

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ,
ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЕ КРУТЯЩЕГО
МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ, СЛЕДЯЩЕЙ ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ**

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине
«Теория автоматического управления»

Вариант 344

Выполнил:
Студент гр. 360-1
_____М.М. Поддубный
«____» _____ 2023 г.

Принял:
Доцент кафедры ПрЭ
_____Ю.М. Лебедев
«____» _____ 2023 г.

Томск, 2023

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на курсовой проект по дисциплине

«Теория автоматического управления»

Тема проекта: анализ и синтез электромеханической системы, осуществляющей регулирование крутящего момента двигателя, следящей за перемещением.

Вариант: 344

Структурная схема: заданы ОСС, ОСМ, компенсационная обратная связь по скорости.

Компенсация влияния скорости момент и момента на скорость (K_{KW} , K_{KM})

Статическая точность по скорости $\Delta\omega = 2,5\%$

Параметры структурной схемы

Отношение электромеханической и электромагнитной

постоянных времени _____ $k = T_M/T_\Sigma = 4$

Постоянная времени преобразователя _____ $T_\Pi = 0,005$ с

Коэффициент передачи преобразователя _____ $K_\Pi = 40$

Постоянная времени цепи обратной связи:

по моменту _____ $T_{OM} = 0,002$ с

по скорости _____ $T_{OC} = 0,004$ с

Время переходного процесса в синтезированной

ЭМС не более _____ $t_{пп} = 0,25$ с

Параметры электродвигателя:

Номинальная мощность _____ $P_H = 1,5$ кВт

Номинальная скорость вращения _____ $n_H = 2000$ об/мин

Номинальный ток _____ $I_H = 9$ А

Активное сопротивление двигателя _____ $R_d = 2$ Ом

Активное сопротивление цепи якоря _____ $R_{ця} = 4$ Ом

Момент инерции двигателя _____ $J = 0,042$ кг·м²

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 _____ (доцент каф. ПрЭ, Лебедев Ю.М.)

Задание принял к исполнению _____ Поддубный М.М.

Перв. примен.	<div>СОДЕРЖАНИЕ</div> <div>ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ 2</div> <div>1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВЕЛИЧИН 5</div> <div>2. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ЭМС 8</div> <div> 2.1 Анализ контура регулирование момента 8</div> <div>2.2 АНАЛИЗ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ..... 15</div> <div> 2.3 Механическая характеристика нескорректированной ЭМС..... 22</div> <div>3. СИТНЕЗ ЭМС..... 23</div> <div> 3.1. Синтез контура регулирования момента 23</div> <div> 3.2 Синтез контура регулирования скорости 28</div> <div>4. ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС 35</div> <div>ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 41</div> <div>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... 42</div>																																																												
	Справ. №																																																												
Подп. и дата																																																													
	Инов. № дубл.																																																												
Взам. инв. №																																																													
	Подп. и дата																																																												
Инов. № подл.																																																													
	<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="4" rowspan="2">ФЭТ КП.ХХХХХ.344</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ докум.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td><td rowspan="5">Анализ и синтез электромеханической системы, осуществляющей регулирование крутящего момента двигателя, следящей за перемещением</td><td>Лит.</td><td>Лист</td><td>Листов</td></tr><tr><td>Разраб.</td><td></td><td>Поддубный М.М.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Пров.</td><td></td><td>Лебедев Ю.М.</td><td></td><td></td><td></td><td>4</td><td>42</td></tr><tr><td>Т. Контр.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="3" rowspan="2">ТУСУР ФЭТ каф. ПрЭ гр. 360-1</td></tr><tr><td>Н. Контр.</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Утв.</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										ФЭТ КП.ХХХХХ.344									Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Анализ и синтез электромеханической системы, осуществляющей регулирование крутящего момента двигателя, следящей за перемещением	Лит.	Лист	Листов	Разраб.		Поддубный М.М.						Пров.		Лебедев Ю.М.				4	42	Т. Контр.					ТУСУР ФЭТ каф. ПрЭ гр. 360-1			Н. Контр.					Утв.			
					ФЭТ КП.ХХХХХ.344																																																								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Анализ и синтез электромеханической системы, осуществляющей регулирование крутящего момента двигателя, следящей за перемещением	Лит.	Лист	Листов																																																					
Разраб.		Поддубный М.М.																																																											
Пров.		Лебедев Ю.М.					4	42																																																					
Т. Контр.						ТУСУР ФЭТ каф. ПрЭ гр. 360-1																																																							
Н. Контр.																																																													
Утв.																																																													

1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВЕЛИЧИН

На рис. 1.1 изображена структурная схема заданной ЭМС, соответствующая техническому заданию (ТЗ).

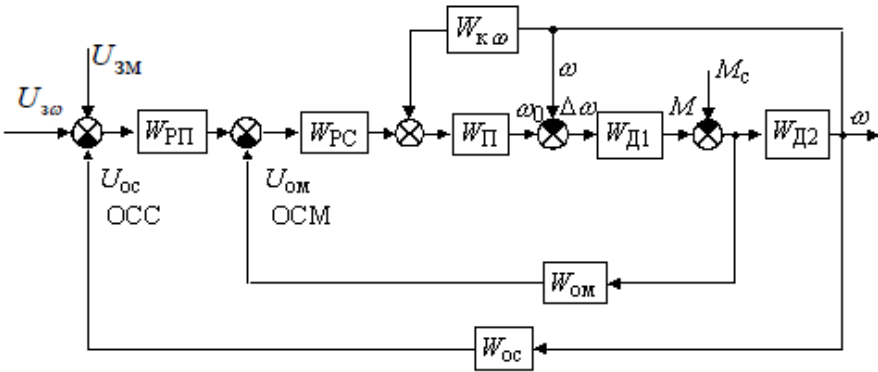


Рисунок 1.1 – Структурная схема заданной ЭМС

Структура по рис. 1.1 содержит два контура: контур регулирования крутящего момента двигателя, замкнутого обратной связью с передаточной

функцией $W_{ом}(p) = \frac{K_{ом}}{T_{ом}p + 1}$ и контур регулирования (стабилизации)

скорости вращения двигателя замкнутого обратной связью с передаточной

функцией $W_{ос}(p) = \frac{K_{ос}}{T_{ом}p + 1}$ Управление работой двигателя осуществляется с

помощью преобразователя с передаточной функцией $W_{п} = \frac{K_{п}/C}{T_{п}p + 1}$, который

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

$W_{д1}(p) = \frac{K_{д1}}{T_{э}p + 1}$ и $W_{д2}(p) = \frac{K_{д2}}{T_{м}p}$ (параметры этих передаточных функций

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Структура по рис. 1.1 содержит два контура: контур регулирования
					крутящего момента двигателя, замкнутого обратной связью с передаточной
					функцией $W_{\text{ом}}(p) = \frac{K_{\text{ом}}}{T_{\text{ом}}p + 1}$ и контуррегулирования (стабилизации)
					скорости вращения двигателя замкнутого обратной связью с передаточной
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	функцией $W_{\text{ос}}(p) = \frac{K_{\text{ос}}}{T_{\text{ом}}p + 1}$ Управление работой двигателя осуществляется с
					помощью преобразователя с передаточной функцией $W_{\text{п}} = \frac{K_{\text{п}}/C}{T_{\text{п}}p + 1}$, который
					изменяет скорость вращения якоря двигателя путем изменения напряжения,
					приложенного к якорной цепи. Двигатель постоянного тока с независимым
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	возбуждением представлен звеньями с передаточными функциями
					функцией $W_{\text{д1}}(p) = \frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{э}}p + 1}$ и $W_{\text{д2}}(p) = \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{м}}p}$ (параметры этих передаточных функций
					ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344
					Лист
					5

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.

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 отдельно. Если работает контур регулирования момента, то контур регулирования скорости отключен, и, наоборот, если работает контур регулирования скорости, то отключен контур регулирования момента.

Также в схеме присутствует компенсационная обратная связь по скорости. Эта компенсационная связь необходима для того, чтобы разорвать обратную связь, объединяющую звенья $W_{d1}(p)$ и $W_{d2}(p)$. Полная компенсация влияния скорости на крутящий момент двигателя будет только тогда, когда за счет компенсационной связи по скорости $W_{K\omega}(p)$ эта связь будет скомпенсирована. Тогда, за счет интегрирующего звена, расположенного на выходе системы, при постоянном моменте $M=M_{II}$ скорость будет неограниченно нарастать по линейному закону. В статическом режиме работы для контура регулирования момента это будет соответствовать вертикальному участку на механической характеристике.

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

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Эта компенсационная связь необходима для того, чтобы разорвать обратную связь, объединяющую звенья $W_{Д1}(p)$ и $W_{Д2}(p)$. Полная компенсация влияния скорости на крутящий момент двигателя будет только тогда, когда за счет компенсационной связи по скорости $W_{K\omega}(p)$ эта связь будет скомпенсирована. Тогда, за счет интегрирующего звена, расположенного на выходе системы, при постоянном моменте $M=M_{П}$ скорость будет неограниченно нарастать по линейному закону. В статическом режиме работы для контура регулирования момента это будет соответствовать вертикальному участку на механической характеристике.				
					Ниже в среде MathCAD рассчитаны другие параметры передаточных функций структурной схемы.				

$$\begin{array}{lll} W_{\Pi}(p) := \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi} \cdot p + 1} & W_{\text{oc}}(p) := \frac{K_{\text{oc}}}{T_{\text{oc}} \cdot p + 1} & \\ W_{\text{д1}}(p) := \frac{K_{\text{д1}}}{T_{\text{э}} \cdot p + 1} & W_{\text{д2}}(p) := \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{м}} \cdot p} & W_{\text{om}}(p) := \frac{K_{\text{om}}}{T_{\text{om}} \cdot p + 1} \end{array}$$
$$\omega_H := \frac{N_H}{60} \cdot 2 \quad \omega_H = 209.44 \text{ - номинальная скорость вращения двигателя (рад/с)}$$

$$C := \frac{U_H - I_H \cdot R}{\omega_H} \quad C = 0.964 \text{ - машинная постоянная (В*с)}$$

$$\omega_0 := \frac{U_H}{C} \quad \omega_0 = 228.102 \text{ - скорость холостого хода}$$
$$\Delta\omega_H := (\omega_0 - \omega_H) \cdot \frac{R_{\text{---}}}{k_d} \Delta\omega_H = 37.326$$

$$K_{d1} := \frac{M_H}{\Delta \omega_H} K_{d1} = 0.233 \text{ - добротность механической характеристики (Н*м*с)}$$

$$T_M := \frac{J}{K_{d1}} T_M = 0.181 \quad \text{- Электромеханическая постоянная времени (с)}$$

$$K_{\text{ом}} := \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot M_{\text{н}}} K_{\text{ом}} = 0.576 \quad \text{- максимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования момента (1/(A*c))}$$

$K_{ос} := \frac{U_{л}}{\omega_{н}}$	$K_{ос} = 0.048$ - минимальный коэффициент передачи обратной связи в контуре регулирования скорости (В*с)
$K_{ос} := 0.1$	

2. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ЭМС

На рис. 2.1. приведена структурная схема заданной ЭМС, в которой $W_{pc}(p) = W_{pm}(p) = 1$

Для этой структуры проведем анализ каждого из контуров.

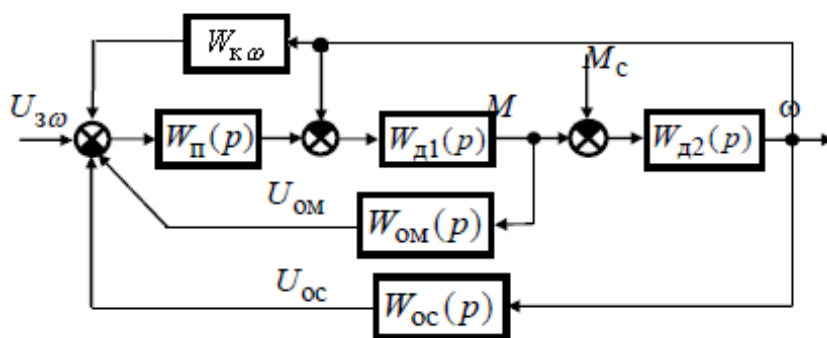


Рисунок 2.1. Структурная схема для анализа заданной ЭМС

2.1 Анализ контура регулирования момента

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

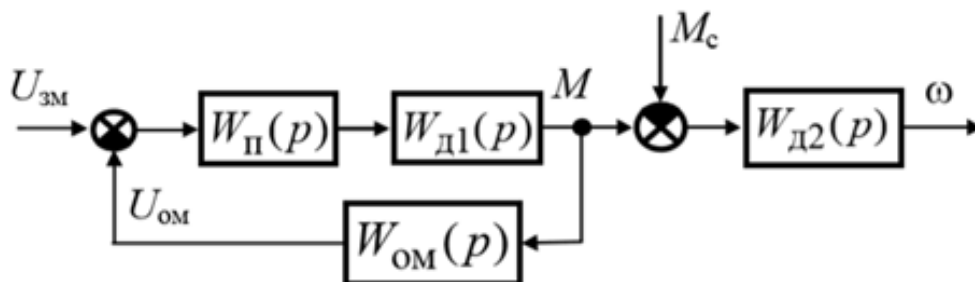


Рисунок 2.2 - Структурная схема для анализа контура регулирования момента.

