



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

И. В. Дорощенко

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
к курсовой работе
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2019

УДК 681.5.01(075.8)
ББК 31.291-5.05я73
Д69

Рецензент: доц. каф. «Теоретические основы электротехники»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *А. В. Козлов*

Дорощенко, И. В.
Д69

Теория автоматического управления : учеб.-метод. пособие к курсовой работе для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Дорощенко. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – 47 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Даны задания на курсовую работу, составленные в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теория автоматического управления»

Приведены примеры выполнения всех разделов курсовой работы, изложены рекомендации по их оформлению, а также необходимые краткие теоретические и справочные сведения для студентов специальности 1 53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 681.5.01(075.8)
ББК 31.291-5.05я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2019

Введение

Курсовая работа по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальности 1 53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» направлена на углубление и закрепление теоретического материала на примере синтеза регуляторов, статического и динамического расчетов наиболее широко распространенной в отечественной и зарубежной практике и имеющей высокие показатели качества двухзонной системы управления электроприводом постоянного тока с подчиненными контурами регулирования токов якоря и возбуждения [1, 2, 4].

Она выполняется в виде расчетно-пояснительной записки объемом 25-35 страниц текста, включая рисунки, схемы, графики и таблицы.

Расчеты и пояснения в записке пишутся на листах белой нелинованной бумаги стандартного размера 297x210 мм, а графический материал выполняется карандашом на миллиметровке того же размера.

Вычисления производятся в абсолютных единицах системы СИ, условные графические и буквенные обозначения должны соответствовать ГОСТам и ЕСКД [3].

Оформляют записку, начиная с титульного листа - обложки, затем располагают бланк с заданием на курсовую работу, подписанный преподавателем и студентом, после чего следуют разделы:

- введение;
- анализ технического задания и блок-схема рассчитываемого канала (зоны) регулирования;
- структурная схема канала регулирования и ее преобразования; – синтез регуляторов;
- синтез регуляторов;
- статический расчет заданного канала регулирования;
- динамический расчет канала;
- синтез электрических схем регуляторов;
- принципиальная электрическая схема всего канала регулирования и описание ее принципа действия;
- заключение;
- литература;
- содержание.

1. Задания на курсовую работу

В результате выполнения курсовой работы студентом должны быть синтезированы электрические схемы регуляторов для одного из каналов (зон) двухзонной САУ с подчиненным регулированием токов якоря и возбуждения, функциональная схема которой представлена на рис.1.1.

Номинальные технические данные регулируемого электродвигателя постоянного тока студент выбирает по таблице 1.1 согласно номера по списку в групповом журнале. Далее в соответствии с трехзначным номером варианта, выданным студенту преподавателем, из таблицы 1.2 выбираются по первой цифре варианта номинальные технические данные тиристорных преобразователей и датчиков, из таблицы 1.3 - по второй цифре варианта величины момента инерции нагрузки и скачков управления и возмущения, из таблицы 1.4 - по третьей цифре варианта виды оптимальных настроек регуляторов. Вариант канала (якорный или возбуждения) и зоны регулирования ($\omega \leq \omega_N$ или $\omega \geq \omega_N$) задаются преподавателем.

Рекомендуется курсовую работу по ТАУ по теме «Синтез регуляторов в двухзонной системе управления электроприводом постоянного тока с подчиненным регулированием токов якоря и возбуждения» выполнять поэтапно:

1. Согласно варианта задания и выбрать из таблиц численные данные.
2. Составить блок-схему и структурную схему заданного канала и рассчитать параметры передаточных функций ее звеньев.
3. Преобразовать структурные схемы контуров регулирования к нормальному виду и произвести синтез регуляторов согласно заданию методом последовательной оптимизации по желаемым передаточным функциям.
4. Произвести статический расчет САУ.
5. Рассчитать на ПЭВМ переходные процессы в оптимизированной САУ по управлению и возмущению, с целью определения качества настройки регуляторов по их типовым техническим показателям.
6. Синтезировать электрические схемы регуляторов, фильтров, задатчика интенсивности, ограничителей, выделителя модуля, составить общую принципиальную электрическую схему САУ с перечнем элементов, дать краткое описание ее принципа действия.

