(p) = \frac{W_{\Delta 2}(p)}{1 + \frac{W_{\Pi'}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi'}(p)W_{OM}(p)} \cdot \frac{1}{W_{\Pi}(p)}} =$$

$$= \frac{K_{\Pi} / C \cdot K_{OM} + T_{\Sigma} p (T_{OM}p + 1) (T_{\Pi'} p + 1)}{a_{M4}p^4 + a_{M3}p^3 + a_{M2}p^2 + a_{M1}p + a_{M0}}.$$

$$W_{3f,M}(0) = K_{\Pi} / C \cdot K_{OM}.$$

Уравнение механической характеристики на участке работы контура регулирования момента будет иметь вид

$$\omega(M) = U_{3M} W_{3g,M}(0) - M W_{3g,f}(0) =$$

$$= U_{3M} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C} - M \cdot \frac{K_{\Pi} K_{OM}}{C}. \quad (4.9)$$

При пусковом моменте ( $M = M_{\Pi} = 2,5M_H$ ) скорость ЭМС  $\omega = 0$  и уравнение (4.9) приобретает вид



$U_{3\omega} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C} - M_{\Pi} \cdot \frac{K_{\Pi} K_{\text{ОМ}}}{C} = 0$ , отсюда задающее воздействие для контура регулирования момента рассчитывается по формуле

$$U_{3\omega} = M_{\Pi} K_{\text{ОМ}}. \quad (4.10)$$

Получим передаточную функцию для контура регулирования скорости (рис. 4.7, б) по задающему воздействию  $W_{3\omega, \omega}(p)$ :

$$\begin{aligned} W_{3\omega, \omega}(p) &= \frac{W_{\Pi'}(p)W_{\Delta 2}(p)}{1 + W_{\Pi'}(p)W_{\Delta 2}(p) \cdot \left( \frac{1}{W_{\Pi}(p)} + \frac{K_{\text{Ос}}}{K_{\text{Ос}}p + 1} \right)} = \\ &= \frac{K_{\Pi}/C(T_{\text{Ос}}p + 1)}{a_{\omega 4}p^4 + a_{\omega 3}p^3 + a_{\omega 2}p^2 + a_{\omega 1}p + a_{\omega 0}}, \end{aligned}$$

где  $a_{\omega 0} = 1 + \frac{K_{\Pi} K_{\text{Ос}}}{C}$ ,  $a_{\omega 1} = T_{\Pi} + T_{\text{Ос}}$ ,  $a_{\omega 2} = T_{\Pi} T_{\text{Ос}} + T_{\text{М}} T_{\Sigma}$ ,  
 $a_{\omega 3} = T_{\Sigma} T_{\text{М}} (T_{\Pi'} + T_{\text{Ос}})$ ,  $a_{\omega 4} = T_{\Pi'} T_{\Sigma} T_{\text{М}} T_{\text{Ос}}$ .

$$\boxed{W_{3\omega, \omega}(0) = \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{\text{Ос}}}.$$

Поскольку контур регулирования скорости является астатическим, то при  $p = 0$  его передаточная функция по возмущающему воздействию будет равна нулю и после окончания переходного процесса установившееся значение скорости на выходе ЭМС будет равно скорости холостого хода  $\omega_0$  и задающее воздействие для этого контура определится из соотношения:

$$U_{3\omega} W_{3\omega, \omega}(0) = U_{3\omega} \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{\text{Ос}}} = \omega_0,$$

отсюда

$$U_{3\omega} = \omega_0 \left( \frac{C}{K_{\Pi}} + K_{\text{Ос}} \right). \quad (4.11)$$

Момент отсечки определится из уравнения

$$\omega_0 = U_{3\omega} \frac{K_{\Pi}}{C} - M_{\text{отс}} \frac{K_{\Pi}}{C} K_{\text{ом}},$$

отсюда

$$M_{\text{отс}} = \frac{U_{3\omega} \frac{K_{\Pi}}{C} - \omega_0}{\frac{K_{\Pi}}{C} K_{\text{ом}}}. \quad (4.12)$$

На рис. 4.8 изображена механическая характеристика (МХ), соответствующая структуре, приведённой на рис. 4.7, и построенная по формулам (4.9) – (4.11). Участок **1** на ней соответствует работе контура регулирования момента при  $K_{\text{ос}} = 0$ ,  $K_{\text{ом}} \neq 0$ , а участок **2** – работе контура регулирования скорости при  $K_{\text{ом}} = 0$ ,  $K_{\text{ос}} \neq 0$ . При работе контура регулирования скорости при  $M < M_{\text{отс}}$  поддерживается скорость холостого хода двигателя  $\omega_0$ , а при  $M_{\text{отс}} < M < M_{\Pi}$  скорость снижается до нуля.

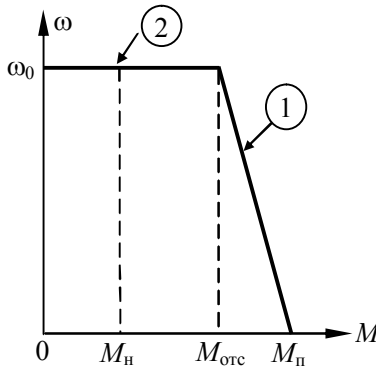


Рис. 4.8. МХ для ЭМС с компенсацией влияния момента на скорость

Рассмотрим действие другой положительной обратной связи, осуществляющей в варианте 3 компенсацию влияния скорости на крутящий момент двигателя (рис. 4.9). Легко видно, что это влияние происходит за счет единичной обратной связи, охватывающей звенья с передаточными функциями двигателя  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$ .

Механизм действия этой компенсации поясняет рис. 4.10. Полная компенсация влияния скорости на крутящий момент двигателя будет только тогда, когда за счет компенсационной связи по скорости  $W_{к\omega}(p)$  эта связь будет устранена и структура, приведенная на рис. 4.10, а, должна превратиться в структуру, показанную на рис. 4.10, б. Тогда, за счет интегрирующего звена, расположенного на выходе системы, при постоянном моменте  $M = M_{\Pi}$  скорость будет неограниченно нарастать по линейному закону. В статическом режиме работы для контура регулирования момента это будет соответствовать вертикальному участку на механической характеристике.

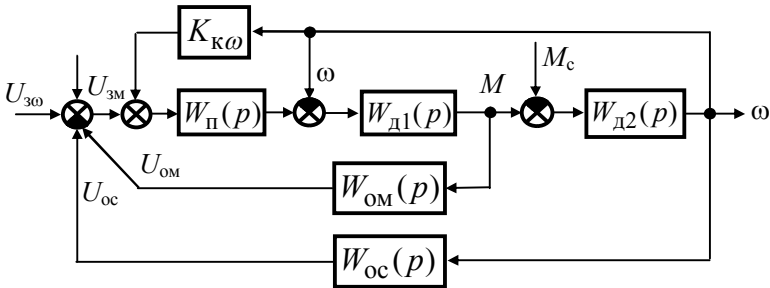


Рис. 4.9. Структурная схема ЭМС с компенсацией влияния скорости на момент

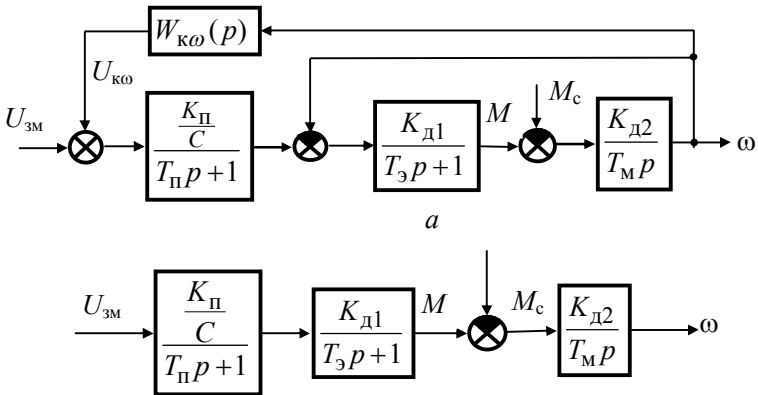


Рис. 4.10. Пояснения к действию компенсации влияния скорости на момент

Определим передаточную функцию звена  $W_{\kappa\omega}(p)$ , обеспечивающего полную компенсацию влияния скорости на момент. Для этого определим эквивалентные передаточные функции  $W_{\text{эКВ1}}(p)$  и  $W_{\text{эКВ2}}(p)$  для замкнутых систем, приведенных на рис. 4.10, а и 4.10, б соответственно:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{эКВ1}}(p) &= \frac{\frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\Pi}p+1} \cdot \frac{\frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{з}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{М}}p}}{1 + \frac{\frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{з}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{М}}p}}}}{1 - \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\Pi}p+1} \cdot \frac{\frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{з}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{М}}p}}{1 + \frac{\frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{з}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{М}}p}}} \cdot W_{\kappa\omega}(p)} = \\
 &= \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{(T_{\Pi}p+1)[T_{\text{М}}p(T_{\text{з}}p+1)+1] - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot W_{\kappa\omega}(p)} = \\
 &= \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\text{М}}p(T_{\text{з}}p+1)(T_{\Pi}p+1) + (T_{\Pi}p+1) - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot W_{\kappa\omega}(p)}; \\
 W_{\text{эКВ2}}(p) &= \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\Pi}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{з}}p+1} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{М}}p} = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\text{М}}p(T_{\text{з}}p+1)(T_{\Pi}p+1)}.
 \end{aligned}$$

Для полной компенсации влияния скорости на момент необходимо и достаточно выполнения равенства

$$W_{\text{эКВ1}}(p) = W_{\text{эКВ2}}(p),$$

то есть чтобы  $(T_{\Pi}p+1) - \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot W_{\kappa\omega}(p) = 0$ , откуда

$$W_{\kappa\omega}(p) = \frac{T_{\Pi}p+1}{\frac{K_{\Pi}}{C}}. \quad (4.13)$$

Для получения коэффициента компенсирующей связи  $K_{\kappa\omega}$  в статическом режиме работы необходимо в выражении (4.13) положить  $p = 0$ , тогда

$$K_{\kappa\omega} = \frac{1}{\frac{K_{\Pi}}{C}} = \frac{C}{K_{\Pi}}. \quad (4.14)$$

Описанная компенсация работает только совместно с контуром регулирования крутящего момента, то есть при разомкнутой обратной связи по скорости. Если ЭМС работает в режиме регулирования скорости электродвигателя, то компенсация влияния скорости на момент отключается. Аппаратно это может быть произведено, например, посредством диодного переключателя (ячейки ИЛИ).

Анализ такой ЭМС имеет свои особенности.

На рис. 4.11 приведена структурная схема для анализа контура регулирования момента в ЭМС с полной компенсацией влияния скорости на момент. Для неё рассчитываются и строятся только переходные характеристики по задающему воздействию относительно момента и относительно скорости.

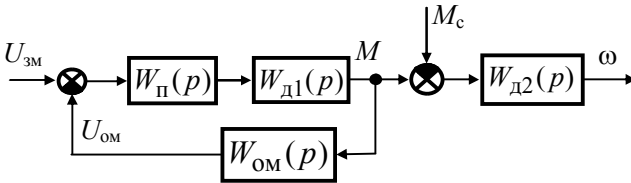


Рис. 4.11. Структурная схема для анализа контура регулирования момента в ЭМС с полной компенсацией влияния скорости на момент

Переходная характеристика относительно момента рассчитывается с применением теоремы разложения для простого нулевого полюса и трёх (или двух при  $T_{\text{ом}} = 0$ ) простых ненулевых полюсов, т.е.

$$M(t) = M_{\Pi} + U_{3M} \sum_{k=1}^3 \frac{B_M(p_k) e^{p_k t}}{p_k A_M'(p_k)}, \quad (4.15)$$

где  $A_M(p) = (T_{\Pi} p + 1)(T_{\Sigma} p + 1)(T_{OM} p + 1) + \frac{K_{\Pi} K_{д1} K_{OM}}{C}$ ,

$$A_M'(p) = \frac{d}{dp} A_M(p),$$

$$B_M(p) = \frac{K_{\Pi} K_{д1}}{C} (T_{OM} p + 1),$$

$$U_{3M} = M_{\Pi} \left( \frac{C}{K_{\Pi} K_{д1}} + K_{OM} \right), \quad (4.16)$$

$p_k$  –  $k$ -тый простой корень уравнения  $A_M(p) = 0$ .

На рис. 4.12 приведена переходная характеристика относительно момента, рассчитанная по формулам (4.15), (4.16) и имеющая вид затухающих колебаний и стремящаяся к пусковому моменту  $M_{\Pi}$ .

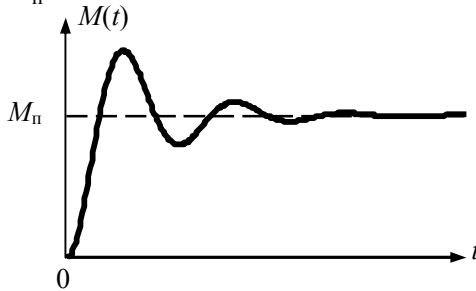


Рис. 4.12. Переходная характеристика относительно момента

За счёт интегрирующего звена  $W_{д2}(p)$  изображение скорости  $\Omega(p)$  будет иметь вид  $\Omega(p) = \frac{U_{3M}}{T_M p^2} \cdot \frac{B_M(p)}{A_M(p)}$ , т.е., помимо простых ненулевых полюсов будет содержать нулевой полюс кратности 2. Поэтому оригинал  $\omega_{\Sigma}(t)$  будет состоять из двух составляющих: первая из них  $\omega_1(t)$  определена простыми по-

люсами  $p_k$ , а вторая  $\omega_2(t, p)$  – нулевым полюсом кратности 2, причём

$$\omega_1(t) = \frac{U_{3M} K_{д2}}{T_M} \sum_{k=1}^3 \frac{B_M(p_k) e^{p_k t}}{[p_k^2 A_M(p_k)]'}, \quad (4.17)$$

$$\omega_2(t, p) = \frac{U_{3M} K_{д2}}{T_M} \cdot \frac{d}{dp} \left[ \frac{B_M(p) e^{p t}}{A_M(p)} \right], \quad (4.18)$$

$$\omega_\Sigma(t) = \omega_1(t) + \omega_2(t, 0). \quad (4.19)$$

На рис. 4.13 приведена переходная характеристика контура относительно скорости на выходе ЭМС, рассчитанная по формулам (4.17 – (4.19). На рис. 4.13, а, наглядно виден процесс суммирования составляющих  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t, 0)$ , происходящий при малых значениях  $t$ . При больших значениях  $t$  суммарная характеристика имеет вид линейно нарастающей до уровня  $\omega_0 - \Delta\omega$  прямой, на которую наложены затухающие колебания,

причём  $\Delta\omega = M_{\Pi} \frac{B_{\omega}(0)}{A_{\omega}(0)}$ , где  $B_{\omega}(0)$ ,  $A_{\omega}(0)$  – числитель и знаменатель передаточной функции контура регулирования скорости, вычисленные при  $p = 0$ .

Для варианта 3, реализующего компенсацию влияния скорости на момент, контур регулирования скорости выглядит так же, как для варианта 1 (рис. 4.1. в), поскольку при достижении скорости  $\omega_0 - \Delta\omega$  описанная компенсационная связь отключается. Поэтому анализ для этого контура проводится так же, как и для варианта 1.

На рис. 4.14 изображена механическая характеристика ЭМС с компенсацией влияния скорости на момент. На ней вертикальный участок 1 соответствует работе контура регулирования момента ( $K_{ос} = 0, K_{к\omega} = \frac{K_{\Pi}}{C}$ ), а линейно спадающий уча-

сток 3 – работе контура регулирования скорости ( $K_{OM} = 0, K_{OC} \neq 0$ ).

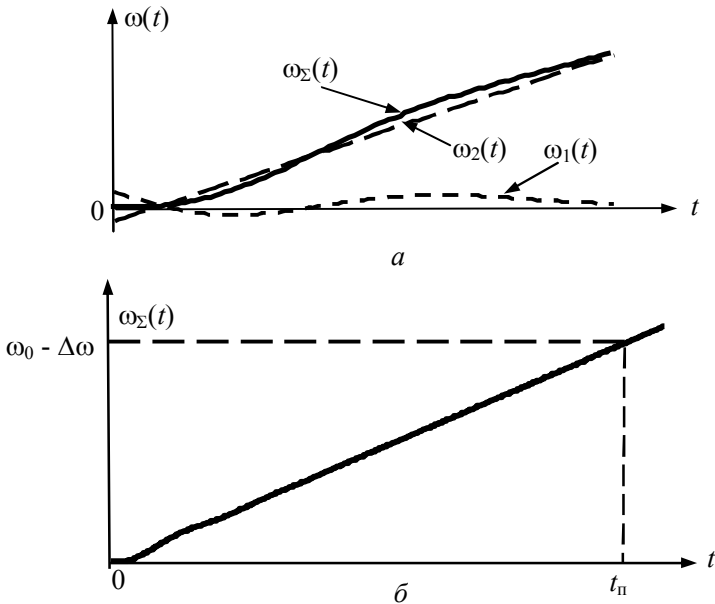


Рис. 4.13. Переходная характеристика относительно скорости

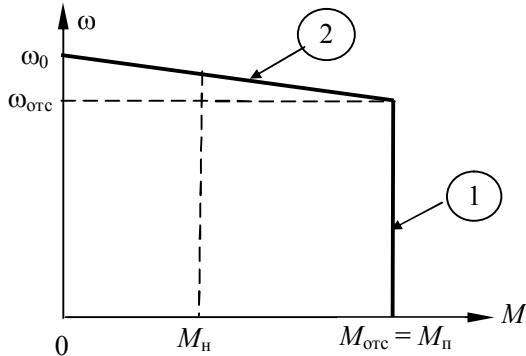


Рис. 4.14. МХ для с полной компенсацией влияния скорости на момент



На рис. 4.15, *a* показана структурная схема ЭМС, в которой присутствуют компенсации влияния момента на скорость и скорости на момент (вариант 4 в табл. 2.2).

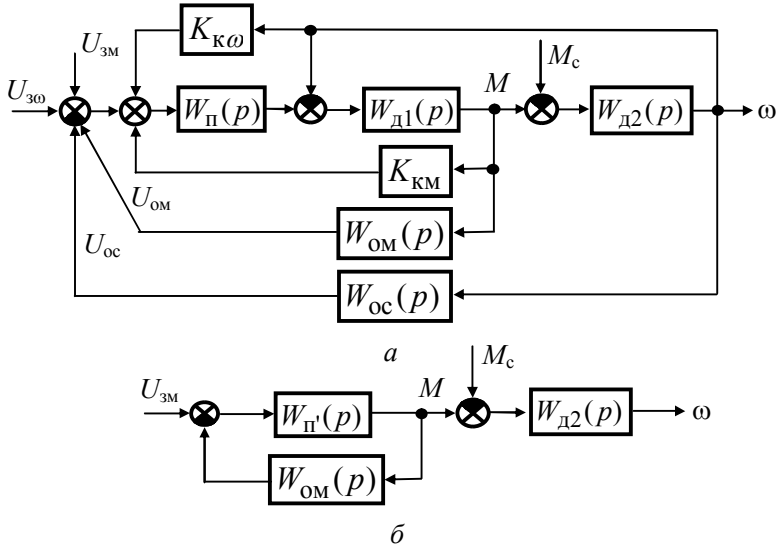


Рис. 4.15. Структурные схемы ЭМС с двумя компенсационными обратными связями (*a*) и контура регулирования момента (*б*)

На рис. 4.15, *б* приведена структурная схема контура регулирования момента. Его отличие от структуры, изображённой на рис. 4.11 заключается лишь в том, что звенья с передаточными функциями  $W_{\Pi}(p)$  и  $W_{д1}(p)$  заменены звеном с передаточной функцией  $W_{\Pi'}(p) = \frac{K_{\Pi}/C \cdot K_{д1}}{T_{\Sigma} p (T_{\Pi'} p + 1)}$ . Контур регулирования

скорости выглядит так же, как в варианте 2 (рис. 4.7, *б*). Поэтому анализ контура регулирования момента проводится также, как в варианте 3, а контура регулирования скорости – также, как в варианте 2.

На рис. 4.16 изображена механическая характеристика ЭМС с двумя компенсационными обратными связями. Она име-

ет прямоугольную форму и соответствует нулевой статической ошибке при стабилизации скорости вращения электродвигателя (участок 2 МХ) и максимальному ограничению пускового момента (участок 1 МХ).

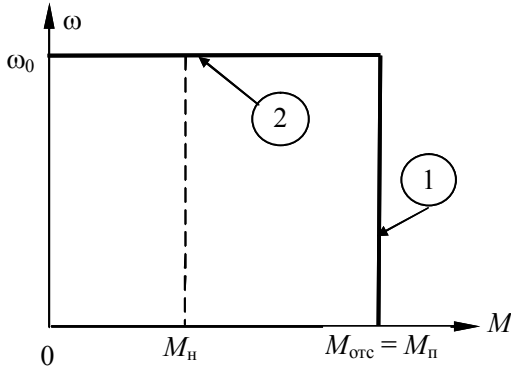


Рис. 4.16. МХ для ЭМС с двумя компенсационными обратными связями

Анализ структур, описанных в разделе 4.2, проводится в следующем порядке:

4.1.1. Для каждого из контуров выводятся передаточные функции. При этом контур регулирования скорости для всех вариантов и контур регулирования момента для вариантов 1, 2 характеризуется всем семейством передаточных функций: разомкнутой цепи, замкнутой системы по задающему и возмущающему воздействиям. Для контура регулирования момента в вариантах 3, 4 выводятся передаточные функции контура, замкнутого обратной связью по моменту (относительно задающего воздействия) и передаточные функции всех структур, изображенных на рис. 4.13, 4.15, б – относительно скорости  $\omega$ .

4.1.2. На основании характеристического полинома  $A_\omega(p)$ ,  $A_M(p)$  (знаменателя передаточной функции замкнутой системы для любого из воздействий) анализируется устойчивость каждого из контуров и рассчитываются их граничные коэффициенты передачи. Полученные значения этих коэффициен-

тов сравниваются с заданными и делаются соответствующие выводы.

4.1.3. По передаточным функциям разомкнутой цепи (для вариантов 3, 4 – по передаточным функциям относительно момента  $M$ ) рассчитываются и строятся ЛАЧХ и ЛФЧХ, по которому анализируется устойчивость контуров и определяются запасы устойчивости.