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

Передаточная функция контура регулирования момента относительно момента

$$W_M(p) = \frac{W_{\Pi}(p) \cdot W_{д1}(p)}{1 + W_{\Pi}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{om}(p)} = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{\Pi}p + 1} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{з}p + 1}}{1 + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{\Pi}p + 1} \cdot \frac{K_{ом}}{T_{ом}p + 1}} = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{д1} \cdot (T_{ом}p + 1)}{(T_{з}p + 1) \cdot (T_{\Pi}p + 1) \cdot (T_{ом}p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{д1} \cdot K_{ом}}$$

Передаточная функция контура регулирования момента относительно момента

$$W_M(p) = \frac{W_{\Pi}(p) \cdot W_{Д1}(p)}{1 + W_{\Pi}(p) \cdot W_{Д1}(p) \cdot W_{ОМ}(p)} = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C} \cdot \frac{K_{Д1}}{T_{\Pi} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_{Э} \cdot p + 1}}{1 + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot \frac{K_{Д1}}{T_{\Pi} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{ОМ}}{T_{ОМ} \cdot p + 1}} = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot (T_{ОМ} \cdot p + 1)}{(T_{Э} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{ОМ} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{ОМ}}$$

$$W_M(p) := \frac{\frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot (T_{ОМ} \cdot p + 1)}{(T_{Э} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{ОМ} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{ОМ}}$$

Характеристический полином

$$A_M(p) := (T_{Э} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{ОМ} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{ОМ}$$

Вектор характеристического полинома для контура регулирования момента

$$a_M := \begin{pmatrix} \frac{K_{\Pi} \cdot K_{Д1} \cdot K_{ОМ}}{C} + 1 \\ T_{Э} + T_{\Pi} + T_{ОМ} \\ T_{Э} \cdot T_{\Pi} + T_{Э} \cdot T_{ОМ} + T_{\Pi} \cdot T_{ОМ} \\ T_{Э} \cdot T_{\Pi} \cdot T_{ОМ} \end{pmatrix}$$

Анализ устойчивости контура по критерию Гурвица

$$\Delta_M := \begin{vmatrix} a_{M2} & a_{M0} \\ a_{M3} & a_{M1} \end{vmatrix} \quad \Delta_M = 1.089 \times 10^{-5} \quad \text{- контур устойчив}$$

$$a_{M2} \cdot a_{M1} - a_{M0} \cdot a_{M3} = 0$$

+

$$a_{M2} \cdot a_{M1} - K_{Мгр} \cdot a_{M3} = 0$$

$$K_{Мгр} := \frac{a_{M1} \cdot a_{M2}}{a_{M3}} \quad K_{Мгр} = 36.66$$

Коэффициент передачи разомкнутой цепи контура регулирования момента

$$K_{Мр} := \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{ОМ} \quad K_{Мр} = 12.538$$

 $K_{Мр} = 12.538 < K_{Мгр} = 36.66$, значит, устойчивость контура доказана

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div><div><div>$\begin{pmatrix} 19 \cdot I_{П1} + 19 \cdot I_{ОМ} + I_{П1} \cdot I_{ОМ} \\ T_Э \cdot T_{П1} \cdot T_{ОМ} \end{pmatrix}$</div></div></div> <div><div><div><u>Анализ устойчивости контура по критерию Гурвица</u></div></div></div> <div><div><div>$\Delta_m := \left \begin{pmatrix} a_{m2} & a_{m0} \\ a_{m3} & a_{m1} \end{pmatrix} \right$</div><div>$\Delta_m = 1.089 \times 10^{-5} \quad \text{- контур устойчив}$</div></div></div> <div><div><div>$a_{m2} \cdot a_{m1} - a_{m0} \cdot a_{m3} = 0$</div><div>$a_{m2} \cdot a_{m1} - K_{мгр} \cdot a_{m3} = 0$</div></div></div> <div><div><div>$K_{мгр} := \frac{a_{m1} \cdot a_{m2}}{a_{m3}}$</div><div>$K_{мгр} = 36.66$</div></div></div> <div><div><div>Коэффициент передачи разомкнутой цепи контура регулирования момента</div></div></div> <div><div><div>$K_{мр} := \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{д1} \cdot K_{ом}$</div><div>$K_{мр} = 12.538$</div></div></div> <div><div><div>$K_{мр} = 12.538 < K_{мгр} = 36.66, \text{ значит, устойчивость контура доказана}$</div></div></div>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	Лист
						9



Логарифмические и частотные характеристики

Расчетная формула для точной ЛАЧХ

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

$$\omega := 1, 1.1 \dots 999.9$$

На рис. 2.3 показан график ЛАЧХ И ЛФЧХ контура регулирования момента

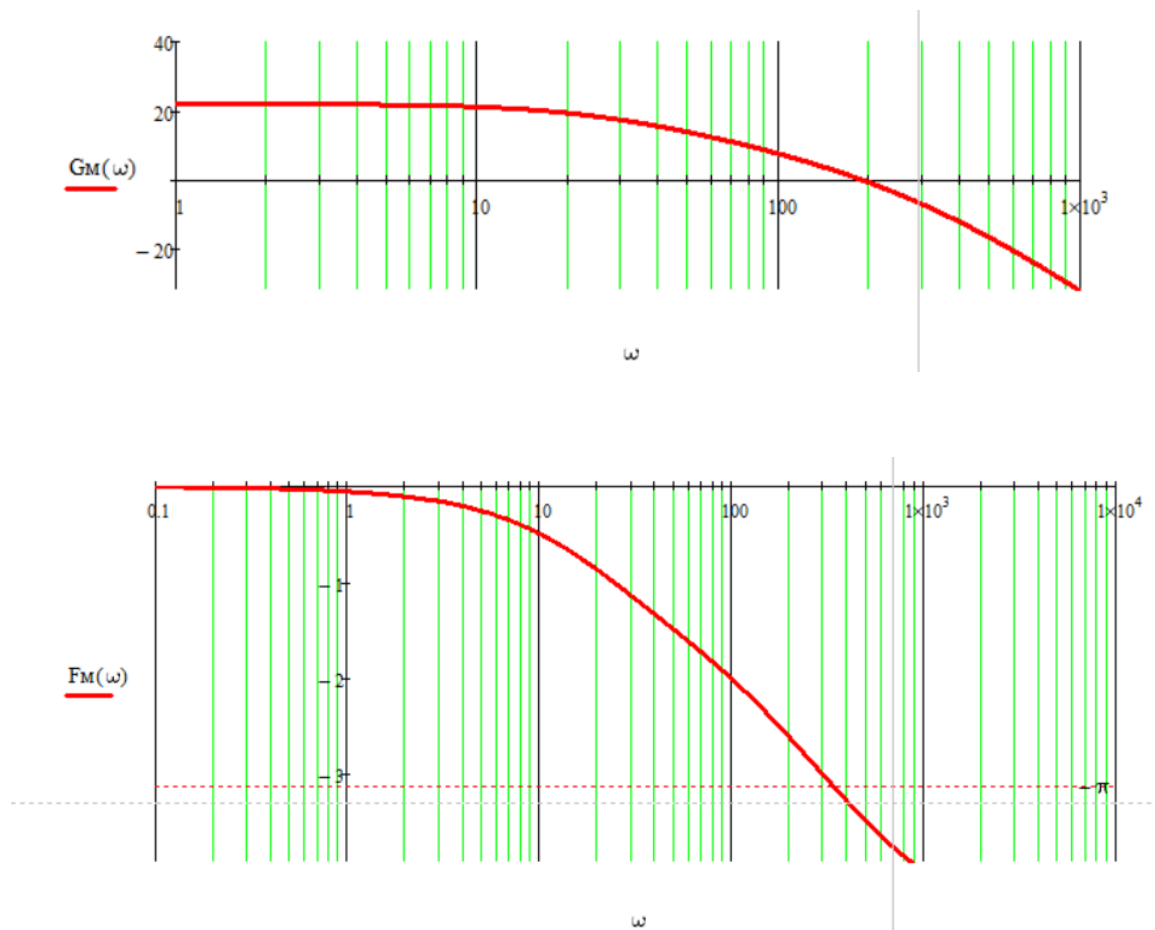


Рисунок 2.3. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) контура регулирования момента

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344

Лист

10

Частота среза:

$$\omega := 190 \quad \text{Given} \quad G_M(\omega) = 0 \quad \omega_{cp} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{cp} = 188.058$$

Частота переворота фазы

$$\omega := 330 \quad \text{Given} \quad F_M(\omega) = -\pi \quad \omega_{\pi} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\pi} = 339.858$$

Запас устойчивости по фазе (в градусах)

$$\Delta F_M := (\pi + F_M(\omega_{cp})) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Delta F_M = 32.867$$

Запас устойчивости по амплитуде (дБ)

$$\Delta G_M := |G_M(\omega_{\pi})| \quad \Delta G_M = 9.319$$

Расчет и построение переходных характеристик контура.

Определение показателей качества регулирования

Числитель, характеристический полином, вектор коэффициентов характеристического полинома и его производная по переменной p передаточной функции контура регулирования момента относительно момента

$$B_M(p) := \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot (T_{\text{Ом}} \cdot p + 1)$$

$$A_M(p) := (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{Ом}} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{Д1} \cdot K_{\text{Ом}}$$

$$S_M(p) := \frac{d}{dp} A_M(p)$$

$$a_M := \begin{pmatrix} \frac{K_{\Pi} \cdot K_{Д1} \cdot K_{\text{Ом}}}{C} + 1 \\ T_{\Sigma} + T_{\Pi} + T_{\text{Ом}} \\ T_{\Sigma} \cdot T_{\Pi} + T_{\Sigma} \cdot T_{\text{Ом}} + T_{\Pi} \cdot T_{\text{Ом}} \\ T_{\Sigma} \cdot T_{\Pi} \cdot T_{\text{Ом}} \end{pmatrix}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Корни характеристического уравнения

$$p_m := \text{polyroots}(a_m) \quad p_m = \begin{pmatrix} -613.545 \\ -54.301 + 214.295i \\ -54.301 - 214.295i \end{pmatrix}$$

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

$$M_{\text{п}} := 2.5 \cdot M_{\text{н}} \quad M_{\text{п}} = 21.701$$

Задающее напряжение для контура регулирования момента (В):

$$U_{\text{зм}} := M_{\text{п}} \cdot \left(K_{\text{ом}} + \frac{C}{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}}} \right) U_{\text{зм}} = 30.461$$

Установившееся значение момента отсечки

$$M_0 := U_{\text{зм}} \cdot \frac{B_m(0)}{A_m(0)} \quad M_0 = 21.701$$

Переходная функция по задающему воздействию для контура регулирования момента

$$M(t) := M_0 + U_{\text{зм}} \cdot \text{Re} \left[\sum_{k=0}^2 \left(\frac{B_m(p_{mk}) \cdot \exp(p_{mk} \cdot t)}{p_{mk} \cdot S_m(p_{mk})} \right) \right]$$

На рисунке 2.4 показана рассчитанная по приведенным переходным функциям переходная характеристика контура регулирования момента по задающему воздействию (по оси абсцисс – время в секундах, по оси ординат – скорость в рад/с). ниже определено время переходного процесса по задающему воздействию (с), перерегулирование по задающему воздействию.