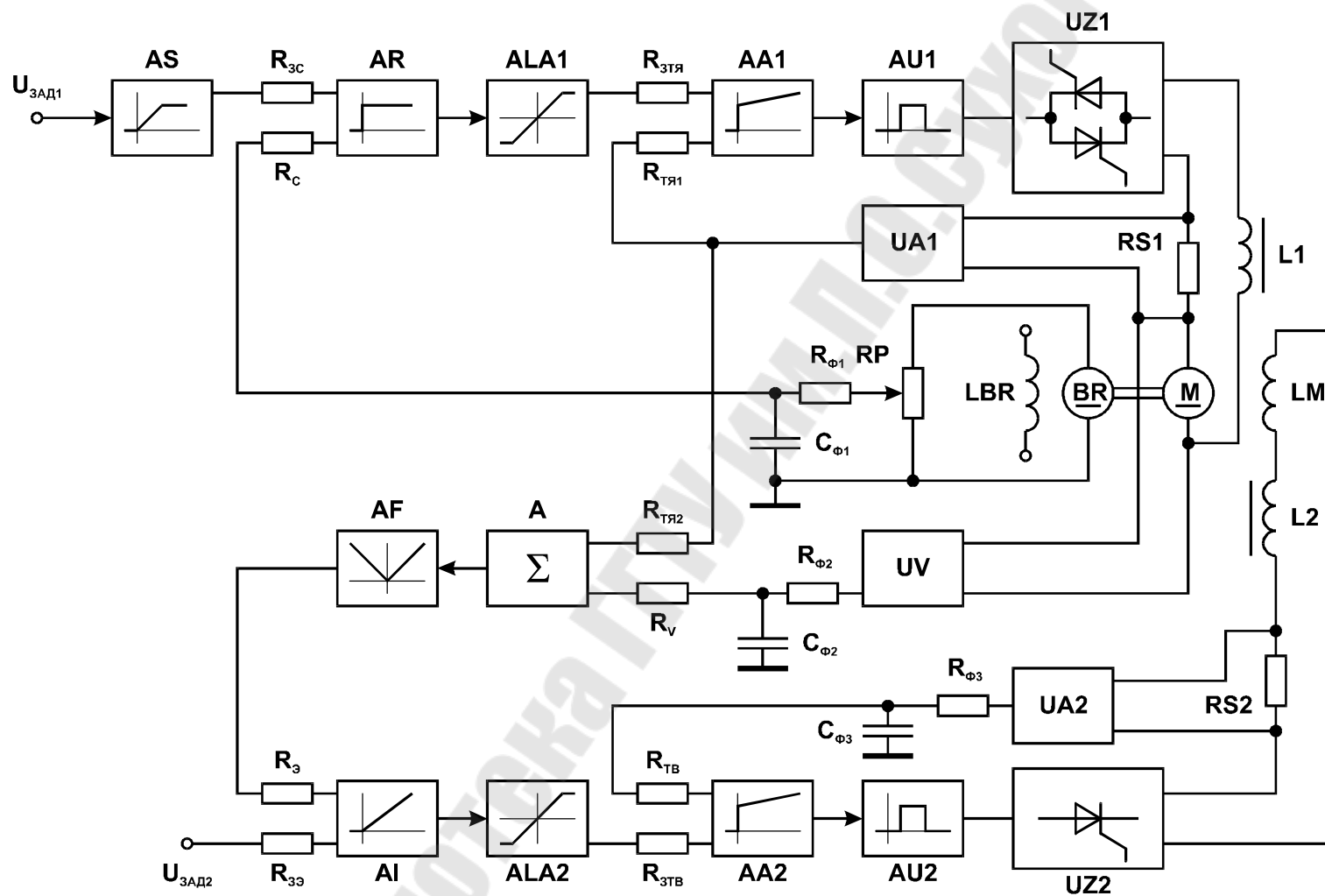


Рис. 1.1. Функциональная схема двухзонной системы автоматического управления электроприводом постоянного тока с подчиненным регулированием токов якоря и возбуждения

