

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 12.09.2024 23:36:46

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb73e945d14a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 20 » 06 2024 г.



## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания по выполнению курсовой работы  
для студентов направлений подготовки 09.03.01 и 11.03.03

Курск 2024

УДК 681.51.01

Составитель Т.А. Ширабакина

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *В.С.Панищев*

**Исследование систем управления:** методические указания по выполнению курсовой работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Т.А. Ширабакина.- Курск, 2024. – 30 с.: ил.8, табл.4. – Библиогр.: с.30

Методические указания содержат сведения по исследованию систем управления. Приводятся исходные данные и указывается порядок выполнения курсовой работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочих программ дисциплин «Основы теории управления» и «Основы управления техническими системами», Федеральным государственным образовательным стандартам направлений подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и 11.03.03 Проектирование и технология электронных средств.

Предназначены для студентов направлений подготовки 09.03.01 и 11.03.01 очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *20.06.24* Формат 60x84 1/16  
Усл.печ.л. *1,8* . Уч.-изд.л. *1,5* . Тираж 50 экз. Заказ *555* Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г.Курск, ул 50 лет Октября, 94

## 1 Задание на курсовое проектирование

Учебными планами по дисциплинам «Основы теории управления» и «Основы управления техническими системами» предусмотрено выполнение курсовой работы, целью которой является закрепление теоретических знаний и приобретение практических навыков для самостоятельного решения вопросов, связанных с анализом систем управления.

Содержание курсового проектирования включает следующие этапы:

1. Анализ заданной структурной схемы, ее преобразования для расчетов.
2. Определение передаточных функций системы для управляющего и возмущающего воздействий.
3. Проверка устойчивости системы критерием Гурвица и Найквиста с использованием логарифмических частотных характеристик. Оценка быстродействия системы относительно заданного значения. Определение граничного коэффициента усиления.
4. Расчет и построение переходных процессов системы при изменении управляющего сигнала скачком. Оценка их качества.

В курсовой работе необходимо провести анализ системы, структурная схема которой приведена на рис. 1.1, с учетом параметров, определяемых шифром задания. Исходные данные задания определяются шифром из трех цифр, взятых из таблиц 1.1, 1.2, 1.3. Они отражают показатели исследуемой системы и являются номерами вариантов этих таблиц. Например, для шифра 118 следует:

- по первой цифре, соответствующей варианту 1 в таблице 1.1, структурная схема (рис. 1.1) не содержит токовой компенсации ( $K_{KM} = 0$ ), компенсации ЭДС двигателя ( $K_{KW} = 0$ ) и обратной связи по положению ( $K_{OСП} = 0$ ); ошибка стабилизации скорости на максимальном уровне должна быть не более 1%;
- для второй цифры шифра следует взять из варианта 1 таблицы 1.2 параметры структурной схемы:  $T_M / T_{\Sigma} = 8$ ;  $T_{\Pi} = 0,01$ ;  $K_{\Pi} = 40$ ;  $T_{OM} = 5$  мс;  $T_{OC} = 5$  мс;  $t_{\text{ПП}} < 0,08$  с;
- для третьей цифры шифра по варианту 8 в таблице 1.3 параметры двигателя имеют значения: номинальная мощность  $P_n = 3,2$  кВт; номинальный ток  $I_n = 18,4$  А; активное сопротивление двигателя  $R_d = 1$  Ом; активное сопротивление цепи якоря двигателя  $R_{ц.я} = 2$  Ом; момент инерции системы  $J = 0,15$  кг·м<sup>2</sup>; скорость  $N_n = 1500$  об/мин.

Расчетно-теоретическая часть курсовой работы, помещаемая в пояснительной записке, объемом 20-25 страниц, оформляется в соответствии с [4]. Структура пояснительной записки включает: титульный лист; задание; реферат; содержание; обозначения и сокращения (при необходимости); введение; основная часть; заключение; список использованных источников; приложения (при необходимости).

Таблица 1.1- Варианты структурных схем

Вариант	КМ	КW	ОСМ	ООС	ОСП	$\Delta\omega$ , %	$\Delta L$ , %
1	–	–	+	+	–	1	
2	+	–	+	+	–	5	–
3	–	+	+	+	–	5	–
4	+	+	+	+	–	2,5	–
5	–	–	+	–	+	–	2
6	+	–	+	–	+	–	2,5
7	–	+	–	+	+	–	1,5
8	–	–	+	+	+	–	4

Таблица 1.2- Варианты параметров структурных схем

Вариант	$T_M / T_{\Sigma}$	$T_{П}$ , с	$K_{П}$	$T_{ОМ}$ , мс	$T_{ОС}$ , мс	$t_{ПП}$ , с
1	8	0,01	40	5	5	0,08
2	5	0,02	40	4	5	0,15
3	4	0,008	40	2	4	0,05
4	3	0,005	40	0	4	0,2
5	2	0,01	25	3	5	0,05
6	4	0,2	25	0	10	0,15
7	1	0,02	40	4	4	0,2
8	2	0,25	25	0	10	0,25

Таблица 1.3 - Варианты параметров двигателя

Вариант	$P_{н}$ , кВт	$N_{н}$ , об/мин	$I_{н}$ , А	$R_{д}$ , Ом	$R_{ц.я}$ , Ом	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
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	34	0,042
4	1,5	3000	9,0	2,0	4,0	0,042
5	1,0	1500	6,0	4,0	8,0	0,058
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	6,0	3000	33	0,4	0,8	0,2
10	11,0	2000	60	0,2	0,4	0,8

Условия задания записываются с тремя подзаголовками:

- показатели частного варианта структурной схемы;

- параметры структурной схемы;
- номинальные данные двигателя.

Ряд параметров исследуемой структурной схемы следует рассчитать:

1) коэффициент обратной связи по току

$$K_{OM} = \frac{10}{2M_n} = \frac{10}{2I_n C} \left[ \frac{1}{A \cdot c} \right]; \quad (1.1)$$

2) коэффициент полной компенсации момента

$$K_{KM} = \frac{1}{K_{\Pi} K_{OM} K_{Д1}}; \quad (1.2)$$

3) коэффициент обратной связи по скорости

$$K_{OC} = \frac{10}{\omega_n} \left[ \frac{1}{\text{рад/с}} \right]; \quad (1.3)$$

4) коэффициент полной компенсации скорости двигателя

$$K_{KW} = \frac{C}{K_{\Pi}} [\text{В} \cdot \text{с}]. \quad (1.4)$$

Значения  $K_{Д1}$ ,  $C$ ,  $\omega_n$  определяются ниже.

Два параметра, свойственные только обратной связи по положению, взяты для всех заданий одинаковыми:

- передаточное число редуктора от двигателя к механизму  $i = 10$ ;
- коэффициент чувствительности датчика положения  $K_{\delta} = 25 \text{ В/рад}$ .

Номинальное напряжение якоря двигателя  $U_n = 220 \text{ В}$ .

## 2 Пояснения к выполнению работы

### 2.1 Элементы расчетной структурной схемы. Передаточные функции

В курсовой работе исследуются варианты структурных схем обобщенной системы, приведенной на рисунке 1.1. Данная система широко применяется на практике для обеспечения всех видов движения. Частных вариантов такой системы в зависимости от ее назначения очень много: можно плавно регулировать скорость, изменяя ее в десятки тысяч раз и стабилизируя на любом выбранном уровне с требуемой точностью; управлять крутящим моментом, усилиями и мощностью рабочего механизма; отслеживать любые заданные траектории; перемещать механизмы с микронной точностью и т. д. Схемотехническое исполнение системы включает большой перечень устройств и блоков: электрические двигатели, трансформаторы и управляющие устройства промышленной электроники, элементы логики, датчики, микропроцессорные устройства, измерительные приборы и т. д.

Учеными и инженерами затрачено много усилий на то, чтобы всю сложнейшую схмотехнику системы, которая совершенствуется вместе с элементной базой, подчинить строгим законам фундаментальных знаний [1,2,4].

Структура системы (рисунок 1.1) является линейной и представляет класс систем трехконтурного подчиненного регулирования. Первый (внутренний) контур охвачен отрицательной обратной связью по моменту ОСМ, второй – отрицательной обратной связью по скорости ООС, третий – отрицательной обратной связью по положению ОСП.

Каждый контур имеет свой регулятор: РМ (момента), РС (скорости), РП (положения). Работают эти контуры в строгой подчиненности от внутреннего к внешнему. Когда один из них выполняет свои функции, другие ему не мешают, ожидая своей очереди. В каждом контуре можно обеспечить необходимые режимы статики и динамики.

Главная задача системы – обеспечить для рабочего механизма требуемые движения через скорость  $\omega$ , перемещения  $L$  и движущие силы от момента двигателя  $M$  с заданной точностью и быстродействием [3].