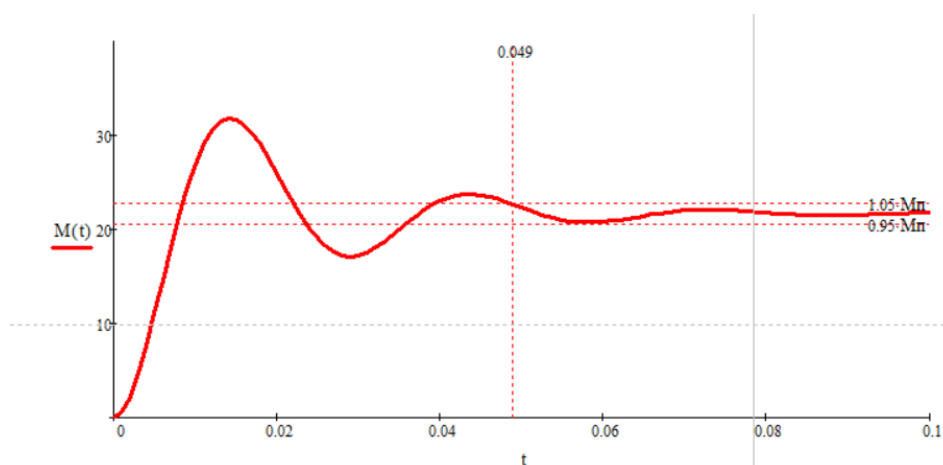


Рис. 2.4. Переходные характеристики контура регулирования момента

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП. XXXXXX.344					Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

t

Время переходного процесса относительно момента

$$t := 0.05 \text{ Given } M(t) = 1.05 \cdot M_{\text{п}} \quad t_{\text{тп}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{тп}} = 0.049$$

Время, соответствующее максимуму

$$t := 0.01 \text{ Given } \frac{d}{dt} M(t) = 0 \quad t_{\text{тм}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{тм}} = 0.014$$

Максимальное значение

$$M_{\text{max}} := M(t_{\text{тм}}) \quad M_{\text{max}} = 22.786$$

Перерегулирование при подаче задающего воздействия

$$\sigma_{\text{гм}} := \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} \quad \sigma_{\text{гм}} = 5 \cdot \%$$

Переходный процесс в контуре регулирования момента имеет колебательный характер. При этом время переходного процесса в контуре меньше требуемого по ТЗ.

Передаточная функция контура регулирования момента относительно скорости

$$W_{\omega}(p) = W_M(p) \cdot W_{d2}(p) = \frac{\frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}}}{C} \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1)}{(T_{\text{п}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{э}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1) + \frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}}{C}} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{м}} \cdot p}$$

$$W_{\omega}(p) := \frac{\frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}}}{C} \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1)}{(T_{\text{п}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{э}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1) + \frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}}{C}} \cdot \frac{K_{\text{д2}}}{T_{\text{м}} \cdot p}$$

$$\Omega(p) := \frac{U_{\text{зм}} \cdot \frac{K_{\text{п}}}{C} \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1)}{\left[(T_{\text{п}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{э}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{ом}} \cdot p + 1) + \frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{ом}}}{C} \right] \cdot T_{\text{м}} \cdot p^2}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП. XXXXXXXX.344					Лист
										13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Составляющая скорости, определяемая простыми полюсами передаточной функции

$$\omega_1(t) := U_{zm} \cdot \frac{K_{л2}}{T_m} \cdot \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^2 \frac{B_m(p_k) \cdot \exp(p_k \cdot t)}{(p_k)^2 \cdot S_m(p_k)} \right]$$

Составляющая скорости определяемая нулевыми полюсами крастности 2 передаточной функции

$$\omega_2(t, p) := U_{zm} \cdot \frac{K_{л2}}{T_m} \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{d}{dp} \frac{B_m(p) \cdot \exp(p \cdot t)}{A_m(p)} \right) \quad \omega_{00} := \frac{K_{п}}{C} \cdot (U_{zm} - M_{п}) \cdot K_{о1} \quad \omega_{00} = 93.315 \quad \omega_0 = 228.102$$

Переходная характеристика

$$\Delta \omega := M_{п} \cdot \frac{B_m(0)}{A_m(0)} \quad \Delta \omega = 15.46$$

$$\omega_{sum}(t) := \omega_1(t) + \omega_2(t, 0)$$

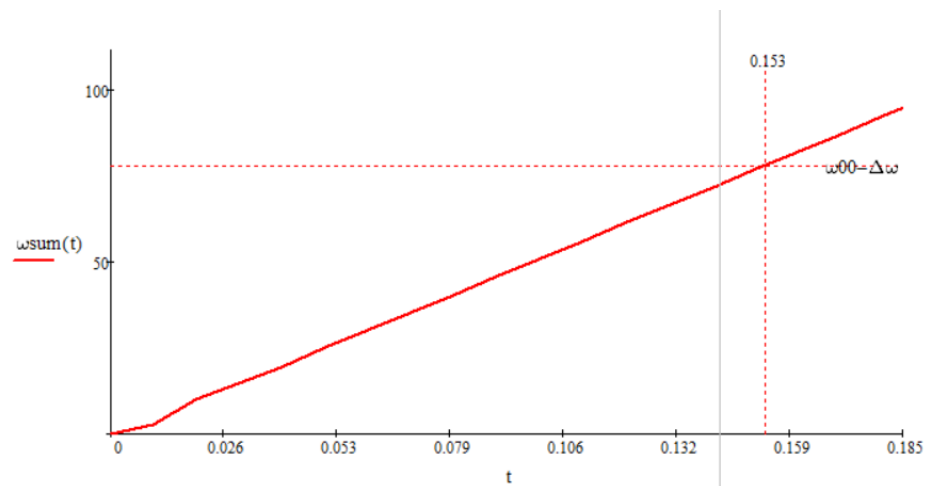
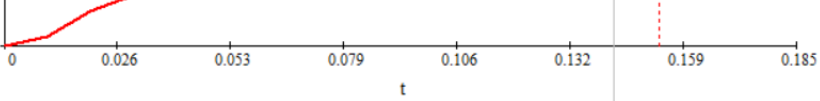


Рисунок 2.5 - Переходная характеристика кон относительно скорости.

Время пуска системы до отключения компенсационной связи:

$$t := 0.3 \quad \text{Given} \quad \omega_{sum}(t) = \omega_{00} - \Delta \omega \quad t_{nm} := \text{Find}(t) \quad t_{nm} = 0.153$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата					
					Рисунок 2.5 - Переходная характеристика кон относительно скорости.				
					Время пуска системы до отключения компенсационной связи:				
					$t := 0.3 \text{ Given } \omega_{sum}(t) = \omega_{00} - \Delta\omega_{nm} := \text{Find}(t) \text{ } \omega_{nm} = 0.153$				

2.2 АНАЛИЗ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

На рис. 2.6 приведена структурная схема для анализа контура регулирования скорости. На ней схеме преобразователь и двигатель охвачены эквивалентной отрицательной обратной связью с передаточной функцией

$$W_{\text{осэкв}}(p) = \frac{1}{W_p(p)} + W_{\text{ос}}(p) = \frac{C \cdot \left[(T_p \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{ос}} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{\text{ос}} \right]}{(T_{\text{ос}} \cdot p + 1) \cdot K_p}$$

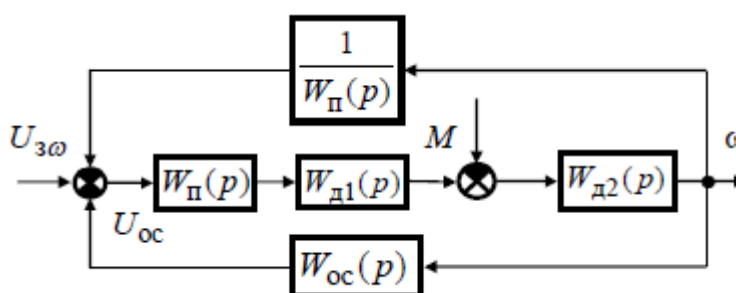


Рис. 2.6. Структурная схема для анализа контура регулирования скорости

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

Передаточная функция разомкнутой цепи:

$$W_{\text{рц.}\omega}(p) = W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{д2}(p) \cdot W_{\text{ос.экв}}(p) = \frac{\frac{K_{п}}{C}}{T_{п}p + 1} \cdot \frac{K_{д1}}{T_{з}p + 1} \cdot \frac{K_{д2}}{T_{м}p} \cdot \frac{C \cdot \left[(T_{п}p + 1) \cdot (T_{\text{ос}}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{\text{ос}} \right]}{K_{п} \cdot (T_{\text{ос}}p + 1)} = \frac{(T_{п}p + 1) \cdot (T_{\text{ос}}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{\text{ос}}}{T_{м}p \cdot (T_{з}p + 1) \cdot (T_{п}p + 1) \cdot (T_{\text{ос}}p + 1)}$$

$$W_{\text{рц.}\omega}(p) := \frac{(T_{п}p + 1) \cdot (T_{\text{ос}}p + 1) + \frac{K_{п}}{C} \cdot K_{\text{ос}}}{T_{м}p \cdot (T_{з}p + 1) \cdot (T_{п}p + 1) \cdot (T_{\text{ос}}p + 1)}$$

Передаточная функция замкнутой цепи по задающему воздействию:

$$W_{zg_w(p)} = \frac{W_n(p) \cdot W_{d1}(p) \cdot W_{d2}(p)}{1 + W_{pu_w(p)}} = \frac{\frac{K_p}{C} \cdot \frac{K_{d1}}{T_z \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{d2}}{T_m \cdot p}}{\frac{(T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}{1 + \frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}} = \frac{\frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}$$

$$W_{zg_w(p)} := \frac{\frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}$$

Передаточная функция замкнутой цепи по возмущающему воздействию:

$$W_{zf_w(p)} = \frac{W_{d2}(p)}{1 + W_{pu_w(p)}} = \frac{\frac{K_{d2}}{T_m \cdot p}}{\frac{(T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}{1 + \frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}} = \frac{K_{d2} \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}$$

$$W_{zf_w(p)} = \frac{K_{d2} \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}$$

$$W_{zg_w(p)} = \frac{\frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)}{T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}}$$

Характеристический полином:

$$A_w(p) := T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}$$

Вектор коэффициентов характеристического полинома:

$$a_w := \begin{pmatrix} \frac{K_{oc} \cdot K_p}{C} + 1 \\ T_m + T_n + T_{oc} \\ T_z \cdot T_m + T_m \cdot T_n + T_m \cdot T_{oc} + T_n \cdot T_{oc} \\ T_z \cdot T_m \cdot T_n + T_z \cdot T_m \cdot T_{oc} + T_m \cdot T_n \cdot T_{oc} \\ T_z \cdot T_m \cdot T_n \cdot T_{oc} \end{pmatrix}$$

Главный минор определителя Гурвица

$$\Delta_w := \begin{vmatrix} a_{w3} & a_{w1} & 0 \\ a_{w4} & a_{w2} & a_{w0} \\ 0 & a_{w3} & a_{w1} \end{vmatrix} \quad \Delta_w = 1.067 \times 10^{-7} \quad - \text{ контур устойчив}$$

Коэффициент передачи контура:

$$K_{pw} := \frac{K_{oc} \cdot K_p}{C} \quad K_{pw} = 4.147$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Дата
ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					Лист
					16

Граничный коэффициент передачи контура:

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

$Kg\omega = 22.141$

$Kg\omega > Kp\omega$, следовательно контур устойчив

Граничный коэффициент передачи контура:

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

$Kg\omega = 10.662$

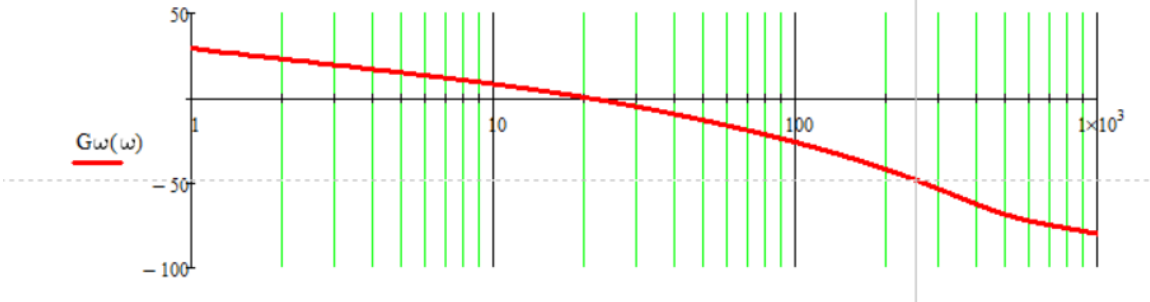
$Kg\omega > Kp\omega$, следовательно контур устойчив