Таблица 1.1

Номинальные технические данные электродвигателей

№ студента по списку	Мощность P_N , кВт	Скорость n_n , об/мин	Момент M_N , Н·м	Напряжение якоря $U_{ЯН}$, В	Ток якоря $I_{ЯН}$, А	Сопрот. якоря $R_{Я}$, Ом	Индукт. якоря $L_{Я}$, мГн	Пост. врем. якоря $T_{Я}$, мс	Напряжение возб. $U_{ВН}$, В	Ток возб. $I_{ВН}$, А	Сопрот. возб. $R_{В}$, Ом	Индукт. возб. $L_{В}$, мГн	Пост. врем. возб. $T_{В}$, мс	Пост. врем. вихр. токов $T_{ВТ}$, мс	Пост. электр. $K_E=K_M$, В·с/рад·Вб	Момент инерц. якоря $J_{Я}$, кг·м ²	Электро-мех. пост. врем. $T_{ЭМ}$, мс	Пост. магн. потока $K_{ФН} \cdot W_{В}$, Вб·А ⁻¹
1	0.75	1000	7,16	52	18	–	1,18	2,05	24	5	–	12	–	2	40	0,01	–	10^{-3}
2	1.1	1000	10,5	56	24	0,42	0,8	–	24	6	–	15	–	1,8	44	0,013	–	$2 \cdot 10^{-4}$
3	1.1	750	14	44	31,5	0,29	0,732	–	–	6	4	18	–	2,2	50	0,035	–	$5 \cdot 10^{-4}$
4	1.1	600	17,5	47	29	–	0,855	2,75	–	6	4,5	16	–	1,9	60	–	10,1	$2 \cdot 10^{-3}$
5	1.1	500	21	50	28	–	1,108	2,89	–	5	4,8	–	4,1	2	70	–	8,6	$5 \cdot 10^{-4}$
6	2.2	600	35	53	50	0,18	0,422	–	–	10	4,8	–	3,8	2,5	60	–	14,2	10^{-4}
7	3.0	600	47,7	70	50	0,202	0,554	–	–	10	7	–	2,6	1,8	70	0,238	–	$8 \cdot 10^{-4}$
8	4.0	500	76,4	66	78,5	–	0,337	1,75	–	12	5,5	19	–	3	64	0,242	–	$6 \cdot 10^{-4}$
9	5.5	500	105	78,5	90	–	0,675	3,51	78,5	8	–	–	1,6	1,6	72	–	7,9	$9 \cdot 10^{-4}$
10	7.5	500	143,2	58	182	0,093	–	9,25	58	9	–	–	2	2	60	–	9,9	$7 \cdot 10^{-4}$
11	11.0	600	175	82	180	0,117	–	10,6	82	12	–	–	2,4	2	68	0,242	–	$4 \cdot 10^{-4}$
12	6.0	2500	22,8	400	15,3	0,513	–	14,2	200	1,5	–	–	0,8	0,7	100	0,046	–	$3 \cdot 10^{-4}$
13	6.0	2360	24,3	440	14,1	1,07	18,5	–	220	–	25,6	14	–	2,4	90	0,038	–	$2 \cdot 10^{-4}$
14	6.0	2200	26	440	15,6	3,52	18	–	220	–	46,5	16	–	1,6	86	0,083	–	10^{-4}
15	12.8	2000	61,1	380	37,4	1,01	6	–	70	–	42	15	–	1,8	100	0,655	–	$2 \cdot 10^{-4}$
16	0.75	1000	7,16	52	20	0,725	–	4,6	–	5	4,8	–	4	2,9	40	–	13,5	$3 \cdot 10^{-4}$
17	1.0	1000	9,55	56	25	0,64	0,8	–	–	6	4	–	4,4	3,8	46	0,013	–	$4 \cdot 10^{-4}$
18	1.0	750	12,7	44	28	0,29	0,732	–	24	6	–	16	–	2,3	52	0,034	–	$5 \cdot 10^{-4}$
19	1.3	600	20,6	47	35	0,282	–	3,62	47	6	–	–	2,7	2	58	0,043	–	$6 \cdot 10^{-4}$
20	1.2	500	22,8	50	32	0,4	1,102	–	50	7	–	20	–	2	68	–	13,6	$7 \cdot 10^{-4}$
21	2.3	600	36,6	53	54	–	0,422	2,2	–	7	7,57	17,5	–	2,9	60	–	22	$5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 1.2

Номинальные технические данные тиристорных преобразователей и датчиков

№ варианта	Коэффициент передачи тиристорного преобразователя $K_{тп}$, о.е.	Постоянная времени СИФУ и запаздывание ТП $T_{тп}$, мс	Сопротивление токоограничивающего реактора $R_{гр}$, МОм	Индуктивность токоограничивающего реактора $L_{гр}$, мГн	Сопротивление сглаживающего реактора $R_{ср}$, МОм	Индуктивность сглаживающего реактора $L_{ср}$, мГн	Коэффициент передачи тахогенератора $K_{тг}$, $\frac{мВ \cdot об}{мин}$	Постоянная времени тахогенератора $T_{тг}$, мс	Постоянная времени датчика тока $T_{дт}$, мс	Постоянная времени датчика напряжения $T_{дн}$, мс	Задающий сигнал скорости $U_{зад}$, В	Задающий сигнал тока $U_{зт}$, В	Сигналы обратных связей $U_{ос}$, В
1	10	1.6	175	1.08	130	0.75	10	2.0	2.5	3.5	8.0	4.0	4.0
2	12	1.8	220	1.53	98.2	0.60	20	6.2	3.5	4.5	7.0	3.0	2.5
3	20	2.0	265	2.02	98.0	0.50	30	5.3	4.5	3.0	6.0	2.0	2.0
4	18	3.0	62	0.54	87.0	0.48	40	4.7	3.0	2.0	5.0	3.5	3.0
5	8	2.5	82	0.76	64.5	0.50	50	3.2	2.0	1.5	4.0	2.5	2.5
6	24	1.5	102	1.01	54.7	0.50	45	1.6	1.5	2.0	4.5	4.0	4.0
7	30	4.0	22.5	0.27	43.2	0.40	35	2.8	2.0	3.2	5.5	2.5	2.0
8	14	3.5	29.5	0.38	24.0	0.40	25	3.2	3.2	2.4	6.5	3.5	3.0
9	16	2.8	37.0	0.505	33.2	0.32	15	1.8	2.4	1.8	7.5	2.0	1.5
10	26	3.6	8.6	0.135	32.0	0.25	30	2.9	1.8	4.5	8.0	3.0	2.5