Величины  $M$ ,  $\omega$ ,  $L$  являются выходными и обеспечиваются электродвигателем, представленным двумя звеньями с передаточными функциями:

$$W_{д1}(p) = \frac{K_{д1}}{T_{\Omega} p + 1}; \quad (2.1)$$

$$W_{д2}(p) = \frac{K_{д2}}{T_M p}, \quad (2.2)$$

где  $p$  – оператор Лапласа;

$K_{д1}$  – добротность механической характеристики двигателя;

$$K_{д1} = \frac{M_H}{\Delta\omega_H}; \quad (2.3)$$

$K_{д2}$  – жесткость механической характеристики;

$$K_{д2} = \frac{\Delta\omega_H}{M_H} = \frac{1}{K_{д1}}; \quad (2.4)$$

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени;

$$T_M = J K_{д2} = J \frac{\Delta\omega_H}{M_H} = J \frac{R_{ц.я}}{C^2}; \quad (2.5)$$

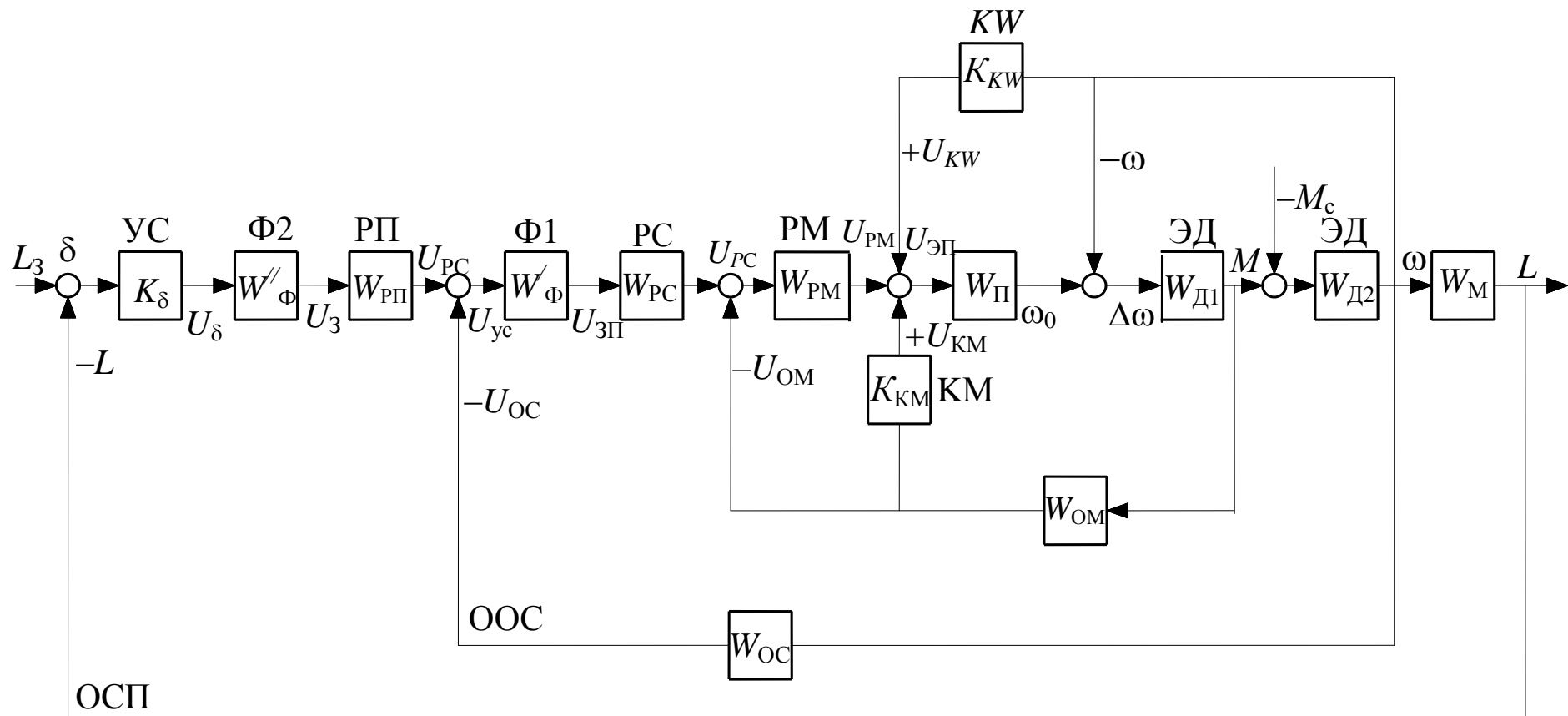


Рисунок 1.1 - Обобщенная структурная схема системы

$C$  – машинная постоянная;

$$C = \frac{U_H - I_H R_d}{\omega_H}; \quad (2.6)$$

$U_H$  – номинальное напряжение якоря, В;

$I_H$  – номинальный ток якоря, А;

$R_d$  – активное сопротивление на входе якоря двигателя, Ом;

$J$  – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя, кг · м<sup>2</sup>;

$\Delta\omega_H$  – снижение скорости двигателя при номинальном моменте нагрузки  $M_H$  относительно скорости холостого хода  $\omega_0$  (без нагрузки);

$$\Delta\omega_H = (\omega_0 - \omega_H) \frac{R_{ц.я}}{R_d}. \quad (2.7)$$

В международной системе единиц СИ скорость измеряется в радианах в секунду. Если скорость  $N_H$  задана в оборотах в секунду, то

$$\omega_H = \frac{N_H}{60} \cdot 2\pi = 0,1N_H. \quad (2.8)$$

Скорость холостого хода для двигателей постоянного тока определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{U_H}{C}. \quad (2.9)$$

Зная параметр  $C$  (см. формулу (2.6)), можно определить номинальный момент двигателя

$$M_H = C I_H, \quad (2.10)$$

и электромеханическую постоянную времени

$$T_M = J \frac{R_{ц.я}}{C^2}.$$

Электромагнитная постоянная времени цепи якоря

$$T_{\mathcal{E}} = \frac{L_{ц.я}}{R_{ц.я}}, \quad (2.11)$$

где  $L_{ц.я}$  – суммарная индуктивность цепи якоря двигателя.

В проекте значение  $T_{\mathcal{E}}$  находится через соотношение  $T_M / T_{\mathcal{E}}$  (таблица 1.1).

В целом передаточные функции  $W_{д1}$  и  $W_{д2}$  являются типовыми: первая – апериодического звена первого порядка, вторая – интегрирующего звена. Коэффициенты этих передаточных функций определяются по приведенным выше формулам, используя исходные данные.



Для рассматриваемого варианта:

$$\omega_n = 1500 \cdot 0,105 = 157 \text{ рад/с};$$

$$C = \frac{220 - 18,4 \cdot 1}{157} = 1,28 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$M_n = 18,4 \cdot 1,28 = 23,55 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с};$$

$$\omega_0 = \frac{220}{1,28} = 172 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_n = (172 - 157) \cdot \frac{2}{1} = 30 \text{ рад/с};$$

$$K_{д1} = 23,55 : 30 = 0,785 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}^2;$$

$$K_{д2} = \frac{1}{0,785} = 1,27 \text{ 1}/(\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}^2);$$

$$T_M = 0,15 \cdot 1,27 = 0,19 \text{ с};$$

$$T_{\Sigma} = 0,19 : 8 = 0,024 \text{ с}.$$

По формулам (1.1), (1.3) определим  $K_{OM}$  и  $K_{OC}$  (численные значения  $K_{KM}$  и  $K_{KW}$  находить не обязательно):

$$K_{OM} = \frac{10}{2 \cdot 23,55} = 0,21 \text{ 1}/(\text{А} \cdot \text{с});$$

$$K_{OC} = \frac{10}{157} = 0,07 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Принимаем  $K_{OM} = 0,2$ ;  $K_{OC} = 0,1$ .

Для удобства расчетов все полученные данные сведем в таблицу 2.1.

Таблица 2.1- Результаты расчета

C, В·с	$\omega_n$ , рад/с	$\omega_0$ , рад/с	$\Delta\omega_n$ , рад/с	$M_n$ , А·В·с	$K_{д1}$ , А·В·с <sup>2</sup>	$K_{д2}$ , 1/(А·В·с <sup>2</sup> )	$T_M$ , с	$T_{\Sigma}$ , с	$K_{OM}$ , 1/(А·с)	$K_{OC}$ , В·с
1,28	157	172	30	23,55	0,785	1,27	0,19	0,024	0,2	0,1

Скоростью, моментом крутящим и током двигателя, перемещением рабочего механизма управляет преобразователь электрической энергии (П). Его передаточная функция описывается апериодическим звеном первого порядка (рисунки 1.1):

$$W_{\Pi}(p) = \frac{\omega_0}{U_Y} = \frac{K_{\Pi}/C}{T_{\Pi}P + 1}, \quad (2.12)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент усиления по напряжению, безразмерный;  $T_{\Pi}$  – постоянная времени, определяющая инерционность преобразователя; для полупроводниковых преобразователей  $T_{\Pi} < 0,01$  с, для электромагнитных, магнитных, индуктивно-емкостных  $T_{\Pi} > 0,01$  с.

Обратные связи часто содержат фильтры. В этом случае их передаточные функции записываются как инерционные апериодические:

$$W_{\text{ОМ}}(p) = \frac{K_{\text{ОМ}}}{T_{\text{ОМ}} p + 1}; \quad (2.13)$$

$$W_{\text{ОС}}(p) = \frac{K_{\text{ОС}}}{T_{\text{ОС}} p + 1}, \quad (2.14)$$

где  $T_{\text{ОМ}}$ ,  $T_{\text{ОС}}$  – постоянные времени фильтров обратных связей по моменту и по скорости соответственно (в курсовом проекте они заданы);  $K_{\text{ОМ}}$ ,  $K_{\text{ОС}}$  – коэффициенты отрицательных обратных связей по моменту и скорости, определяемые по формулам (1.1) и (1.3).

Фильтры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  могут быть и на входах контуров (см. рис. 1.1). Их основное назначение – ограничить скорость нарастания управляющего сигнала и уменьшить перерегулирование выходных величин. Типовая передаточная функция фильтров имеет вид:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{T_{\Phi 1} p + 1}{T_{\Phi 2} p + 1}. \quad (2.15)$$

Постоянные  $T_{\Phi 1}$ ,  $T_{\Phi 2}$  определяются при синтезе параметров системы, затем устанавливаются настройкой (в RC-фильтрах – настройкой сопротивлений при выбранной емкости).

Рабочий механизм (РМ) имеет передаточную функцию интегрирующего типа

$$W_{\text{М}}(p) = \frac{1}{i p}, \quad (2.16)$$

где  $i$  – передаточное число механизма, показывающее, во сколько раз его скорость меньше скорости двигателя.