На рис. 2.7 показана ЛАЧХ и ЛФЧХ нескорректированного контура

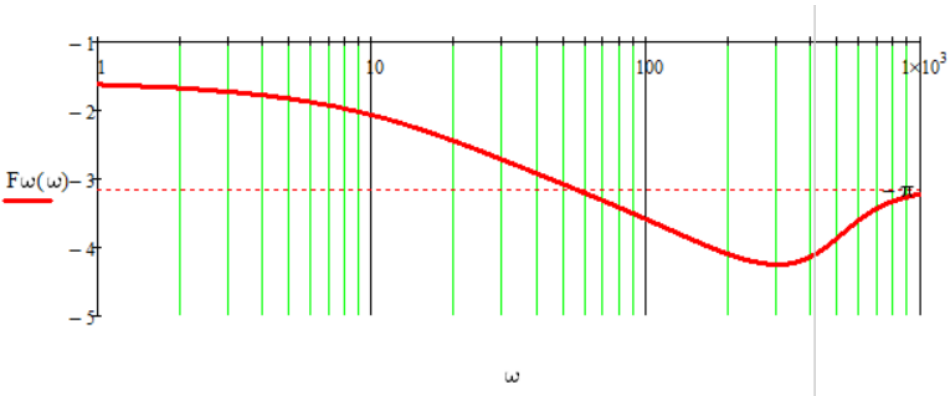
Расчет и построение переходных характеристик контура.
Определение показателей качества регулирования

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

$\omega := 1, 1.1 \dots 999.9$



а



б

Рис. 2.7. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) нескорректированного контура регулирования скорости

Инт. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инт. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Частота среза (рад/с):

$$\omega := 10 \quad \text{Given} \quad G\omega(\omega) = 0 \quad \omega_{cp} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{cp} = 20.646$$

Частота переворота фазы:

$$\omega := 20 \quad \text{Given} \quad F\omega(\omega) = -\pi \quad \omega_{\pi} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\pi} = 54.609$$

Запас устойчивости по фазе (в градусах)

$$\Delta F\omega := (\pi + F\omega(\omega_{cp})) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Delta F\omega = 38.466$$

Запас устойчивости по амплитуде (дБ)

$$\Delta G\omega := |G\omega(\omega_{\pi})| \quad \Delta G\omega = 14.724$$

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.

$$A\omega(p) := T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}$$

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

Числитель передаточной функции контура по задающему воздействию:

$$B\omega(p) := \frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)$$

Числитель передаточной функции контура по возмущающему воздействию:

$$C\omega(p) := K_d^2 \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)$$

Инв. № подл.	Подп. и дата			
Взам. инв. №	Инв. № дубл.			
Подп. и дата	Подп. и дата			
основных показателей качества регулирования.				
$A\omega(p) := T_m \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1) + \frac{K_p}{C} \cdot K_{oc}$				
$S\omega(p) := \frac{d}{dp} A\omega(p)$				
Числитель передаточной функции контура по задающему воздействию:				
$B\omega(p) := \frac{K_p}{C} \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)$				
Числитель передаточной функции контура по возмущающему воздействию:				
$C\omega(p) := K_d2 \cdot (T_z \cdot p + 1) \cdot (T_n \cdot p + 1) \cdot (T_{oc} \cdot p + 1)$				
ФЭТ КП. XXXXXXXX.344				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Лист
18

Корни характеристического уравнения:

$$p\omega := \text{polyroots}(a\omega)$$

$$p\omega = \begin{pmatrix} -236.076 \\ -218.955 \\ -8.558 - 23.181i \\ -8.558 + 23.181i \end{pmatrix}$$

Задающее воздействие для контура регулирования скорости (В):

$$U_{3\omega} := \frac{\omega_0 \cdot (C + K_{\Pi} \cdot K_{oc})}{K_{\Pi}}$$

$$U_{3\omega} = 28.31$$

Переходные функции по задающему и возмущающему воздействиям:

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

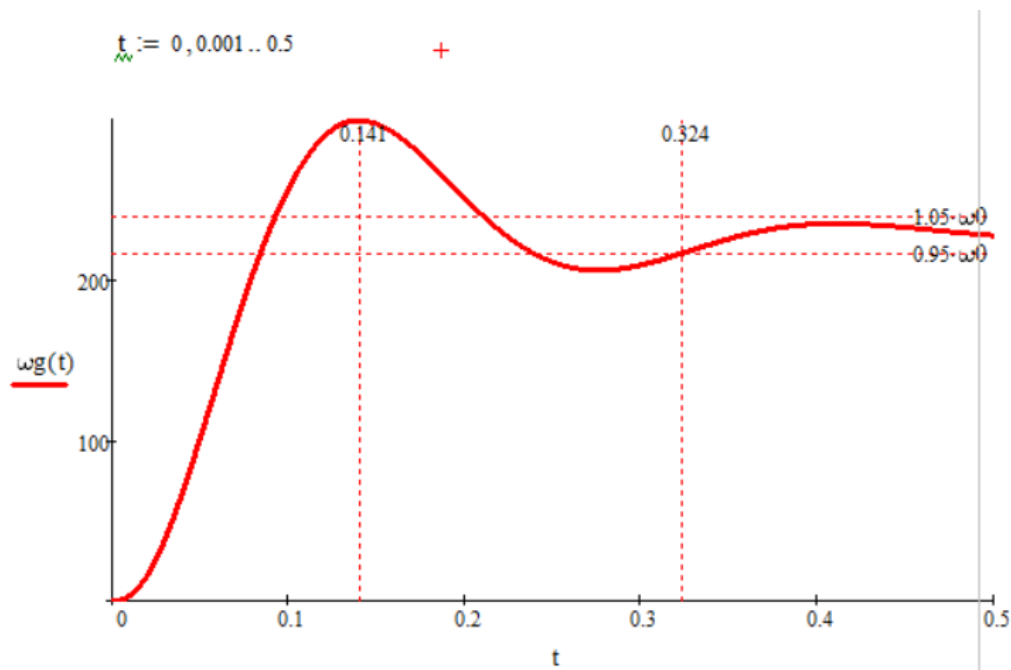
$$t_0 := 0.1$$

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

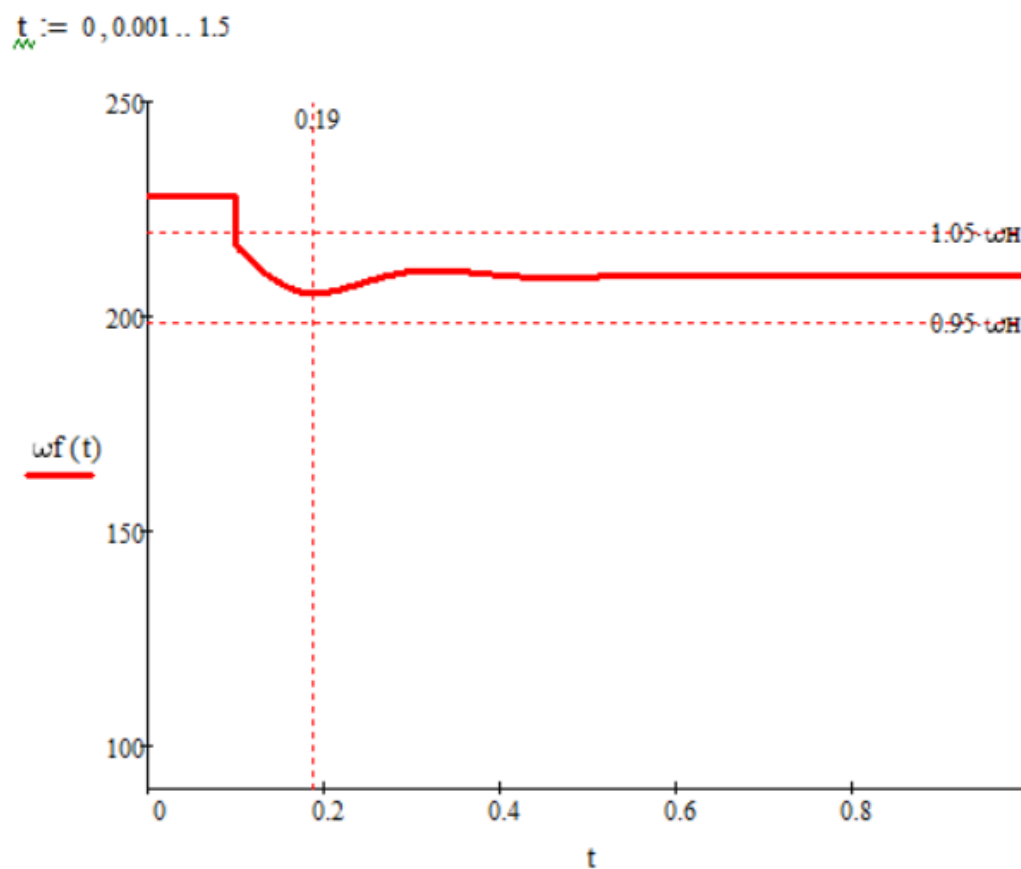
$$\omega_{\text{f}}(t) := \text{if}[(t < t_0), \omega_0, \omega_{\text{н}} - \omega_{\text{fc}}(t - t_0)]$$

На рис. 2.8 по приведенным выше переходным функциям построены переходные характеристики контура регулирования скорости по задающему (рис. 2.8, а) и возмущающему (рис. 2.8, б) воздействиям. В качестве возмущения в контуре действует номинальный момент нагрузки.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	
Изн. № подл.	



а



б

Рис. 2.8. – Переходные характеристики контура регулирования скорости по задающему (а) и возмущающему (б)

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344

Время, соответствующее максимуму скорости для передаточной функции по задающему воздействию(с)

$$t := 0.1 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega_g(t) = 0 \quad t_{\max} := \text{Find}(t) \quad t_{\max} = 0.141$$

Максимальное значение скорости (рад/с)

$$\omega_{\max} := \omega_g(t_{\max}) \quad \omega_{\max} = 299.1$$

Перерегулирование при подаче задающего воздействия

$$\sigma_{cg1} := \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0} \quad \sigma_{cg1} = 31.125 \cdot \%$$

Время переходного процесса при подаче задающего воздействия (с)

$$t_{\omega\omega} := 0.4 \quad \text{Given} \quad \omega_g(t) = 0.95 \cdot \omega_0 \quad t_{ng1} := \text{Find}(t) \quad t_{ng1} = 0.324$$

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

$$t := 0.15 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega_f(t) = 0 \quad t_{\min} := \text{Find}(t) \quad t_{\min} = 0.19$$

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

$$\omega_{\min} := \omega_f(t_{\min}) \quad \omega_{\min} = 205.386$$

Перерегулирование при подаче возмущающего воздействия (номинального момента)

$$\sigma_f := \frac{\omega_H - \omega_{\min}}{\omega_H} \quad \sigma_f = 1.935 \cdot \%$$

Время переходного процесса при подаче возмущающего воздействия (с)

$$t_{\omega\omega} := 0.19 \quad \text{Given} \quad \omega_f(t) = 1.05 \quad t_{pp} := \text{Find}(t) \quad t_{pp} = 0$$

Быстродействие контура регулирования скорости не удовлетворяет заданному времени переходного процесса ($0,324 > 0,25$). Переходной процесс сопровождается большим перерегулированием (примерно 31%). Эти показатели можно значительно улучшить при настройке контура на технический оптимум.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p>Время, соответствующее минимуму скорости (с) для переходной характеристики по возмущению</p> $t := 0.15 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega f(t) = 0 \quad t_{min} := \text{Find}(t) \quad t_{min} = 0.19$ <hr/> <p>Минимальное значение скорости для переходной характеристики по возмущению, рад/с</p> $\omega_{min} := \omega f(t_{min}) \quad \omega_{min} = 205.386$ <p>Перерегулирование при подаче возмущающего воздействия (номинального момента)</p> $\sigma f := \frac{\omega_H - \omega_{min}}{\omega_H} \quad \sigma f = 1.935 \cdot \%$ <p>Время переходного процесса при подаче возмущающего воздействия (с)</p> $t := 0.19 \quad \text{Given} \quad \omega f(t) = 1.05 \quad t_{pp} := \text{Find}(t) \quad t_{pp} = 0$	
<p>Быстродействие контура регулирования скорости не удовлетворяет заданному времени переходного процесса (0,324>0,25). Переходной процесс сопровождается большим перерегулированием (примерно 31%). Эти показатели можно значительно улучшить при настройке контура на технический оптимум.</p>						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	Лист
						21