Таблица 1.3

Величины момента инерции нагрузки и скачков управляющих и возмущающих сигналов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Момент инерции нагрузки J_n , кг·м ²	0,1	0,2	0,4	0,6	0,5	0,3	0,35	0,45	0,55	0,25
Относит. скачок задания скорости $\frac{U_{зад1}}{U_{зад1N}}$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,04	0,09	0,1	0,085	0,075	0,05
Относит. скачок задания ЭДС $\frac{U_{зад2}}{U_{зад2N}}$	0,06	0,07	0,08	0,04	0,09	0,1	0,085	0,075	0,05	0,08
Относит. скачок момента нагрузки $\frac{\Delta M_{ст}}{M_N}$	0,07	0,08	0,04	0,09	0,1	0,085	0,075	0,05	0,08	0,06
Относит. скачок сетевого напряжения $\frac{\Delta E_c}{U_{ЯN}}$	0,08	0,04	0,09	0,1	0,085	0,075	0,05	0,08	0,06	0,07

Таблица 1.4

Варианты настроек регуляторов

№ варианта		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Внутренний контур	T0										
	CO										
	УСО										
Внешний контур	T0										
	CO										
	УСО										

1.1 Краткие сведения о типовой двухзонной САУ с подчиненными контурами регулирования токов якоря и возбуждения электропривода постоянного тока

В функциональной схеме заданной САУ (рис. 1.1) обозначено:

AS - задатчик интенсивности, определяющий темп нарастания (убывания) частоты вращения электродвигателя при пуске (торможении);

AR - регулятор скорости двигателя;

AA1, AA2 - регуляторы тока якоря и возбуждения электродвигателя;

AI - регулятор ЭДС якоря двигателя;

AU1, AU2 - системы импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорными преобразователями каналов якоря UZ1 и возбуждения UZ2;

L1, L2 - сглаживающие дроссели тиристорных преобразователей;

M, LM - регулируемый электродвигатель постоянного тока и его обмотка возбуждения;

BR, LBP - тахогенератор и его обмотка возбуждения;

RS1, RS2 - шунты, являющиеся измерителями токов якоря и возбуждения;

UA1, UA2 - датчики токов якоря и возбуждения, служащие для гальванической развязки и согласования силовых и управляющих электрических цепей;

UV - датчик напряжения на якоре электродвигателя;

A - сумматор, вычисляющий ЭДС якоря;

ALA1, ALA2 - функциональные блоки-ограничители тока якоря и возбуждения;

AF - функциональный блок - выделитель модуля;

R_{ЗС}, R_{ЗТЯ}, R_{ЗТВ}, R_{ЗЭ} - резисторы, служащие для подачи сигналов задания скорости, тока якоря, тока возбуждения и ЭДС якоря;

R_С, R_{ТЯ1}, R_{ТЯ2}, R_{ТВ}, R_V, R_Э - резисторы, служащие для подачи сигналов обратной связи по скорости, токам якоря и возбуждения, напряжения и ЭДС якоря;

R_{Ф1}, C_{Ф1}, R_{Ф2}, C_{Ф2}, R_{Ф3}, C_{Ф3} - пассивные фильтры.

Данная САУ позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя по двум зонам. Со стороны якорной цепи электродвигателя за счет увеличения сигнала задания якорного канала $U_{ЗАД1}$ от минимального до номинального значения можно увеличивать угловую скорость двигателя от минимальной ω_{\min} до номинальной величины. При этом канал возбуждения поддерживает магнитный поток на номинальном уровне. Это достигается следующим образом: установка уровня ограничения блока ALA2 соответствующего напряжению задания номинального тока возбуждения; наличие в регуляторе ЭДС интегрирующей части; подача номинального значения сигнала задания канала возбуждения $U_{ЗАД2}$. При этом сигнал ре-

гулятора ЭДС будет снижаться и блок ALA2 будет выходить из ограничения, снижая сигнал задания тока возбуждения только при отрицательном рассогласовании на входе регулятора ЭДС. А это возможно только при превышении ЭДС якоря и, следовательно, скоростью своих номинальных значений.

Это первая зона регулирования угловой скорости двигателя, в которой регулирующую роль выполняет только якорный канал.

Если продолжать увеличивать сигнал задания якорного канала $U_{ЗАД1}$ от номинального до максимального, то можно продолжать увеличивать угловую скорость двигателя от номинальной до допустимой по паспорту максимальной.

Здесь роль канала возбуждения сводится к стабилизации ЭДС якоря, поскольку $U_{ЗАД2}$ не меняется. Теперь ограничитель ALA2 работает в линейной зоне и первоначальное уменьшение ΔU_{Σ} вызовет уменьшение тока возбуждения I_B , а значит и магнитного потока Φ_B , что вместе с ростом частоты вращения и оставит ЭДС якоря на прежнем уровне.