Обратные связи могут быть гибкими, то есть действовать только во время переходных процессов. Применяются они для демпфирования колебаний, что возможно при подаче на вход системы производных первого или второго порядка от выходных величин. Поэтому передаточные функции гибких связей – дифференцирующие. В курсовой работе они не рассматриваются.

У всех передаточных функций, рассмотренных выше, параметры должны быть заданы или установлены до анализа и синтеза системы. Тип регуляторов РП, РС, РМ при этом, а следовательно, и их передаточные функции  $W_{\text{РП}}$ ,  $W_{\text{РС}}$ ,  $W_{\text{РМ}}$  остаются неизвестными до результатов синтеза, который следует проводить при несоответствии системы техническому заданию.

## 2.2 Структурные схемы, их возможности и характеристики

Структурная схема системы (рисунок 1.1) выполняет свои задачи, обеспечивая:

- необходимые статические характеристики: внешние, отражающие зависимость выходных величин от нагрузки, и регулировочные, связывающие выходные величины с управляющим воздействием;
- оптимальные по качеству переходные процессы.

Внешние характеристики представляют зависимость скорости  $\omega$  от электромагнитного момента двигателя  $M$  и называются *механическими характеристиками* (МХ). Требования, предъявляемые к МХ, следующие:

1) скорость холостого хода (при отсутствии нагрузки) должна регулироваться плавно в широком диапазоне  $\omega_{0\min} \dots \omega_{0\max}$  (10...50000), который задается технологическим процессом;

2) изменение скорости  $\Delta\omega$  под воздействием нагрузки должно быть незначительным или вообще отсутствовать;

3) максимальный момент двигателя ограничивается по критериям электрической и механической прочности ЭМС допустимым для пуска его значением  $M_{\Pi}$ ; желательно, чтобы момент был стабильным.

Идеальными МХ (рисунок 2.1) являются такие характеристики, которые обеспечиваются при использовании компенсационных связей по скорости и моменту двигателя или выбором регулятора скорости (РС) и регулятора момента (РМ) с интегрирующими свойствами.

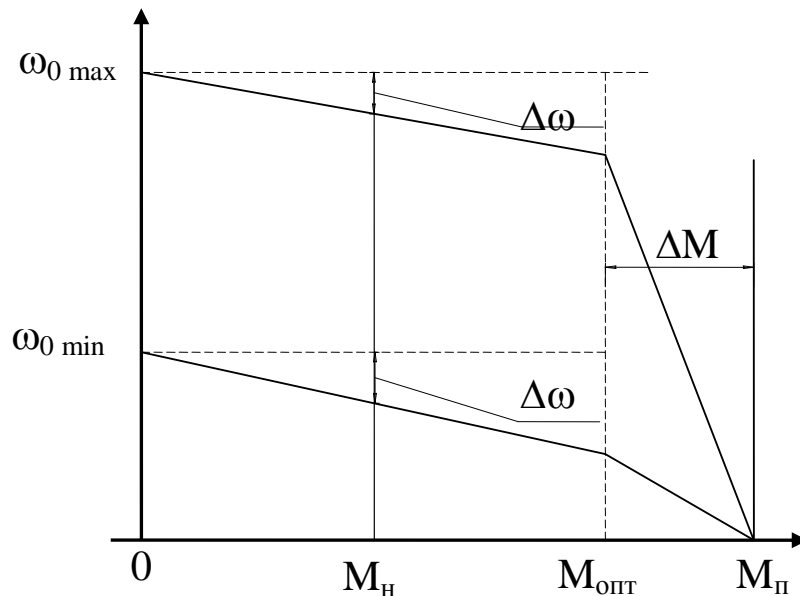


Рисунок 2.1- Идеальные механические характеристики

Динамические режимы системы, без специального синтеза ее структуры, могут оказаться неоптимальными, несмотря на удовлетворительные статические характеристики.

Если РМ и РС являются усилителями пропорционального типа (П), то статическая ошибка неизбежна, при этом чем меньше коэффициент усиления регуляторов, тем больше  $\Delta\omega$  и  $\Delta M$ .

Стабилизирующие скорость и момент отрицательные обратные связи по этим величинам (ОСС и ОСМ) не должны работать одновременно, так как будут мешать друг другу. Стремлению ОСМ понизить скорость будет противодействовать ОСС, главная задача которой – удерживать скорость двигателя на заданном уровне.

Ограничение и стабилизация крутящего момента должны осуществляться на уровне  $M_{П} < K_M M_n$ , где  $K_M = 2 \dots 8$  – допустимая перегрузочная способность двигателя (задана предварительно).

Отметим, что контролировать через обратную связь крутящий момент двигателя прямым способом, как это показано на рисунке 1.1, непросто – требуются сложные и дорогостоящие датчики. Однако в большинстве режимов работы момент двигателя пропорционален току ( $M = C I$ ), поэтому обратные связи по моменту (комплексующие и управляющие) можно осуществлять с помощью датчиков тока, которые значительно проще датчиков момента.

Удовлетворение требуемых показателей системы в статических (установившихся) режимах работы не гарантирует обеспечения необходимого качества переходных процессов. Эти процессы считаются неудовлетворительными, если их длительность превышает заданное время переходного процесса  $t_{ПП}$  (быстродействие) и заданное перерегулирование  $\delta$  относительно ожидаемого установившегося значения. Число перерегулирований вверх и вниз не должно быть более двух.

Оценить соответствие переходных процессов (ПП) заданным требованиям можно по кривым ПП, полученным экспериментально или аналитически, или по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам (ЛАЧХ).

Оптимальные переходные процессы исследуемого контура системы гарантируются, если передаточная функция этого разомкнутого контура имеет вид

$$W_{\text{Тоi}}(p) = \frac{1}{2T_{ai} p (T_{ai} p + 1)}, \quad (2.17)$$

где  $\frac{1}{2T_{ai}} = \omega_{\text{ср}}$  – частота среза ЛАЧХ.

Такая передаточная функция обеспечивает одно перерегулирование при  $\delta = 4,7\%$ , время переходного процесса будет минимальным:

$$t_{\text{ПП}} = t_p = \frac{2}{\omega_{\text{ср}}} = 4T_{ai}. \quad (2.18)$$

По данному  $t_{\text{ПП}}$  можно установить сумму некомплексированных малых постоянных времени  $T_{ai}$ , оставляемых в контуре:

$$T_{ai} = \frac{t_{\text{ПП}}}{4}. \quad (2.19)$$

Переходные процессы структуры САУ с передаточной функцией (2.17) являются наилучшими и характеризуются как технический оптимум (ТО) динамического режима. На рисунке 2.2 кривая 1 является ПП для ТО. Рисунок приведен в относительных единицах;  $y^* = y / \Delta y_{\text{уст}}$  отражает относительное изменение выходных величин при возрастании управляющего сигнала скачком на величину  $\Delta x$ .

Синтезируя структуру системы под функцию (2.17), не всегда удается обеспечить ТО. Тогда пытаются получить передаточные функции (ПФ), ЛАЧХ которых сохраняют свойственный для ТО при частоте среза наклон 20 дБ/дек и меняют этот наклон (неважно в какую сторону и насколько) при верхних и нижних частотах пропускания, отличающихся от частоты среза не менее чем в 2 раза. Такой вариант структуры называется *структурой симметричного оптимума* (СО), которая в разомкнутом состоянии описывается передаточной функцией

$$W_{\text{CO}}(p) = \frac{4T_{ai} p + 1}{4T_{ai} p} \frac{1}{2T_{ai} p(T_{ai} p + 1)}. \quad (2.20)$$

Кривая ПП для СО при изменении задающего воздействия показана на рисунке 2.2.

Длительность ПП при СО в 2 раза больше длительности, достигаемой для ТО:

$$t_{\text{ПП}} = \frac{4}{\omega_{\text{ср}}} = 8T_{ai}. \quad (2.21)$$

Обеспечение оптимальных динамических режимов в статике возможно только в результате структурно-параметрического синтеза САУ. Эти вопросы рассмотрены ниже.

### 2.3 Статические характеристики

Структурные схемы САУ являются графическим отображением математической модели, описывающей все режимы ее работы. Динамические режимы исследуются по передаточным функциям структуры, статические – по частным случаям этих ПФ при операторе  $p = 0$ .

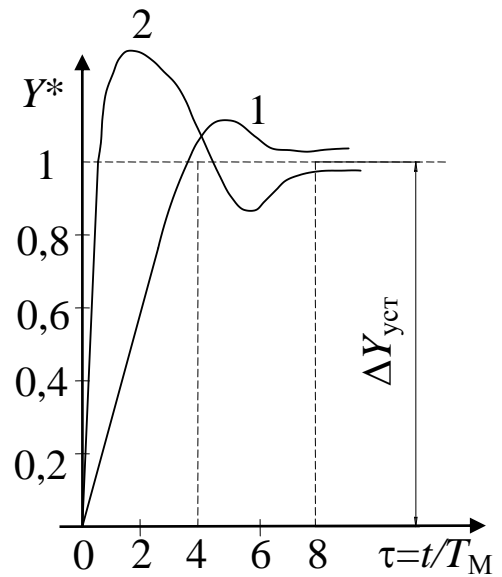


Рисунок 2.2 - Кривые переходного процесса

Всегда структурную схему САУ можно привести к схеме, изображенной на рисунке 2.3.