2.3 Механическая характеристика нескорректированной ЭМС

- для контура регулирования скорости

$$\omega_1(M) := U_{3\omega} \cdot \left(\frac{K_{\Pi}}{C + K_{\text{ос}} \cdot K_{\Pi}} \right) - M \cdot \frac{\frac{C}{K_{\text{д1}}}}{C + K_{\text{ос}} \cdot K_{\Pi}}$$

$$\omega_2(M) := U_{3\omega} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C} - M \cdot \left(\frac{1}{K_{\text{д1}}} + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{\text{ом}} \right)$$

Момент отсечки на МХ ЭМС

$$M_{\text{от}} := \frac{\omega_2(0) - \omega_1(0)}{\frac{1}{K_{\text{д1}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + K_{\text{ос}} \cdot \frac{K_{\Pi}}{C}} \right) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{\text{ом}}} M_{\text{от}} = 18.041 \qquad \omega_1(M_{\text{от}}) = 213.031$$

$$\omega(M) := \text{if}(M < M_{\text{от}}, \omega_1(M), 0)$$

$$M := 0, 0.001 \dots 20$$

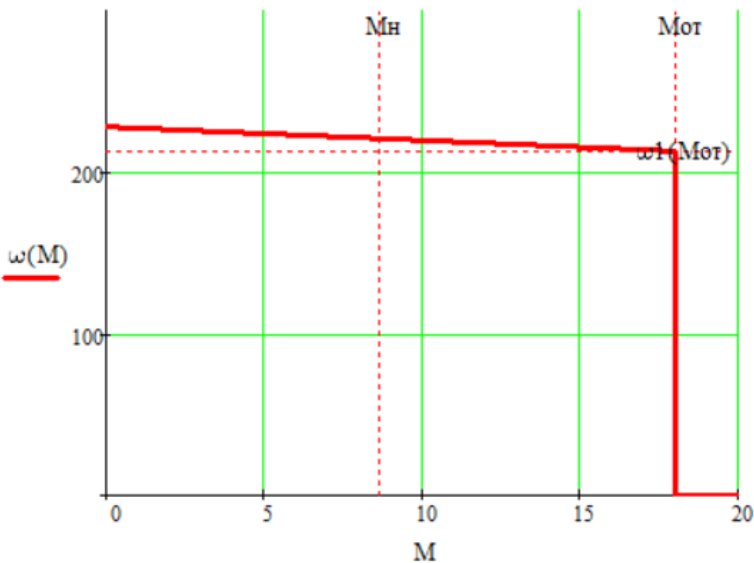


Рис. 2.8. Механическая характеристика ЭМС

Статизм внешней характеристики контура регулирования скорости

Статизм внешней характеристики контура регулирования скорости

$$S := \frac{\omega_0 - \omega(M_{\text{н}})}{\omega_0} \qquad S = 3.179 \cdot \%$$

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

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	Лист
	22

3. СИТНЕЗ ЭМС

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

$$T_{\mu p} := \frac{t_{пп}}{8} \quad T_{\mu p} = 0.069$$

В качестве T_{μ} выберем ближайшую к расчетной меньшую постоянную времени. Таковой в данном контуре является постоянная времени преобразователя $T_g = 0,045$ с, т.е.

$$T_{\mu} := (T_g) \quad T_g = 0.045$$

3.1. Синтез контура регулирования момента

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

$$W_{pTO}(p) = W_{pm}(p) \cdot W_n(p) \cdot W_{dl}(p) \cdot W_{om}(p)$$

$$\frac{1}{2 \cdot T_g \cdot p \cdot (T_g \cdot p + 1)} = W_{pm} \cdot \frac{\frac{K_p}{C}}{T_p \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{dl}}{T_g \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{om}}{T_{om} \cdot p + 1}$$

$$W_{pm}(p) := \frac{C \cdot (p \cdot T_p + 1) \cdot (p \cdot T_{om} + 1)}{2 \cdot p \cdot T_g \cdot K_p \cdot K_{dl} \cdot K_{om}}$$

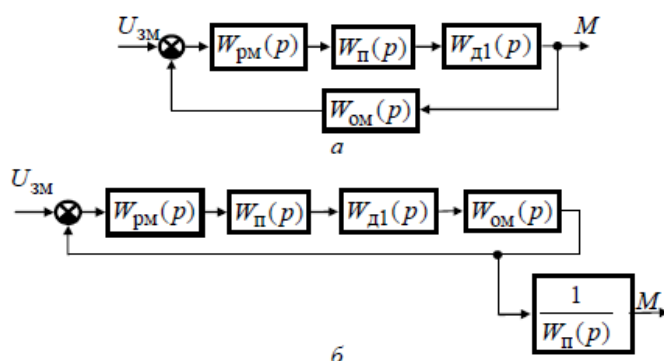


Рисунок 3.1. Синтезируемый контур регулирования момента

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

$$W_{рм}(p) = K_{пид} \cdot \frac{(T_{пид1} \cdot p + 1) \cdot (T_{пид2} \cdot p + 1)}{p}$$

$$K_{пид} = \frac{C}{2 \cdot T_z \cdot K_{п} \cdot K_{д1} \cdot K_{ом}} \quad \text{коэффициент передачи ПИД регулятора}$$

$$T_{пид1} = T_{п} \quad T_{пид2} = T_{ом}$$

В этом случае передаточная функция разомкнутой цепи контура

$$W_{рцм}(p) = W_{рм}(p) \cdot W_{п}(p) \cdot W_{д1}(p) \cdot W_{ом}(p) = \frac{C}{2 \cdot T_z \cdot K_{п} \cdot K_{д1} \cdot K_{ом}} \cdot \frac{(T_{п} \cdot p + 1) \cdot (T_{ом} \cdot p + 1)}{p} \cdot \frac{K_{п} \cdot K_{д1} \cdot K_{ом}}{C \cdot (p \cdot T_z + 1) \cdot (p \cdot T_{п} + 1) \cdot (p \cdot T_{ом} + 1)} = \frac{1}{2 \cdot T_z \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1)}$$

$$W_{рцм}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_z \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1)}$$

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

Передаточная функция замкнутого контура регулирования момента по задающему воздействию:

$$W_{здм}(p) = \frac{W_{рцм}(p)}{1 + W_{рцм}(p)} \cdot \frac{1}{W_{ом}(p)} = \frac{\frac{1}{2 \cdot T_z \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1)}}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_z \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1)}} \cdot \frac{T_{ом} \cdot p + 1}{K_{ом}} = \frac{\frac{T_{ом} \cdot p + 1}{K_{ом}}}{\frac{2 \cdot T_z^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_z \cdot p + 1}{2 \cdot T_z \cdot p \cdot (T_z \cdot p + 1)}} = \frac{B_m(p)}{A_m(p)}$$

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,

$$\text{т.е. } M_{п} = U_{зм} \cdot W_{зг.м}(0) = \frac{U_{зм}}{K_{ом}}, \quad U_{зм} = M_{п} \cdot K_{ом}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП. XXXXXXX.344					Лист
										24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

$$W_{pцм}(p) := \frac{1}{2 \cdot Tэ \cdot p \cdot (Tэ \cdot p + 1)}$$

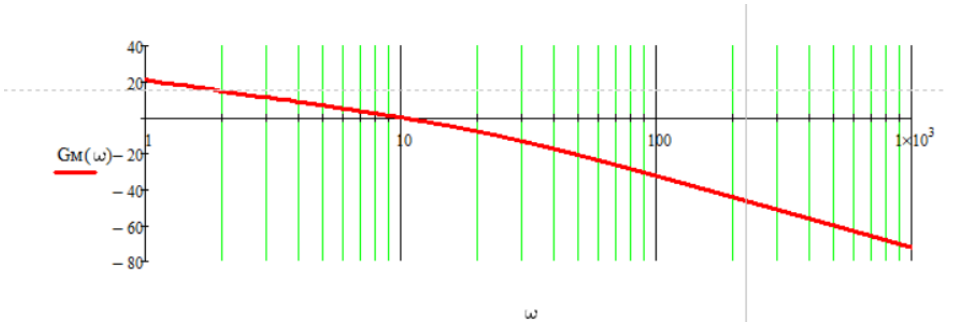
ЛАЧХ

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

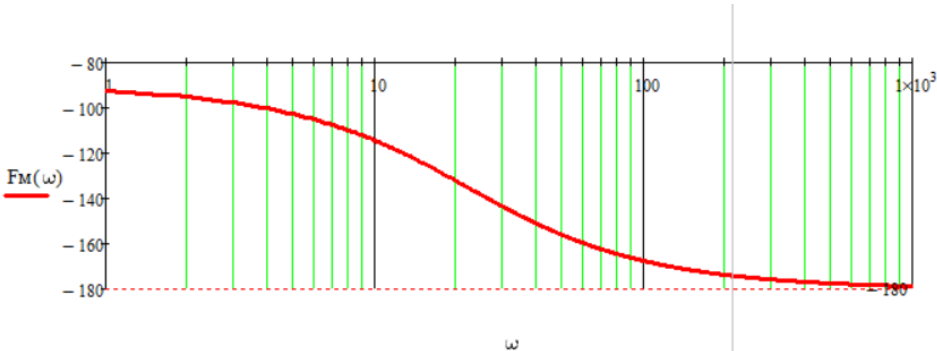
$$F_M(\omega) := \arg(W_{pцм}(i \cdot \omega)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\omega := 1, 1.2 \dots 9999.9$$

На рис. 3.2 показаны графики ЛАЧХ и ЛФЧХ синтезированного контура регулирования момента



а



б

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

Инт. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инт. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Частота среза:

$$\omega := 10 \quad \text{Given} \quad G_m(\omega) = 0 \quad \underline{\omega_{cp}} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{cp} = 10.079$$

Ожидаемое время переходного процесса в контуре (с)

$$\underline{tr_{пм}} := \frac{2}{\omega_{cp}} \quad tr_{пм} = 0.198$$

Запас устойчивости по фазе (в градусах)

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

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

$$2 \cdot T_3^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_3 \cdot p + 1$$

$$\underline{am} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \cdot T_3 \\ 2 \cdot T_3^2 \end{pmatrix} \quad \underline{Am(p)} := am_2 \cdot p^2 + am_1 \cdot p + am_0$$

$$\underline{Sm(p)} := \frac{d}{dp} Am(p)$$

$$\underline{pm} := \text{polyroots}(am) \quad pm = \begin{pmatrix} -11.074 - 11.074i \\ -11.074 + 11.074i \end{pmatrix}$$

$$\underline{Bm(p)} := \frac{T_{om} \cdot p + 1}{K_{om}}$$

Задающее воздействие (В):

$$\underline{U_{зм}} := M_{п} \cdot K_{о1} U_{зм} = 28.211$$

Переходная функция контура регулирования момента

$$M(t) := M_{п} + U_{зм} \cdot \text{Re} \left[\sum_{k=0}^1 \left(\frac{B_m(pm_k) \cdot \exp(pm_k t)}{pm_k S_m(pm_k)} \right) \right]$$

Изн. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

На рис. 3.3 показана переходная характеристика синтезированного контура регулирования момента