Это вторая зона регулирования угловой скорости двигателя, в которой основную регулирующую роль выполняет канал возбуждения. Влиянием якорного канала можно пренебречь ввиду его более высокого быстродействия, чем канала возбуждения.

Канал управления электродвигателем по якорю имеет два контура регулирования: внешний контур регулирования скорости (с обратной связью по частоте вращения от тахогенератора BR) и, подчиненный ему, внутренний контур регулирования тока якоря (с обратной связью по току якоря от шунта RS1 и датчика тока UA1).

Канал управления электродвигателем по возбуждению также имеет два контура регулирования: внешний контур регулирования скорости (с обратной связью по ЭДС якоря, пропорциональной частоте вращения, от датчиков тока UA1 и напряжения якоря UV, через вычислитель ЭДС на сумматоре A) и, подчиненный ему, внутренний контур регулирования тока возбуждения (с обратной связью по току возбуждения от шунта RS2 и датчика тока UA2).

Каналы управления по якорю и возбуждению будем в дальнейшем считать независимыми, что обусловлено логикой процесса регулирования частоты вращения по двум зонам, а также соответствующей настройкой ограничителей ALA1 и ALA2.

1.2 Линеаризованная структурная схема двухзонной САУ подчиненного регулирования

По функциональной схеме САУ составим ее структурную схему (рис.1.2) в линеаризованном виде, исходя из следующих соображений.

Нелинейности электродвигателя и тиристорных преобразователей линеаризуем обычным порядком, записывая их дифференциальные уравнения (передаточные функции) для малых приращений управляющих и возмущающих сигналов [1, 2, 4].

Нелинейные блоки ALA1, ALA2, AF заменим на безинерционные пропорциональные звенья с коэффициентами передачи, равными единице, что допустимо, если рассматривать рабочие, а на предельные режимы регулирования.

Передаточные функции регуляторов будем считать неизвестными, так как их требуется определить в процессе выполнения курсовой работы для синтеза электрических схем регуляторов. На функциональной схеме САУ (рис.1.1) регуляторы условно представлены типовыми (AR - П-регулятор; AA1, AA2 - ПИ-регуляторы, AI - И-регулятор по классификации приложения 1), что не всегда удовлетворяет заданию.

Операторные изображения по Лапласу отклонений сигналов управления и возмущения от установившегося значения на структурной схеме САУ представленной на рис. 1.2, обозначены следующим образом (оператор “p” для краткости записи условно опущен):

$U_{\text{ЗAD1}}, U_{\text{ЗAD2}}$ - сигналы задания угловой скорости двигателя ω по каналам якоря и возбуждения;

$U_{\text{ЗТЯ}}, U_{\text{ЗТВ}}$ - сигналы задания токов якоря $I_{\text{я}}$ и возбуждения $I_{\text{в}}$;

$U_{\text{ОСС}}, U_{\text{ОСТЯ}}, U_{\text{ОСТВ}}, U_{\text{ОСН}}, U_{\text{ОСЭ}}$ - сигналы обратной связи по скорости двигателя, токам якоря и возбуждения, напряжению $U_{\text{я}}$ и ЭДС якоря $E_{\text{я}}$;

$\Delta U_{\text{РС}}, \Delta U_{\text{РТЯ}}, \Delta U_{\text{РТВ}}, \Delta U_{\text{РЭ}}$ - сигналы рассогласования на входах регуляторов скорости, токов якоря и возбуждения, ЭДС якоря $E_{\text{я}}$;

$E_{\text{С}}, E_{\text{ТП1}}, E_{\text{ТП2}}$ - ЭДС сети и тиристорных преобразователей канала якоря и возбуждения;

$U_{\text{УТП1}}, U_{\text{УТП2}}$ - управляющие сигналы СИФУ тиристорных преобразователей каналов якоря и возбуждения;

$\Phi_{\text{В}}, M_{\text{ДВ}}, M_{\text{СТ}}$ - магнитный поток, электромагнитный и статический нагрузочный момент электродвигателя.