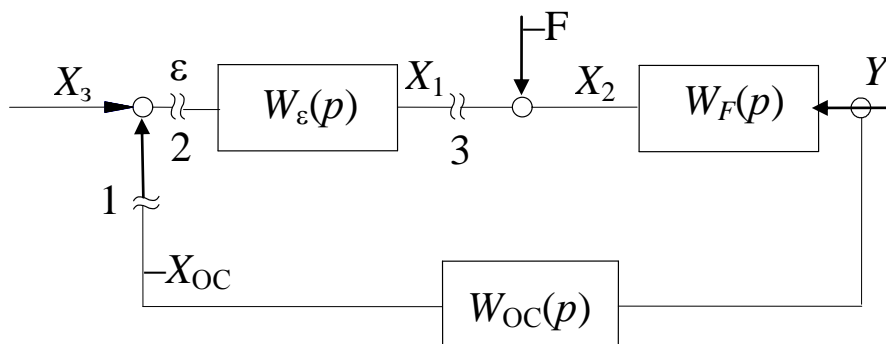


Рисунок 2.3 - Структурная схема САУ:  $X_3$  – входная величина, задающее воздействие;  $X_{OC}$  – сигнал главной отрицательной связи;  $\varepsilon$  – результирующий управляющий сигнал на входе;  $Y$  – выходная (управляемая) величина;  $F$  – возмущающее воздействие;  $W_\varepsilon(p)$  – ПФ структуры от управляющей величины до возмущающей;  $W_F(p)$  – ПФ от возмущения до выхода;  $W_{OC}(p)$  – ПФ цепей обратных связей между входом и выходом

Передаточная функция такой структуры при размыкании контура в любом месте (см. разрывы в точках 1, 2, 3) будет одной и той же:

$$W_{\text{раз}}(p) = W_\varepsilon(p) W_F(p) W_{OC}(p); \quad (2.22)$$

по ней строятся ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Для расчетов и построения ПП в системе требуются ПФ замкнутых структур по задающему (управляющему) воздействию:

$$W_{3X}(p) = \frac{Y}{X_3} = \frac{W_\varepsilon(p) W_F(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}, \quad (2.23)$$

и по возмущающему воздействию:

$$W_{3F}(p) = \frac{Y}{F} = \frac{W_F(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (2.24)$$

Знаменатель этих ПФ является характеристическим уравнением, используемым для анализа устойчивости и определения предельного коэффициента усиления системы по критерию Гурвица.

Формулы (2.22) и (2.23) при  $p=0$  определяют статические характеристики системы:

- регулировочную

$$y_0 = x_3 \frac{W_\varepsilon(0) W_F(0)}{1 + W_{\text{раз}}(0)}; \quad (2.25)$$

- характеристику ошибки

$$\Delta y = \Delta F \frac{W_F(0)}{1 + W_{\text{раз}}(0)}; \quad (2.26)$$

- внешнюю

$$y = y_0 - \Delta y = x_3 \frac{W_\varepsilon(0) W_F(0)}{1 + W_{\text{раз}}(0)} - \Delta F(0). \quad (2.27)$$

Для иллюстрации возможности выражений (2.22) и (2.23) рассмотрим систему, структурная схема которой приведена на рисунке 2.4.

Совместив сумматоры 1 и 2 (перенос показан пунктиром), получим:

$$W_\varepsilon(p) = \frac{K_{\text{П}} K_{\text{Д1}} / C}{(T_{\text{П}} p + 1)(T_{\text{Э}} p + 1)} = \frac{M}{U_3}; \quad W_F(p) = \frac{K_{\text{Д2}}}{T_{\text{М}} p} = \frac{\Delta \omega}{M_C};$$

$$W_{\text{ос}}(p) = \frac{K_{\text{ос}}}{T_{\text{ос}} p + 1} + \frac{T_{\text{П}} p + 1}{K_{\text{П}} / C} =$$

$$= \frac{K_{\text{ос}} K_{\text{П}} / C + (T_{\text{П}} p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1)}{(T_{\text{ос}} p + 1) K_{\text{П}} / C} = \frac{U_{\text{ос}}}{\omega};$$

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{(T_{\text{П}} p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1) + K_{\text{П}} K_{\text{ос}} / C}{(T_{\text{П}} p + 1)(T_{\text{Э}} p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1)} \frac{K_{\text{Д1}} K_{\text{Д2}}}{T_{\text{М}} p}.$$

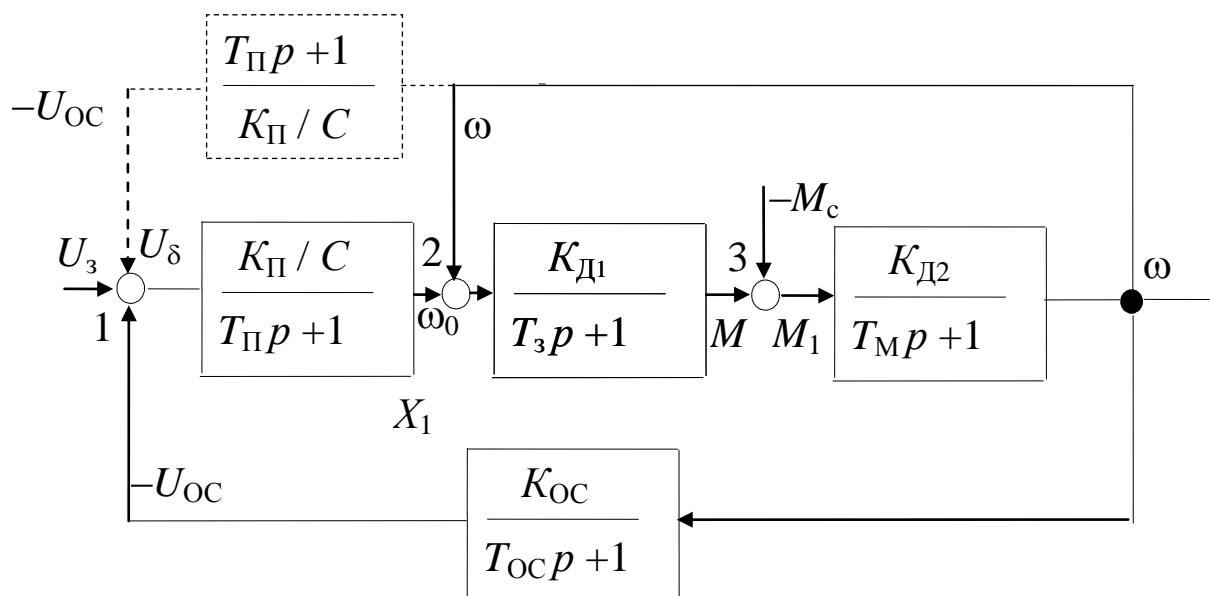


Рисунок 2.4 - Преобразованная структурная схема САУ

Для статики  $p = 0$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} W_{\varepsilon}(p) &= \frac{M}{U_3} = \frac{K_{\Pi} K_{Д1}}{C}; \\ W_F(p) &= \frac{\Delta\omega}{M_C} = \frac{K_{Д2}}{T_M \cdot 0}; \\ W_{OC}(p) &= \frac{U_{OC}}{\omega} = \frac{C + K_{\Pi} K_{OC}}{K_{\Pi}}; \\ W_{раз}(p) &= \frac{C + K_{\Pi} K_{OC}}{C} \frac{K_{Д1} K_{Д2}}{T_M \cdot 0}. \end{aligned} \right\}; \quad (2.28)$$

С учетом формул (2.25)–(2.28) получим:

$$y_0 = \omega_0 = U_3 \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{OC}}; \quad (2.29)$$

$$\Delta y = \Delta\omega = \frac{M_C C}{(C + K_{\Pi} K_{OC})} K_{Д1}; \quad (2.30)$$

$$y_0 - \Delta y = y = \omega = \omega_0 - \Delta\omega = U_3 \frac{K_{\Pi}}{C + K_{\Pi} K_{OC}} - \frac{M_C C \frac{1}{K_{Д1}}}{K_{\Pi} K_{OC} + C}. \quad (2.31)$$

Формула (2.31) является механической характеристикой системы  $\omega = f(M_C)$ .

Для определения механической характеристики конкретной системы нужно в структуре убрать лишние связи. Подчеркнем, что не все связи работают одновременно в статике, так как могут мешать друг другу. Механические характеристики имеют смысл лишь в системах, регулирующих и стабилизирующих скорость. В системах, управляющих перемещениями, скорость и момент постоянно меняются.

### ***Механические характеристики при отрицательных обратных связях***

В заданной системе применяются 4 типа отрицательных обратных связей: по скорости, моменту или току двигателя, по напряжению, по перемещению. Одновременно все связи могут быть задействованы только в системах подчиненного регулирования, главной задачей которых является не стабилизация контролируемой величины, а оптимизация динамических режимов.



В других структурах, где управление ведется через регулирующий орган, выделяется главная отрицательная связь, контролирующая управляемую величину; по необходимости она дополняется другими связями.

Например, если используется отрицательная обратная связь по скорости, то нет необходимости включать слабую связь по напряжению. Для систем управления положением (следящие, позиционирования, программных перемещений) не требуются связи, стабилизирующие момент и скорость. Отрицательные связи хорошо работают с положительными, например: отрицательная по моменту и положительная по скорости, отрицательная по скорости и положительная по моменту.

Проанализируем влияние отрицательных обратных связей на механические характеристики (МХ) системы неподчиненного типа, когда дополнительных регуляторов нет ( $K_{PC} = K_{PM} = K_{PI} = 1$ ).

*1. Отрицательная обратная связь по моменту (току).*

При этой связи уравнение МХ имеет вид

$$\omega = \frac{U_3 K_{PI}}{C} - \frac{M}{K_{DI}} \left( 1 + \frac{K_{PI} K_{DI}}{C} K_{OM} \right), \quad (2.32)$$

где  $K_{OM} = \frac{U_{OM}}{M}$  [1/(A·с)].