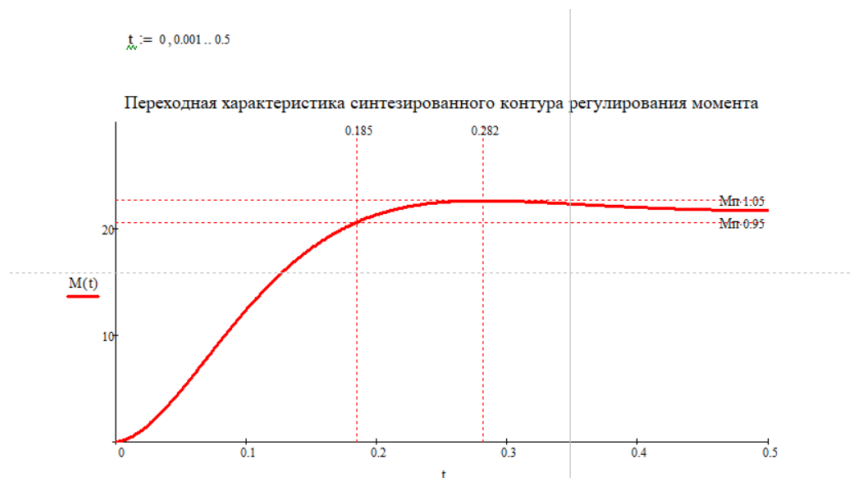


Рисунок 3.3. Переходная характеристика синтезированного контура регулирования момента

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

$$t := 0.2 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} M(t) = 0 \quad t_{\text{max}} := \text{Find}(t \text{ tmax} = 0.282$$

$$M_{\text{max}} := M(t_{\text{max}}) \quad M_{\text{max}} = 22.639$$

$$\sigma_M := \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{П}}}{M_{\text{П}}} \quad \sigma_M = 4.324 \cdot \%$$

Время переходного процесса в контуре регулирования момента (с)

$$t := 0.282 \quad \text{Given} \quad M(t) = 0.95 \cdot M_{\text{П}} \quad t_{\text{ПМ}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{ПМ}} = 0.185 \quad 4 \cdot T_{\mu} = 0.02 \quad \frac{t_{\text{ПМ}}}{t_{\text{ПМ}}} = 2.972$$

Контур точно настроен на ТО. Перерегулирование не превышает 5%, время переходного процесса tПМ приблизительно равно 4Тμ и немного меньше меньше ожидаемого. Отношение $\frac{t_{\text{ПП}}}{t_{\text{ПМ}}}=2,972>2$ (для внутреннего контура по отношению в внешнему время переходного процесса должно не менее, чем в два раза меньше времени переходного процесса для внешнего контура)

Подп. и дата	$t := 0.2 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} M(t) = 0 \quad t_{\max} := \text{Find}(t \text{ } t_{\max} = 0.282$				
Инв. № дубл.	$M_{\max} := M(t_{\max}) \quad M_{\max} = 22.639$				
Взам. инв. №	$\sigma_M := \frac{M_{\max} - M_{\Pi}}{M_{\Pi}} \quad \sigma_M = 4.324 \cdot \%$				
	Время переходного процесса в контуре регулирования момента (с)				
	$t := 0.282 \quad \text{Given} \quad M(t) = 0.95 \cdot M_{\Pi} \quad t_{\text{ппм}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{ппм}} = 0.185 \quad 4 \cdot T_{\mu} = 0.02 \quad \frac{t_{\text{пп}}}{t_{\text{ппм}}} = 2.972$				
Подп. и дата	<p>Контур точно настроен на ТО. Перерегулирование не превышает 5%, время переходного процесса $t_{\text{ппм}}$ приблизительно равно $4T_{\mu}$ и немного меньше меньше ожидаемого. Отношение $\frac{t_{\text{пп}}}{t_{\text{ппм}}} = 2,972 > 2$ (для внутреннего контура по отношению в внешнему время переходного процесса должно не менее, чем в два раза меньше времени переходного процесса для внешнего контура)</p>				
Инв. № подл.					
ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					27

3.2 Синтез контура регулирования скорости

На рисунке 3.4 приведена структурная схема контура регулирования скорости. Здесь $W_{зг,м}'(p)$ - передаточная функция замкнутого контура регулирования момента, в которой сделано допущение – опущен член при p^2 , т.е.

$$W_{зг,м}'(p) := \frac{T_{ом} \cdot p + 1}{K_{ом} \cdot (2 \cdot T_{э} \cdot p + 1)}$$

Произведем настройку контура на ТО

$$W_{\omega_ТО}(p) = W_{рс} \cdot W_{зг,м}'(p) \cdot W_{экв}(p) \cdot W_{ос}(p)$$

или

$$\frac{1}{4 \cdot T_{э} \cdot p \cdot (2T_{э} \cdot p + 1)} = W_{рс} \cdot \frac{T_{ом} \cdot p + 1}{K_{ом} \cdot (2 \cdot T_{э} \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_{д2} \cdot (T_{э} \cdot p + 1)}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_{22} \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_{ос}}{T_{ос} \cdot p + 1}$$

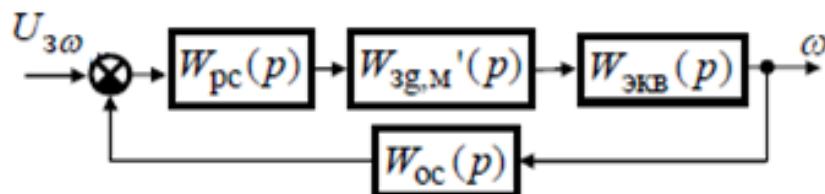


Рисунок 3.4.– Синтезируемый контур регулирования скорости

Отсюда передаточная функция регулятора скорости

$$W_{рс}(p) := \frac{K_{ом} \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot (p \cdot T_{ос} + 1)}{4 \cdot K_{ос} \cdot p \cdot T_{э} \cdot K_{д2} \cdot (p \cdot T_{э} + 1) \cdot (p \cdot T_{ом} + 1)}$$

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

$$W_{pid}(p) := K_{pid} \cdot \frac{(T_{pid1} \cdot p + 1) \cdot (T_{pid2} \cdot p + 1)}{p}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата				Лист
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подп. и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344
<div style="text-align: center; margin-bottom: 20px;"> </div> <p>Рисунок 3.4.– Синтезируемый контур регулирования скорости</p> <p>Отсюда передаточная функция регулятора скорости</p> $W_{pc}(p) := \frac{K_{om} \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot (p \cdot T_{oc} + 1)}{4 \cdot K_{oc} \cdot p \cdot T_{\varepsilon} \cdot K_{д2} \cdot (p \cdot T_{\varepsilon} + 1) \cdot (p \cdot T_{om} + 1)}$ <p>Таким образом, регулятор скорости представляет собой последовательное соединение ПИД-регулятора с передаточной функцией</p> $W_{pid}(p) := K_{pid} \cdot \frac{(T_{pid1} \cdot p + 1) \cdot (T_{pid2} \cdot p + 1)}{p}$					28

Где

$$K_{pid} := \frac{K_{OM}}{(4 \cdot T_p \cdot K_{D2} \cdot K_{OC})} \quad T_{pid2} = T_{OC} \quad T_{pid1} = T_1$$

и двухзвенного фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) := \frac{T_1 \cdot p + 1}{T_{\Sigma} \cdot T_{OM} \cdot p^2 + (T_{\Sigma} + T_{OM}) \cdot p + 1}$$

Поскольку постоянные времени фильтра T_{Σ} и T_{OM} отличаются друг от друга $\left(\frac{T_{\Sigma}}{T_{OM}} \approx 22.575 \right)$, то членом p^2 можно пренебречь и заменить двухзвенный фильтр на однозвенный с передаточной функцией.

$$W_{\Phi}(p) := \frac{T_1 \cdot p + 1}{(T_{\Sigma} + T_{OM}) \cdot p + 1}$$

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

$$W_{rc,\omega}(p) = W_{\Pi}(p) \cdot W_{d1}(p) \cdot W_{d2}(p) \cdot W_{oc,экв}(p) = \frac{\frac{K_{\Pi}}{C}}{T_{\Pi} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{d1}}{T_{\Sigma} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{d2}}{T_m \cdot p} \cdot \frac{C \cdot \left[(T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{OC} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{OC} \right]}{K_{\Pi} \cdot (T_{OC} \cdot p + 1)} = \frac{(T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{OC} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{OC}}{T_m \cdot p \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{OC} \cdot p + 1)}$$

$$W_{rc,\omega}(p) := \frac{(T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{OC} \cdot p + 1) + \frac{K_{\Pi}}{C} \cdot K_{OC}}{T_m \cdot p \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1) \cdot (T_{OC} \cdot p + 1)}$$

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:

Ив. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	Подп. и дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					Лист
										29
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$1 + \frac{\frac{(p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_{OM} + 1)}{4 \cdot p \cdot T_3 \cdot (2 \cdot p^2 \cdot T_3^2 + 2 \cdot p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_3 + p \cdot T_{OM} + 1)}}{(p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_{OM} + 1)} \cdot \frac{T_{OC} \cdot p + 1}{K_{OC}} = \frac{(p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_{OM} + 1)}{4 \cdot p \cdot T_3 \cdot (2 \cdot p^2 \cdot T_3^2 + 2 \cdot p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_3 + p \cdot T_{OM} + 1) + (p \cdot T_3 + 1) \cdot (p \cdot T_{OM} + 1)} \cdot \frac{T_{OC} \cdot p + 1}{K_{OC}}$$

$$= \frac{B_{\omega}(p)}{A_{\omega}(p)}$$

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

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

Формулы для расчета ЛАЧХ и ЛФЧХ синтезированного контура регулирования скорости

Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ:

$$G_{\omega}(\omega) := 20 \cdot \log(|W_{PU}(\omega)|)$$

$$\text{Fl}(\omega) := \arg \left[\frac{[\text{T}\mathfrak{z} \cdot (i \cdot \omega) + 1] \cdot [\text{T}\text{om} \cdot (i \cdot \omega) + 1]}{[(\text{T}\mathfrak{z} + \text{T}\text{om}) \cdot (i \cdot \omega) + 1] \cdot [2 \cdot \text{T}\mathfrak{z} \cdot (i \cdot \omega) \cdot [\text{T}\mathfrak{z} \cdot (i \cdot \omega) + 1] + 1]} \right]$$

$$\underline{F}_w(\omega) := \left(F_l(\omega) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\omega := 1, 1.2 \dots 999.9$$

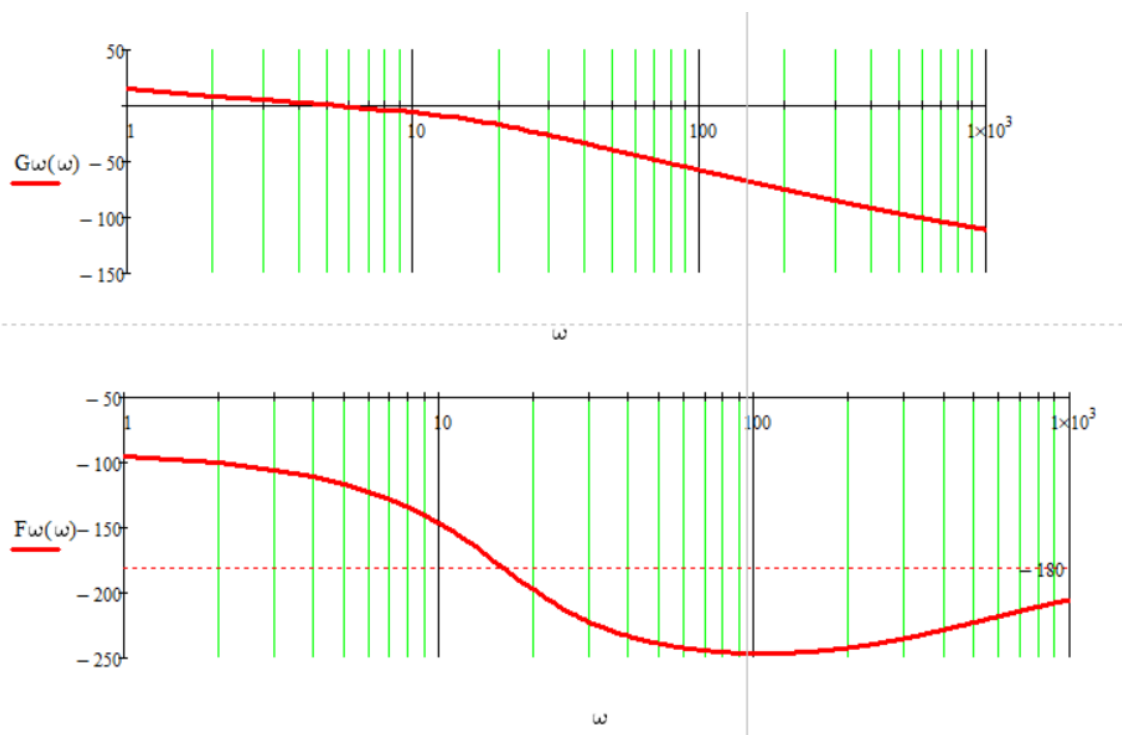


Рисунок 3.5 ЛАЧХ и ЛФЧХ синтезированного контура регулирования скорости

Частота среза (рад/с):

$$\omega := 10 \quad \text{Given} \quad G\omega(\omega) = 0 \quad \omega_{\text{ср}} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\text{ср}} = 5.482$$

Частота переворота фазы (рад/с):

$$\omega := 10 \quad \text{Given} \quad F\omega(\omega) = -180 \quad \omega_{\pi} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\pi} = 15.783$$

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

$$\Delta G\omega := |G\omega(\omega_{\pi})| \quad \Delta G\omega = 12.302$$

$$\Delta F\omega := 180 + F\omega(\omega_{\text{ср}}) \quad \Delta F\omega = 60.608$$

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 12,302 дБ, запас устойчивости по фазе примерно на 5% меньше, чем при точной настройке на ТО.