4.1.4. По переходным функциям

$$\omega_g(t) = U_{3\omega} \left[ \frac{B_\omega(0)}{A_\omega(0)} + \sum_{k=1}^4 \frac{B_\omega(p_k) e^{p_k t}}{p_k A'_\omega(p_k)} \right], \quad (4.20)$$

$$\omega_f(t) = \omega_0 - M_{\text{H}} \left( \frac{C_\omega(0)}{A_\omega(0)} - \sum_{k=1}^4 \frac{C_\omega(p_k) e^{p_k t}}{p_k A'_\omega(p_k)} \right), \quad (4.21)$$

где  $B_\omega(p_k)$ ,  $C_\omega(p_k)$  – полиномы числителей передаточных функций замкнутой системы по задающему и возмущающему воздействиям для контура регулирования скорости, вычисленные для  $k$ -го корня характеристического уравнения  $A_\omega(p) = 0$ ;  $A_\omega(0)$ ,  $B_\omega(0)$ ,  $C_\omega(0)$  – значения полиномов  $A_\omega(p)$ ,  $B_\omega(p)$ ,  $C_\omega(p)$  при  $p = 0$ ,  $\omega_0$ ,  $M_{\text{H}}$  – скорость холостого хода и номинальный момент двигателя, рассчитываются и строятся переходные характеристики контура регулирования скорости. Величина  $U_{3\omega}$  определяется согласно соотношениям, приведенным выше. Для контура регулирования момента в вариантах 1, 2 эти характеристики рассчитываются по формулам:

$$\omega_{\text{Mg}}(t) = U_{3\text{M}} \left[ \frac{B_{\text{M}}(0)}{A_{\text{M}}(0)} + \sum_{k=1}^4 \frac{B_{\text{M}}(p_k) e^{p_k t}}{p_k A'_{\text{M}}(p_k)} \right], \quad (4.22)$$

$$\omega_{\text{Mf}}(t) = U_{3\text{M}} \frac{B_{\text{M}}(0)}{A_{\text{M}}(0)} - M_{\text{П}} \left( \frac{C_{\text{M}}(0)}{A_{\text{M}}(0)} + \sum_{k=1}^4 \frac{C_{\text{M}}(p_k) e^{p_k t}}{p_{\text{M}} A'_{\text{П}}(p_k)} \right), \quad (4.23)$$

где  $B_M(p_k)$ ,  $C_M(p_k)$  – полиномы числителей передаточных функций замкнутой системы по задающему и возмущающему воздействиям для контура регулирования скорости, вычисленные для  $k$ -го корня характеристического уравнения  $A_M(p) = 0$ ;  $A_M(0)$ ,  $B_M(0)$ ,  $C_M(0)$  – значения полиномов  $A_M(p)$ ,  $B_M(p)$ ,  $C_M(p)$  при  $p = 0$ ;  $M_{\Pi}$  – пусковой момент двигателя (рассчитывается по формуле  $M_{\Pi} = \lambda_M M_H = 2,5 M_H$ ). Величина  $U_{3M}$  определяется по формулам, приведенным в разделе 4.2.

**Примечание 1.** Если контур регулирования скорости – неустойчивый, то для него **переходную характеристику по возмущающему воздействию рассчитывать и строить не нужно.**

**Примечание 2.** Если в задании  $T_{OM} = 0$ , то порядок характеристического полинома понижается до 3-го, поэтому верхний предел суммы в свободной составляющей переходной функции равен 3.

**Примечание 3.** В вариантах 3, 4 для контура регулирования момента рассчитываются и строятся только переходные характеристики относительно задающего воздействия для момента  $M$  и скорости  $\omega$ .

По полученным характеристикам определяются основные показатели качества регулирования (время переходного процесса и перерегулирование), сравниваются с заданными и делаются необходимые выводы.

4.1.5. По соотношениям и рекомендациям, изложенным в настоящем разделе, рассчитывается и строится механическая характеристика (МХ) ЭМС, определяется статизм ее участка, соответствующего регулированию (стабилизации) скорости двигателя и сравнивается с его заданным значением.

Для неустойчивых ЭМС **рассчитывать и строить МХ не нужно** ввиду отсутствия статического режима как такового.

### 4.3. Анализ ЭМС, следящих за перемещением

Назначение ЭМС такого типа – обрабатывать с заданными быстроедействие и точностью линейное или угловое переме-

ние из одного положения в другое. При этом значения крутящего момента, скорости и ускорения (замедления) не влияют на погрешность конечных перемещений (угловых или линейных). Эти величины лишь ограничиваются при достижении опасных для ЭМС показателей, то есть в аварийных и пусковых режимах ее работы. Поэтому статическая характеристика ЭМС, следящих за перемещением, является характеристикой ошибки этих перемещений после останова.

Получим выражение для статической ошибки применительно к обобщенной ЭМС, приведенной на рис. 3.1. Для этого в передаточных функциях  $W_{\Pi}(p)$ ,  $W_{\text{дл}}(p)$ ,  $W_{\text{ом}}(p)$ ,  $W_{\text{ос}}(p)$

примем оператор Лапласа  $p$  равным нулю. Тогда  $W_{\Pi}(0) = \frac{K_{\Pi}}{C}$ ,

$W_{\text{дл}}(0) = K_{\text{дл}}$ ,  $W_{\text{ом}}(0) = K_{\text{ом}}$ ,  $W_{\text{ос}}(0) = K_{\text{ос}}$ ,  $W_{\text{кщ}}(0) = K_{\text{кщ}}$ ,  
 $U_{\text{ос}} = K_{\text{ос}} \cdot \omega$ ,  $U_{\text{ом}} = K_{\text{ом}} \cdot M$ ,  $U_{\text{к}\omega} = K_{\text{к}\omega} \cdot \omega$ ,  $U_{\text{к}M} = K_{\text{к}M} \cdot M$ .

На рис. 4.17 приведена структурная схема системы, эквивалентная обобщенной ЭМС, изображенной на рис. 3.1, для ее статического режима работы, т.е.  $M = M_c$ .

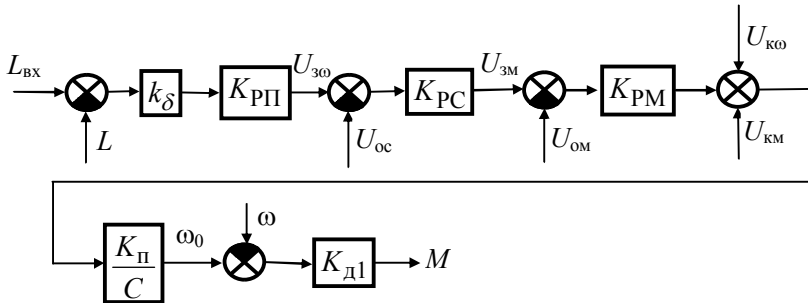


Рис. 4.17. Структурная схема обобщенной ЭМС для статического режима ее работы

Используя правила, сформулированные в ТАУ для сигналов и передаточных функций, получим выражения для основных переменных данной структуре:

$$\left. \begin{aligned}
 L_{\text{ВХ}} - L &= \delta \\
 U_{3\omega} &= \delta \cdot K_{\delta} \cdot K_{\text{РП}}, \\
 U_{3\text{М}} &= (U_{3\omega} - U_{\text{ОС}}) \cdot K_{\text{РС}}, \\
 U_{\text{К}\omega} &= K_{\text{К}\omega} \cdot \omega, \\
 U_{\text{КМ}} &= K_{\text{КМ}} \cdot M, \\
 U_{\text{ОС}} &= K_{\text{ОС}} \cdot \omega, \\
 U_{\text{ОМ}} &= K_{\text{ОМ}} \cdot M, \\
 \omega_0 &= [(U_{3\text{М}} - U_{\text{ОМ}}) \cdot K_{\text{РМ}} + U_{\text{К}\omega} + U_{\text{КМ}}] \frac{K_{\text{П}}}{C}, \\
 M &= (\omega_0 - \omega) \cdot K_{\text{Д1}}, \\
 M &= M_{\text{с}}.
 \end{aligned} \right\} (4.24)$$

При исключении из системы уравнений (4.24) промежуточных переменных  $U_{3\text{П}}$ ,  $U_{3\text{М}}$ ,  $\omega_0$  получится выражение:

$$\delta = \frac{(M + K_{\text{Д1}}\omega)C}{K_{\text{РП}}K_{\text{РС}}K_{\text{РМ}}K_{\delta}K_{\text{П}}K_{\text{Д1}}} + \frac{1}{K_{\text{РП}}K_{\text{РС}}K_{\delta}} \left[ K_{\text{РС}}U_{\text{ОС}} + U_{\text{ОМ}} - \frac{U_{\text{КМ}} + U_{\text{К}\omega}}{K_{\text{РМ}}} \right]. \quad (4.25)$$

Поскольку после обработки задающего воздействия  $L_{\text{ВХ}}$  двигатель останавливается в заданном положении, его крутящий момент равен моменту нагрузки и при этом обратные связи по скорости и моменту отключаются, положим  $\omega = 0$ ,  $M = M_{\text{Н}}$ ,  $U_{\text{ОС}} = U_{\text{ОМ}} = 0$ , Пусть  $U_{\text{КМ}} = U_{\text{К}\omega} = 0$ . Тогда в уравнении (4.25) второе слагаемое будет равно нулю и выражение (4.25) примет вид:

$$\delta_{\text{СТ}} = L_{\text{ВХ}} - L = \frac{M_{\text{с}}C}{K_{\text{РП}}K_{\text{РС}}K_{\text{РМ}}K_{\delta}K_{\text{П}}K_{\text{Д1}}}. \quad (4.26)$$

Таким образом, статическая ошибка в рассматриваемой ЭМС прямо пропорциональна статическому моменту  $M_{\text{с}}$ , обратно пропорциональна ее собственному коэффициенту переда-

чи  $K_p = \frac{K_\delta K_\Pi K_{д1}}{C}$  и коэффициентам передачи регуляторов  $K_{РП}$ ,  $K_{РС}$ ,  $K_{РМ}$ , не зависит от коэффициентов обратных связей.

Для ЭМС, следящих за перемещением, очень важна характеристика ошибки (рис. 4.18). Если регулятор по перемещению РП будет содержать в своей структуре интегрирующее звено, то есть будет выполнено на основе И-, ПИ- или ПИД-регулятора, то система относительно перемещения станет астатической и статическая ошибка будет равна нулю.

Следует отметить, что хотя, согласно формуле (3.26), отклонение (ошибка слежения)  $\delta$  не зависит от величины входного воздействия, статизм системы  $S = \frac{\delta_{ст}}{L_{вх}} \cdot 100$  (в процентах)

будет зависеть от  $L_{вх}$ . Поэтому в проекте при оценке статической точности принимается  $L_{вх, \max} = 1$ .

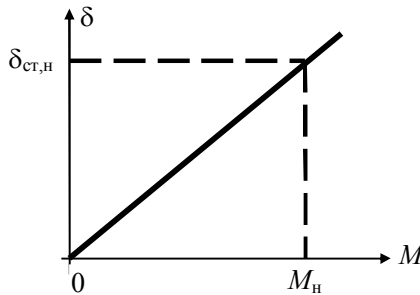


Рис. 4.18. Характеристика ошибки для ЭМС, следящей за перемещением

Рассмотрим варианты структур ЭМС, следящих за перемещением. В них, также, как и в системах регулирования скорости и момента двигателя (см. раздел 4.2), реализуется *п о д ч и - н е н н о е* регулирование, т.е. когда работает какой-либо из внутренних контуров, внешние по отношению к нему контуры отключены (их обратные связи разомкнуты).

На рис. 4.19, *a* приведена структурная схема двухконтурной ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по моменту, при отсутствии регуляторов, т. е.  $W_{PI}(p) = W_{PC}(p) = W_{PM}(p) = 1$ , и компенсационных обратных связей. Она соответствует варианту 5 в табл. 2.2. Здесь, как и далее, для компактности рисунков не указана зависимость передаточных функций звеньев ЭМС от оператора Лапласа  $p$ .

Структурная схема для анализа контура регулирования момента такая же, как в варианте 1 (рис. 4.1, *б*).

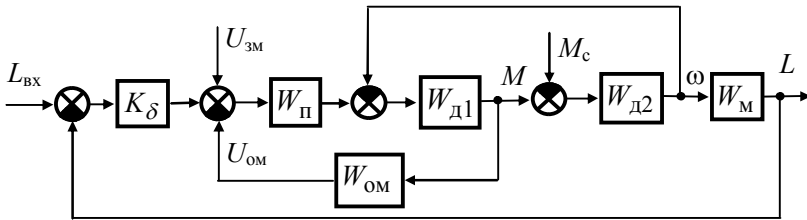
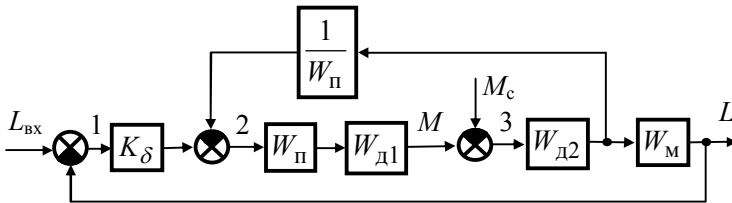
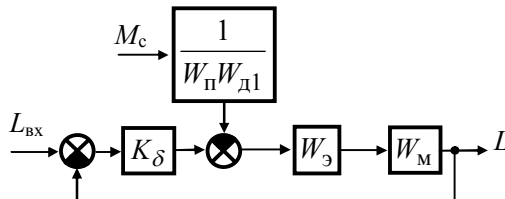
*a**б*

Рис. 4.19. Структура ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по моменту (*a*) и структурные схемы для анализа ее внешнего контура (*б, в*)



Анализ всех структур, следящих за перемещением проводится аналогично анализу вариантов ЭМС, осуществляющих регулирование крутящего момента и скорости двигателя. Сначала размыкается обратная связь по перемещению и по схеме, изображенной на рис. 4.19, *а* проводится анализ контура регулирования момента. После его проведения обратная связь по моменту размыкается, замыкается обратная связь по перемещению и проводится анализ внешнего контура. Структурная схема для его анализа показана на рис. 4.19, *б*. Путем переноса сумматора 3 (см. рис. 4.19, *б*) она может быть преобразована в структуру, представленную на рис. 4.19, *в*, где эквивалентная передаточная функция

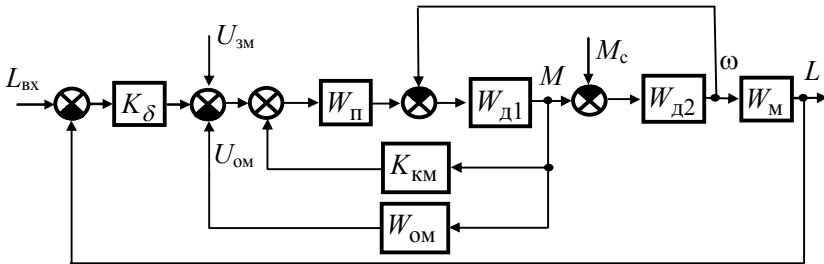
$$\begin{aligned}
 W_9(p) &= \frac{W_{\Pi}(p)W_{д1}(p)W_{д2}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{д1}(p)W_{д2}(p)} \frac{1}{W_{\Pi}(p)} = \\
 &= \frac{W_{\Pi}(p)W_{д1}(p)W_{д2}(p)}{1 + W_{д1}(p)W_{д2}(p)}.
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

На рис. 4.20, *а* приведена структурная схема двухконтурной ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по моменту и компенсацией влияния момента на скорость (при отсутствии регуляторов). Она соответствует варианту 6 в табл. 2.2. Анализ контура регулирования момента в такой ЭМС проводится по структурной схеме, показанной на рис. 4.7, *а*, контура слежения за перемещением – по структуре, изображенной на рис. 4.20, *б*, *в*, где

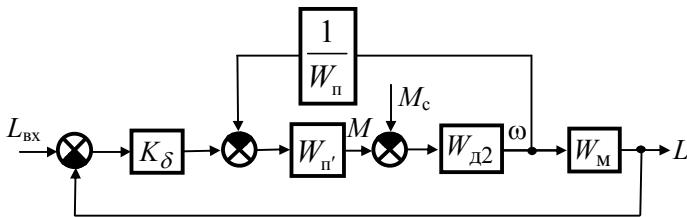
$$W_9(p) = \frac{W_{\Pi'}(p)W_{д2}(p)}{1 + W_{\Pi'}(p)W_{д2}(p)} \frac{1}{W_{\Pi}(p)}. \tag{4.28}$$

На рис. 4.21, *а* приведена структурная схема двухконтурной ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по моменту и двумя компенсационными обратными связями. Она соответствует варианту 7 в табл. 2.2. Контур регулирования момента в ней анализируется по схеме, показанной на рис. 4.15, *б*,

а контур слежения за перемещением – по структуре, изображенной на рис. 4.21, б.



а



б

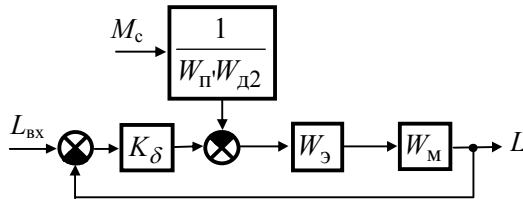


Рис. 4.20. Структура ЭМС, следящей за перемещением с обратной связью по моменту с компенсацией влияния момента на скорость (а) и структурные схемы для анализа ее внешнего контура (б, в)

На рис. 4.22 приведена структурная схема двухконтурной ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по скорости и компенсацией влияния скорости на момент. Она соответствует варианту 8 в табл. 2.2. Здесь, в пусковых и аварийных

режимах работы, за счет интегрирующего звена  $W_{д2}(p) = \frac{K_{д2}}{T_M p}$  происходит неограниченное нарастание скорости и ограничение пускового момента на уровне момента отсечки  $M_{от}$ , величина которого определяется величиной задающего напряжения  $U_{з\omega}$ . Этому режиму соответствует структура, при введенная на рис. 4.23, а. Далее происходит размыкание компенсационной обратной связи и замыкание обратной связи по скорости. При этом будет иметь место структура, изображенная на рис. 4.1, в. Анализ контура слежения за перемещением проводится по структуре, показанной на рис. 4.19, б, где эквивалентная передаточная функция  $W_3(p)$  рассчитывается по формуле (4.27).

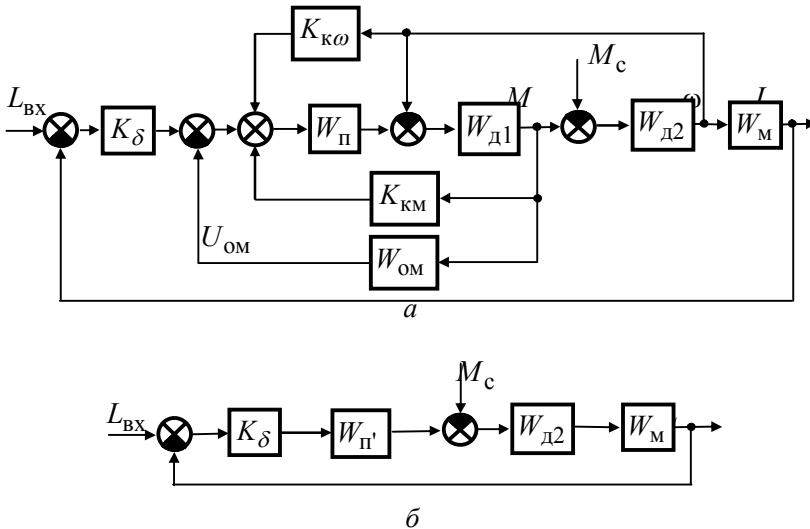


Рис. 4.21. Структура ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по моменту, двумя компенсационными обратными связями и структурная схема для анализа ее внешнего контура (б)

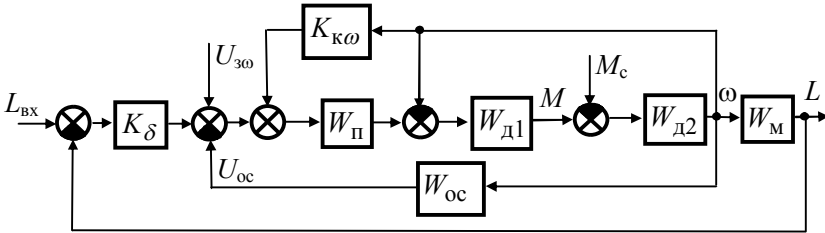


Рис. 4.22. Структура ЭМС, следящей за перемещением с обратной связью по скорости и компенсацией влияния скорости на момент

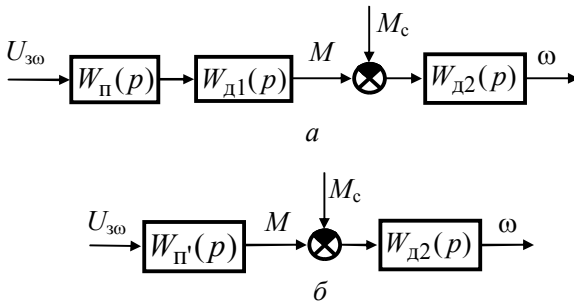
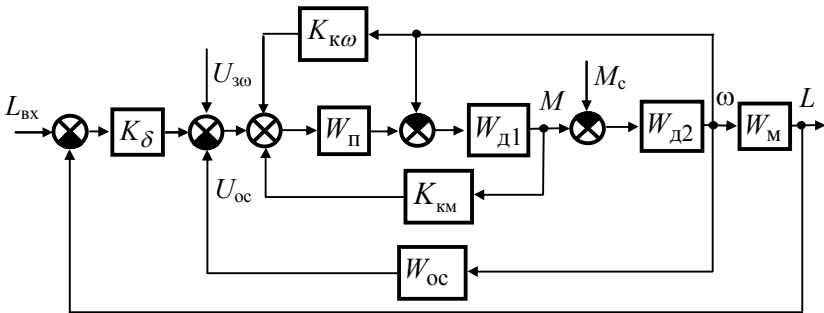


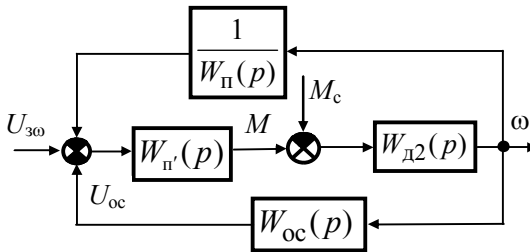
Рис. 4.23. Структурные схемы, иллюстрирующие действие компенсации, исключающей влияние скорости на момент в вариантах ЭМС 8 (а) и 9 (б)

На рис. 4.24, а приведена структурная схема двухконтурной ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по скорости и двумя компенсационными обратными связями, соответствующая варианту 9 в табл. 2.2. Здесь также в пусковых и аварийных режимах работы размыкаются обе отрицательные обратные связи и включается компенсационная обратная связь, исключающая влияние скорости на момент (компенсационная обратная связь, исключающая влияние момента на скорость включена постоянно). Пусковой момент двигателя ограничивается на уровне момента отсечки и этому режиму работы соответствует схема, показанная на рис. 4.23, б. Далее происходит размыкание компенсационной обратной связи, исключающей

влияние скорости на момент, и замыкание обратной связи по скорости. Этому режиму работы ЭМС соответствует структура, изображенная на рис. 4.20, б, в. Анализ контура слежения за перемещением проводится по структуре, показанной на рис. 4.20, б, в где эквивалентная передаточная функция  $W_3(p)$  рассчитывается по формуле (4.28).