Характеристики для  $\omega_{0i} = \frac{U_{3i} K_{PI}}{C}$  приведены на рисунке 2.5, где МХ1

соответствуют случаю, когда связь отсутствует ( $K_{OM} = 0$ ); МХ2 – когда связь есть ( $K_{OM} \neq 0$ ). Вторая характеристика круче, обеспечивает уменьшение рабочего момента в  $(K_{PI} K_{DI} K_{OM} / C + 1)$  раз.

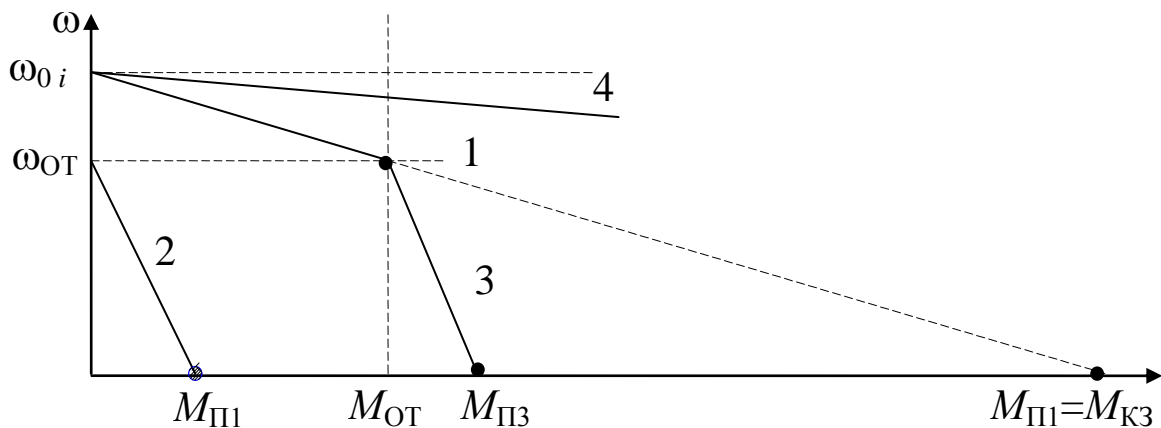


Рисунок 2.5 - Механические характеристики системы с отрицательными обратными связями: 1 –  $K_{OM} = 0$ ; 2 –  $K_{OM} \neq 0$ ; 3 – ограничение момента; 4 –  $K_{OC} \neq 0$

Покажем это. Из формулы (2.32) при  $\omega = 0$  имеем

$$M_{\text{П1}} = M_{\text{КЗ}} = \frac{U_3 K_{\text{П}}}{C} K_{\text{Д1}} = \omega_{0i} K_{\text{Д1}};$$

$$M_{\text{П2}} = \omega_{0i} \frac{K_{\text{Д1}}}{1 + K_{\text{П}} K_{\text{Д1}} K_{\text{ОМ}}/C};$$

$$M_{\text{П1}}/M_{\text{П2}} = 1 + K_{\text{П}} K_{\text{Д1}} K_{\text{ОМ}}/C,$$

где  $M_{\text{П}}$  – момент пуска;  $M_{\text{КЗ}}$  – момент короткого замыкания.

Однако крутопадающая МХ непригодна для работы с переменной нагрузкой, так как скорость при этом нестабильна. Чем больше крутизна характеристики, измеряемая параметром  $\omega_{0i}/M_{\text{П2}}$ , тем лучше для ограничения момента и хуже для стабильности скорости. Поэтому отрицательную обратную связь по моменту включают только при определенных значениях этого момента (рисунок 2.5, прямая 3).

Схемотехнически такая задача решается просто. Для обеспечения вертикальности МХ ( $M_{\text{ПЗ}} = M_{\text{ОТС}} < K_{\text{н}} M_{\text{н}}$ ) включают отрицательную ОС через регулирующий орган с интегрирующим звеном или сочетают с полной компенсацией ЭДС двигателя.

Отметим, что на скорость холостого хода обратные связи по моменту (току) не влияют (ни отрицательные, ни положительные):

$$\omega_{0i} = U_3 \frac{K_{\text{П}}}{C}. \quad (2.33)$$

Для обеспечения требуемого значения  $\omega_{0i}$  при установленном значении  $K_{\text{П}}$  на вход системы нужно подать задающее напряжение

$$U_{3i} = \frac{\omega_{0i} C}{K_{\text{П}}}. \quad (2.34)$$

## 2. Отрицательная обратная связь по скорости.

Для определения механической характеристики необходимо убрать все лишние связи, то есть из всех коэффициентов оставим  $K_{\text{ОС}}$ :

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_3 K_{\text{П}}}{K_{\text{ОС}} K_{\text{П}} + C} - M \frac{C}{K_{\text{Д1}}} \frac{1}{K_{\text{ОС}} K_{\text{П}} + C}. \quad (2.35)$$

Отсюда следует, что для получения абсолютно жесткой МХ ( $\Delta\omega = 0$ ) нужно обеспечить  $K_{\text{ОС}} K_{\text{П}} = \infty$ , что нереально. Более того, увеличение  $K_{\text{ОС}}$  приводит к увеличению  $U_3$  при  $\omega = \text{const}$ . Здесь также имеются ограничения.

В целом стабилизирующие возможности ОСС относительно небольшие. Ее часто используют вместе с положительной (компенсационной) ОС по моменту (току) или как корректирующую связь с включением через регулятор.

### Статические характеристики при управлении перемещением

Такие характеристики свойственны системе, назначение которой заключается в управлении, с заданными быстродействием и точностью, линейными или угловыми перемещениями из одного положения в другое. При этом значения момента, скорости и ускорения (замедления) не влияют на погрешность конечных перемещений. Эти величины лишь ограничиваются при достижении опасных для системы показателей. В целом статическая характеристика системы для перемещений является характеристикой ошибки этих перемещений после останова.

Для установившегося процесса конечного перемещения следует принять  $\omega = 0$ ,  $M = M_C$ ; сигналы обратных связей отсутствуют ( $U_{OC} = U_{KW} = 0$ ).

Получим

$$[(U_3 K_{PC} - M_C K_{OM}) K_{PM} + M_C K_{KM}] K_{PI} K_{DI} = M_C C, \quad (2.36)$$

$$(L_3 - L) K_{\delta} K_{PI} = U_3. \quad (2.37)$$

Совместное решение уравнений дает

$$U_3 = \frac{M_C (C + K_{OM} K_{PM} K_{PI} K_{DI} - K_{KM} K_{PI} K_{DI})}{K_{PC} K_{PM} K_{PI} K_{DI}} = \delta K_{\delta} K_{PI}; \quad (2.38)$$

$$\delta = L_3 - L = \frac{M_C (C + K_{OM} K_{PI} K_{DI} K_{PM} - K_{KM} K_{PI} K_{DI})}{K_{PC} K_{PM} K_{PI} K_{DI} K_{\delta}}. \quad (2.39)$$

При отсутствии ошибки обработки заданного перемещения ( $L_3 - L = 0$ ) статическая характеристика имеет вид пунктирной прямой (рисунок 2.6). Реально процесс идет по сплошной кривой с ошибкой, определяемой по формуле (2.39). Формула подтверждает, что ошибка обработки перемещений не зависит от имевших место значений скорости, момента, ускорений системы и определяется лишь моментом нагрузки  $M_C$  и коэффициентами передачи главного тракта системы.

Если один из регуляторов РП или РС является интегрирующим:

$$K_{PI} = \frac{A}{p}, \quad K_{PC} = \frac{B}{p},$$

то по формуле (2.39) статическая ошибка обработки заданного перемещения  $L_3$  для статики ( $p=0$ ) отсутствует.

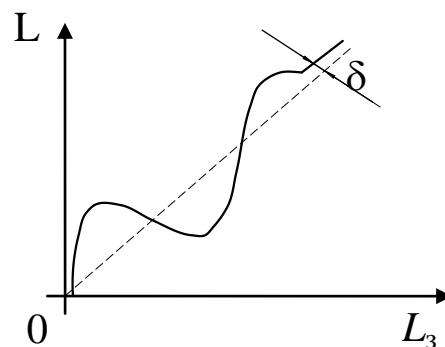


Рисунок 2.6- Статическая характеристика ЭМС

В других случаях ошибка присутствует. Чем выше чувствительность датчика положения и коэффициент усиления преобразователя силовой энергии  $K_{\Pi}$ , тем меньше ошибка. Момент нагрузки всегда увеличивает эту ошибку. Отметим, что ошибка в статике не зависит от задания на обработку перемещения  $L_3$ .

## 2.4 Синтез систем управления

Центральной задачей целевого проектирования автоматизированных систем, наилучшим способом удовлетворяющих заданным требованиям, является синтез. Это оптимальное, наиболее выгодное для статики и динамики построение структуры системы.

Проектирование систем включает схемотехнику, анализы и расчеты и обеспечивает достоверные показатели, часто не удовлетворяющие требуемым ожиданиям. Обеспечивая принципы работы, функционирование, технико-экономические показатели, требуемые характеристики в статике, системы могут оказаться неустойчивыми в динамике. При обеспечении требуемых динамических режимов схемотехника может не обеспечить требуемой точности статики (установившихся режимов).

Указанные противоречия снимаются путем замены расчета и анализа с коррекцией получаемых результатов на синтез по заданным требованиям с последующим анализом и коррекцией синтеза.

Основными этапами современного оптимального проектирования САУ являются:

- 1) построение функциональной и принципиальной схем САУ (схемотехника) и определение состава и параметров ее элементов;
- 2) составление структурной схемы с параметрами звеньев выполненной САУ;
- 3) выполнение синтеза структурной схемы с целью обеспечения нужных динамических показателей – быстродействия и качества переходных процессов;
- 4) проверка обеспечения требуемых характеристик в статике с корректировкой предыдущего синтеза.