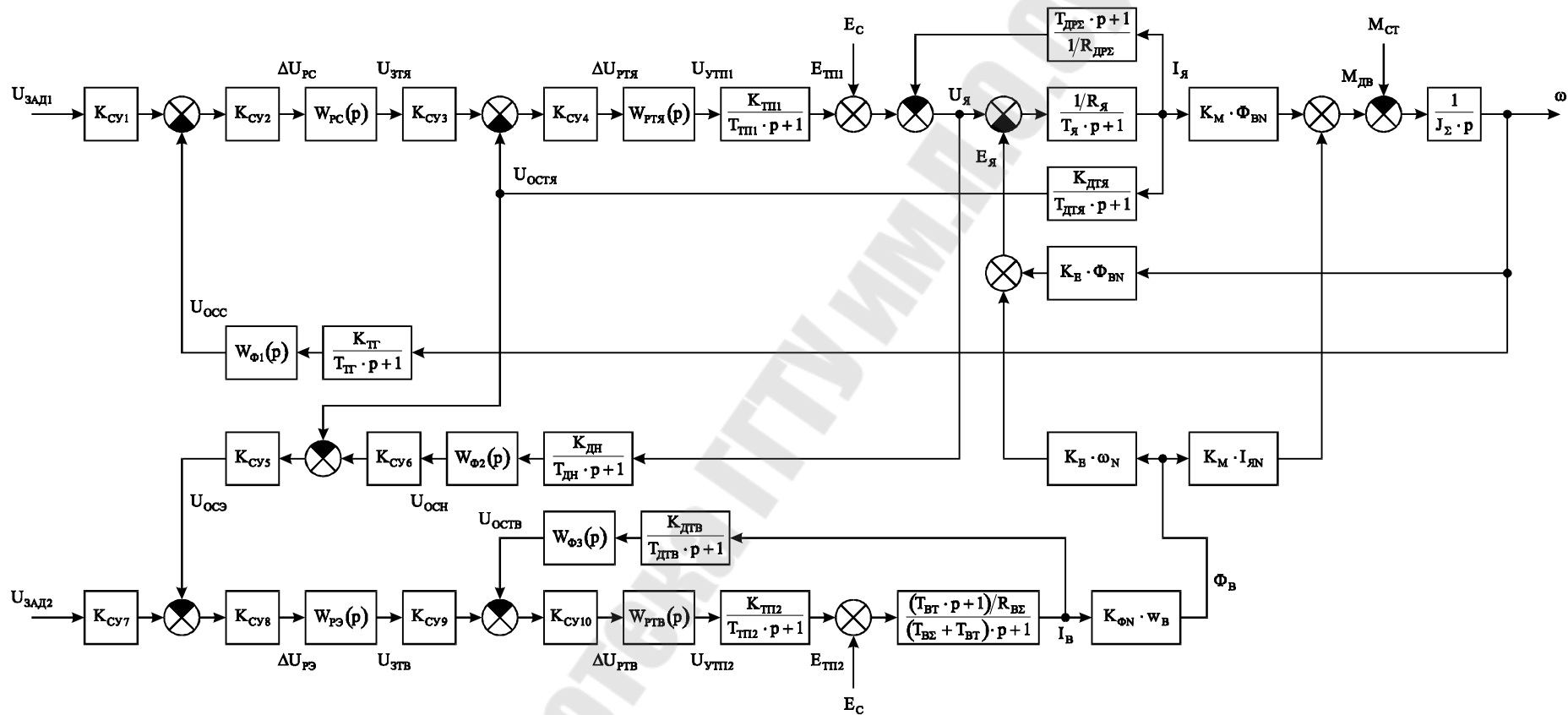


Рис. 1.2. Линеаризованная структурная схема САУ

Передаточные функции и их параметры на структурной схеме обозначены так:

$W_{PC}(p)$, $W_{PTЯ}(p)$, $W_{PTВ}(p)$, $W_{PЭ}(p)$ - передаточные функции регуляторов скорости, токов якоря и возбуждения, ЭДС якоря:

$W_{Ф1}(p)$, $W_{Ф2}(p)$, $W_{Ф3}(p)$ - передаточные функции фильтров;

$K_{СУ1}$, $K_{СУ2}$, ... $K_{СУ10}$ - коэффициенты передачи, сравниваемых устройств;

$K_{ТГ}$, $K_{ДТЯ}$, $K_{ДТВ}$, $K_{ДН}$ - коэффициенты передачи тахогенератора и датчиков токов якоря и возбуждения, напряжения на якоре;

$T_{ТП1}$, $T_{ТП2}$, $K_{ТП1}$, $K_{ТП2}$ - постоянные времени и коэффициенты передачи тиристорных преобразователей каналов якоря и возбуждения;

$L_{Я}$, $R_{Я}$ - индуктивность и активное сопротивление якорной цепи двигателя;

$L_{ДРС}$, $R_{ДРС}$ - суммарные индуктивность и активное сопротивление сглаживающего и токоограничивающего реакторов тиристорного преобразователя в якорном канале;

$L_{ВЭ}$, $R_{ВЭ}$ - суммарные индуктивность и активное сопротивление цепи возбуждения электродвигателя, сглаживающего и токоограничивающего реакторов тиристорного преобразователя в канале возбуждения;

$T_{ТГ}$, $T_{ДТЯ}$, $T_{ДТВ}$, $T_{ДН}$ - постоянные времени тахогенератора и датчиков токов якоря и возбуждения, напряжения на якоре;

$$T_{Я} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}, \quad T_{ДРС} = \frac{L_{ДРС}}{R_{ДРС}}, \quad T_{ВЭ} = \frac{L_{ВЭ}}{R_{ВЭ}}, \quad T_{ВТ} - \text{постоянные времени}$$

якорной цепи, реакторов тиристорного преобразователя в канале якоря (суммарная), цепи возбуждения (суммарная), вихревых токов;

$K_E \cdot \omega_N$, $K_E \cdot \Phi_{ВН}$, $K_M \cdot I_{ЯН}$, $K_{ФН} \cdot W_B$ - коэффициенты передачи блоков структурной схемы двигателя постоянного тока;

J_{Σ} - суммарный момент инерции ротора электродвигателя и нагрузки на его валу.