Инв. № подл.	Подп. и дата			
	Изнв. № дубл.			
	Взам. инв. №			
	Подп. и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344				
				Лист
				31

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

$$a\omega := \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \cdot T_{\text{э}} + T_{\text{ом}} \\ 12 \cdot T_{\text{э}}^2 + 5 \cdot T_{\text{ом}} \cdot T_{\text{э}} \\ 16 \cdot T_{\text{э}}^3 + 8 \cdot T_{\text{ом}} \cdot T_{\text{э}}^2 \\ 8 \cdot T_{\text{э}}^4 + 8 \cdot T_{\text{ом}} \cdot T_{\text{э}}^3 \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

$$p\omega := \text{polyroots}(a\omega) \quad p\omega = \begin{pmatrix} -20.855 \\ -11.344 \\ -5.579 - 9.52i \\ -5.579 + 9.52i \end{pmatrix}$$

Задающее напряжение для контура регулирования скорости (В)

$$U_{3\omega} := \omega_0 \cdot K_{\text{ос}} \quad U_{3\omega} = 22.81$$

Переходная функция контура регулирования скорости при его настройке на ТО показана на рис. 3.6

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	функции корни характеристического уравнения для синтезированного контура регулирования скорости
					$S\omega(p) := \frac{d}{\phi p} A\omega(p)$
					$B\omega(p) := \frac{(T_э \cdot p + 1) \cdot (T_{ом} \cdot p + 1) \cdot (T_{ос} \cdot p + 1)}{K_{ос}}$
					$p\omega := \text{polyroots}(a\omega) \qquad p\omega = \begin{pmatrix} -20.855 \\ -11.344 \\ -5.579 - 9.52i \\ -5.579 + 9.52i \end{pmatrix}$
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Задающее напряжение для контура регулирования скорости (В)
					$U_{з\omega} := \omega_0 \cdot K_{ос} \quad U_{з\omega} = 22.81$
					Переходная функция контура регулирования скорости при его настройке на ТО показана на рис. 3.6

					ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\omega(t) := \omega_0 + U_3 \omega \cdot \text{Re} \left[\sum_{k=0}^3 \left(\frac{B \omega(p \omega_k) \cdot \exp(p \omega_k \cdot t)}{p \omega_k \cdot S \omega(p \omega_k)} \right) \right]$$

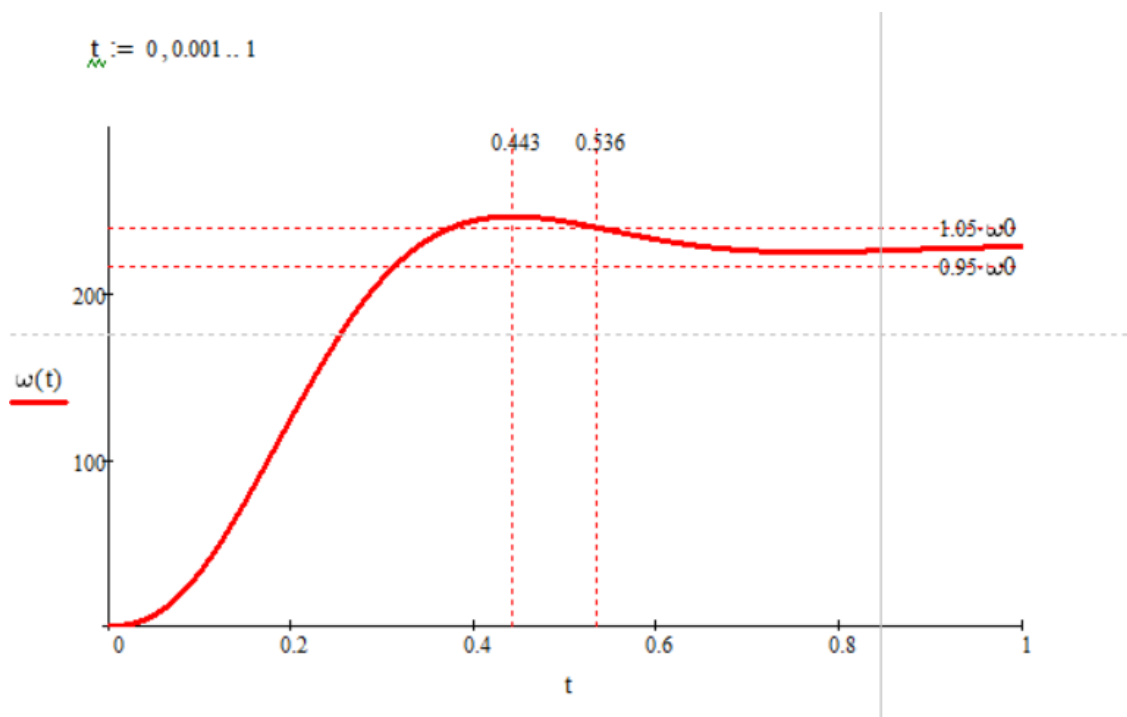


Рисунок 3.6 Переходная характеристика контура регулирования скорости при его настройке на ТО

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

$$t := 0.4 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega(t) = 0 \quad t_{\max} := \text{Find}(t) \quad t_{\max} = 0.443$$

$$\omega_{\max} := \omega(t_{\max}) \quad \omega_{\max} = 246.377$$

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

$$\sigma_c := \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0} \quad \sigma_c = 8.012 \cdot \%$$

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

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p>Рисунок 3.6 Переходная характеристика контура регулирования скорости при его настройке на ТО</p> <p>Время, соответствующее максимуму переходной характеристики для контура регулирования скорости при его настройках на ТО, (с)</p> <div>$t := 0.4 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} \omega(t) = 0 \quad \underline{t_{max}} := \text{Find}(t) \quad t_{max} = 0.443$$\underline{\omega_{max}} := \omega(t_{max}) \quad \omega_{max} = 246.377$</div> <p>Максимальные значения скорости (рад/с) и перерегулирование (%)</p> <div>$\sigma_c := \frac{\omega_{max} - \omega_0}{\omega_0} \quad \sigma_c = 8.012 \cdot \%$</div> <p>Время переходного процесса в контуре регулирования скорости (с) при его настройке на ТО</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП. XXXXXX.344	Лист
						33

$$t := 0.538 \text{ Given} \quad \omega(t) = 1.05 \cdot \omega_0 \quad t_{\text{ппс}} := \text{Find}(t) \quad t_{\text{ппс}} = 0.536 \quad \frac{t_{\text{пп}}}{t_{\text{ппс}}} = 1.026$$

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 12,302 дБ, запас устойчивости по фазе примерно на 5% меньше, чем при точной настройке на ТО. Перерегулирование превысило 5 % и составило около 8 %, вследствие чего увеличилось время переходного процесса в контуре регулирования скорости ($t_{\text{ппс}}=0,536\text{с}$), что не удовлетворяет требованиям ТЗ $t_{\text{пп}}=0,25\text{с}$.

Поскольку регуляторы момента и скорости содержат в своих структурах интегрирующие звенья, каждый из контуров регулирования в ЭМС стал астатическим. Механическая характеристика синтезированной ЭМС имеет прямоугольную форму, статическая ошибка при стабилизации скорости вращения двигателя равна нулю.

На рис. 3.7 показана механическая характеристика синтезированной ЭМС.

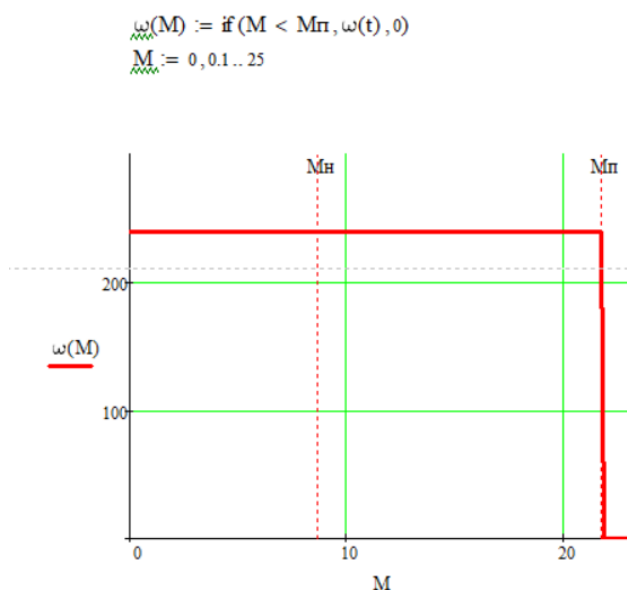
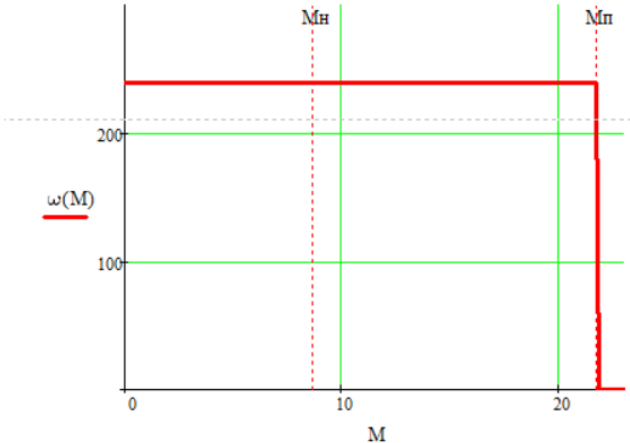


Рисунок 3.7– Механическая характеристика синтезированной ЭМС.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	астати́ческим. Механи́ческая характеристика синтезированной ЭМС имеет
					прямоугольную форму, статическая ошибка при стабилизации скорости
					вращения двигателя равна нулю.
					На рис. 3.7 показана механическая характеристика синтезированной ЭМС.
<div>$\omega(M) := \text{if}(M < M_{\text{н}}, \omega(t), 0)$$M := 0, 0.1 \dots 25$</div> 					
Рисунок 3.7– Механическая характеристика синтезированной ЭМС.					
ФЭТ КП.ХХХХХХ.344					Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	34

4. ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

В соответствии с техническим заданием, требуется провести электронное моделирование не скорректированного контура регулирования скорости по его структурной схеме. Разработаем электронную модель этого контура, эквивалентной его разомкнутой системой. При этом воспользуемся передаточной функцией $W_{pc\omega}(p)$, для которой известны числитель $B\omega(p)$ и знаменатель $A\omega(p)$, причем

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

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

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

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

$$p_{\omega} = \begin{pmatrix} -20.855 \\ -11.344 \\ -5.579 - 9.52i \\ -5.579 + 9.52i \end{pmatrix}$$

Разработаем электронную модель нескорректированного контура регулирования скорости по его структурной схеме, представленной на рис. 4.1.