Рассмотрим наиболее современные приемы синтеза САУ, обеспечивающие структуры подчиненного регулирования.

### ***Основные приемы оптимального синтеза структур САУ***

В конечном итоге оптимизация структур САУ путем синтеза должна обеспечить наилучшие по качеству переходные процессы, требуемое быстродействие и требуемые статические характеристики. Эта цель всегда достигается при любой сложности оптимизируемой структуры, при любых параметрах и показателях. Доказано, что динамика САУ будет наилучшей с требуемыми показателями качества и быстродействия переходных процессов, если переда-

точную функцию синтезированной системы удастся привести к виду, описываемому выражениями:

- для технического оптимума

$$W_{\text{ТО}i}(p) = \frac{1}{2Tai p(Tai p + 1)}; \quad (2.40)$$

- для симметричного оптимума

$$W_{\text{СО}}(p) = \frac{4Tai p + 1}{4Tai p} \frac{1}{2Tai p(Tai p + 1)}, \quad (2.41)$$

где  $Tai$  – эквивалентная постоянная времени синтезируемого контура, не подлежащая компенсации (коррекции);

$$Tai = Ta_1 \cdot 2^{i-1}; \quad (2.42)$$

$i$  – номер синтезируемого контура;

$Ta_1$  – расчетная эквивалентная постоянная времени внутреннего (первого) контура САУ, определяемая по заданному быстродействию системы  $t_{\text{ПП}}$ ;

$$Ta_1 = \frac{t_{\text{ПП}}}{8 \cdot 2^{k-1}}; \quad (2.43)$$

$k$  – число синтезируемых контуров (не номер  $i$ ).

Обеспечить оптимальные передаточные функции (2.40) и (2.41) можно, если в синтезируемом разомкнутом контуре убрать все постоянные времени, превышающие в сумме значение  $Tai$ , и величину общего коэффициента передачи контура заменить параметром  $\frac{1}{2}Tai$ . Такая задача решается включением

в главный тракт контура специального звена последовательной коррекции с необходимой передаточной функцией. Синтезируемая структура должна быть одноконтурной с отрицательной единичной обратной связью, чтобы передаточные функции (2.40) и (2.41) с интегральными составляющими были для замкнутого контура апериодическими. Если такой связи нет, то ее следует ввести. Например, при указанной связи ПФ типа (2.40) станет равной

$$W_{3\text{ТО}}(p) = \frac{1}{2Tai p(Tai p + 1)} \approx \frac{1}{2Tai + 1}. \quad (2.44)$$

Кроме указанных главных принципов синтеза структуры с помощью ПФ (2.40), (2.41) необходимо соблюдать дополнительные правила.

1. В многоконтурной системе синтез ведется поконтурно от внутреннего к последующему за ним внешнему (поочередно).

2. Контур не должен содержать много звеньев интегрирующего и дифференцирующего типов, иначе это усложнит исполнение корректирующих звеньев

ев. Для упрощения многозвеньевого контура целесообразно выделять в нем дополнительные внутренние контуры за счет введения отрицательных связей, не предусмотренных в системе по ее функциональному назначению.

3. Корректирующие звенья (их называют регуляторами) должны иметь стандартное исполнение. Характеристики таких регуляторов, в том числе передаточные функции, приводятся в многочисленной литературе по ТАУ.

4. Синтезируемый контур должен быть однолинейным, то есть перекрещивающиеся связи нужно вывести из него по правилам ТАУ.

5. Эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени  $T_{ai}$  внешнего синтезированного контура по отношению к такой же постоянной внутреннего контура должна быть больше не менее чем в 2 раза по правилу (2.46). Только в этом случае переходные процессы внутреннего контура заканчиваются до начала ПП во внешнем (динамически контуры становятся независимыми). Для быстродействующих систем нецелесообразно выполнять САУ с более чем 4 контурами регулирования, так как быстродействие подчиняется правилу

$$t = 8 \cdot 2^{k-1} T_{ai}.$$

6. Без заметной погрешности малые постоянные времени апериодических звеньев можно суммировать или прибавлять к большим:

$$(T_M p + 1)(T_\Delta p + 1)(T_\Pi p + 1)(T_{OC} p + 1) = (T_M p + 1)(T_\Delta p + 1) \times \\ \times [(T_\Pi + T_{OC})p + 1] = (T_M p + 1)[(T_\Delta + T_\Pi + T_{OC})p + 1],$$

если  $T_M > T_\Delta$ ,  $T_\Delta \gg T_\Pi + T_{OC}$ .

Реализуем основные приемы оптимального синтеза структур САУ на конкретных примерах.

## 2.5 Примеры синтеза

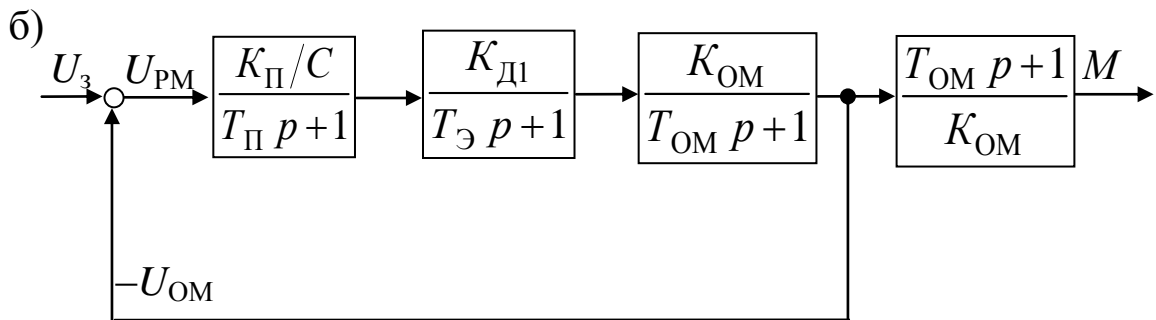
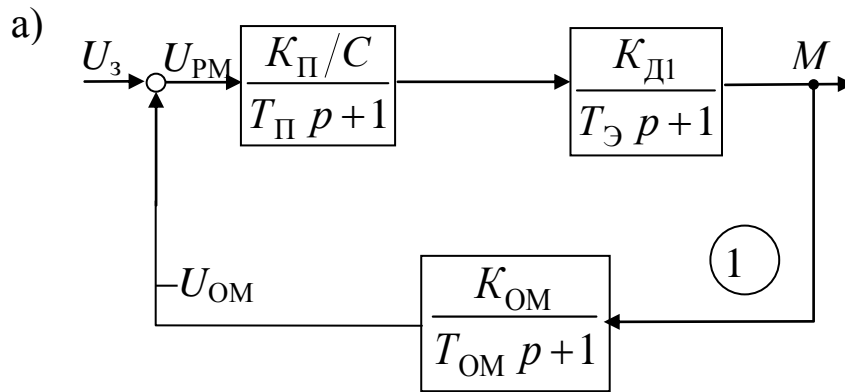
Рассмотрим контур системы, подлежащий синтезу (рисунок 2.7, а). Им является контур регулирования момента. Преобразуем контур под единичную обратную связь (рисунок 2.7, б). Он состоит из 3 апериодических звеньев, параметры которых известны:  $T_\Delta = 0,2$  с,  $T_\Pi = 0,01$  с  $>$   $T_{OM} = 0,005$  с. Согласно ТАУ контур обладает следующими характеристиками:

- переходный процесс устойчивый и протекает апериодически (по экспоненте), так как  $T_\Delta \gg (T_\Pi + T_{OM})$ ;
- длительность указанного ПП не менее  $t_{ПП} = 4T_\Delta = 4 \cdot 0,2$  с = 0,8 с;
- контур статический (нет интегрирующих звеньев), поэтому точность стабилизации момента не может быть высокой:

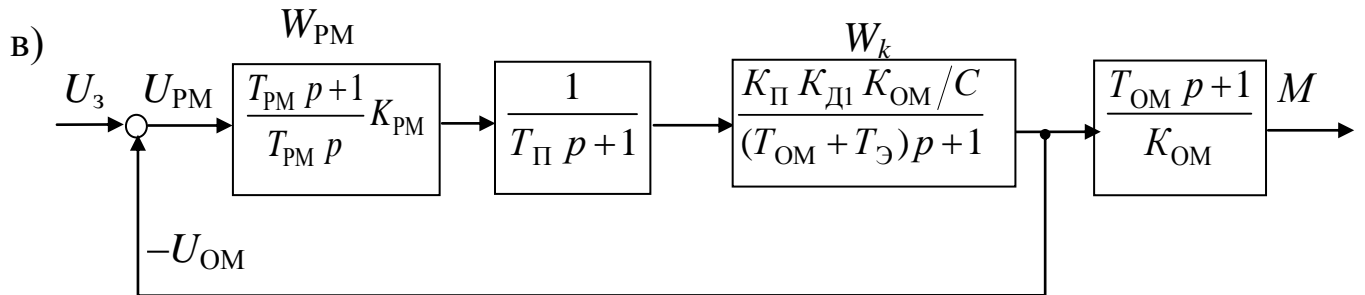
$$\Delta M = \frac{1}{1 + K_\Pi K_{д1} K_{OC}/C} \cdot 100\%.$$

По структурной схеме и ее параметрам можно с высокой точностью построить все необходимые статические и динамические характеристики и ука-