а



б

Рис. 4.24. Структура ЭМС, следящей за перемещением, с обратной связью по скорости и двумя компенсационными обратными связями (а) и её контур регулирования скорости (б)

На рис. 4.25 изображена структура трехконтурной ЭМС, в которой отсутствуют компенсационные обратные связи (для варианта 10 в табл. 2.2). Анализ такой ЭМС также осуществляется поконтурно. Так, анализ контуров регулирования момента и скорости проводится по схемам, изображенным на рис. 4.1, а,

б, а контура слежения за перемещением – по схеме, приведенной на рис. 4.19, б, в.

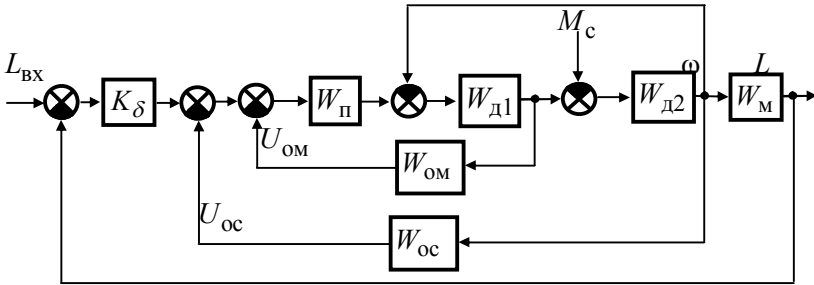


Рис. 4.22. Структурная схема трехконтурной ЭМС, следящей за перемещением без компенсационных обратных связей

При проведении анализа рассмотренных вариантов ЭМС, следящих за перемещением, нужно:

- получить передаточные функции: разомкнутой цепи и замкнутой системы по задающему и возмущающему воздействиям для каждого из контуров, входящих в структуру;
- исследовать каждый из контуров на устойчивость с расчетом граничного коэффициента передачи, при этом для внешнего контура определить граничное значение коэффициента передачи  $K_{\delta}$  (исходное значение  $K_{\delta} = 25$  для всех систем, следящих за перемещением);
- построить ЛАЧХ и ЛФЧХ для каждого контура и определить запасы устойчивости, если таковые существуют;
- для каждого контура рассчитать и построить переходные характеристики по задающему и возмущающему воздействиям с определением основных показателей качества регулирования, сравнить полученные показатели с заданными;

- по формуле (4.26) рассчитать статическую ошибку в системе, сравнить ее с заданной и построить характеристику ошибки слежения.

**Примечание 1.** Расчет задающих напряжений  $U_{зм}$ ,  $U_{3\omega}$  производится в соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе 4.1.

**Примечание 2.** Для неустойчивых контуров и систем рассчитывается **только переходная характеристика по задающему воздействию**. Расчет статической точности и построение характеристики ошибки слежения для этих систем **производить не нужно**.

## 5. СИНТЕЗ ЭМС

### 5.1. Общие сведения о синтезе систем

Удовлетворение требуемой точности регулирования и стабилизации напряжения, тока, скорости и перемещений в статических режимах работы систем автоматического управления (САУ) не гарантирует обеспечения необходимого качества переходных процессов. Эти процессы будут неудовлетворительными, если их длительность превышает заданное время переходного процесса  $t_{пп}$  (быстродействие). Кроме того, переходные процессы в САУ могут сопровождаться большим перерегулированием и слабым затуханием. На практике требуется обеспечить перерегулирование не более 50 – 60 %, при этом число колебаний до входа в зону  $\pm 5\%$  от установившегося значения не должно превышать двух.

Синтез (оптимальное, наиболее выгодное с точки зрения статики и динамики построение) структур САУ является центральной задачей их проектирования.

Ниже рассматриваются приемы и методы, позволяющие обеспечить оптимальные показатели САУ.

Считается [1, 3 – 5, 8], что система будет иметь **наилучшие (оптимальные) переходные процессы**, если передаточная функция ее разомкнутой цепи будет иметь вид:

$$W_{\text{рц,ТО}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}, \quad (5.1)$$

где  $T_{\mu}$  – эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени в системе.

Если для САУ имеет место (5.1), то она настроена на технический оптимум (ТО).

Известно [1, 4, 5], что перерегулирование в системе, для которой имеет место (5.1), не превышает 5 %. Тогда, согласно номограммам Солодовникова, время переходного процесса можно оценить по соотношению:

$$t_{\text{пн,ТО}} \approx \frac{2}{\omega_{\text{ср}}},$$

где  $\omega_{\text{ср}}$  – частота среза.

В системе точно настроенной на ТО время переходного процесса  $t_{\text{пн,ТО}} \approx 4T_{\mu}$ , а перерегулирование  $\sigma \approx 4,3\%$ . Из этого следует, что для САУ, точно настроенной на ТО

$$T_{\text{м}} = \frac{t_{\text{пн,ТО}}}{4}. \quad (5.2)$$

Если система замкнута инерционной обратной связью с постоянной времени  $T_{\text{ос}}$ , то точность настройки на ТО зависит от величины этой постоянной времени. Показано [4], что если

отношение  $\frac{T_{\mu}}{T_{\text{ос}}} < 2$ , то перерегулирование в системе превысит

5 %, что, в свою очередь, приведет к существенному увеличению времени переходного процесса.

Если, помимо малых значений времени переходного процесса, в системе нужно обеспечить астатизм первого порядка и в ней присутствуют интегрирующее звено, то ее настраивают на симметричный оптимум (СО). При этом передаточная разомкнутой цепи для функция САУ, обеспечивающих характеристики СО, имеет вид

$$W_{\text{рц,СО}}(p) = \frac{4T_{\mu}p+1}{4T_{\mu}p} \cdot \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} = \frac{4T_{\mu}p+1}{4T_{\mu}p} \cdot W_{\text{рц,ТО}}(p). \quad (5.3)$$



Для САУ, настроенной на СО, известно [4, 7, 8 ], что время переходного процесса В системе точно настроенной на ТО время переходного процесса  $t_{\text{пп,СО}} \approx 8T_{\mu}$ , а перерегулирование составляет около 43 - 45 %. Тогда величину эквивалентной некомпенсированной постоянной времени выбирают из соотношения

$$T_{\mu} = \frac{t_{\text{пп,СО}}}{8}. \quad (5.4)$$

При этом время переходного процесса можно также оценить по частоте среза

$$t_{\text{пп,СО}} \approx \frac{4}{\omega_{\text{ср}}}.$$

Обеспечение оптимальных показателей качества регулирования в динамических режимах (настройка систем на ТО или СО) достигается в результате структурно – параметрического синтеза корректирующих устройств. Синтезу последовательных корректирующих устройств будет посвящен материал настоящего раздела.

## 5.2. Оптимальный синтез ЭМС

ЭМС представляет собой многоконтурную САУ с подчиненным регулированием. Ее настройка начинается с внутреннего контура регулирования, для которого эквивалентная некомпенсированная постоянная времени  $T_{\mu}$  рассчитывается по следующим формулам [1, 8]:

- для технического оптимума

$$T_{\mu} = \frac{t_{\text{пп}}}{4 \cdot 2^{n-1}}; \quad (5.5)$$

- для симметричного оптимума

$$T_{\mu} = \frac{t_{\text{пп}}}{8 \cdot 2^{n-1}}, \quad (5.6)$$

где  $t_{\text{пп}}$  – заданное время переходного процесса;

$n$  – количество контуров регулирования.

Из формул (5.5), (5.6) следует, что некомпенсируемая постоянная времени  $T_{\mu i}$  для последующего внешнего  $i$  – го контура регулирования может быть определена из соотношения:

$$T_{\mu i} = T_{\mu} \cdot 2^{i-1}, \quad (5.7)$$

где

$T_{\mu}$  – некомпенсируемая постоянная времени для внутреннего контура регулирования;

$i$  – номер контура регулирования.

Для двухконтурной системы, каждый из контуров которой настраивается на технический оптимум, некомпенсируемая постоянная времени внутреннего контура рассчитывается по формуле

$$T_{\mu 1} = \frac{t_{\text{нп}}}{4 \cdot 2^{2-1}} = \frac{t_{\text{нп}}}{8}. \quad (5.8)$$

Если в двухконтурной системе внутренний контур настраивается на технический оптимум, а внешний – на симметричный оптимум, то

$$T_{\mu 1} = \frac{t_{\text{нп}}}{4 \cdot 4^{2-1}} = \frac{t_{\text{нп}}}{16}. \quad (5.9)$$

Если в трёхконтурной системе два внутренних контура настраиваются на технический оптимум, а внешний – на симметричный оптимум, то

$$T_{\mu 1} = \frac{t_{\text{нп}}}{8 \cdot 4^{2-1}} = \frac{t_{\text{нп}}}{32}. \quad (5.10)$$

Следует отметить, что в качестве  $T_{\mu 1}$  крайне нецелесообразно выбирать постоянные времени обратных связей, поскольку это приводит к усложнению корректирующих устройств, а также к увеличению перерегулирования во внутреннем контуре. Если при расчёте  $T_{\mu 1}$  не удаётся подобрать постоянную времени, меньшую расчётной, то **в техническом задании время переходного процесса необходимо корректировать в большую сторону** (это делается преподавателем).

Таким образом, при синтезе ЭМС необходимо придерживаться следующих правил.

5.2.1. В многоконтурных структурах синтез ведется по контурно от внутреннего к последующему внешнему контуру.

5.2.2. Корректирующие устройства могут содержать в своей структуре типовой регулятор (регулятор типа П, ПД, ПИ, ПИД) и однозвенный фильтр, передаточная функция которого в общем случае имеет вид

$$W_{\Phi}(p) = \frac{\tau_{\Phi} p + 1}{T_{\Phi} p + 1}.$$

5.2.3. Эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени последующего внешнего контура в два или четыре раза, больше  $T_{\mu}$ , выбранной для предыдущего (внутреннего) контура (см. формулу (5.7)). Только в этом случае переходные процессы во внутреннем контуре заканчиваются до начала переходных процессов во внешнем контуре, то есть реализуется подчиненное регулирование.

5.2.4. Синтезируемый контур должен быть простейшим. Если в нем имеются перекрестные связи, то контур необходимо свести к простейшему, используя правила преобразования структурных схем.

5.2.5. Малые постоянные времени апериодических звеньев можно без существенной погрешности суммировать с большими постоянными времени. Например, если  $T_M > 4 \cdot T_3$ ,  $T_3 > 4 \cdot T_{OM}$ , то

$$(T_M p + 1)(T_3 p + 1)(T_{OM} p + 1) \approx (T_M p + 1)[(T_3 + T_{OM})p + 1],$$

или

$$(T_M p + 1)(T_3 p + 1)(T_{OM} p + 1) \approx (T_M + T_3 + T_{OM})p + 1.$$

При проведении синтеза ЭМС необходимо придерживаться следующего порядка (алгоритма):

- по формуле (5.8) – (5.10) рассчитывается эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени  $T_{\mu}$ ; далее в качестве  $T_{\mu 1}$  из имеющихся постоянных времени (за исключением  $T_{OM}$  или  $T_{oc}$ ) выбирается меньшая постоянная времени;

- во внутренний контур вводится корректирующее устройство, записывается передаточная функция разомкнутой цепи скорректированной САУ и приравняется к передаточной функции ТО или СО;
- из полученного уравнения определяется передаточная функция корректирующего устройства, регулятора и фильтра, если таковой необходим;
- полученное корректирующее устройство вводится в корректируемый контур и выводятся передаточные функции скорректированного контура;
- для синтезированной ЭМС по полученным передаточным функциям рассчитываются ЛАЧХ, ЛФЧХ, переходная характеристика по задающему воздействию, рассчитываются показатели качества регулирования и сравниваются с ожидаемыми;
- эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени  $T_{\mu}$  увеличивается в два или четыре раза, внутренний контур заменяется инерционным звеном и, в соответствии с приведенной последовательностью, проводится синтез внешнего контура.

Следует отметить, что, если  $T_{\mu} \gg T_{\text{ом}}$ , внутренний контур всегда можно точно настроить на ТО. Для внешнего контура этого не удастся сделать никогда. Невозможность точной настройки на ТО обусловлена главным допущением, сделанным при синтезе корректирующих устройств – приближенным представлением внутреннего контура инерционным звеном, то есть искусственным понижением его порядка. Тогда при получении передаточных функций внешнего контура его порядок увеличится и станет третьим. Это не соответствует техническому оптимуму, для которого передаточные функции имеют второй порядок. Другая причина увеличения порядка системы – допущения, принимаемые для получения передаточной функции однозвенного фильтра (пренебрежение членами характеристического полинома, для которых  $p > 1$ ). Чем больше будет сделано приближений на этапе синтеза корректирующего устройства контура, тем выше будет его порядок. Поэтому задача синтеза заключается в том, чтобы максимально приблизить

характеристики синтезированного контура характеристикам ТО или СО.

Другой задачей синтеза является обеспечение астатизма каждого из контуров регулирования. В этом случае в системах, осуществляющих регулирования скорости и крутящего момента двигателя, оба контура настраиваются на технический оптимум. В системах, следящих за перемещением, каждый внутренний контур настраивается на технический оптимум, а внешний контур – на симметричный оптимум. Это связано с тем, исполнительный механизм, установленный на выходе ЭМС, является интегрирующим звеном и при настройке на ТО внешний контур становится статическим, причем величина статической ошибки, как правило, превышает ее заданное значение.

Ниже рассматривается пример синтеза двухконтурной ЭМС.

### 5.3. Пример синтеза ЭМС.

Введем в структуру ЭМС, приведенную на рис. 4.16, а, регуляторы для контуров регулирования момента  $W_{рм}(p)$  и перемещения  $W_{рп}(p)$ . При этом схема преобразуется к виду, показанному на рис. 5.1, а. Для упрощения рисунка в ее передаточных функция опущен оператор Лапласа  $p$ .

Определим эквивалентную передаточную функцию для участка схемы с передаточными функциями  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$ :

$$W_{\text{экр}}(p) = \frac{W_{д2}(p)}{1 + W_{д2}(p) \cdot W_{д1}(p)} = \frac{\frac{K_{д2}}{T_{мп}}}{1 + \frac{K_{д2}}{T_{мп}} \cdot \frac{K_{д1}}{T_3 p + 1}} = \frac{K_{д2}(T_3 p + 1)}{T_{мп} T_3 p^2 + T_{мп} p + 1}. \quad (5.11)$$

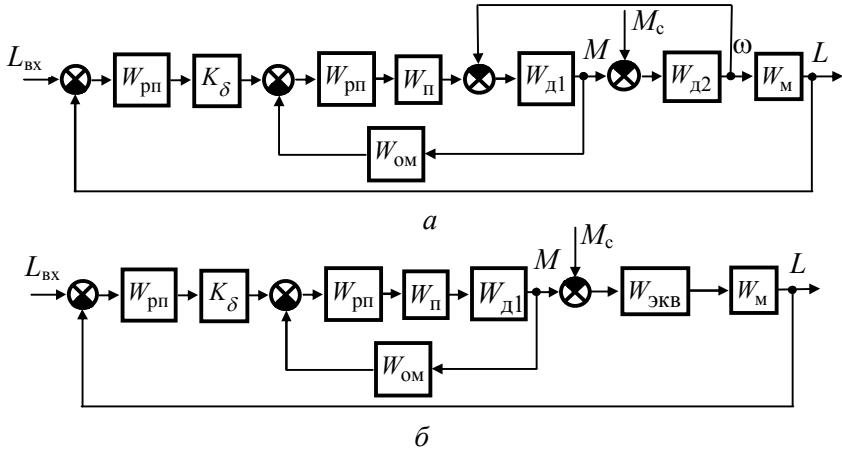


Рис. 5.1. Структура синтезируемой ЭМС (а) и её преобразование (б)

Получившееся эквивалентное звено содержит последовательно соединенные форсирующее звено и звено второго порядка. Тип звена второго порядка в формуле (5.11) определяется соотношением постоянных времени  $T_M$  и  $T_3$ . Если имеет место отношение  $T_M/T_3 < 4$ , то это будет колебательное звено с постоянной времени

$$T_{ЭКВ} = \sqrt{T_M T_3} \quad \text{и коэффициентом демпфирования} \quad \xi = \frac{T_M}{2\sqrt{T_M T_3}}.$$

Если  $T_M/T_3 \geq 4$ , то имеет место апериодическое звено второго порядка, которое можно разложить на два инерционных звена, то есть

$$W_{ЭКВ}(p) = \frac{K_{д2}(T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (5.12)$$

где эквивалентные постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  рассчитываются по формуле:

$$T_{1,2} = \frac{T_M}{2} \pm \sqrt{\frac{T_M^2}{4} - T_M T_3}. \quad (5.13)$$

При  $T_M/T_3 = 4$  дискриминант в выражении (5.13) становится равным нулю и  $T_1 = T_2 = \frac{T_M}{2}$ , а передаточная функция

$$(5.12) \text{ приобретает вид} \quad W_{\text{экв}}(p) = \frac{K_{д2}(T_3 p + 1)}{\left(\frac{T_M}{2} p + 1\right)^2}. \quad (5.14)$$

Такое звено может быть скомпенсировано, например, ПИД – регулятором и фильтром. При этом форсирующие звенья с постоянными времени  $\frac{T_M}{2}$  необходимо распределить между регулятором и фильтром.

Если соотношение  $\frac{T_M}{T_3} < 4$ , то постоянную времени эквивалентного колебательного звена  $T_k = \sqrt{T_M T_3}$  и его коэффициент демпфирования  $\xi_k = \frac{T_M}{2\sqrt{T_M T_3}}$  с помощью стандартного регулятора и фильтра компенсировать не удастся. Для этого требуется сконструировать устройство, передаточная функция которого была бы обратной передаточной функции колебательного звена, то есть имела бы вид  $W(p) = T_M T_3 p^2 + T_M p + 1$ .

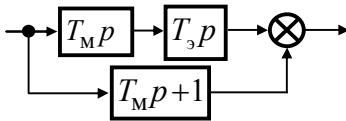


Рис. 5.2. Структура устройства, компенсирующего влияние колебательного звена

Структурная схема устройства, реализующего данное звено, изображена на рис. 5.2. Она содержит два последовательно включенных дифференцирующих звена с постоянными времени  $T_M$  и  $T_3$ , параллельно которым подсоединено фор-

сирующее звено с постоянной времени  $T_M$ . Благодаря такой сложной структуре при идеальной реализации дифференци-

рующих звеньев действие колебательного звена удается компенсировать.

Пусть синтезируемая система (рис. 5.1, а) имеет параметры, заданные в табл. 5.1. Тогда по формуле (5.13) эквивалентные постоянными времени принимают значения  $T_1 = 0,473$  с и  $T_2 = 0,127$  с.

Таблица 5.1

$K_{\Pi}$	$K_{д1}$	$K_{д2}$	$C$	$K_{ом}$	$T_{\Pi}$	$T_{\varepsilon}$	$T_{\mu}$	$T_{ом}$	$\Delta L$	$t_{\Pi\Pi}$
-	Нм·с	1/Нм·с	В·с	1/А·с	с	с	с	с	%	с
40	0,843	1,186	1,284	0,2	0,005	0,1	0,6	0,002	1	0,1

В соответствии с рекомендацией, приведенной в предыдущем разделе, произведем настройку контура регулирования момента на технический оптимум, а контура, следящего за перемещением – на симметричный оптимум. Для этого по формуле (5.9) для внешнего (второго) контура регулирования при  $n=2$  рассчитаем эквивалентную некомпенсированную постоянную времени

$$T_{\mu 2} = \frac{t_{\Pi\Pi}}{8 \cdot 2^{n-1}} = \frac{0,1}{8 \cdot 2^{2-1}} = \frac{0,1}{16} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

В качестве эквивалентной некомпенсированной постоянной времени примем ближайшую к расчетной меньшую постоянную времени. Таковой в данном случае является постоянная времени преобразователя в контуре регулирования момента, т.е.

$$T_{\mu} = T_{\Pi} = 0,005 \text{ с.}$$

Анализируя данные табл. 5.1, видно, что в процессе настройки на должны быть скомпенсированы постоянные времени все постоянные времени за исключением  $T_{\Pi} = T_{\mu}$  и  $T_{ом}$ .

Из схемы, приведенной на рис. 5.1, б выделим контур регулирования момента (внутренний контур). При этом получим структуру, изображенную на рис 5.3.



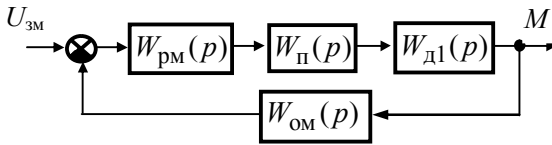


Рис. 5.3. Структурная схема синтезируемого контура регулирования момента

Передаточная функция разомкнутой цепи синтезированного контура регулирования момента будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ср,м}}(p) &= W_{\text{рм}}(p) \cdot W_{\text{п}}(p) \cdot W_{\text{д1}}(p) \cdot W_{\text{ом}}(p) = \\
 &= W_{\text{рм}}(p) \cdot \frac{K_{\text{п}}/C \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}}{(T_{\text{п}}p + 1)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}.
 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Для настройки контура на ТО приравняем выражение (5.15) передаточной функции технического оптимума (5.1) при  $T_{\mu} = T_{\text{п}}$ , то есть

$$\frac{1}{2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1)} = W_{\text{рм}}(p) \cdot \frac{K_{\text{п}}/C \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}}{(T_{\text{п}}p + 1)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}. \quad (5.16)$$

Разрешая уравнение (5.16) относительно  $W_{\text{рм}}(p)$ , определим передаточную функцию корректирующего устройства для контура регулирования момента

$$W_{\text{рм}}(p) = \frac{C}{2T_{\text{п}}K_{\text{п}}K_{\text{д1}}K_{\text{ом}}} \cdot \frac{(T_{\text{ом}}p + 1)(T_{\text{э}}p + 1)}{p}. \quad (5.17)$$

Таким образом, согласно (5.17), корректирующее устройство (регулятор) для контура регулирования момента представляет собой ПИД – регулятор с коэффициентом передачи

$$K_{\text{рм}} = K_{\text{ПИД}} = \frac{C}{2T_{\text{ом}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}} \quad \text{и постоянными времени}$$

$$\tau_{\text{ПИД1}} = T_{\text{ом}}, \quad \tau_{\text{ПИД2}} = T_{\text{э}}.$$

Подстановка передаточной функции регулятора момента (5.17) в выражение (5.15) позволяет получить передаточную функцию контура, настроенного на ТО при  $T_\mu = T_\pi$

$$W_{\text{рц,м}}(p) = \frac{1}{2T_\pi p(T_\pi p + 1)}.$$

По ней строятся ЛАЧХ и ЛФЧХ, определяется частота среза, затем по этой частоте среза оценивается время переходного процесса в контуре.