При расчете постоянных времени и коэффициентов передачи блоков структурной схемы по номинальным техническим параметрам элементов САУ, данным в задании на курсовую работу, можно пользоваться следующими рекомендациями.

Коэффициенты передачи сравниваемых устройств по прямому каналу $K_{СУ1}$, $K_{СУ3}$, ... $K_{СУ9}$ рассчитывается, исходя из условия нулевой ошибки в номинальном режиме работы САУ.

Например,

$$K_{cy1} = \frac{U_{OCCN}}{U_{3ADIN}}. \quad (1.1)$$

Обычно устройства сравнения реализуются в виде сумматора на операционном усилителе с активным сопротивлением R_{OC} в обратной связи, поэтому одновременно

$$K_{cy1} = \frac{R_C}{R_{3C}}, \quad K_{cy2} = \frac{R_{OC}}{R_C}. \quad (1.2)$$

По функциональной схеме (рис. 1.1) видно, что фильтры могут быть представлены на структурной схеме (рис.1.2) апериодическим звеном с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi} \cdot p + 1}, \quad (1.3)$$

где K_{Φ} - коэффициент передачи фильтра, равный отношению положения движка потенциометра PR на его входе;

$$T_{\Phi} = R_{\Phi} \cdot C_{\Phi} \cdot \left[1 + K_{\Phi} \cdot (1 - K_{\Phi}) \cdot \frac{RP}{R_{\Phi}} \right] - \text{постоянная времени филь-}$$

ра.

Коэффициенты передачи тахогенератора и тиристорных преобразователей достаточно точно находятся по номинальным паспортным данным

$$K_{TG} = \frac{U_{TGN}}{\omega_N}, \text{ В} \cdot \text{с}; \quad K_{TH} = \frac{E_{THN}}{U_{YN}}. \quad (1.4)$$

Расчетные соотношения (1.1 – 1.4) необходимы, но недостаточны для окончательного определения параметров передаточных функций. Их следует дополнять величинами полных потребных коэффициентов передачи прямого канала и канала обратной связи данного контура в номинальном режиме согласно технического задания на расчет.

Например, коэффициент передачи канала обратной связи по току возбуждения

$$K_{OCTB} = K_{\Phi3} \cdot K_{ДТВ} = \left(\frac{U_{OCTBN}}{U_{BX\Phi3N}} \right) \cdot \left(\frac{U_{BX\Phi3N}}{I_{BN}} \right) = \frac{U_{OCTBN}}{I_{BN}}. \quad (1.5)$$

Требуемые значения коэффициентов передачи прямых каналов становятся известными после синтеза регуляторов.

Коэффициенты передачи блоков структурной схемы электродвигателя постоянного тока могут быть рассчитаны по известным соотношениям

$$\left\{ \begin{array}{l} K_E \cdot \Phi_{\Phi N} = K_M \cdot \Phi_{BN} = \frac{M_N}{I_{ЯN}} = \frac{U_{ЯN} - I_{ЯN} \cdot R_{Я}}{\omega_N}, \text{ В} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}; \\ K_E \cdot \omega_N = \frac{U_{ЯN} - I_{ЯN} \cdot R_{Я}}{\Phi_{BN}}, \text{ В} \cdot \text{Вб}^{-1}; \\ K_M \cdot I_{ЯN} = \frac{M_N}{\Phi_{BN}}, \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Вб}^{-1}; \\ K_{\Phi N} \cdot W_B = \frac{\Phi_{BN}}{I_{BN}}, \text{ Вб} \cdot \text{А}^{-1}. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

При расчете постоянных времени:
электромеханической двигателя и нагрузки

$$T_{ЭМ\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{Я}}{K_E^2 \cdot \Phi_{BN}^2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{Я} \cdot \omega_N^2}{(U_{ЯN} - I_{ЯN} \cdot R_{Я})^2}, \text{ где } J_{\Sigma} = J_{Я} + J_{Н}; \quad (1.7)$$

якорной цепи двигателя

$$T_{Я} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}; \quad (1.8)$$

суммарной сглаживающего и токоограничивающего реакторов
тиристорного преобразователя

$$T_{ДР\Sigma} = \frac{L_{ДР\Sigma}}{R_{ДР\Sigma}} = \frac{L_{СР} + L_{ТР}}{R_{СР} + R_{ТР}}; \quad (1.9)$$