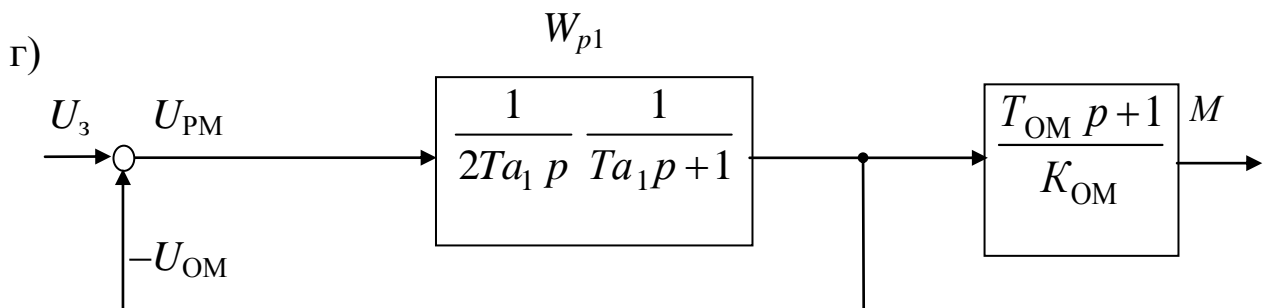
зять все возможности контура. Но хорош ли он? Сформулировав назначение и требования к характеристикам, мы сможем ответить на этот вопрос.



$$T_{\Pi} = 0,01\text{с}; T_{\text{Э}} = 0,2\text{с}; T_{\text{ОМ}} = 0,005\text{с}; T_{a_1} = 0,0125\text{с}$$



$$T_{\text{PM}} = T_{\text{Э}} + T_{\text{ОМ}}; K_{\text{PM}} = \frac{T_{\text{PM}} C}{K_{\Pi} K_{\text{Д1}} K_{\text{ОМ}}} \frac{1}{2T_{a_1}}; T_{a_1} = T_{\Pi}$$



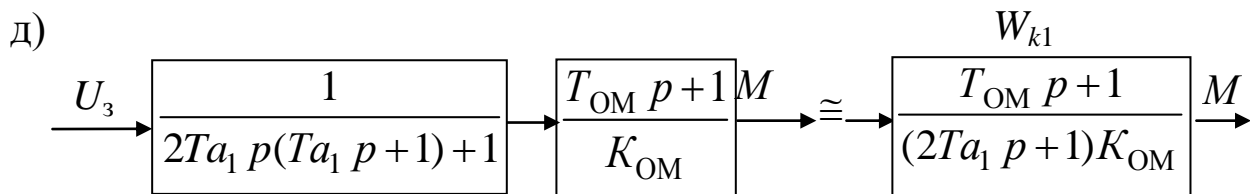


Рисунок 2.7- Синтез контура регулирования момента ЭМС

Будем считать, что синтезируемый контур является внутренним (первым) для САУ, то есть с него начинается синтез, до входа система имеет 3 контура ( $i=1, k=3$ ).

В целом САУ должна обладать быстродействием 0,4 с и астатизмом выходных величин. Видно, что контур не удовлетворяет требованиям системы: в 2 раза медленнее обрабатывает команды, чем допускается для всей системы, и является статическим. Чтобы контур был полезен системе, нужно ввести астатическое (интегральное) звено и наибольшую постоянную времени свести до значения

$$Tai = Ta_1 = \frac{t_{\text{ПП}}}{8 \cdot 2^{k-1}} = \frac{0,4}{8 \cdot 2^{3-1}} = \frac{0,4}{8,4} = 0,0125 \text{ с.}$$

Сравнивая величину  $Tai$  с постоянными времени контура, можно сделать вывод о безусловной компенсации  $T_{\Sigma}$ ; из  $T_{\Pi}$  и  $T_{\text{ОМ}}$  следует оставить  $T_{\Pi}$ , так как

$$T_{\text{ОМ}} \ll Tai < (T_{\Pi} + T_{\text{ОМ}}), \quad 0,005 \ll 0,0125 < 0,015.$$

Принимаем  $Tai = T_{\Pi} = 0,01$  с, что меньше расчетных 0,0125 с. Для обеспечения контуру ТО надлежит убрать из его структуры все коэффициенты передачи, постоянные времени  $T_{\Sigma}$ ,  $T_{\text{ОМ}}$  и ввести составляющую  $\frac{1}{2} Tai p$ . Эта задача решается вводом последовательного звена с передаточной функцией

$$\frac{(T_{\Sigma} + T_{\text{ОМ}})p + 1}{2Tai p} \frac{C}{K_{\Pi} K_{\text{Д1}} K_{\text{ОМ}}}.$$

Такую передаточную функцию может обеспечить операционный усилитель класса ПИ. Назовем его регулятором момента РМ с параметрами

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

где  $T_{\text{РМ}} = T_{\Sigma} + T_{\text{ОМ}}$ ;  $K_{\text{РМ}} = \frac{C T_{\text{РМ}}}{K_{\Pi} K_{\text{Д1}} K_{\text{ОМ}}} \frac{1}{2Ta_1}$ .

Синтезированная структура контура приведена на рисунок 2.7, в, при этом звено  $W_k$  подлежит корректировке – компенсации с помощью звена  $W_{\text{РМ}}$ . Сумма постоянных времени ( $T_{\text{ОМ}} + T_{\Sigma}$ ) компенсируется величиной  $T_{\text{РМ}} = (T_{\Sigma} +$



$T_{OM}$ ) апериодического звена. Все коэффициенты передачи несинтезированного контура компенсируются коэффициентом передачи регулятора  $K_{PM}$ .

В итоге синтеза получаем структурную схему, приведенную на рисунке 2.7, г. Преобразовав ее, получим структуру, обеспечивающую передаточную функцию (рисунок 2.7д).

Итак, на рисунке 2.7 представлена объемная иллюстрация процесса синтеза структурной схемы контура ( рисунок 2.7, а). Для наглядности подробно изложены все моменты. На практике такую процедуру графических преобразований можно не делать. Достаточно исходной взять структуру контура, приведенного на рисунке 2.7, б, и сразу найти передаточную функцию последовательного корректирующего звена:

$$W_{PM} \frac{K_{II} K_{DI} K_{OM} / C}{(T_{II} p + 1)(T_{\Theta} p + 1)(T_{OM} p + 1)} = W_{TO} = \frac{1}{2Tai p (Tai p + 1)}. \quad (2.45)$$

При  $Tai = T_{II}$  получим

$$W_{PM}(p) = \frac{[(T_{\Theta} + T_{OM})p + 1](T_{II}p + 1)}{2Tai p (Tai p + 1)} \frac{C}{K_{II} K_{DI} K_{OM}} = \frac{T_{PM} p + 1}{T_{PM} p} K_{PM},$$

где  $T_{PM} = T_{\Theta} + T_{OM}; \quad K_{PM} = \frac{C}{K_{II} K_{DI} K_{OM}} \frac{T_{PM}}{2Ta_1}.$

Главная задача синтеза – найти передаточную функцию и ее параметры для последовательного корректирующего звена, обеспечивающего контуру технический или симметричный оптимум. Такая задача в рассмотренном примере решена.

Рассмотрим трехконтурную систему, внутренний контур которой уже синтезирован и представлен звеном  $W_{k1}$  (рисунок 2.8). Передаточная функция  $W_{k1}$  показана на рисунке 2.7, д.

Параметры системы известны:  $T_M = 0,5$  с,  $T_{OM} = 0,005$  с. Продолжая синтез структуры второго контура можно оставить лишь составляющую  $1/(2Tai p + 1)$  и ввести интегральную составляющую  $1/4Tai$ . Все остальное убирается с помощью корректирующего последовательного звена, передаточную функцию которого  $W_{PC}$  найдем так:

$$\frac{1}{4Tai p (2Tai p + 1)} = \frac{T_{OM} p + 1}{2Tai p + 1} \frac{K_{D2}}{K_{OM}} \frac{T_{\Theta} p + 1}{T_M p + 1} \frac{K_{OC}}{T_{OC} p + 1} W_{k2}.$$

Отсюда

$$W_{k2}(p) = \frac{(2Tai p + 1)(T_M p + 1)(T_{OC} p + 1)}{(2Tai p + 1)(T_{OM} p + 1)(T_{\Theta} p + 1)} = \frac{K_{OM}}{K_{OC} K_{D2} \cdot 4Tai p}.$$

Поскольку  $T_M > T_{\Theta} \gg (T_{OM} + T_{OC})$ , то можно записать

$$W_{k2}(p) = \frac{T_M p + 1}{T_M p} \frac{K_{OM} T_M}{K_{OC} K_{D2} \cdot 4T_{ai}} \frac{1}{(T_{\Theta} + T_{OM} - T_{OC})p + 1} =$$

$$= \frac{T_{PC} p + 1}{T_{PC} p} K_{PC} \frac{1}{T_{\Phi1} p + 1} = W_{PC} W_{\Phi1},$$

где  $T_{PC} = T_M$ ;  $T_{\Phi1} = T_{\Theta} + T_{OM} - T_{OC}$ ;

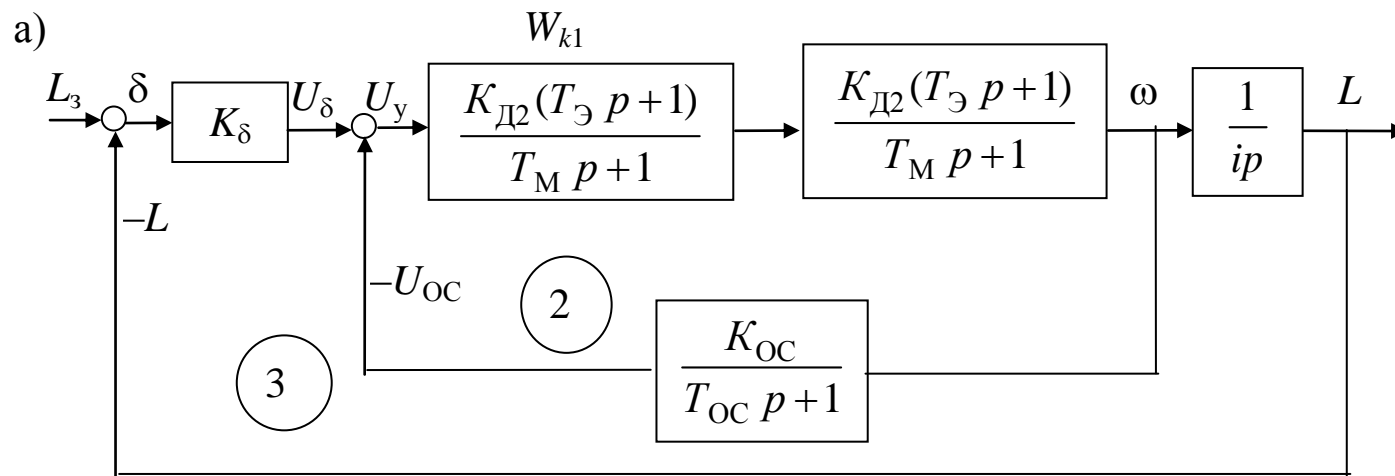
$$K_{PC} = \frac{K_{OM} T_M}{K_{OC} K_{D2} \cdot 4T_{ai}}.$$

Таким образом, корректирующий блок  $W_{k2}$  будет состоять из последовательно включенных регулятора  $W_{PC}$  класса ПИ и R-C-фильтра  $W_{\Phi1}$ . Структурная схема для второго контура приведена на рисунке 2.8, б. Результат синтеза приведен на рисунке 2.8, в.