Получим передаточную функцию замкнутого контура регулирования момента по задающему воздействию:

$$\begin{aligned} W_{\text{сз,м}}(p) &= \frac{W_{\text{рц,м}}(p)}{1 + W_{\text{рц,м}}(p)} \cdot \frac{1}{W_{\text{ом}}(p)} = \\ &= \frac{T_{\text{ом}} p + 1}{K_{\text{ом}} [2T_\pi p(T_\pi p + 1) + 1]} = \frac{T_{\text{ом}} p + 1}{K_{\text{ом}} (2T_\pi^2 p^2 + 2T_\pi p + 1)}. \end{aligned} \quad (5.18)$$

По формуле (5.18) при задающем напряжении  $U_{\text{з,м}} = M_\pi K_{\text{ом}}$  рассчитывается переходная характеристика контура регулирования момента и определяются показатели качества регулирования.

Такая характеристика, рассчитанная при  $M_\pi = 60 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}$ , приведена на рис. 5.4 (сплошная линия). Перерегулирование  $\sigma \approx 4,55 < 5 \%$ , что несколько выше, чем при идеальной настройке не ТО (4,32 % при  $T_{\text{ом}} = 0$ ). Переходный процесс заканчивается при достижении уровня  $0,95M_\pi$  и время переходного процесса  $t_{\text{пп,ТО}} = 0,018 \text{ с}$ . Отношение заданного времени переходного процесса к полученному  $\frac{t_{\text{пп}}}{t_{\text{пп,ТО}}} = 5,44 > 4$ , что подтверждает

правильность выбора некомпенсированной постоянной времени  $T_\mu$ . Пунктирная кривая соответствует переходной характеристике инерционного звена, здесь время переходного процесса  $t_{\text{пп,и}} = 0,015 \text{ с}$ , что на 16,7 % больше  $t_{\text{пп,ТО}} = 0,018 \text{ с}$  и это считается допустимым.

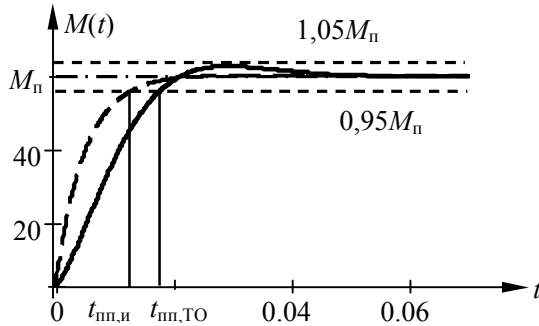


Рис. 5.4. Переходная характеристика контура регулирования момента, настроенного на ТО

При синтезе внешнего контура колебательное звено во внутреннем контуре заменяют аperiodическим, т.е. пренебрегают первым слагаемым  $2T_{\text{ом}}^2 p^2$ , тогда

$$W_{\text{сз,м}}(p) \approx \frac{T_{\text{ом}} p + 1}{K_{\text{ом}} (2T_{\text{п}} p + 1)}. \quad (5.19)$$

На рис. 5.5 показана структурная схема контура, следящего за перемещением (внешнего контура). Здесь  $K_{\delta} = 25$  В/рад, передаточная функция  $W_{\text{сз,м}}(p)$  определяется по формуле (5.15), передаточная функция  $W_{\text{эКВ}}(p)$  – по формуле (5.7), где

$$T_1 = \frac{T_{\text{м}}}{2} + \sqrt{\frac{T_{\text{м}}^2}{4} - T_{\text{м}} T_{\text{э}}} = 0,583 \text{ с}, \quad T_2 = \frac{T_{\text{м}}}{2} - \sqrt{\frac{T_{\text{м}}^2}{4} - T_{\text{м}} T_{\text{э}}} = 0,017 \text{ с}.$$

Передаточная функция исполнительного механизма

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{1}{i_{\text{р}} p}, \text{ где передаточное число редуктора } i_{\text{р}} = 10.$$

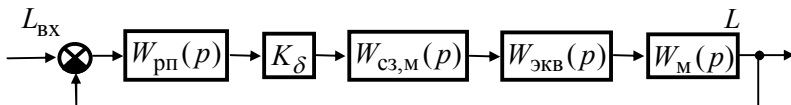


Рис. 5.5. Структурная схема контура, следящего за перемещением

Произведем настройку этого контура на симметричный оптимум (СО). Для этого нужно обеспечить условие для передаточной функции разомкнутой цепи

$$W_{\text{рц,Л}} = \frac{8T_{\mu 2}p + 1}{8T_{\mu 2}p} \cdot \frac{1}{4T_{\mu 2}p(2T_{\mu 2}p + 1)} = \quad (5.20)$$

$$= \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{8T_{\text{п}}p} \cdot \frac{1}{4T_{\text{п}}p(2T_{\text{п}}p + 1)}$$

при  $T_{\mu 2} = T_{\text{п}}$ .

Передаточная функция корректирующего устройства (регулятора перемещения) определится из тождества

$$W_{\text{рц,Л}} = W_{\text{рм}}(p) \cdot K_{\delta} \cdot W_{\text{сз,м}}(p) \cdot W_{\text{экв}}(p) \cdot W_{\text{м}}(p). \quad (5.21)$$

После подстановки в (5.21) формулы (5.20) и выражений для  $W_{\text{сз,м}}(p)$ ,  $W_{\text{экв}}(p)$ ,  $W_{\text{м}}(p)$ , получим

$$\frac{8T_{\text{п}}p + 1}{8T_{\text{п}}p} \cdot \frac{1}{4T_{\text{п}}p(2T_{\text{п}}p + 1)} =$$

$$= W_{\text{рп}}(p) \cdot \frac{K_{\delta} \cdot K_{\text{д1}} \cdot (T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}p(2T_{\text{п}}p + 1)(T_1p + 1)(T_2p + 1)}.$$

Отсюда

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}}{32T_{\text{п}}^2 K_{\delta} \cdot K_{\text{д1}}} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p} \cdot \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)} =$$

$$= W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{ф}}(p),$$

где  $W_{\text{ПИД}}(p)$  – передаточная функция ПИД-регулятора

$$W_{\text{ПИД}}(p) = K_{\text{ПИД}} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p}, \quad (5.22)$$

$$\text{с коэффициентом передачи } K_{\text{ПИД}} = \frac{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}}{32T_{\text{п}}^2 K_{\delta} \cdot K_{\text{д1}}}; \quad (5.23)$$

$W_{\text{ф}}(p)$  – передаточная функция двухзвенного фильтра

$$W_{\phi}(p) = \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}. \quad (5.24)$$

Поскольку отношение  $\frac{T_3}{T_{\text{ом}}} = \frac{0,1}{0,002} = 50 > 5$ , произведением  $T_3T_{\text{ом}}$  можно пренебречь и заменить двухзвенный фильтр однозвенным с передаточной функцией

$$W_{\phi}(p) \approx \frac{T_2p + 1}{(T_3 + T_{\text{ом}})p + 1}. \quad (5.25)$$

Таким образом, передаточная функция регулятора перемещения

$$\begin{aligned} W_{\text{рп}}(p) &= W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\phi}(p) \\ &= \frac{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}}{32T_{\text{п}}^2 K_{\delta} \cdot K_{\text{дл}}} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p} \cdot \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{(T_3 + T_{\text{ом}})p + 1}. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Подставив в правую часть тождества (5.19) выражения для  $W_{\text{рп}}(p)$  из (5.24),  $W_{\text{сз,м}}(p)$  из (5.19),  $W_{\text{экв}}(p)$  из (5.11), а также

$W_{\text{м}}(p) = \frac{1}{i_{\text{р}}p}$ , определим передаточную функцию разомкнутой

цепи контура при его реальной настройке на СО:

$$\begin{aligned} W_{\text{рл,СО}}(p) &= \frac{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}}{32T_{\text{п}}^2 K_{\delta} \cdot K_{\text{дл}}} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p} \cdot \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{(T_3 + T_{\text{ом}})p + 1} \times \\ &\times \frac{K_{\delta} \cdot K_{\text{дл}} \cdot (T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{K_{\text{ом}} \cdot i_{\text{р}}p [2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1] (T_1p + 1)(T_2p + 1)} = \\ &= \frac{(8T_{\text{п}}p + 1)(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{32T_{\text{п}}^2 p^2 [2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1] [(T_3 + T_{\text{ом}})p + 1]}. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Полученная передаточная функция имеет пятый порядок существенно отличается от передаточной функции разомкнутой цепи системы, идеально настроенной на СО:

$$W_{\text{co}}(p) = \frac{8T_{\text{п}}p + 1}{32T_{\text{п}}^2 p^2 (4T_{\text{п}}p + 1)} \text{ при } T_{\mu} = T_{\text{п}} \text{ и имеющей третий по-}$$

рядок. Повышение порядка системы обусловлено, с одной стороны, представлением внутреннего контура при синтезе регулятора перемещения инерционным форсирующим звеном вместо последовательного соединения колебательного и форсирующего звеньев, а с другой стороны – заменой двухзвенного фильтра однозвенным. Это подтверждает ранее высказанное замечание о том, что внешний контур невозможно точно настроить ни на один из оптимумов.

По формуле (5.27), путем замены оператора Лапласа  $p$  на переменную  $i\omega$ , рассчитываются логарифмические частотные характеристики контура, определяются частоты среза и переворота фазы, запасы устойчивости.

Передаточная функция замкнутого контура слежения за перемещением

$$W_{3,L}(p) = \frac{(8T_{\text{п}}p + 1)(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{a_5p^5 + a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0} = \frac{B_L(p)}{A_L(p)},$$

где

$$B_L(p) = (8T_{\text{п}}p + 1)(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1),$$

$$A_L(p) = a_5p^5 + a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0,$$

$$a_0 = 1, \quad a_1 = 8T + T_3 + T_{\text{ом}}, \quad a_2 = 32T_{\text{п}}^2 + 8T_{\text{п}}(T_3 + T_{\text{ом}}) + T_3 + T_{\text{ом}}.$$

$$a_3 = 64T_{\text{п}}^3 + 32T_{\text{п}}^2(T_3 + T_{\text{ом}}) + 8T_{\text{п}}T_3T_{\text{ом}},$$

$$a_4 = 64T_{\text{п}}^3(T_{\text{п}} + T_3 + T_{\text{ом}}), \quad a_5 = 64T_{\text{п}}^4(T_3 + T_{\text{ом}}).$$

На рис. 5.6 изображена переходная характеристика скорректированного контура слежения за перемещением при подаче на вход контура единичного воздействия ( $L_{\text{вх}} = 1$  рад). Пунктиром здесь и далее обозначены уровни 0,95 и 1,05. Она рассчитывается по переходной функции

$$L(t) = \frac{B_L(0)}{A_L(0)} + \sum_{k=1}^5 \frac{B_L(p_k)e^{p_k t}}{p_k A'_L(p_k)}, \quad (5.28)$$

где  $p_k$  –  $k$ -тый простой полюс передаточной функции  $W_{3,L}(p)$ ,

$B_L(0)$ ,  $A_L(0)$ ,  $B_L(p_k)$  – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции  $W_{3,L}(p)$ , вычисленные при  $p = 0$  и  $p = p_k$ ;

$A'_L(p_k)$  – производная от характеристического полинома  $A_L(p)$ , вычисленная при  $p = p_k$ .

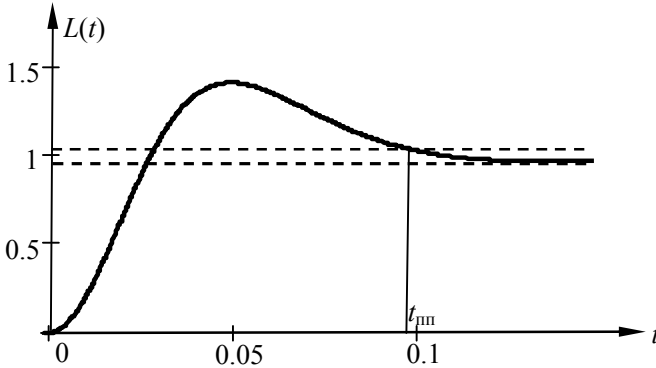


Рис. 5.6. Переходная характеристика внешнего контура при простых полюсах его передаточной функции

Анализируя полученные результаты можно сделать выводы о том, что

- при реальной настройке на СО перерегулирование (примерно 42,8 %) несколько меньше, чем при идеальной настройке (43,4 %);
- время переходного процесса  $t_{пп,р} = 0,095$  с при реальной настройке немного превышает время переходного процесса  $t_{пп,и} = 0,082$  с, полученное для идеальной настройки на СО.

Таким образом, в результате синтеза в заданной ЭМС удалось обеспечить время переходного процесса меньше заданного  $t_{пп} = 0,095$  с при относительно небольшой величине перерегулирования.

Примечание. Поскольку отношение  $\frac{T_3}{T_{\text{ом}}} = 50$ , в выражении  $(T_3 p + 1)(T_{\text{ом}} p + 1) = T_3 T_{\text{ом}} p^2 + (T_3 + T_{\text{ом}}) p + 1$ , расположенном в числителе передаточной функции (5.27), можно пренебречь произведением  $T_3 T_{\text{ом}}$ . В этом случае передаточная функция (5.27) упрощается к виду

$$W_{\text{ср,Л}}(p) = \frac{8T_{\text{п}} p + 1}{32T_{\text{ом}}^2 p^2 [2T_{\text{п}} p (T_{\text{п}} p + 1) + 1]}, \quad (5.29)$$

т.е. порядок системы понижается до четвертого. В этом случае передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию

$$W_{3,Л}(p) = \frac{W_{\text{ср,Л}}(p)}{1 + W_{\text{ср,Л}}(p)} = \frac{8T_{\text{ом}} p + 1}{(8T_{\text{ом}}^2 p^2 + 8T_{\text{ом}} p + 1)^2} = \frac{B_{\text{Л}}(p)}{A_{\text{Л}}(p)}, \quad (5.30)$$

Характеристическое уравнение

$$A_{\text{Л}}(p) = (8T_{\text{ом}}^2 p^2 + 8T_{\text{ом}} p + 1)^2 = 0$$

имеет пару корней кратности 2, т.е.  $A_{\text{Л}}(p) = (p - p_1)^2 (p - p_2)^2$ , где для заданных параметров  $p_{1,2} = -49,989 \pm 50i$ . Формула (5.28) становится непригодной для расчета переходной характеристики. В данном случае для получения переходной функции можно воспользоваться символьным процессором MathCAD. Для этого нужно:

- записать изображения выходного перемещения как реакцию на единичное ступенчатое воздействие

$$L(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{8T_{\text{ом}} p + 1}{(8T_{\text{ом}}^2 p^2 + 8T_{\text{ом}} p + 1)^2}; \quad (5.31)$$

- полученное изображение подвергнуть обратному преобразованию Лапласа с помощью команды **Transforms – Inverse Laplace Transform** с последующей группировкой командой **Collect** относительно показательной и тригонометрических функций.

Для изображения (5.31) переходная функция будет иметь вид



$$L(t) = 1 + \left[ \left( 2 - \frac{t}{4T_n} \right) \sin \left( \frac{t}{4T_n} \right) - \left( 1 + \frac{3t}{4T_n} \right) \cos \left( \frac{t}{4T_n} \right) \right] e^{-\frac{t}{4T_n}}. \quad (5.32)$$

На рис. 5.7 приведена переходная характеристика контура слежения за перемещением, рассчитанная по формуле (5.32). Сравнивая полученный результат с ранее приведенным (см. рис.5.6), можно видеть увеличение перерегулирования до 53,7 % и уменьшение времени переходного процесса до 0,091 с.

Следует также отметить, что ситуация с парой комплексно сопряженных полюсов передаточной функции кратности 2 возникает в вариантах систем, следящих за перемещением, в которых  $T_{ом} = 0$ . В этом случае переходная характеристика внешнего контура рассчитывается аналогично.

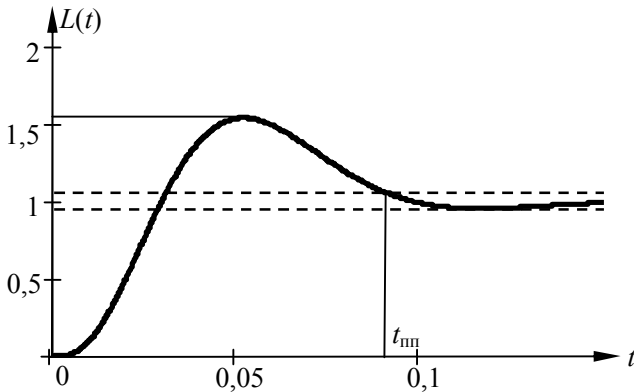


Рис. 5.7. Переходная характеристика внешнего контура при полюсах кратности 2 передаточной функции

Таким образом, благодаря настройке контура регулирования момента на технический оптимум, а контура слежения за перемещением – на симметричный оптимум, удалось обеспечить заданное время переходного процесса при относительно небольшом перерегулировании и статической ошибке в синтезированной ЭМС, равной нулю.

## 6. ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

В курсовой работе электронному моделированию подвергается один из контуров ЭМС, характеристики которого были рассчитана на этапах ее анализа или синтеза. Контур задается преподавателем, причем задание на моделирование может быть получено не позднее, чем за неделю до срока сдачи работы.

Моделирование выполняется в среде ASIMEC [6] и предполагает выполнение следующих этапов:

- разработка электронной модели контура и расчет ее параметров;
- снятие на электронной модели переходной характеристики контура;
- определение основных показателей качества регулирования по переходной характеристике и их сравнение с ранее рассчитанными.

Проведение электронного моделирования базируется на навыках, полученных при выполнении лабораторных работ и индивидуального задания №3 по ТАУ.

Модели разрабатываются в двух вариантах:

- по структурной схеме моделируемого контура;
- по передаточной функции контура и ее полюсам (корням характеристического полинома).

Вариант задания на разработку электронной модели задается преподавателем.

Результаты моделирования должны быть задокументированы в пояснительной записке.

Рассмотрим оба подхода к разработке электронных моделей. Первый подход очевиден – в структурной схеме контура (чаще всего, нескорректированного) каждое звено представляется его схемной реализацией на операционном усилителе, звенья соединяются между собой по структурной схеме с учетом четности операционных усилителей между входом и выходом модели. При втором подходе замкнутый контур заменяется эквивалентным разомкнутым. Рассмотрим этот подход более подробно.

Пусть передаточная функция замкнутого контура имеет вид  $W_3(p) = \frac{B_3(p)}{A_3(p)}$  и его характеристическое уравнение

$A_3(p) = 0$  имеет  $k$  вещественных корней  $p_1, p_2, \dots, p_k$  с отрицательной вещественной частью и  $m$  пар комплексных сопряженных корней вида  $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm \beta_1, p_{3,4} = -\alpha_2 \pm \beta_2, \dots, p_{2m-1,2m} = -\alpha_m \pm \beta_m$ . Числитель передаточной функции  $W_3(p)$  имеет вид  $B_3(p) = k(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1) \cdots (\tau_l p + 1)$ . Знаменатель передаточной функции (характеристический полином) для контура, согласно теореме Виета, можно записать в виде

$$A_3(p) = (p - p_1)(p - p_2) \cdots (p - p_k) [p - (-\alpha_1 + \beta_1)] [p - (-\alpha_1 - \beta_1)] \times \cdots [p - (-\alpha_m + \beta_m)] [p - (-\alpha_m - \beta_m)]$$

Это означает, что замкнутую систему можно представить эквивалентной ей разомкнутой системой, содержащей  $k$  инерционных и  $m$  колебательных звеньев, соединенных последовательно с общим коэффициентом передачи  $K_3 = \frac{B_3(0)}{A_3(0)}$ . При этом для  $i$ -

го ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) инерционного звена постоянная времени

$$T_{\text{ин}i} = \left| \frac{1}{p_i} \right|. \text{ Параметры каждого } j\text{-го колебательного звена оп-}$$

ределяются из тождества:

$$\begin{aligned} [p - (-\alpha_j + \beta_j)] \cdot [p - (-\alpha_j - \beta_j)] &= p^2 + 2\alpha_j p + \alpha_j^2 + \beta_j^2 = \\ &= \frac{1}{\alpha_j^2 + \beta_j^2} p^2 + \frac{2\alpha_j}{\alpha_j^2 + \beta_j^2} p + 1 = T_{\text{кол}j}^2 p^2 + 2\xi_j T_{\text{кол}j} p + 1, \end{aligned}$$

$$\text{отсюда } T_{\text{кол}j} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_j^2 + \beta_j^2}}, \quad \xi_j = \frac{\alpha_j}{\sqrt{\alpha_j^2 + \beta_j^2}}.$$

Такой прием удобно применять для электронного моделирования скорректированных замкнутых систем.

В качестве примера на рис. 6.1 приведена схема электронной модели синтезированного контура слежения перемещения,

реализующая передаточную функцию (5.31) при  $p_{1,2} = -49,989 \pm 50i$  и  $T_{\text{н}} = 0,005$  с. Она состоит из последовательно соединенных двух одинаковых колебательных звеньев, выполненных на усилителях  $DA1 - DA6$ , форсирующего звена, выполненного на усилителе  $DA7$  и усилителя-инвертора  $DA8$ , обеспечивающего четность усилителей, включенных между входом 1 и выходом 2 модели. Коэффициент передачи каждого из звеньев равен 1, поэтому  $R1 = R2 = R5 = R6 = R7 = R8 = R11 = R12 = R14 = R15 = R16 = 100$  кОм. Емкости конденсаторов  $C1 - C4$  приняты равными 1 мкФ.