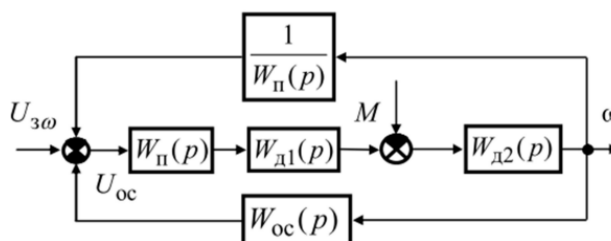
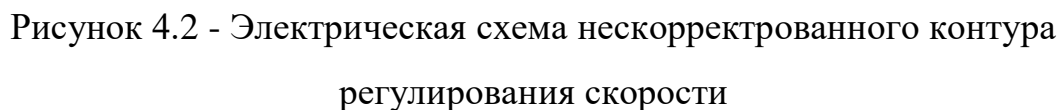


Рисунок 4.1 – Структурная схема нескорректированного контура регулирования скорости

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата



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

$$W_{d2}(p) := \frac{K_{d2}}{T_M \cdot p}$$

$$K1 := \frac{K_{\Pi}}{C} \quad K1 = 41.473$$

$$C1 := \frac{T_{\Pi}}{R_6} \quad C1 = 1.206 \times 10^{-9} \text{ } \Phi$$

Инерционное звено Wd1(p)

$$K2 := K_{д1} \quad K2 = 0.233$$

$$R7 := 10^5 \text{ Ом}$$

$$R8 := K2 \cdot R7 \quad R8 = 2.326 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$C2 := \frac{T_э}{R8} \quad C2 = 1.942 \times 10^{-6} \text{ Ф}$$

Инерционное звено Woc(p)

$$K3 := K_{ос} \quad K3 = 0.1$$

$$R9 := 10^4 \text{ Ом}$$

$$R10 := K3 \cdot R9 \quad R10 = 1 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$C3 := \frac{T_{ос}}{R10} \quad C3 = 4 \times 10^{-7} \text{ Ф}$$

Интегрирующее звено Wd2(p)

$$K4 := \frac{K_{п2}}{T_{м}} \quad K4 = 23.81$$

$$R11 := 10^4 \text{ Ом}$$

$$C4 := \frac{1}{K4 \cdot R11} \quad C4 = 4.2 \times 10^{-7} \text{ Ф}$$

Форсирующее звено 1/Wn(p)

$$\frac{1}{W_n(p)} = \frac{T_n \cdot p + 1}{\frac{K_n}{C}}$$

$$K5 := \frac{C}{K_n} \quad K5 = 0.024$$

$$R12 := 10^4 \text{ Ом}$$

$$C5 := \frac{T_n}{R12} \quad C5 = 5 \times 10^{-8} \text{ Ф}$$

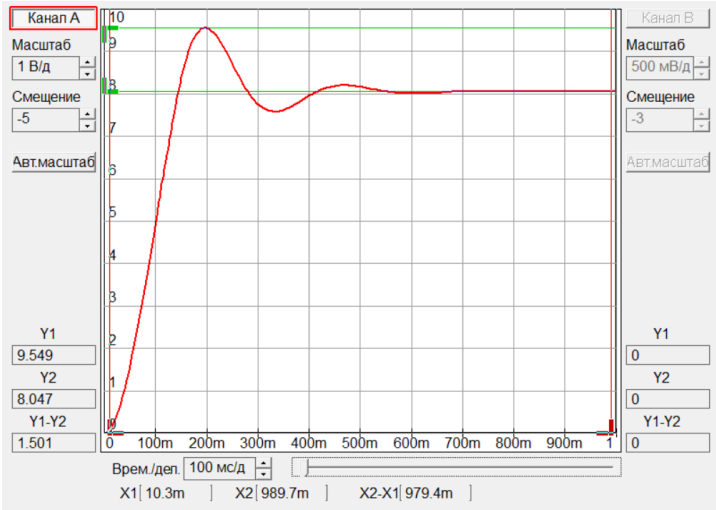
$$R13 := K5 \cdot R12 \quad R13 = 2.411 \times 10^3 \text{ Ом}$$

Параметры остальных резисторов

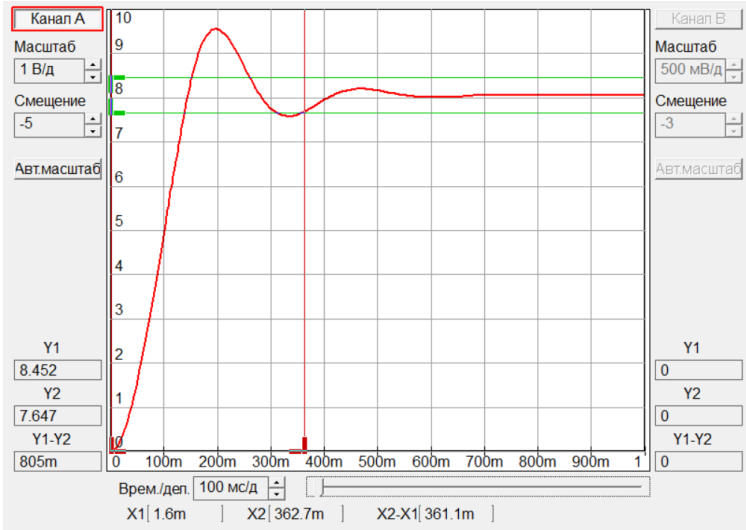
$$R1=R2=R3=R4=100 \text{ кОм}$$

Операционный усилитель DA1 выполняет роль сумматора сигналов. Таким образом, результаты моделирования в среде ASIMEC полностью совпали с результатами, полученными в среде MathCAD.

На рис. 4.3 приведена осциллограмма выходного напряжения модели, отражающая переходную характеристику не скорректированного контура регулирования скорости при подаче на вход модели напряжения $U_{вх} = 1 \text{ В}$



а



б

Рисунок 4.3 Осциллограмма выходного напряжения модели не скорректированного контура регулирования скорости

Оценим полученные результаты. Согласно рисунку 4.5, а, максимальное значение входного напряжения модели $U_{\text{ВЫХ,мах}} = 1.317 \text{ В}$, его установившееся значение $U_{\text{ВЫХ,уст}} = 1.004 \text{ В}$, тогда перерегулирование $\sigma_{\text{мод}} = \frac{U_{\text{ВЫХ,мах}} - U_{\text{ВЫХ,уст}}}{U_{\text{ВЫХ,уст}}} \cdot 100 \approx 31.17\%$. Время переходного процесса, измеренное при $U_{\text{ВЫХ}} = 0.95 \cdot U_{\text{ВЫХ,уст}} \approx 0.954 \text{ В}$ (рисунок 4.5, б)

Имп. и дата	
Имп. № дубл.	
Взам. имп. №	
Подп. и дата	
Имп. № подл.	

По задающему воздействию:

$U_{\max} := 1.317$

$U_{уст} := 1.004$

$U_{уст} \cdot 1.05 = 1.054$

$U_{уст} \cdot 0.95 = 0.954$

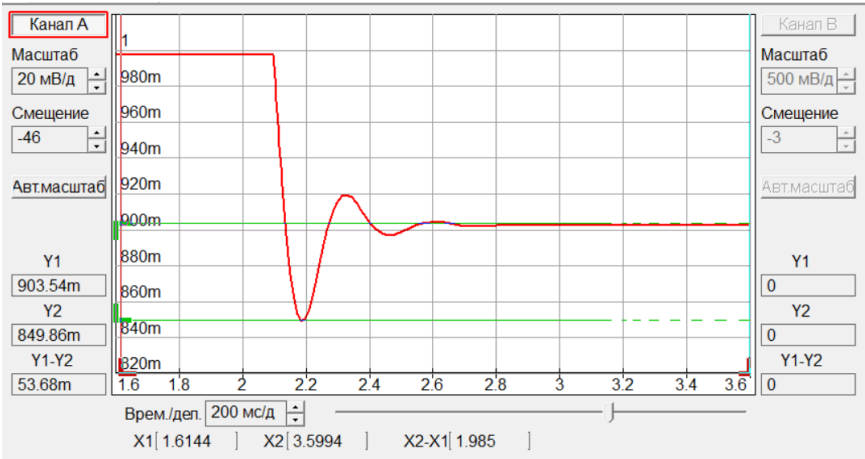
$t_{\text{ппизм}} := 0.324$

$\sigma_{L\text{мод}} := \frac{U_{\max} - U_{уст}}{U_{уст}} \quad \sigma_{L\text{мод}} = 31.175 \cdot \%$

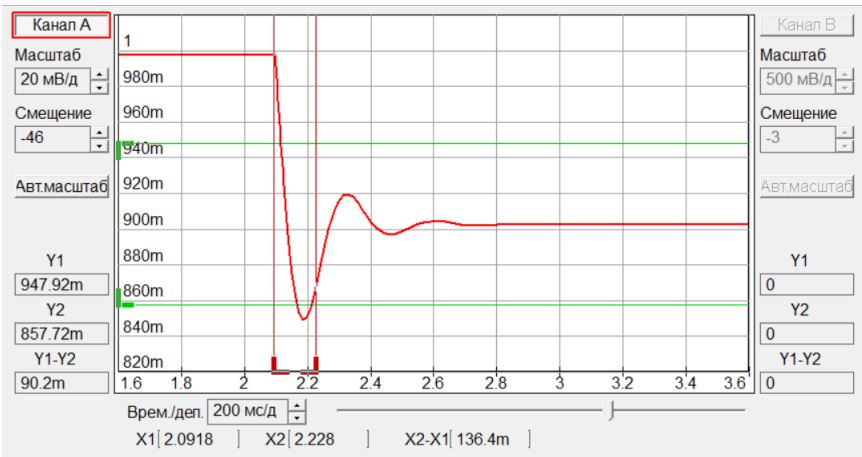
$\sigma_{cg1} = 31.125 \cdot \%$
 $tng1 = 0.324$

$\delta\sigma := \frac{|\sigma_{L\text{мод}} - \sigma_{cg1}|}{\sigma_{cg1}} \quad \delta\sigma = 0.161 \cdot \%$

$\delta t_{\text{пп}} := \frac{|t_{\text{ппизм}} - tng1|}{tng1} \quad \delta t_{\text{пп}} = 0.02 \cdot \%$



а



б

Рис. 4.4– Осциллограмма выходного напряжения модели нескорректированного контура регулирования скорости по возмущающему воздействию

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Для возмущающего воздействия:

Минимальное значение выходного напряжения модели

$$U_{\min} := 0.849$$

Установившееся значение выходного напряжения модели

$$U_{\text{уст1}} := 0.902$$

Перерегулирование

$$\sigma_{\text{мод}} := \frac{U_{\text{уст1}} - U_{\min}}{U_{\text{уст1}}} = 0.059$$

Время переходного процесса

$$t_{\text{ppmod}} := 0.123$$

Оценим полученные результаты, рассчитав относительные погрешности моделирования

Перегулирование по возмущающему воздействию:

$$\delta\sigma := \frac{|\sigma_{\text{мод}} - \sigma_f|}{\sigma_f} = 2.036 \quad \%$$

Время переходного процесса по задающему воздействию:

$$\delta t_{\text{пп}} := \frac{|(t_{\min}) - t_{\text{ppmod}}|}{t_{\min}} = 0.354 \quad \%$$

Что демонстрирует практически полную адекватность модели объекту моделирования.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Лист	
	Инв. № дубл.					
	Взам. инв. №					
	Подп. и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344	40

Оценим полученные результаты, рассчитав относительные погрешности моделирования
Перегулирование по возмущающему воздействию: $\delta\sigma := \frac{ \sigma_{\text{мод}} - \sigma_f }{\sigma_f} = 2.036 \quad \%$
Время переходного процесса по задающему воздействию: $\delta t_{\text{пр}} := \frac{ (t_{\text{мин}}) - t_{\text{прмод}} }{t_{\text{мин}}} = 0.354 \quad \%$
Что демонстрирует практически полную адекватность модели объекту моделирования.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные исследования показали, что:

– заданная нескорректированная ЭМС имеет низкое быстродействие в контуре регулирования скорости и низкую статическую точность (статизм МХ при работе контура регулирования скорости составило около 3% в ТЗ он составляет 2,5%);

– при настройке каждого из контуров ЭМС почти удалось обеспечить ей заданное быстродействие (время переходного процесса синтезированной ЭМС составило 0,536 с), подчиненное регулирование и астатизм первого порядка для каждого из контуров регулирования;

– результаты расчётов подтверждены электронным моделированием синтезированного контура регулирования скорости двигателя.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЭТ КП.ХХХХХХХ.344					Лист
										41

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.П. Обрусник, Ю.М. Лебедев. Теория автоматического управления. Методическое указания по выполнению курсовой работы. Томск 2007.
2. Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. Теория автоматического управления. Учебное пособие. – Томск: Томск.гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003-205 с

[illegible]