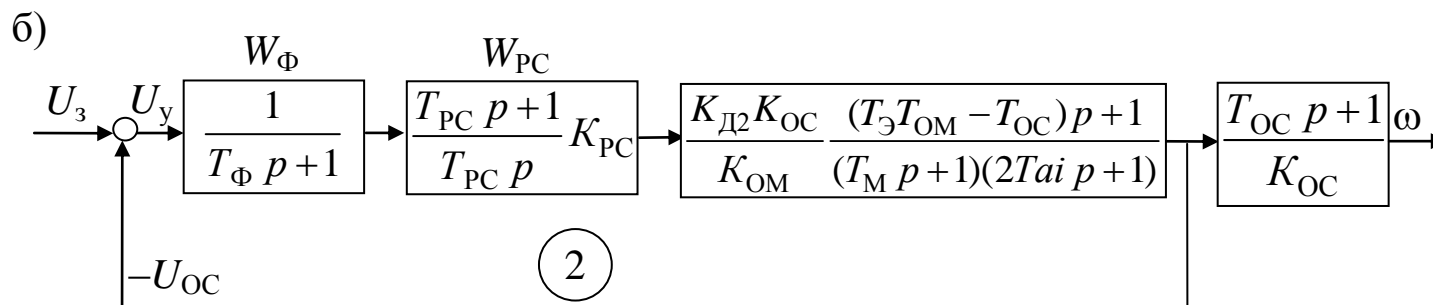
Третий контур легко синтезировать на ТО вводом звена – регулятора пропорционального типа (класс П) с коэффициентом передачи (усиления)

$$K_{PI} = \frac{K_{OC} i}{K_{\delta} \cdot 8T_{ai}}.$$

В результате передаточная функция оптимально синтезированной на ТО трехконтурной структуры получит вид, представленный на рисунке 2.8, г.



$$Ta_2 = 2Ta_1 = 2T_{\Pi} = 0,02 \text{ с}; T_M = 0,5 \text{ с}; T_{OC} = 0,003 \text{ с}$$



$$T_{\Phi} = T_{\Delta} + T_{OM} - T_{OC}; T_{PC} = T_M; K_{PC} = \frac{K_{OM} T_{PC}}{K_{D2} K_{OC}} \frac{1}{4Ta_1}$$

Рисунок 2.8 - Синтез трехконтурной системы (окончание см. на следующей стр.)

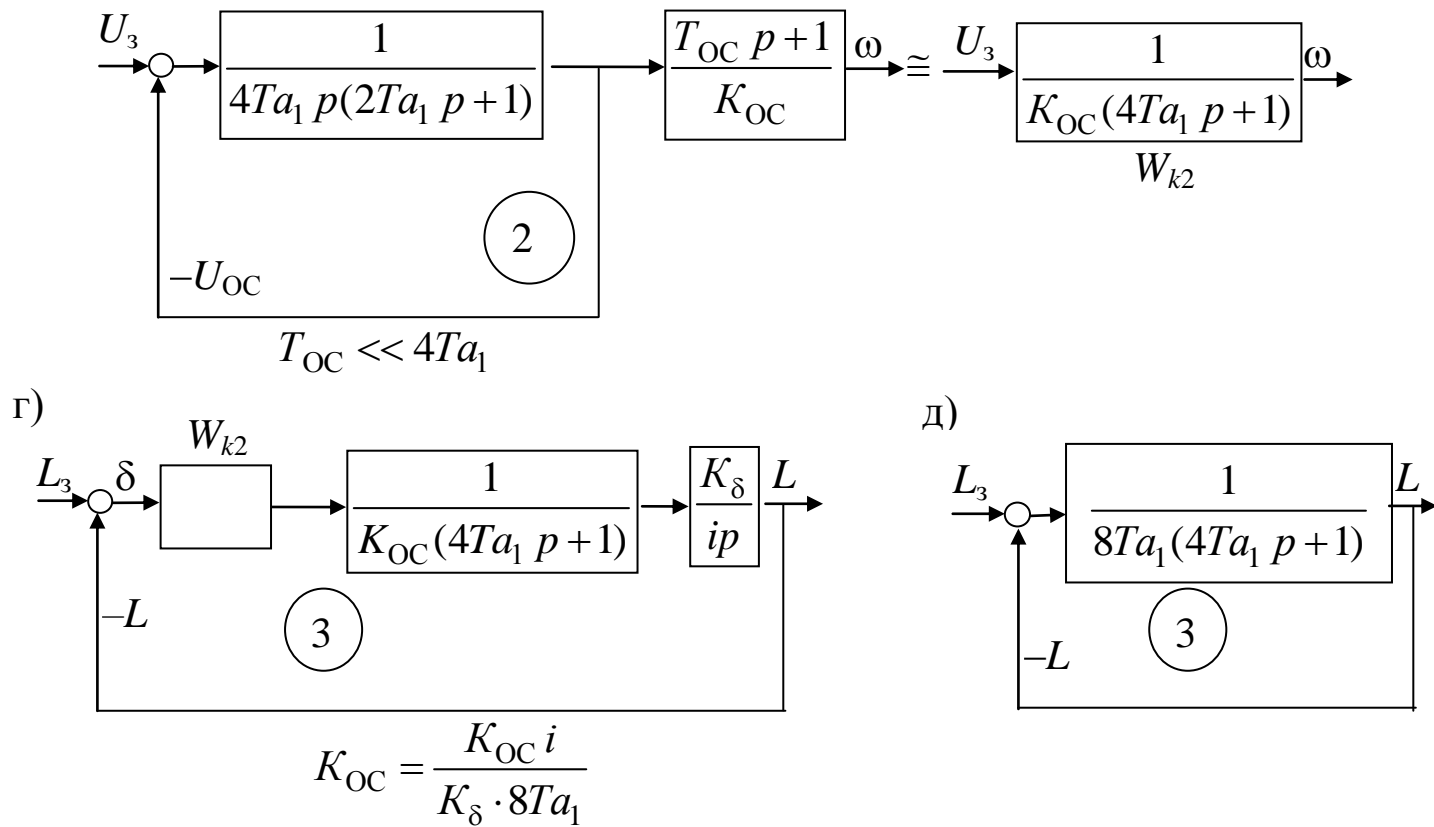


Рисунок 2.8 - Окончание преобразования

Для технических систем регуляторы класса П часто бывают неприемлемыми, как не исключаяющие в системах ошибок при отработке сигналов. Если в структуре (рисунок 2.8, б) вместо пропорционального регулятора применить ПИ-регулятор, то ее синтезируют, ориентируясь на характеристики симметричного оптимума с ПФ по формулам (2.41) и (2.44).

При этом следует принять

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

где  $T_{\text{РП}} = 16Ta_1 = 16 \cdot T_{\text{П}}$ ;  $K_{\text{РП}} = \frac{K_{\text{ОС}} i}{K_{\delta} \cdot 8Tai}$ .

Подчеркнем, что  $K_{\text{РП}}$  для П и ПИ регуляторов одинаковы. После синтеза внешнего контура структурной схемы (рисунок 2.8, а) на СО получим ее передаточную функцию для ЛАЧХ:

$$W_{\text{РЗ}}(p) = \frac{16T_{\text{П}} p + 1}{16T_{\text{П}} p} \frac{1}{8T_{\text{П}} p(4T_{\text{П}} p + 1)}.$$

Рассмотренные примеры синтеза структурных схем не охватывают всего множества возможных вариантов, но простота синтеза очевидна. Синтез обеспечивает САУ любой сложности наилучшие характеристики в статике и динамике без изменения функций исполнения, сводит к минимуму применение многочисленных методов анализа, разработанных в ТАУ.

## Литература

1. Петраков, Ю.В. Теория систем автоматического управления технологическими системами – Ст. Оскол.: ТНТ, 2013. – 352 с
2. Титов, Д.В. Основы теории управления: учеб. пособие / Д. В. Титов, И.Е. Чернецкая, Т. А. Ширабакина ; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2022. – 204 с.
3. Федосенков, Б. А. Теория автоматического управления: классические и современные разделы [Электронный ресурс]: учебное пособие / Б. А. Федосенков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет». – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2023. – 322 с. – Режим доступа: [biblioclub.ru](http://biblioclub.ru)
4. СТУ 02.030-2023. Курсовые работы (проекты). Выпускные квалификационные работы. Общие требования к структуре и оформлению.