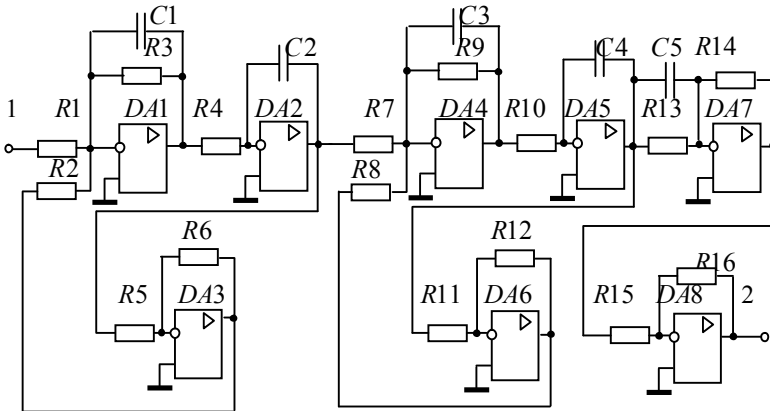


Рис. 6.1. Электронная модель синтезированного внешнего контура

Параметры остальных элементов модели определяются следующим образом. т.к.  $p_{1,2} = -49,989 \pm 50i$ , то постоянная времени каждого колебательного звена

$$T_{\text{кол}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = 0,014 \text{ с}, \text{ а его коэффициент демпфирования}$$

$$\xi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = 0,707, \quad \text{тогда} \quad R_4 = R_{10} = \frac{T_{\text{кол}}^2}{R_2 C_1 C_2} = 2 \text{ кОм},$$

$R_3 = R_9 = \frac{\sqrt{R_2 R_4}}{2\xi} = 10 \text{ кОм} \text{ кОм}$ . Постоянна времени форсирующего звена  $\tau_\phi = 8T_{II}$ , поэтому  $C_5 = \frac{8T_{II}}{R_{13}} = 0,4 \text{ мкФ} \text{ мкФ}$ .

На рис. 6.2 приведена осциллограмма выходного напряжения модели, на вход которой 1 подано напряжение  $U_{ВХ} = 1 \text{ В}$  (к выходу 2 подключен один из входов осциллографа). Максимальное значение выходного напряжения  $U_{\max} \approx 1,54 \text{ В}$ , его установившееся значение  $U_{уст} = 1 \text{ В}$  (см. рис. 6.2, а), тогда перерегулирование  $\sigma = \frac{U_{\max} - U_{уст}}{U_{уст}} \cdot 100 = 54 \%$ . Время переходного процесса (см. рис. 6.2, б)  $t_{\text{пн}} \approx 0,091 \text{ с}$ . Результаты моделирования практически полностью совпадают с результатами расчета (см. рис. 5.7).

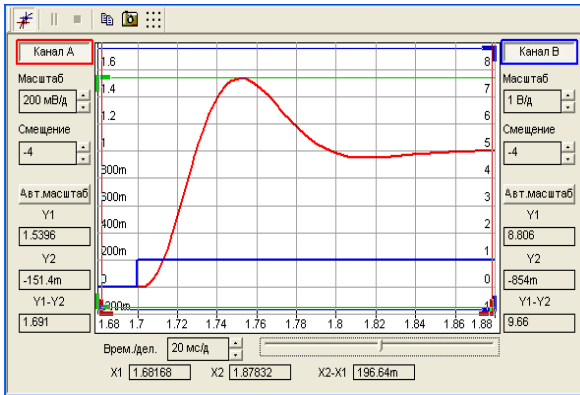
## 7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Результаты работы оформляются в виде пояснительной записки соответствию с требованиями ЕСКД.

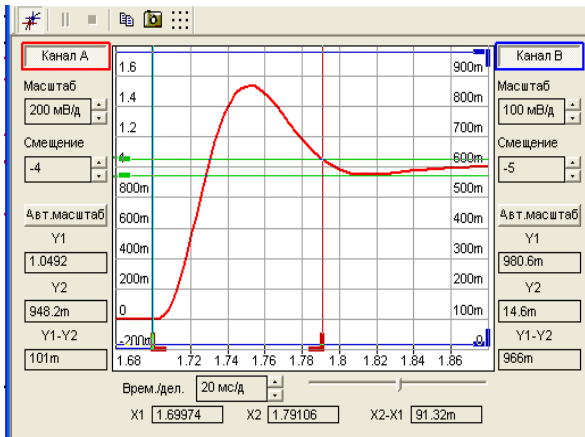
Пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

- 7.1. Техническое задание (ТЗ) на работу.
- 7.2. Анализ ТЗ, где указываются назначение, особенности заданной ЭМС и описываются ее структура.
- 7.3. Пояснительные материалы по анализу заданной ЭМС. Они должны включать в себя структурные схемы контуров ЭМС, их преобразование, передаточные функции, основные результаты расчетов и выводы по результатам анализа.
- 7.4. Пояснительные материалы по синтезу заданной ЭМС. Они включают в себя выбор некомпенсируемой постоянной времени, структурные схемы синтезируемых контуров ЭМС, синтез и выбор корректирующих устройств, получение переда-

точных функций скорректированной системы, основные результаты расчетов и выводы по результатам синтеза.



а



б

Рис. 6.2. Результаты электронного моделирования синтезированного внешнего контура

7.5. Пояснительные материалы по электронному моделированию за ЭМС, содержащие схему модели, расчет ее параметров, результаты моделирования, представленные, например, в виде кривой переходного процесса на экране осциллографа, оп-

ределение показателей качества регулирования и их сопоставление с расчетными.

7.6. Пояснительные материалы, касающиеся выполнения творческого задания оформляются аналогично (см. п. п. 7.3, 7.4).

7.7. Заключение, в котором анализируются основные результаты, полученные при выполнении работы, и даются необходимые рекомендации.

Пояснительная записка выполняется в виде распечатанного текстового файла, в который в виде рисунков вставлены основные расчетные соотношения и графики, полученные в среде MathCAD. Допускается выполнение приложения в среде MathCAD, при этом в пояснительной записке обязательно должны присутствовать ссылки на это приложение.

**Неосмысленное копирование друг у друга текстовых файлов наказывается существенным снижением оценки при защите проекта.**

Пример оформления курсовой работы приведен в приложении 2.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авраамов И. С., Обрусник В. П. Теория автоматического управления: Учебное пособие. – Томск, ротап rint ТПИ, 1981. – 130 с.
2. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления. Учебное пособие,. Томск: Изд-во ТПУ, 2000 – 152 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 53 с.
4. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления. Учебное пособие. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 207 с.
5. Лебедев Е. Д., Неймарк В. Е., Пистарк М. Я., Слежановский О. В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. - М.: Энергия, 1970. – 198 с.
6. Лебедев. Ю. М. Теория автоматического управления. Руководство к лабораторным работам для студентов специальности 210106. – Томск, ТУСУР, 2006 – 41 с.

7. Москаленко В. В. Теория электропривода. - М.: Высшая школа, 1991. – 392 с.
8. Рапопорт Я. Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. - Куйбышев, 1985 – 53 с.



**ПРИЛОЖЕНИЕ.**

**Пример выполнения курсового проекта**

**Техническое задание**  
на курсовой проект по дисциплине  
«Теория автоматического управления»

Тема проекта: анализ и синтез электромеханической системы, осуществляющей регулирование скорости и крутящего момента двигателя

Вариант: 1XX

Структурная схема: заданы ОСМ, ОСС, компенсационные обратные связи отсутствуют

**Параметры структурной схемы:**

Статическая точность \_\_\_\_\_  $S = 1\%$

Отношение электромеханической и электромагнитной постоянных времени \_\_\_\_\_  $k = \frac{T_m}{T_\sigma} = 7$

Постоянная времени преобразователя \_\_\_\_\_  $T_{\Pi} = 0,04 \text{ с}$

Коэффициент передачи преобразователя \_\_\_\_\_  $W_{д1}(p)$

Постоянная времени цепи обратной связи:

по моменту \_\_\_\_\_  $T_{ом} = 0,004 \text{ с}$

по скорости \_\_\_\_\_  $T_{ос} = 0,008 \text{ с}$

Время переходного процесса в синтезированной

ЭМС не более \_\_\_\_\_  $t_{пп} = 0,5 \text{ с}$

**Параметры электродвигателя:**

Номинальная мощность \_\_\_\_\_  $P_{\text{н}} = 3,2 \text{ кВт}$

Номинальная скорость вращения \_\_\_\_\_  $n_{\text{н}} = 1500 \text{ об/мин}$

Номинальный ток \_\_\_\_\_  $I_{\text{н}} = 18,4 \text{ А}$

Активное сопротивление двигателя \_\_\_\_\_  $R_{\text{д}} = 1 \text{ Ом}$

Активное сопротивление цепи якоря \_\_\_\_\_  $R_{\text{ц\text{я}}} = 2 \text{ Ом}$

Момент инерции двигателя \_\_\_\_\_  $J = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

**Перечень подлежащих проработке вопросов:**

Провести:

- анализ технического задания;
- анализ устойчивости нескорректированной заданной ЭМС, рассчитать ее частотные и переходные характеристики, построить механическую характеристику, определить показатели качества регулирования и сравнить их с заданными;
- синтез ЭМС путем настройки каждого из ее контуров на технический оптимум, рассчитать частотные и переходные характеристики скорректированной САУ, построить механическую характеристику, определить показатели качества регулирования и сравнить их с заданными;
- электронное моделирование контура регулирования скорости синтезированной ЭМС

Руководитель \_\_\_\_\_ (должность, ФИО)

## 1. Анализ технического задания и расчет основных параметров и величин

На рис. 1.1 изображена структурная схема заданной ЭМС, соответствующая техническому заданию (ТЗ). Для упрощения рисунка зависимость передаточных функций от оператора Лапласа  $p$  опущена.

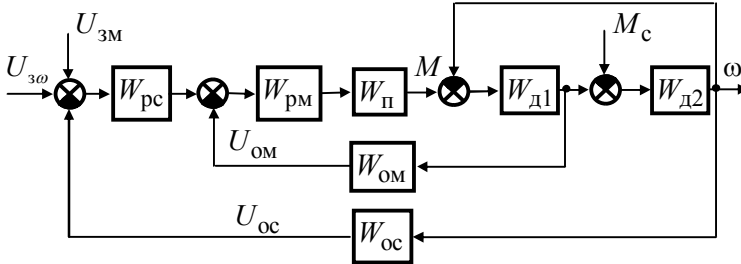


Рис. 1.1. Структурная схема заданной ЭМС

Структура по рис. 1.1 содержит два контура: контур регулирования крутящего момента двигателя, замкнутого обратной связью с передаточной функцией  $W_{om}(p) = \frac{K_{om}}{T_{om}p + 1}$  и контур

регулирования (стабилизации) скорости вращения двигателя замкнутого обратной связью с передаточной функцией

$W_{oc}(p) = \frac{K_{oc}}{T_{om}p + 1}$ . Управление работой двигателя осуществляется с помощью преобразователя с передаточной функцией

$W_{oc}(p) = \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1}$ , который изменяет скорость вращения якоря

двигателя путем изменения напряжения, приложенного к якорной цепи. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением представлен звеньями с передаточными функциями

$W_{d1}(p) = \frac{K_{d1}}{T_{\theta}p + 1}$  и  $W_{d2}(p) = \frac{K_{d2}}{T_{m}p}$  (параметры этих передаточ-

ных функций рассчитываются ниже), объединенных между собой единичной отрицательной обратной связью.

Контур регулирования момента выполняет защитные функции, ограничивая момент (ток в якоре) двигателя в пусковых и аварийных режимах его работы. Поскольку в ЭМС отсутствуют компенсационные обратные связи, то пусковой момент  $M_{\Pi}$  двигателя превысит момент отсечки, а статическая ошибка стабилизации скорости вращения двигателя  $\omega$  не будет равна нулю.

Регуляторы скорости  $W_{pc}(p)$  и  $W_{pm}(p)$  представляют собой последовательные корректирующие устройства, обеспечивающие при их правильном выборе, с одной стороны, требуемые показатели качества регулирования, а с другой – реализацию подчиненного регулирования, при котором контуры ЭМС работают раздельно. Если работает контур регулирования момента, то контур регулирования скорости отключен, и, наоборот, если работает контур регулирования скорости, то отключен контур регулирования момента.

Ниже в среде MathCAD рассчитаны другие параметры передаточных функций структурной схемы.

$$\omega_{дн} := \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{н}}{60} \quad \omega_{дн} = 157.08 \quad \text{- номинальная скорость вращения двигателя (рад/с)}$$

$$C := \frac{U_{н} - I_{н} \cdot R_{д}}{\omega_{дн}} \quad C = 1.283 \quad \text{- машинная постоянная (В*с)}$$

$$\omega_0 := \frac{U_{н}}{C} \quad \omega_0 = 171.416 \quad \text{- скорость холостого хода двигателя (рад/с)}$$

$$\Delta \omega_{н} := \frac{(\omega_0 - \omega_{дн}) R_{цз}}{R_{д}} \quad \Delta \omega_{н} = 28.673 \quad \text{- снижение скорости двигателя (рад/с)}$$

$$M_{н} := I_{н} \cdot C \quad M_{н} = 23.615 \quad \text{- номинальный крутящий момент двигателя (А*В*с)}$$

$$K_{д1} := \frac{M_n}{\Delta \omega_n} \quad K_{д1} = 0.824 \quad - \text{добротность мех. характеристики двигателя (Н*м*с)}$$

$$K_{д2} := \frac{1}{K_{д1}} \quad K_{д2} = 1.214 \quad - \text{жесткость мех. характеристики двигателя (1/Н*м*с)}$$

$$T_M := \frac{J}{K_{д1}} \quad T_M = 0.182 \quad - \text{электромеханическая постоянная времени двигателя (с)}$$

$$T_{\Sigma} := \frac{T_M}{k} \quad T_{\Sigma} = 0.026 \quad - \text{электромагнитная постоянная времени двигателя (с)}$$

$$K_{ом\max} := \frac{U_L}{2 \cdot M_n} \quad K_{ом\max} = 0.212 \quad - \text{максимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования момента (1/А*с)}$$

$$K_{ос\min} := \frac{U_L}{\omega_{дн}} \quad K_{ос\min} = 0.064 \quad - \text{минимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования скорости (В*с)}$$

$$K_{ом} := 0.2 \quad K_{ос} := 0.1 \quad - \text{принятые значения коэффициентов передачи обратных связей.}$$

## 2. Проведение анализа ЭМС

На рис. 2.1. приведена структурная схема заданной ЭМС, в которой  $W_{рс}(p) = W_{рм}(p) = 1$ . Для этой структуры проведем анализ каждого из контуров.

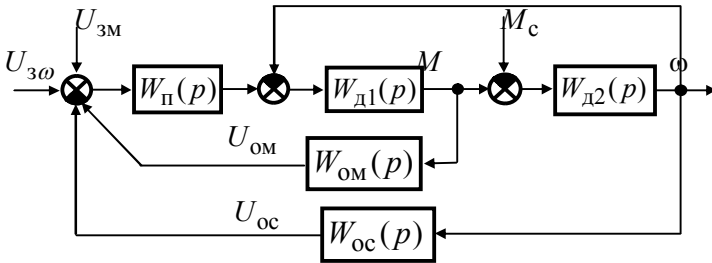


Рис. 2.1. Структурная схема для анализа заданной ЭМС

## 2.1. Анализ контура регулирования момента

На рис. 2.2 приведена структурная схема контура регулирования момента. Получим для нее передаточные функции:

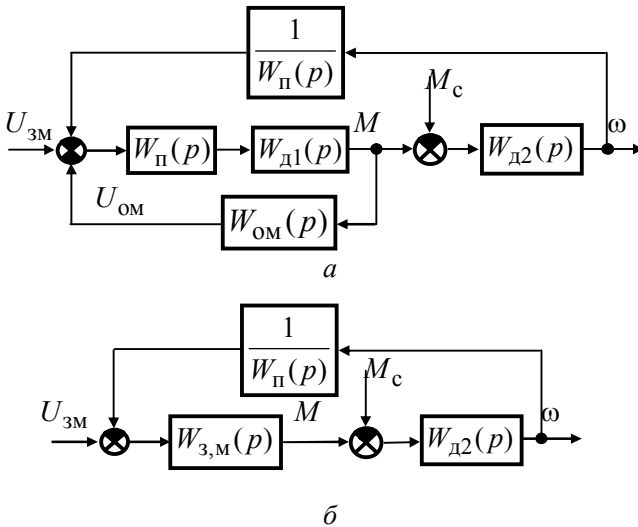


Рис. 2.2. Структурная схема для анализа контура регулирования момента (а) и ее преобразование (б)

На структурной схеме, приведенной на рис. 2.2, б, виден контур, охваченный обратной связью по моменту. Его передаточная функция

$$\begin{aligned} W_{3,м}(p) &= \frac{W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p)}{1 + W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{ом}(p)} = \\ &= \frac{K_{п}/C \cdot K_{д1}(T_{ом}p + 1)}{(T_{э}p + 1)(T_{п}p + 1)(T_{ом}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{д1} K_{ом}}. \end{aligned}$$

Таким образом, структура, приведенная на рис.2.2, а, преобразуется структуру, показанную на рис. 2.2, б. Для этой структуры (для всего контура регулирования момента) передаточные функции разомкнутой цепи  $W_{рц,м}(p)$ , замкнутой системы по задающему  $W_{зг,м}(p)$  и возмущающему  $W_{зф,м}(p)$  воздействиям, характеристический полином  $A_{м}(p)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} W_{рц,м}(p) &= W_{3,м}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot \frac{1}{W_{п}(p)} = \\ &= \frac{(T_{ом}p + 1)(T_{п}p + 1)}{T_{м}p \left[ (T_{э}p + 1)(T_{п}p + 1)(T_{ом}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{д1} K_{ом} \right]}; \\ W_{зг,м}(p) &= \frac{W_{3,м}(p) \cdot W_{д2}(p)}{1 + W_{рц,м}(p)} = \frac{B_{м}(p)}{A_{м}(p)} = \\ &= \frac{K_{п}/C (T_{ом}p + 1)}{T_{м}p \left[ (T_{э}p + 1)(T_{п}p + 1)(T_{ом}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{д1} K_{ом} \right] + (T_{ом}p + 1)(T_{п}p + 1)}; \\ W_{зф,м}(p) &= \frac{W_{д2}(p)}{1 + W_{рц,м}(p)} = \frac{C_{м}(p)}{A_{м}(p)} = \\ &= \frac{K_{д2} \left[ (T_{э}p + 1)(T_{п}p + 1)(T_{ом}p + 1) + \frac{K_{п} K_{д1}}{C} K_{ом} \right]}{T_{м}p \left[ (T_{э}p + 1)(T_{п}p + 1)(T_{ом}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{д1} K_{ом} \right] + (T_{ом}p + 1)(T_{п}p + 1)}; \end{aligned}$$



$$A_M(p) = T_M p \left[ (T_3 p + 1)(T_{II} p + 1)(T_{OM} p + 1) + \frac{K_{II}}{C} K_{д1} K_{OM} \right] + \\ + (T_{OM} p + 1)(T_{II} p + 1) = a_{M4} p^4 + a_{M3} p^3 + a_{M2} p^2 + a_{M1} p + a_{M0},$$

где

$$a_{M0} = 1, \quad a_{M1} = T_M \left( 1 + \frac{K_{II}}{C} K_{д1} K_{OM} \right) + T_{II} + T_{OM}, \\ a_{M2} = T_M (T_3 + T_{II} + T_{OM}) + T_{II} T_{OM}, \\ a_{M3} = T_M (T_3 T_{II} + T_{II} T_{OM} + T_3 T_{OM}), \quad a_{M4} = T_M T_3 T_{II} T_{OM}.$$

Обозначим  $K_{MP} = \frac{K_{II}}{C} K_{д1} K_{OM} = 6,417$  – коэффициент передачи разомкнутой цепи контура регулирования момента, тогда  $a_{M1} = T_M (1 + K_{MP}) + T_{II} + T_{OM} = T_M K_p + T_c$ , где  $T_c = T_M + T_{II} + T_{OM}$ .

Проведем анализ устойчивости этого контура по критерию Гурвица:

Вектор коэффициентов характеристического полинома для контура регулирования момента

$$a_M := \begin{bmatrix} 1 \\ T_3 + T_M \cdot \frac{K_{II} \cdot K_{д1} \cdot K_{OM}}{C} + T_{II} + T_{OM} \\ (T_{II} + T_3 + T_{OM}) \cdot T_M + T_{II} \cdot T_{OM} \\ [(T_{II} + T_3) \cdot T_{OM} + T_{II} \cdot T_3] \cdot T_M \\ T_M \cdot T_{II} \cdot T_3 \cdot T_{OM} \end{bmatrix}$$

Главный минор определителя Гурвица (в раскрытом виде)

$$\Delta := a_{M3} \cdot a_{M2} \cdot a_{M1} - a_{M0} \cdot (a_{M3})^2 - a_{M4} \cdot (a_{M1})^2$$

$$\Delta = 2,581 \times 10^{-6}$$

Главный минор определителя Гурвица больше нуля, следовательно, контур устойчив.

Определим граничный коэффициент передачи контура из условия равенства нулю главного минора определителя Гурвица, т.е. из решения уравнения

$$a_{M1}(a_{M2}a_{M3} - a_{M1}a_{M4}) - a_{M3}^2 a_{M0} = 0$$

или

$$(T_M K_{MГР} + T_c) [a_{M2} a_{M3} - (T_M K_{MГР} + T_c) a_{M4}] - a_{M3}^2 a_{M0} = 0,$$

$$c_2 \cdot K_{ГР}^2 + c_1 \cdot K_{ГР} + c_0 = 0,$$

где  $c_0 = T_c a_{M2} a_{M3} - a_{M3}^2 - T_c^2 a_{M4}$ ,

$$c_1 = T_M a_{M2} a_{M3} - 2 T_M T_c a_{M4},$$

$$c_2 = -T_M^2 a_{M4}.$$

Вектор коэффициентов уравнения

$$c_2 \cdot K_{MГР}^2 + c_1 \cdot K_{MГР} + c_0 = 0$$

$$c := \begin{bmatrix} a_{M3} \cdot a_{M2} \cdot T_c - (a_{M3})^2 - a_{M4} \cdot T_c^2 \\ a_{M3} \cdot a_{M2} \cdot T_M - 2 \cdot a_{M4} \cdot T_c \cdot T_M \\ -a_{M4} \cdot T_M^2 \end{bmatrix}$$

Граничный коэффициент передачи контура (положительное решение)

$$K_{MГР} := \frac{1}{2 \cdot c_2} \cdot \left[ -c_1 - \sqrt{(c_1)^2 - 4 \cdot c_2 \cdot c_0} \right] \quad K_{MГР} = 20.878$$

Поскольку  $K_{MР} = 6,417 < K_{MГР} = 20,878$ , то это доказывает устойчивость контура.

На рис. 2.3 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ контура, построенные по передаточной функции его разомкнутой цепи. Они еще раз подтверждают устойчивость контура, поскольку частота среза  $\omega_{ср} = 0,741$  рад/с меньше частоты переворота фазы  $\omega_{\pi} = \infty$ .

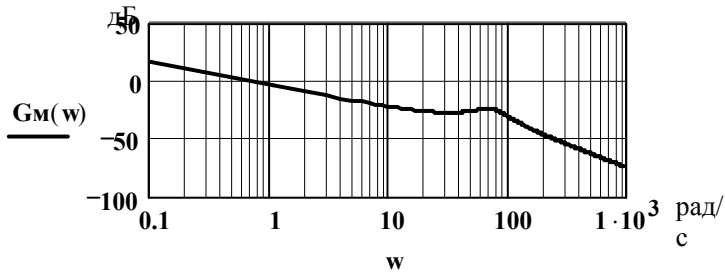
Расчетная формула для ЛАЧХ контура

$$G_M(\omega) := 20 \cdot \log(|W_{PM}(i \cdot \omega)|)$$

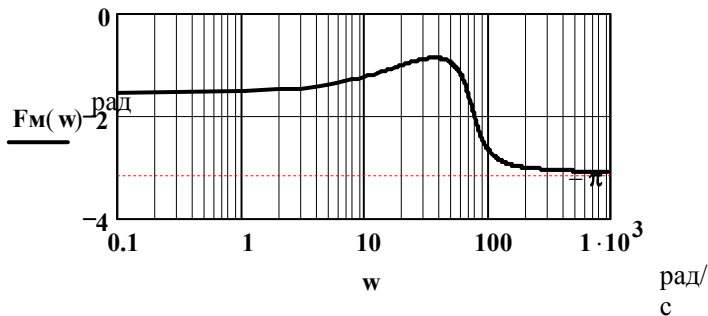
Расчетная формула для ЛФЧХ контура

$$F_M(\omega) := \arg(W_M(i \cdot \omega)) + \arg(T_{II} \cdot i \cdot \omega + 1) - \frac{\pi}{2}$$

$$\omega := 0.1 .. 1000$$



а



б

Рис. 2.3. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) контура регулирования момента  
Частота среза (рад/с)

$$\omega_{sc} := 1 \quad \text{Given} \quad G_M(\omega_{sc}) = 0 \quad \omega_{sc} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{sc} = 0.734 \quad \text{рад/с}$$

- запас устойчивости по фазе (в градусах)

$$\Delta F_M := (\pi + F_M(\omega_{sc})) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Delta F_M = 91.431$$

### Расчет и построение переходных характеристик контура. Определение основных показателей качества регулирования

Числитель, характеристический полином и передаточная функция по задающему воздействию контура регулирования момента

$$Вм(p) := \frac{Кп}{С} \cdot (Том \cdot p + 1)$$

$$Ам(p) := ам4 \cdot p^4 + ам3 \cdot p^3 + ам2 \cdot p^2 + ам1 \cdot p + ам0$$

$$Wзгм(p) := \frac{Вм(p)}{Ам(p)}$$

Числитель, производная от характеристического полинома и передаточная функция по возмущающему воздействию контура регулирования момента

$$см := \begin{bmatrix} 1 + \frac{Кп \cdot Кд1 \cdot Ком}{С} \\ Тп + Тэ + Том \\ Тп \cdot (Тэ + Том) + Тэ \cdot Том \\ Тп \cdot Тэ \cdot Том \end{bmatrix}$$

$$См(p) := Кд2 \cdot (см3 \cdot p^3 + см2 \cdot p^2 + см1 \cdot p + см0)$$

$$Sm(p) := \frac{d}{dp} Ам(p) \quad Wzfm(p) := \frac{См(p)}{Ам(p)}$$

Корни характеристического уравнения для контура регулирования момента

$$рм := \text{polyroots}(ам) \quad рм = \begin{pmatrix} -272.902 \\ -19.859 + 74.448i \\ -19.859 - 74.448i \\ -0.814 \end{pmatrix}$$

Пусковой момент двигателя в контуре регулирования момента ( $A \cdot B \cdot c$ )

$$M_{п} := 2.5 \cdot M_{н} \quad M_{п} = 59.038$$

Задающее напряжение для контура регулирования момента ( $B$ )

$$U_{зм} := M_{п} \cdot \left( K_{ом} + \frac{C}{K_{п} \cdot K_{д1}} \right) \quad U_{зм} = 13.648$$

Установившееся значение скорости, достигаемой в контуре регулирования момента под воздействием задающего напряжения  $U_{зм} = 13.648$  В (рад/с)

$$w_{0м} := U_{зм} \cdot \frac{B_{м}(0)}{A_{м}(0)} \quad w_{0м} = 531.683$$

Переходная функции по задающему воздействию для контура регулирования момента

$$w_{м}(t) := w_{0м} + U_{зм} \cdot \operatorname{Re} \left( \sum_{k=0}^3 \frac{B_{м}(p_{мk}) \cdot \exp(p_{мk} \cdot t)}{p_{мk} \cdot S_{м}(p_{мk})} \right)$$

Момент времени подачи возмущения (пускового момента, с)

$$t_0 := 1$$

Переходная функции для контура регулирования момента под воздействием пускового момента

$$w_{f}(t) := M_{п} \cdot \left( \frac{C_{м}(0)}{A_{м}(0)} + \operatorname{Re} \left( \sum_{k=0}^3 \frac{C_{м}(p_{мk}) \cdot \exp(p_{мk} \cdot t)}{p_{мk} \cdot S_{м}(p_{мk})} \right) \right)$$

$$w_{fм}(t) := \operatorname{if}(t < t_0, w_{0м}, w_{0м} - w_{f}(t - t_0))$$

На рис. 2.4 показаны рассчитанные по приведенным переходным функциям переходные характеристики контура регулирования момента по задающему (а) и возмущающему (б) воздействиям (по оси абсцисс – время в секундах, по оси ординат – скорость в рад/с). ниже определено время переходного процесса по задающему и возмущающему воздействиям (с), перерегулирование равно нулю.

$t := 0, 0.01 .. 8$

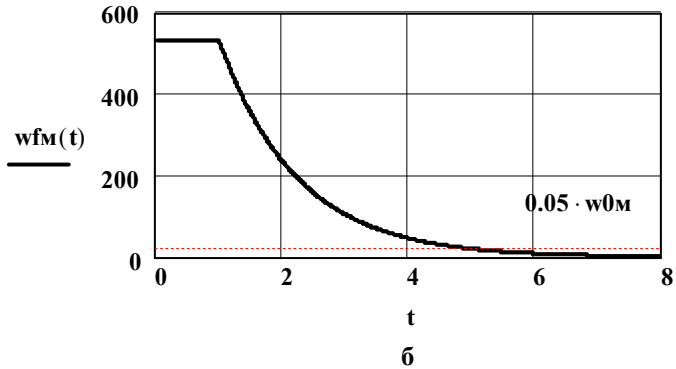
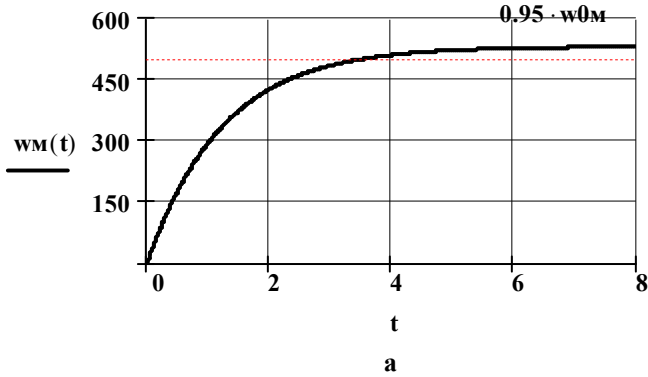


Рис. 2.4. Переходные характеристики контура регулирования момента

Время переходного процесса при подаче задающего и возмущающего воздействий (с)

$t := 0.4$  Given  $w_m(t) = 0.95 \cdot w_{0M}$   $tn_m := \text{Find}(t)$

$t := 6$  Given  $w_{fm}(t) = 0.05 \cdot w_{0M}$   $tn_{fm} := \text{Find}(t) - t_0$

$tn_m = 3.686$

$tn_{fm} = 3.681$

Таким образом, вследствие больших запасов устойчивости, переходный процесс в контуре регулирования момента определяется минимальным (по модулю) вещественным корнем харак-

теристического уравнения и имеет аperiодический характер. При этом время переходного процесса в контуре намного почти в 10 раз превышает заданное значение (0,4 с), что определяет необходимость проведения коррекции контура.

## 2.2. Анализ контура регулирования скорости

На рис. 2.5 приведена структурная схема для анализа контура регулирования скорости. На ней преобразователь и двигатель охвачены эквивалентной отрицательной обратной связью с передаточной функцией

$$W_{oc, экв}(p) = \frac{1}{W_{п}(p)} + W_{oc}(p) = \frac{T_{п}p + 1}{K_{п}/C} + \frac{K_{oc}}{T_{oc}p + 1} =$$

$$= \frac{C \cdot \left[ (T_{п}p + 1)(T_{oc}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} K_{oc} \right]}{K_{п}(T_{oc}p + 1)}.$$

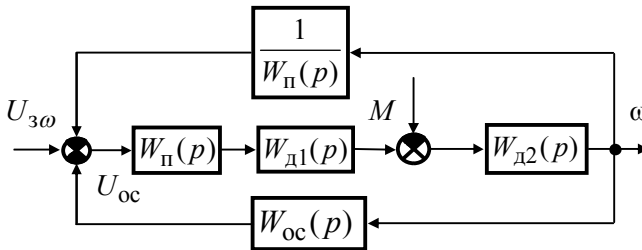


Рис. 2.5. Структурная схема для анализа контура регулирования скорости

Получим передаточные функции разомкнутой цепи  $W_{рц, \omega}(p)$ , замкнутой системы по задающему  $W_{зг, \omega}(p)$  и возмущающему  $W_{зф, ц}(p)$  воздействиям и характеристический полином  $A_{\omega}(p)$ . С учетом того, что  $K_{д1} \cdot K_{д2} = 1$  будем иметь:

$$\begin{aligned}
W_{p\omega}(p) &= W_{\Pi}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p) \cdot W_{oc,эKB}(p) = \\
&= \frac{(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc}}{T_M p(T_3 p+1)(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1)}; \\
W_{3g,\omega}(p) &= \frac{\Omega p}{U_{3\omega}(p)} = \frac{W_{\Pi}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p)}{1 + W_{p\omega}(p)} = \frac{B_{\omega}(p)}{A_{\omega}(p)} = \\
&= \frac{K_{\Pi}/C \cdot (T_{oc}p+1)}{T_M p(T_3 p+1)(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + (T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc}}; \\
W_{3f,\omega}(p) &= \frac{W_{д2}(p)}{1 + W_{p\omega}(p)} = \frac{C_{\omega} p}{A_{\omega}(p)} = \\
&= \frac{K_{д2} \cdot (T_3 p+1)(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1)}{T_M p(T_3 p+1)(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + (T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc}}; \\
A_{\omega}(p) &= T_M p(T_3 p+1)(T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + (T_{\Pi}p+1)(T_{oc}p+1) + \\
&\quad + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc} = a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad \text{где}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_0 &= 1 + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc}, \quad a_1 = T_M + T_{\Pi} + T_{oc}, \quad a_2 = T_M(T_3 + T_{\Pi} + T_{oc}) + T_{\Pi}T_{oc}, \\
a_3 &= T_M(T_3 T_{\Pi} + T_{\Pi}T_{oc} + T_3 T_{oc}), \quad K_{пид} = \frac{K_{om}}{4T_{\Pi}K_{д2}K_{oc}}.
\end{aligned}$$

Ниже приведен фрагмент расчетного файла, в котором проводится анализ устойчивости нескорректированного контура регулирования скорости. Коэффициент передачи контура определен как  $K_{p\omega} = \frac{K_{\Pi}}{C} K_{oc} = a_0 - 1$ , его граничное значение определено из выражения для граничного коэффициента  $a_0$  минус единица. Устойчивость контура подтверждается тем, что  $K_{г,\omega} > K_{p,\omega}$ .



Вектор коэффициентов характеристического полинома

$$a\omega := \begin{bmatrix} 1 + \frac{K_{oc} \cdot K_{п}}{C} \\ T_{м} + T_{п} + T_{oc} \\ (T_{п} + T_{э} + T_{oc}) \cdot T_{м} + T_{п} \cdot T_{oc} \\ (T_{п} \cdot T_{э} + T_{п} \cdot T_{oc} + T_{э} \cdot T_{oc}) \cdot T_{м} \\ T_{м} \cdot T_{п} \cdot T_{э} \cdot T_{oc} \end{bmatrix}$$

Главный минор определителя Гурвица

$$\Delta := \left| \begin{pmatrix} a\omega_3 & a\omega_1 & 0 \\ a\omega_4 & a\omega_2 & a\omega_0 \\ 0 & a\omega_3 & a\omega_1 \end{pmatrix} \right| \quad \Delta = 4.275 \times 10^{-7}$$

Коэффициент передачи контура

$$K_{p\omega} := \frac{K_{oc} \cdot K_{п}}{C} \quad K_{p\omega} = 3.896$$

Граничный коэффициент передачи контура

$$K_{g\omega} := a\omega_1 \cdot \frac{(a\omega_3 \cdot a\omega_2 - a\omega_4 \cdot a\omega_1)}{(a\omega_3)^2} - 1 \quad K_{g\omega} = 9.131$$

Далее по передаточной функции разомкнутой цепи контура

$$W_{p\omega}(p) := \frac{(T_{п} \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{oc}}{T_{м} \cdot p \cdot (T_{э} \cdot p + 1) \cdot (T_{э} \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}$$

рассчитаны логарифмические частотные характеристики контура и

Расчетная формула для ЛАЧХ контура

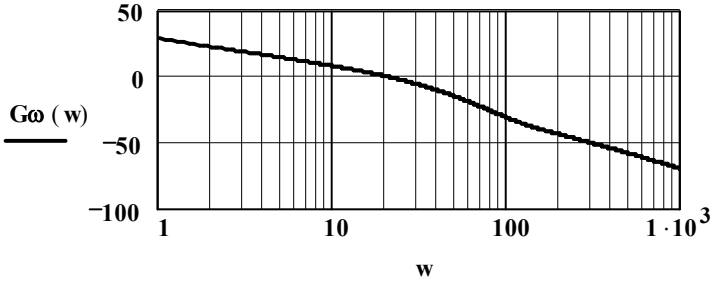
$$G\omega(w) := 20 \cdot \log(|W_{p\omega}(i \cdot w)|)$$

определены запасы устойчивости.

Расчетная формула для ЛФЧХ контура

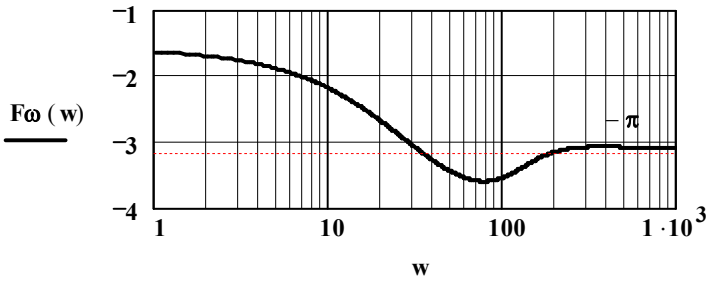
$$F\omega(w) := \arg \left[ \frac{(\Gamma_{пi} \cdot w + 1) \cdot (\Gamma_{осi} \cdot w + 1) + \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{ос}}{(\Gamma_{пi} \cdot w + 1) \cdot (\Gamma_{эi} \cdot w + 1) \cdot (\Gamma_{осi} \cdot w + 1)} \right] - \frac{\pi}{2}$$

$w := 1, 1.1 \dots 1000$



$w$

а



$w$

б

Рис. 2.6. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) нескорректированного контура регулирования скорости

Частота среза (рад/с)

$w := 20$  Given  $G\omega(w) = 0$   $w_{ср} := \text{Find}(w)$   $w_{ср} = 20.506$

Частота переворота фазы (рад/с)

$$w := 30 \quad \text{Given} \quad F\omega(w) = -\pi \quad w\pi := \text{Find}(w) \quad w\pi = 33.616$$

Запас устойчивости по амплитуде (дБ)

$$\Delta G\omega := |G\omega(w\pi)| \quad \Delta G\omega = 7.329$$

Запас устойчивости по фазе (в градусах)

$$\Delta F\omega := (\pi + F\omega(w\pi)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Delta F\omega = 24.923$$

ЛАЧХ и ЛФЧХ подтверждают устойчивость контура. Поскольку запасы устойчивости небольшие, то переходный процесс будет иметь колебательный характер.

### **Расчет и построение переходных характеристик контура. Определение основных показателей качества регулирования**

Характеристический полином контура и его производная

$$A\omega(p) := a\omega_4 \cdot p^4 + a\omega_3 \cdot p^3 + a\omega_2 \cdot p^2 + a\omega_1 \cdot p + a\omega_0$$

$$S\omega(p) := \frac{d}{dp} A\omega(p)$$

Числитель передаточной функции контура по задающему воздействию

$$B\omega(p) := \frac{Kп}{C} \cdot (Tос \cdot p + 1)$$

Числитель передаточной функции контура по возмущающему воздействию

$$C\omega(p) := Kд2 \cdot (Tп \cdot p + 1) \cdot (Tэ \cdot p + 1) \cdot (Tос \cdot p + 1)$$

Корни характеристического уравнения  $A\omega(p) = 0$

$$p\omega := \text{polyroots}(a\omega) \quad p\omega = \begin{pmatrix} -122.492 \\ -56.067 \\ -4.937 + 21.112i \\ -4.937 - 21.112i \end{pmatrix}$$

Задающее воздействие для контура регулирования скорости (В)

$$Uз\omega := \omega_0 \cdot \left( \frac{C}{K_{\Pi}} + K_{OC} \right) \quad Uз\omega = 21.542$$

Установившиеся значения скорости до и после приложения возмущающего воздействия (номинального момента), рад/с

$$\omega_0g := \omega_0 \quad \omega_n := \omega_0 - M_n \cdot \frac{C\omega(0)}{A\omega(0)} \quad \omega_n = 165.56$$

Переходные функции по задающему и возмущающему воздействиям

$$\omega g(t) := \omega_0 + Uз\omega \cdot \text{Re} \left( \sum_{k=0}^3 \frac{B\omega(p\omega_k) \cdot \exp(p\omega_k \cdot t)}{p\omega_k \cdot S\omega(p\omega_k)} \right)$$

$t_0 := 0.1$  с - момент подачи возмущающего воздействия

$$\omega fc(t) := M_n \cdot \text{Re} \left( \sum_{k=0}^3 \frac{C\omega(p\omega_k) \cdot \exp(p\omega_k \cdot t)}{p\omega_k \cdot S\omega(p\omega_k)} \right)$$

$$\omega f(t) := \text{if}(t < t_0, \omega_0, \omega_n - \omega fc(t - t_0))$$

На рис. 2.7 по приведенным выше переходным функциям построены переходные характеристики контура регулирования скорости по задающему (рис. 2.7, а) и возмущающему (рис. 2.7, б) воздействиям. В качестве возмущения в контуре действует номинальный момент нагрузки.

$t := 0, 0.001 .. 1$

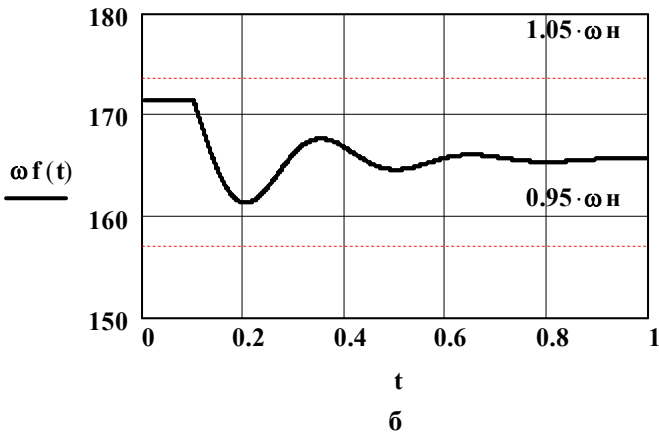
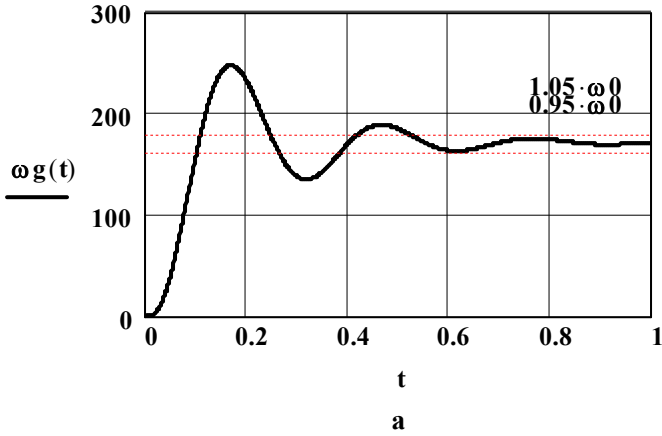


Рис. 2.7. Переходные характеристики контура регулирования скорости

**Основные показатели качества регулирования:**

Время, соответствующее максимуму скорости ( $c$ )

$$t := 0.2 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega g(t) = 0 \quad t_m := \text{Find}(t) \quad t_m = 0.168$$

Максимальное значение скорости (рад/с)

$$\omega_{\max} := \omega g(\text{tm}) \quad \omega_{\max} = 247.405$$

Перерегулирование при подаче задающего воздействия

$$\sigma g := \frac{\omega_{\max} - \omega 0}{\omega 0} \quad \sigma g = 44.33 \%$$

Время переходного процесса при подаче задающего воздействия (с)

$$t := 0.5 \quad \text{Given} \quad \omega g(t) = 1.05 \cdot \omega 0 \quad \text{tng} := \text{Find}(t) \\ \text{tng} = 0.519$$

Время, соответствующее минимуму скорости (с) для переходной характеристики по возмущению

$$t := 0.2 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega f(t) = 0 \quad \text{tmin} := \text{Find}(t) \\ \text{tmin} = 0.203$$

Минимальное значение скорости для переходной характеристики по возмущению, рад/с

$$\omega_{\min} := \omega f(\text{tmin}) \quad \omega_{\min} = 161.265$$

Перерегулирование при подаче возмущающего воздействия (номинального момента)

$$\sigma f := \frac{\omega_{\text{н}} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{н}}} \quad \sigma f = 2.594 \%$$

Быстродействие контура регулирования скорости не удовлетворяет заданному времени переходного процесса ( $0,519 > 0,4$  с). Переходный процесс также сопровождается большим перерегулированием (примерно 44 %). Эти показатели можно значительно улучшить при настройке контура на технический оптимум.

### 2.3. Механическая характеристика нескорректированной ЭМС

При  $p = 0$  получим:

- для контура регулирования момента

$$W_{3g,M}(0) = \frac{K_{\Pi}}{C}, \quad W_{3f,M}(0) = K_{д2} \left( 1 + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{д1} K_{ом} \right);$$

- для контура регулирования скорости

$$W_{3g,\omega}(0) = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{1 + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{ос}} = \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{ос}},$$

$$W_{3f,\omega}(0) = \frac{K_{д2}}{1 + \frac{K_{\Pi}}{C} K_{ос}} = \frac{K_{д2} C}{C + K_{\Pi} K_{ос}}.$$

Расчетные выражения для участков МХ:

- при работе контура регулирования скорости

$$\begin{aligned} \omega_1(M) &= U_{3\omega} W_{3g,\omega}(0) - M W_{3f,\omega}(0) = \\ &= U_{3\omega} \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{ос}} - M \frac{K_{д2} C}{C + K_{\Pi} K_{ос}}; \end{aligned}$$

- при работе контура регулирования момента

$$\begin{aligned} \omega_2(M) &= U_{3M} W_{3g,M}(0) - M W_{3f,M}(0) = \\ &= U_{3M} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C} - M \cdot K_{д2} \left( 1 + \frac{K_{\Pi} K_{д1}}{C} K_{ом} \right). \end{aligned}$$

При  $M = M_{от}$   $\omega_1(M_{от}) = \omega_2(M_{от})$ , отсюда момент отсечки

$$M_{от} = \frac{\omega_2(0) - \omega_1(0)}{\frac{1}{K_{д1}} \left( 1 - \frac{1}{1 + K_{ос} \frac{K_{\Pi}}{C}} \right) + K_{ом} \frac{K_{\Pi}}{C}}.$$

Ниже приведен фрагмент файла, в котором с помощью условного оператора рассчитана МХ (рис. 2.8). Её статизм определяется при  $M = M_{н}$  и, согласно приведенному расчету примерно равен 3,4 % и не удовлетворяет значению, заданному в ТЗ (1 %).

Уравнения МХ

$$\omega 1(M) := U_{3M} \cdot \left( \frac{K_{\Pi}}{C + K_{oc} \cdot K_{\Pi}} \right) - M \cdot \frac{\frac{C}{K_{д1}}}{C + K_{oc} \cdot K_{\Pi}}$$

$$\omega 2(M) := U_{3M} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C} - M \cdot \left( \frac{1}{K_{д1}} + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{om} \right)$$

Момент отсечки на механической характеристике (МХ) ЭМС (А\*В\*с)

$$M_{ог} := \frac{\omega 2(0) - \omega 1(0)}{\frac{1}{K_{д1}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + K_{oc} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C}} \right) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{om}} \quad M_{ог} = 41.137$$

$$\omega (M) := \text{if}(M < M_{ог}, \omega 1(M), \omega 2(M))$$

$$M := 0, 0.001 .. M_{\Pi}$$

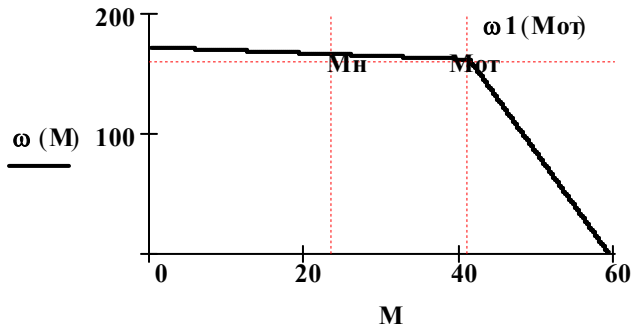


Рис. 2.8. Механическая характеристика ЭМС

Статизм внешней характеристики контура регулирования скорости

$$S := \frac{\omega 0 - \omega (M_{\Pi})}{\omega 0} \quad S = 3.417 \%$$



Таким образом, нескорректированная ЭМС не удовлетворяет требованиям ТЗ по статической точности и быстродействию и требует проведения коррекции (синтеза).

### 3. Синтез ЭМС

#### 3.1. Синтез контура регулирования момента

Произведем настройку каждого из контуров ЭМС на ТО,. В этом случае эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени для контура регулирования момента

$$T_{\mu} = \frac{t_{\text{пп}}}{4 \cdot 2^{2-1}} = \frac{0,5}{8} = 0.065 \text{ с.}$$

В качестве  $T_{\mu}$  выберем ближайшую к расчетной меньшую постоянную времени. Таковой в данном контуре является постоянная времени преобразователя  $T_{\text{п}} = 0,04 \text{ с}$ , т.е.

$$T_{\mu} = T_{\text{п}}.$$

На рис. 3.1, а изображена структурная схема контура регулирования момента, которая может быть преобразована к схеме с единичной обратной связью, приведенной на рис. 3.1, б.

Определим передаточную функцию корректирующего устройства в контуре регулирования момента (регулятора момента), решив уравнение

$$W_{\text{р,ТО}}(p) = W_{\text{рм}}(p) \cdot W_{\text{п}}(p) \cdot W_{\text{дл}}(p) \cdot W_{\text{ом}}(p),$$

или

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = \frac{1}{2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1)} = \frac{\frac{K_{\text{п}}}{C} K_{\text{дл}} K_{\text{ом}}}{(T_{\text{п}}p + 1)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}, \quad \text{от-}$$

сюда

$$W_{\text{рм}}(p) = \frac{C}{2T_{\text{п}}K_{\text{п}}K_{\text{дл}}K_{\text{ом}}} \cdot \frac{(T_{\text{ом}}p + 1)(T_{\text{э}}p + 1)}{p}.$$

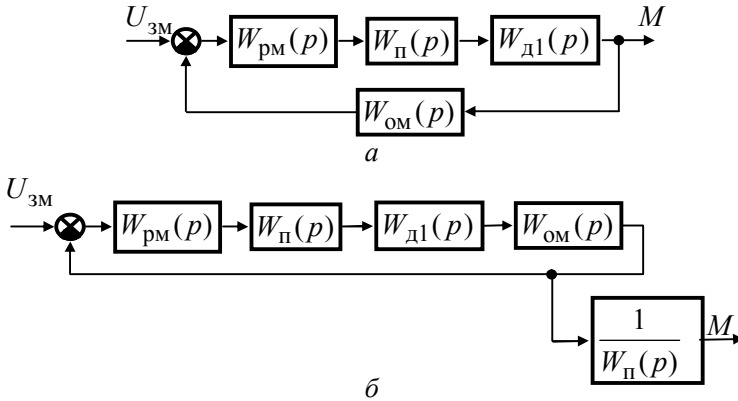


Рис. 3.1. Синтезируемый контур регулирования момента

Таким образом, регулятор момента представляет собой ПИД-регулятор, т.е.

$$W_{pM}(p) = K_{\text{ПИД}} \cdot \frac{(T_{\text{ПИД1}}p + 1)(T_{\text{ПИД2}}p + 1)}{p},$$

где

$$K_{\text{ПИД}} = \frac{C}{2T_{\text{П}}K_{\text{П}}K_{\text{д1}}K_{\text{ОМ}}} - \text{коэффициент передачи ПИД-регулятора;}$$

$$T_{\text{ПИД1}} = T_{\text{ОМ}}, \quad T_{\text{ПИД2}} = T_{\text{Э}} - \text{его постоянные времени.}$$

В этом случае передаточная функция разомкнутой цепи контура

$$\begin{aligned} W_{pц,м}(p) &= W_{pM}(p) \cdot W_{\text{П}}(p) \cdot W_{\text{д1}}(p) \cdot W_{\text{ОМ}}(p) = \\ &= \frac{C}{2T_{\text{П}}K_{\text{П}}K_{\text{д1}}K_{\text{ОМ}}} \cdot \frac{(T_{\text{ОМ}}p + 1)(T_{\text{Э}}p + 1)}{p} \times \\ &\times \frac{K_{\text{П}}K_{\text{д1}}K_{\text{ОМ}}}{C} = \frac{1}{(T_{\text{П}}p + 1)(T_{\text{Э}}p + 1)(T_{\text{ОМ}}p + 1)} \cdot \frac{1}{2T_{\text{П}}p(T_{\text{П}}p + 1)}, \end{aligned}$$

т.е. совпадает с передаточной функцией  $W_{p,ТО}(p)$ .

Передаточная функция замкнутого контура регулирования момента по задающему воздействию:

$$W_{3г,м}(p) = \frac{W_{рц,м}(p)}{1 + W_{рц,м}(p)} \cdot \frac{1}{W_{ом}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2T_{п}p(T_{п}p + 1)}} \times$$

$$\times \frac{T_{ом}p + 1}{K_{ом}} = \frac{K_{ом}}{2T_{п}^2 p^2 + 2T_{п}p + 1} = \frac{B_{м}(p)}{A_{м}(p)}.$$

Ниже приведен фрагмент файла, в котором рассчитаны ЛАЧХ, ЛФЧХ. переходная характеристика по задающему воздействию и определены показатели качества для скорректированного (синтезированного) контура регулирования момента. Расчет ЛАЧХ и ЛФЧХ производится по передаточной функции разомкнутой цепи, а переходная характеристика – по передаточной функции замкнутого контура регулирования момента по задающему воздействию. Само задающее воздействие рассчитано с учетом того, что установившееся значение момента будет равно пусковому моменту, т.е.  $M_{п} = U_{3м} W_{3г,м}(0) = \frac{U_{3м}}{K_{ом}}$ , отсюда

$$U_{3м} = M_{п} K_{ом}.$$

Передаточная функция разомкнутой цепи для контура регулирования момента, настроенного на ТО

$$W_{\text{рцм}}(p) := \frac{1}{2 \cdot T_{\text{п}} \cdot p \cdot (T_{\text{п}} \cdot p + 1)}$$

$$G_{\text{м}}(w) := 20 \cdot \log(|W_{\text{рцм}}(i \cdot w)|) \quad \Phi_{\text{м}}(w) := \arg(W_{\text{рцм}}(i \cdot w)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$w := 1..1000$$

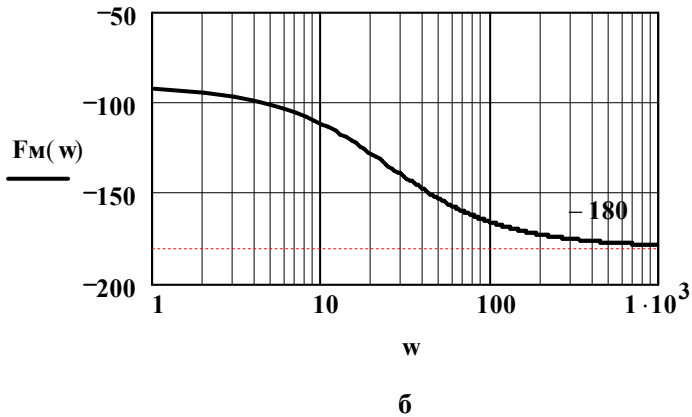
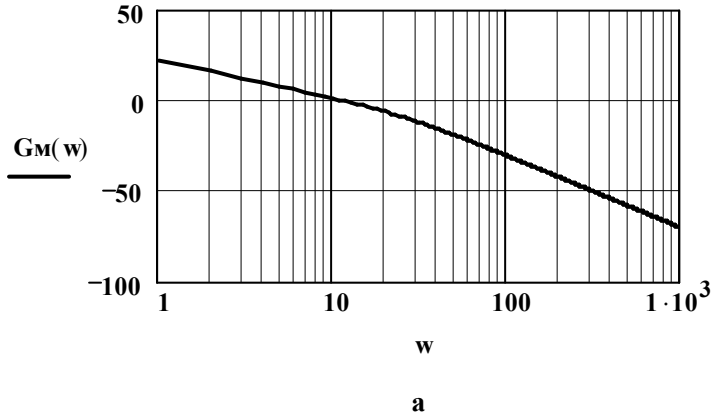


Рис. 3.2. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) синтезированного контура регулирования момента

Частота среза (рад/с)

$$\omega := 100 \quad \text{Given} \quad G_m(\omega) = 0 \quad \omega_{ср} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{ср} = 11.377$$

Ожидаемое время переходного процесса в контуре (с)

$$t_{ппм} := \frac{2}{\omega_{ср}} \quad t_{ппм} = 0.176$$

Запас устойчивости по фазе (в градусах)

$$\Delta F := 180 + F_m(\omega_{ср}) \quad \Delta F = 65.53$$

Запас устойчивости по амплитуде равен бесконечности, т.к. ЛФЧХ асимптотически стремится к значению  $-180$  градусов

### Расчет и построение переходной характеристики синтезированного контура. Определение основных показателей качества регулирования

Вектор коэффициентов характеристического полинома, сам характеристический полином, производная от него, корни характеристического уравнения и числитель передаточной функции замкнутого синтезированного контура регулирования момента

$$\mathbf{am} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \cdot T_{п} \\ 2 \cdot T_{п}^2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{Am}(p) := \mathbf{am}_2 \cdot p^2 + \mathbf{am}_1 \cdot p + \mathbf{am}_0$$

$$\mathbf{Sm}(p) := \frac{d}{dp} \mathbf{Am}(p) \\ \mathbf{pm} := \text{polyroots}(\mathbf{am}) \quad \mathbf{pm} = \begin{pmatrix} -12.5 - 12.5i \\ -12.5 + 12.5i \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Vm}(p) := \frac{T_{ом} \cdot p + 1}{K_{ом}}$$

Задающее воздействие (В)

$$U_{зм} := M_{п} \cdot K_{ом} \quad U_{зм} = 11.808$$

Переходная функция контура регулирования момента

$$\underline{M}(t) := M_{\Pi} + U_{3M} \cdot \operatorname{Re} \left( \sum_{k=0}^1 \frac{V_M(p_{Mk}) \cdot \exp(p_{Mk} \cdot t)}{p_{Mk} \cdot S_M(p_{Mk})} \right)$$

$$t := 0, 0.0001 .. 0.5$$

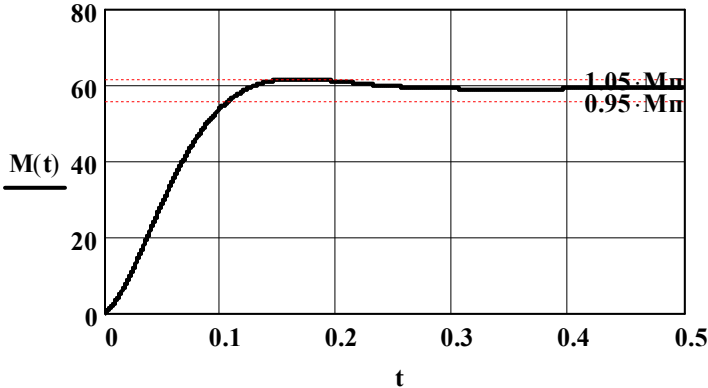


Рис. 3.3. Переходная характеристика синтезированного контура регулирования момента

Время, соответствующее максимуму переходной характеристики, (с), максимальное значение момента ( А\*В\*с) и перегулирование

$$t := 0.15 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} M(t) = 0 \quad t_{\max} := \operatorname{Find}(t) \quad t_{\max} = 0.247$$

$$M_{\max} := M(t_{\max}) \quad M_{\max} = 61.556$$

$$\sigma_M := \frac{M_{\max} - M_{\Pi}}{M_{\Pi}} \quad \sigma_M = 4.333 \%$$

Время переходного процесса в контуре регулирования момента (с)

$$t := 0.1 \quad \text{Given} \quad M(t) = 0.95 \cdot M_{\Pi} \quad t_{\text{п95}} := \operatorname{Find}(t) \quad t_{\text{п95}} = 0.162$$

### Вывод:

Расчеты показали, что контур точно настроен на ТО. Перегулирование не превышает 5-ти процентов, время переходного

го процесса  $t_{\text{пп,м}} \approx 4T_{\mu} = 4T_{\Pi}$  и немного меньше ожидаемого

$t_{\text{пп,м}} \approx 4T_{\mu} = 4T_{\Pi}$ . Отношение  $\frac{t_{\text{пп,}\omega}}{t_{\text{пп,м}}} = 3,086 > 2$  (для внутреннего

контура по отношению в внешнему время переходного процесса должно не менее, чем в два раза меньше времени переходного процесса для внешнего контура).

### 3.2. Синтез контура регулирования скорости

На рис. 3.4, а приведена структурная схема контура регулирования скорости, а на рис. 3.4, б – структурная схема этого контура, приведенного к единичной обратной связи. Здесь  $W_{\text{зг,м}}'(p)$  – передаточная функция замкнутого контура регулирования момента, в которой сделано допущение – опущен член при  $p^2$ , т.е.

$$W_{\text{зг,м}}'(p) = \frac{T_{\text{ом}}p + 1}{K_{\text{ом}}(2T_{\Pi}p + 1)};$$

$W_{\text{экр}}(p) = \frac{K_{\text{д2}}(T_{\text{э}}p + 1)}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$  – эквивалентная передаточная функ-

ция, получающаяся при переносе сумматора, причем

$$T_1 = \frac{T_{\text{м}}}{2} + \sqrt{\frac{T_{\text{м}}^2}{4} - T_{\text{м}}T_{\text{э}}} = 0,151 \text{ с}, \quad T_2 = \frac{T_{\text{м}}}{2} - \sqrt{\frac{T_{\text{м}}^2}{4} - T_{\text{м}}T_{\text{э}}} = 0,031 \text{ с}.$$

Произведем настройку контура на ТО, учитывая, что для внешнего контура  $T_{\mu 2} = 2T_{\mu 1} = 2T_n$ . Тогда передаточная функция

$$W_{\omega, \text{ТО}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot W_{\text{зг,м}}'(p) \cdot W_{\text{экр}}(p) \cdot W_{\text{ос}}(p), \quad (*)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{1}{4T_{\Pi}p(2T_{\Pi}p + 1)} = \\ = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{T_{\Pi}p + 1}{K_{\text{ом}}(2T_{\Pi}p + 1)} \cdot \frac{K_{\text{д2}}(T_{\text{э}}p + 1)}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{T_{\text{ос}}p + 1}. \end{aligned}$$

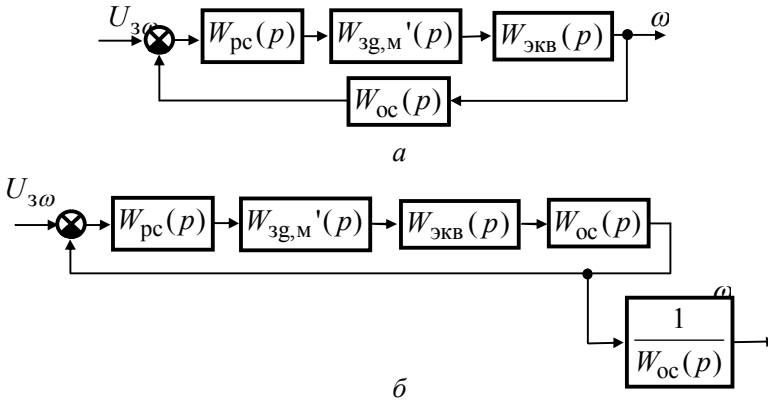


Рис. 3.4. Синтезируемый контур регулирования скорости

Отсюда передаточная функция регулятора скорости

$$W_{pc}(p) = \frac{K_{om}(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_{oc}p + 1)}{4T_{\Pi}K_{д2}K_{oc}p(T_{om}p + 1)(T_3p + 1)}.$$

Таким образом, регулятор скорости представляет собой последовательное соединение ПИД-регулятора с передаточной функцией

$$W_{\text{ПИД}}(p) = K_{\text{ПИД}} \cdot \frac{(T_{\text{ПИД}1}p + 1)(T_{\text{ПИД}2}p + 1)}{p}$$

где

$$K_{\text{ПИД}} = \frac{K_{om}}{4T_{\Pi}K_{д2}K_{oc}}, \quad T_{\text{ПИД}1} = T_1, \quad T_{\text{ПИД}2} = T_2,$$

и двухзвенного фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{T_{oc}p + 1}{(T_{om}p + 1)(T_3p + 1)} = \frac{T_{oc}p + 1}{T_3T_{om}p^2 + (T_3 + T_{om})p + 1}.$$

Поскольку постоянные времени фильтра  $T_3$  и  $T_{om}$  отличаются друг от друга  $\left(\frac{T_3}{T_{om}} \approx 6,5\right)$ , то членом при  $p^2$  можно



пренебречь и заменить двухзвенный фильтр на однозвенный с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{T_{\text{ос}}p + 1}{(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1}.$$

Получим передаточную функцию разомкнутой цепи для скорректированного контура регулирования скорости, подставив в формулу (\*) передаточные функции регулятора, замкнутого внутреннего контура  $W_{\text{зг,м}}(p)$  (без приближения, касающегося члена при  $p^2$ ), эквивалентного звена и звена обратной связи по скорости. Тогда

$$\begin{aligned} W_{\text{рц}\omega}(p) &= W_{\text{рс}}(p) \cdot W_{\text{зг,м}}(p) \cdot W_{\text{экр}}(p) \cdot W_{\text{ос}}(p) = \\ &= \frac{K_{\text{ом}}}{4T_{\text{п}}K_{\text{д2}}K_{\text{ос}}} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p} \cdot \frac{T_{\text{ос}}p + 1}{(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1} \times \\ &\times \frac{T_{\text{ом}}p + 1}{K_{\text{ом}}[2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1]} \cdot \frac{K_{\text{д2}}(T_3p + 1)}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{T_{\text{ос}}p + 1} = \\ &= \frac{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{4T_{\text{п}}p[2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1][(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1]}. \end{aligned}$$

Таким образом, за счет принятых допущений и приближений, порядок контура регулирования скорости – четвертый, а не второй, как это имеет место для системы, настроенной на ТО.

Получим передаточную функцию замкнутого синтезированного контура регулирования скорости:

$$\begin{aligned} W_{\text{з}\omega}(p) &= \frac{W_{\text{рцс}}(p)}{1 + W_{\text{рцс}}(p)} \cdot \frac{1}{W_{\text{ос}}(p)} = \\ &= \frac{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{4T_{\text{п}}p[2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1][(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1]} \cdot \frac{T_{\text{ос}}p + 1}{1 + \frac{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)}{4T_{\text{п}}p[2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1][(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1]}} \cdot K_{\text{ос}} = \\ &= \frac{(T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)(T_{\text{ос}}p + 1)}{K_{\text{ос}}\{4T_{\text{п}}p[2T_{\text{п}}p(T_{\text{п}}p + 1) + 1][(T_{\text{э}} + T_{\text{ом}})p + 1] + (T_3p + 1)(T_{\text{ом}}p + 1)} = \\ &= \frac{B_{\omega}(p)}{A_{\omega}(p)}. \end{aligned} \quad (**)$$

Ниже приведен фрагмент файла с характеристиками скорректированного контура регулирования скорости. ЛАЧХ и ЛФЧХ (рис. 3.5) рассчитываются по передаточной функции разомкнутой цепи, а переходная характеристика (рис. 3.6) – по передаточной функции  $W_{z\omega}(p)$ .

Передаточная функция разомкнутой цепи для контура регулирования скорости при его настройке на ТО

$$W_{p\omega}(p) := \frac{(T_э \cdot p + 1) \cdot (T_{ом} \cdot p + 1)}{4 \cdot T_{п} \cdot p \cdot [2 \cdot T_{п} \cdot p \cdot (T_{п} \cdot p + 1) + 1] \cdot [(T_э + T_{ом}) \cdot p + 1]}$$

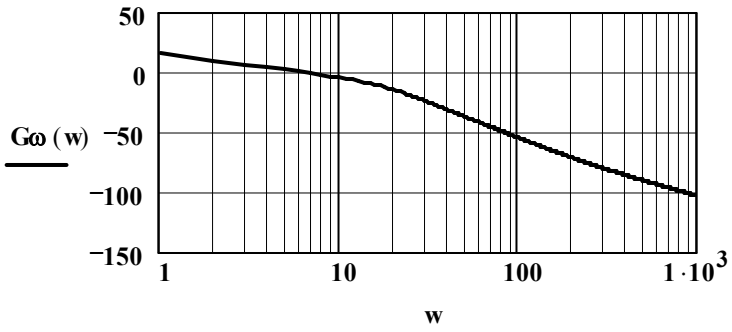
Формулы для расчета ЛАЧХ ЛФЧХ синтезированного контура регулирования скорости

$$G\omega(w) := 20 \cdot \log(|W_{p\omega}(i \cdot w)|)$$

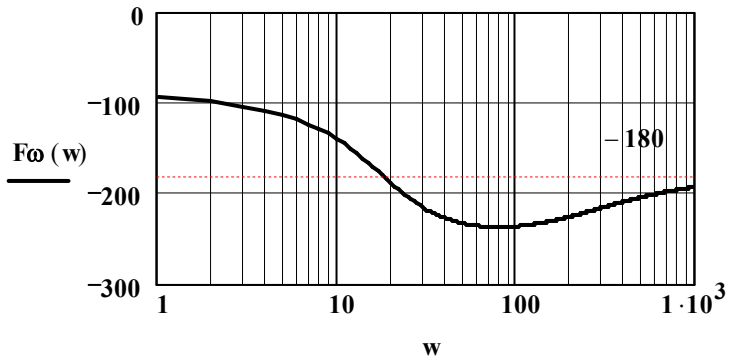
$$F1(w) := \arg \left[ \frac{(i \cdot w \cdot T_э + 1) \cdot (i \cdot w \cdot T_{ом} + 1)}{[i \cdot w \cdot (T_э + T_{ом}) + 1] \cdot [2 \cdot i \cdot w \cdot T_{п} \cdot (i \cdot w \cdot T_{п} + 1) + 1]} \right]$$

$$F\omega(w) := \left( F1(w) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

w := 1 .. 1000



a



b

Частота первоворота фазы (рад/с)

$$w := 10 \quad \text{Given} \quad F\omega(w) = -180w\pi := \text{Find}(w) \quad w\pi = 17.856$$

Запасы устойчивости по амплитуде (дБ) и фазе (в градусах)

$$\Delta G\omega := |G\omega(w\pi)| \quad \Delta G\omega = 12.442$$

$$\Delta F\omega := 180 + F\omega(w\pi) \quad \Delta F\omega = 60.651$$

### Расчет переходной характеристики для контура регулирования скорости при его настройке на ТО

Вектор коэффициентов характеристического полинома и сам характеристический полином для контура регулирования скорости при его настройке на ТО

$$a\omega := \begin{pmatrix} 1 \\ T_э + T_{ом} + 4 \cdot T_{п} \\ 8 \cdot T_{п}^2 + T_э \cdot T_{ом} + 4 \cdot T_{п} \cdot T_э + 4 \cdot T_{п} \cdot T_{ом} \\ 8 \cdot T_{п}^2 \cdot T_{ом} + 8 \cdot T_{п}^3 + 8 \cdot T_{п}^2 \cdot T_э \\ 8 \cdot T_{п}^3 \cdot T_{ом} + 8 \cdot T_{п}^3 \cdot T_э \end{pmatrix}$$

$$A\omega(p) := a\omega_4 \cdot p^4 + a\omega_3 \cdot p^3 + a\omega_2 \cdot p^2 + a\omega_1 \cdot p + 1$$

Производная от характеристического полинома, числитель передаточной функции корни характеристического уравнения для контура синтезированного регулирования скорости

$$S\omega(p) := \frac{d}{dp} A\omega(p)$$

$$B\omega(p) := \frac{(T_э \cdot p + 1) \cdot (T_{ом} \cdot p + 1) \cdot (T_{ос} \cdot p + 1)}{K_{ос}}$$

$$p\omega := \text{polyroots}(a\omega) \quad p\omega = \begin{pmatrix} -32.878 \\ -12.839 \\ -6.298 - 10.699i \\ -6.298 + 10.699i \end{pmatrix}$$

Задающее напряжение для контура регулирования скорости (В)

$$U_{3\omega} := \omega_0 \cdot K_{oc} \quad U_{3\omega} = 17.142$$

Переходная функция контура регулирования скорости при его настройке на ТО

$$\omega(t) := \omega_0 + U_{3\omega} \cdot \operatorname{Re} \left( \sum_{k=0}^3 \frac{B\omega(p\omega_k) \cdot \exp(p\omega_k \cdot t)}{p\omega_k \cdot S\omega(p\omega_k)} \right)$$

$$t := 0, 0.001 .. 0.8$$

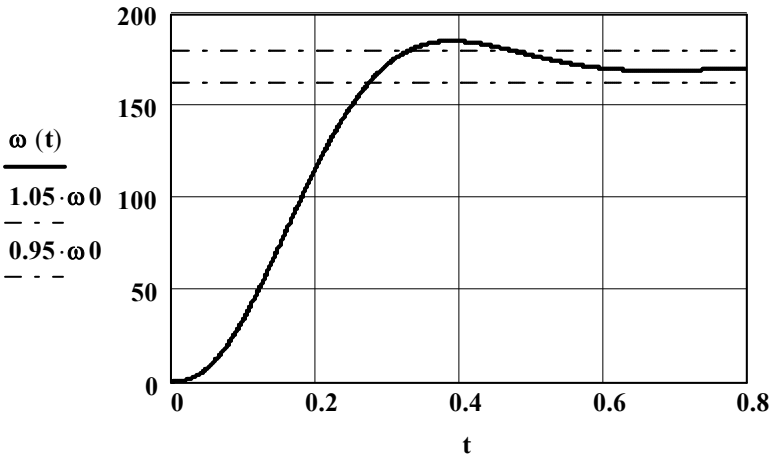


Рис. 3.6. Переходная характеристика контура регулирования скорости при его настройке на ТО

Время, соответствующее максимуму переходной характеристики для контура регулирования скорости при его настройках на ТО, с

$$t := 0.4 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega(t) = 0 \quad t_{\max} := \operatorname{Find}(t) \quad t_{\max} = 0.389$$

Максимальные значения скорости (рад/с) и перерегулирование (%)

$$\omega_{\max} := \omega(t_{\max}) \quad \omega_{\max} = 185.167$$

Перерегулирование (%)

$$\sigma_c := \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0} \cdot 100 \quad \sigma_c = 8.022$$

Время переходного процесса в контуре регулирования скорости (с) при его настройке на ТО

$$t := 0.4 \quad \text{Given} \quad \omega(t) = 1.05 \cdot \omega_0 \quad t_{\text{ппс}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{ппс}} = 0.472$$

Перерегулирование (%)

$$\sigma_c := \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0} \cdot 100 \quad \sigma_c = 8.022$$

Время переходного процесса в контуре регулирования скорости (с) при его настройке на ТО

$$t := 0.4 \quad \text{Given} \quad \omega(t) = 1.05 \cdot \omega_0 \quad t_{\text{ппс}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{ппс}} = 0.472$$

Таким образом, полученные характеристики несколько отличаются от характеристик систем, точно настроенных на ТО. В частности, запас устойчивости по амплитуде не является бесконечным, а составляет около 12,4 дБ, запас устойчивости по фазе примерно на  $5^\circ$  меньше, чем при точной настройке на ТО. Перерегулирование превысило 5 % и составило около 8 %, вследствие чего увеличилось время переходного процесса в контуре регулирования скорости ( $t_{\text{пп}} \approx 0,47$  с), однако оно все равно удовлетворяет требованию ТЗ, в соответствии с которым  $t_{\text{пп}} = 0,5$  с.

Поскольку регуляторы момента и скорости содержат в своих структурах интегрирующие звенья, каждый из контуров регулирования в ЭМС стал астатическим. Механическая характеристика синтезированной ЭМС (рис. 3.7) имеет прямоугольную форму, статическая ошибка при стабилизации скорости вращения двигателя равна нулю, а его крутящий момент ограничен на уровне пускового момента  $M_{\text{п}} = 2,5M_{\text{н}}$ .

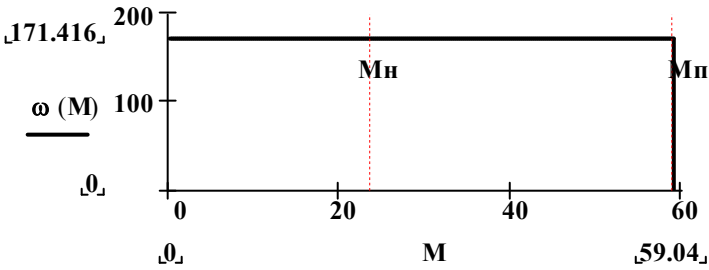


Рис.3.7. Механическая характеристика синтезированной ЭМС

#### 4. Электронное моделирование ЭМС

В соответствии с техническим заданием, требуется провести электронное моделирование контура регулирования скорости синтезированной ЭМС.

Разработаем электронную модель этого контура, эквивалентировав его разомкнутой системой. При этом воспользуемся передаточной функцией (\*\*), для которой известны числитель  $B_\omega(p)$  и знаменатель  $A_\omega(p)$ , причем

$$B_\omega(p) := \frac{(T_\omega \cdot p + 1) \cdot (T_{om} \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{K_{oc}}$$

$$A_\omega(p) := a\omega_4 \cdot p^4 + a\omega_3 \cdot p^3 + a\omega_2 \cdot p^2 + a\omega_1 \cdot p + 1$$

Кроме этого известны корни  $p_{\omega_k}$  характеристического уравнения  $A_\omega(p) = 0$ , вектор которых имеет вид

$$p_\omega = \begin{pmatrix} -32.878 \\ -12.839 \\ -6.298 - 10.699i \\ -6.298 + 10.699i \end{pmatrix}$$

В соответствии с приведенными выражениями, замкнутый синтезированный контур регулирования скорости может быть представлен последовательным соединением колебательного звена, двух инерционных форсирующих звеньев и форсирующего звена со следующими параметрами:

- колебательное звено:

$$\alpha := 6.298 \quad \beta := 10.699$$

$$\text{Коэффициент передачи} \quad K := \frac{B\omega(0)}{A\omega(0)} \quad K = 10$$

$$\text{Постоянная времени (с)} \quad T_{\text{кол}} := \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad T_{\text{кол}} = 0.081$$

$$\text{Коэффициент демпфирования} \quad \xi := \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad \xi = 0.519$$

- первое инерционное форсирующее звено:

Постоянные времени форсирующего и инерционного звеньев (с)

$$\tau_{\phi 1} := T_{\phi} \quad \tau_{\phi 1} = 0.026 \quad T_{i1} := \left| \frac{1}{p_{c1}} \right| \quad T_{i1} = 0.078$$

$$\text{Коэффициент передачи} \quad K_{\phi 1} := 1$$

- второе инерционное форсирующее звено:

Постоянные времени форсирующего и инерционного звеньев (с)

$$\tau_{\phi 2} := T_{\phi c} \quad \tau_{\phi 2} = 8 \times 10^{-3} \quad T_{i2} := \left| \frac{1}{p_{\omega 0}} \right| \quad T_{i2} = 0.034$$

$$\text{Коэффициент передачи} \quad K_{\phi 2} := 1$$



- форсирующее звено:  
Постоянная времени ( $\tau$ ) и коэффициент передачи

$$\tau_{\Phi 3} := \text{Том} \quad \tau_{\Phi 3} = 4 \times 10^{-3} \quad \text{К}\Phi := 1$$

На рис. 4.1 приведен один из вариантов реализации колебательного звена на операционных усилителях. Здесь приняты следующие параметры элементов (номиналы резисторов взяты с точностью до одного знака после десятичной точки):

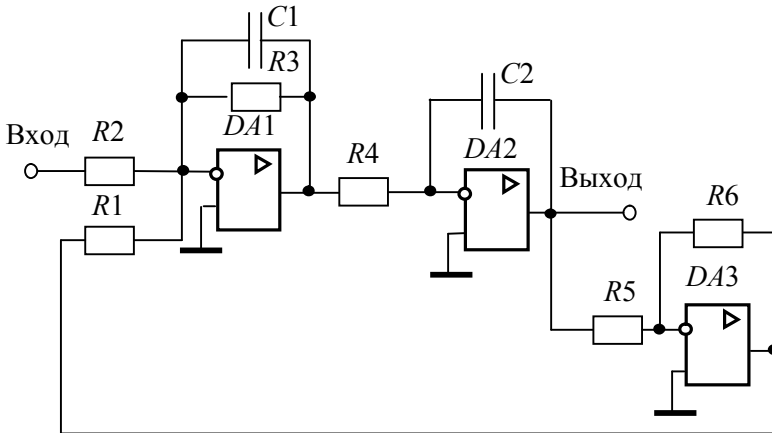


Рис. 4.1. Колебательное звено

$$R2 := 100 \text{ кОм} \quad R5 := 100 \text{ кОм} \quad R6 := 100 \text{ кОм}$$

$$C1 := 1 \text{ мкФ} \quad C2 := 1 \text{ мкФ}$$

$$R2 := 10^5 \text{ Ом} \quad R1 := \frac{R2}{K} \quad R1 = 1 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$R4 := T_{\text{кол}}^2 \cdot 10^7 \quad R4 = 3.037 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$R3 := \frac{\sqrt{R2 \cdot R4}}{2 \cdot \xi} \quad R3 = 5.305 \times 10^4 \text{ Ом}$$

Принимаются

$$R1 := 10 \text{ кОм} \quad R4 := 30.4 \text{ кОм} \quad R3 := 53 \text{ кОм}$$

На рис. 4.2 приведена реализация на операционных усилителях последовательного соединения двух инерционных форсирующих звеньев, у которых постоянная времени форсирующего звена меньше, чем у инерционного. Параметры элементов моделей следующие:

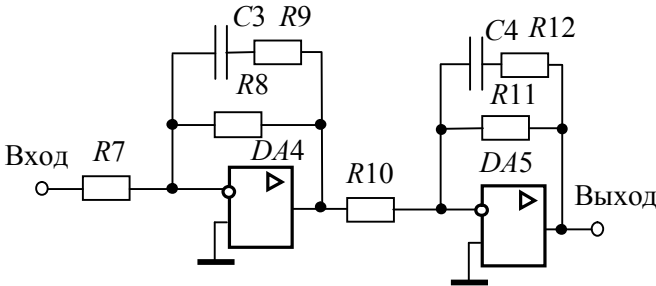


Рис. 4.2. Инерционные форсирующие звенья

1-е инерционное форсирующее звено

$$R9 := 100 \text{ кОм} \quad C3 := \frac{T_{и1}}{R9} \quad C3 := 0.78 \text{ мкФ}$$

$$R7 := \frac{T_{и1} - \tau \phi 1}{C3} \quad R7 := 66.6 \text{ кОм} \quad R8 = R7 = 66.6 \text{ кОм}$$

2-е инерционное форсирующее звено

$$R12 := 100 \text{ кОм} \quad C4 := \frac{\tau \phi 2}{R12} \quad C4 := 0.08 \text{ мкФ}$$

$$R11 := \frac{T_{и2} - \tau \phi 2}{C4} \quad R11 := 280 \text{ кОм} \quad R10 = R11 = 280 \text{ кОм}$$

На рис. 4.3 изображена электронная модель форсирующего звена, последовательно с которым включен инвертор сигнала, обеспечивающий четное количество операционных усилителей,

включенных между входом и выходом модели контура. Здесь приняты следующие номиналы элементов:

Форсирующее звено и инвертор

$$R13 := 100 \text{ кОм} \quad R14 = R13 = R15 = R16 = 100 \text{ кОм}$$

$$C5 := \frac{\tau \phi 3}{R13} \quad C5 := 0.04 \text{ мкФ}$$

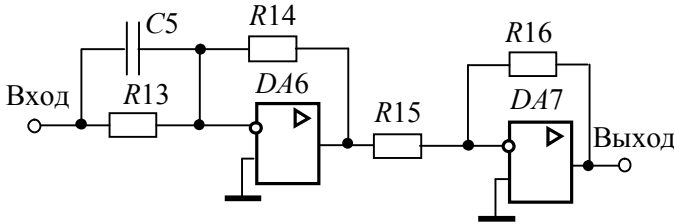


Рис. 4.3. Форсирующее звено и инвертор

На рис. 4.4 изображена функциональная схема электронной модели синтезированного контура регулирования скорости двигателя, состоящая из последовательно соединенных моделей, показанных на рис. 4.1 – 4.3. Ко входу этой модели подключается источник постоянного напряжения, а к ее выходу – осциллограф.

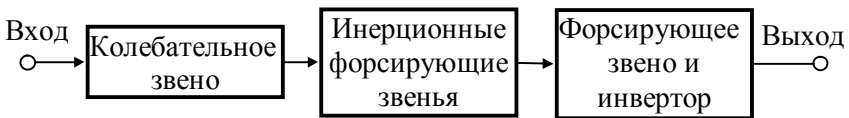
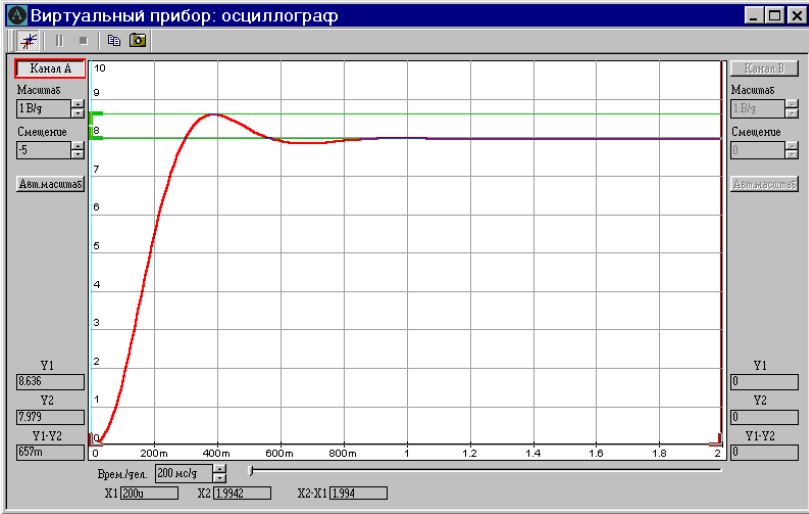
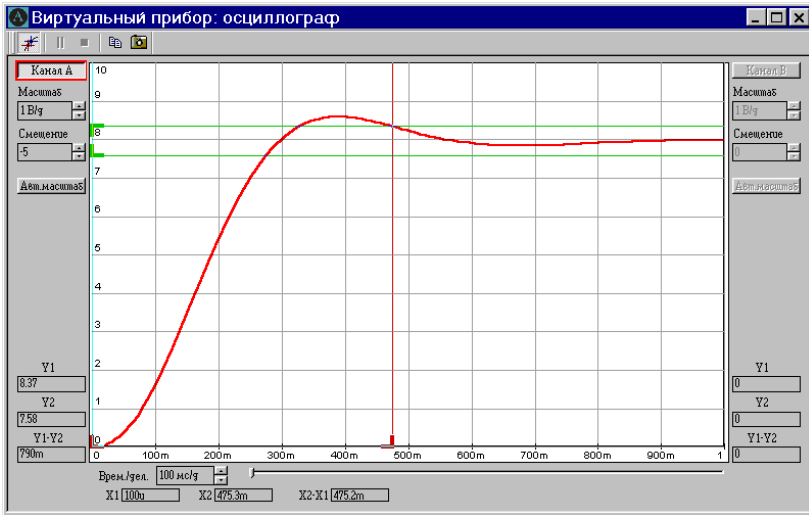


Рис. 4.4. Функциональная схема модели синтезированного контура регулирования скорости

На рис. 4.5 приведена осциллограмма выходного напряжения модели (рис. 4.4), отражающая переходную характеристику синтезированного контура регулирования скорости при подаче на вход модели напряжения  $U_{вх} = 1 \text{ В}$ .



а



б

Рис. 4.5. Осциллограмма выходного напряжения модели синтезированного контура регулирования скорости

Оценим полученные результаты. Согласно рис. 4.5, *a*, максимальное значение входного напряжения модели

$U_{\text{ВЫХ,МАХ}} = 8,636$  В, его установившееся значение

$U_{\text{ВЫХ,УСТ}} = 7,979$  В, тогда перерегулирование

$$\sigma_{\text{МОД}} = \frac{U_{\text{ВЫХ,МАХ}} - U_{\text{ВЫХ,УСТ}}}{U_{\text{ВЫХ,УСТ}}} \cdot 100 \approx 8,18 \%. \text{ Время переходного}$$

процесса, измеренное при  $U_{\text{ВЫХ}} = 1,05U_{\text{ВЫХ,УСТ}} \approx 8,37$  В (рис. 4.5,

*б*), равно  $t_{\text{ПП,МОД}} \approx 0,475$  с. Относительная погрешность моделирования

- перерегулирования:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{МОД}} - \sigma_{\text{С}}}{\sigma_{\text{С}}} \cdot 100 = \frac{8,18 - 8,022}{8,022} \cdot 100 \approx 2 \%;$$

- времени переходного процесса:

$$\delta_{t_{\text{ПП}}} = \frac{t_{\text{ПП,МОД}} - t_{\text{ППС}}}{t_{\text{ППС}}} \cdot 100 = \frac{0,475 - 0,472}{0,472} \cdot 100 \approx 0,6 \%,$$

что демонстрирует практически полную адекватность модели объекту моделирования.

## 5. Выводы по результатам проведенных исследований

Проведенные исследования показали, что:

- заданная нескорректированная ЭМС имеет низкое быстродействие, особенно в контуре регулирования момента (время переходного процесса составляет около 3,7 с против заданного 0,5 с для всей ЭМС), низкую статическую точность (статизм МХ при работе контура регулирования скорости составил около 3,4 % против заданного в ТЗ 1 %);
- при настройке каждого из контуров ЭМС удалось обеспечить ее заданной быстродействие (время переходного процесса в синтезированной ЭМС составило около 0,47 с), подчиненное регулирование и астатизм

- первого порядка для каждого из контуров регулирования;
- результаты расчетов подтверждены электронным моделированием синтезированного контура регулирования скорости двигателя, погрешность моделирования не превысила 2 %.