суммарной цепи возбуждения двигателя и тиристорного преобразователя

$$T_{В\Sigma} = \frac{L_{В\Sigma}}{R_{В\Sigma}} = \frac{L_{В} + (L_{СР} + L_{ТР})}{R_{В} + (R_{СР} + R_{ТР})} \quad (1.10)$$

следует помнить, что величины $T_{Я}$, $L_{Я}$, $R_{Я}$, $T_{В}$, $L_{В}$, $R_{В}$ определены только параметрами электродвигателя (табл. 1.1), а $L_{СР}$, $R_{СР}$, $L_{ТР}$, $R_{ТР}$ - только параметрами тиристорного преобразователя (табл. 1.2), и, поэтому они входят в соотношения (1.7, 1.9, 1.10) как составляющие.

2. Преобразование структурных схем контуров регулирования к нормированному виду

Синтез регуляторов методом последовательной оптимизации по тем или иным критериям модального управления [2, 4] производят с помощью структурных схем отдельных контуров, приведенных к нормализованному виду, показанному на рис. 2.1.

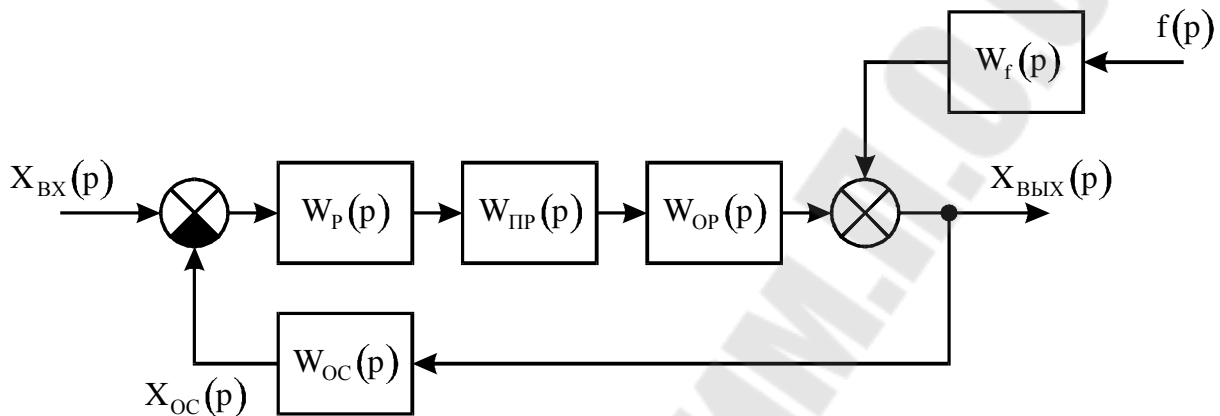


Рис.2.1. Нормированная к синтезу регулятора структурная схема контура регулирования

На рисунке через $W_P(p)$, $W_{ПР}(p)$, $W_{ОР}(p)$, $W_{ОС}(p)$, $W_f(p)$ обозначены передаточные функции регулятора, промежуточных блоков, объекта регулирования данного контура, обратной связи и канала возмущения.

Следует отметить, что разделение на промежуточные блоки и объект регулирования условно, и оно осуществляется по величинам постоянных времени. В качестве объекта регулирования назначают звенья, постоянные времени которых превышают остальные на порядок и более.

Необходимые преобразования в исходных структурных схемах, с целью приведения их к желаемому виду, осуществляют с помощью правил структурных преобразований, приведенных в приложении 2.

Например, структурная схема контура регулирования тока возбуждения, выделенная из общей структурной схемы САУ (рис. 2.2) и изображенная на рис. 2.2 а, с помощью правил переноса знака суммирования и объединения последовательно соединенных звеньев сводится к нормализованному виду (рис. 2.1) представленному на рис. 2.2 б. При этом

$$X_{ВХ}(p) = U_{ЗТВ} \cdot K_{СУ9}, \quad X_{ОС}(p) = U_{ОСТВ}, \quad X_{ВЫХ}(p) = I_B(p), \quad f(p) = E_C,$$

$$\begin{cases} W_P(p) = W_{PTB}(p), W_{IP}(p) = \frac{K_{CY10} \cdot K_{TII2}}{T_{TII2} \cdot p + 1}, \\ W_{OP}(p) = W_f(p) = \frac{(T_{BT} \cdot p + 1)/R_B}{(T_{B\Sigma} + T_{BT}) \cdot p + 1}, \\ W_{OC}(p) = W_{\Phi3}(p) \cdot \frac{K_{ДТВ}}{T_{ДТВ} \cdot p + 1} = \frac{K_{\Phi3} \cdot K_{ДТВ}}{(T_{\Phi3} \cdot p + 1) \cdot (T_{ДТВ} \cdot p + 1)}. \end{cases} \quad (2.1)$$

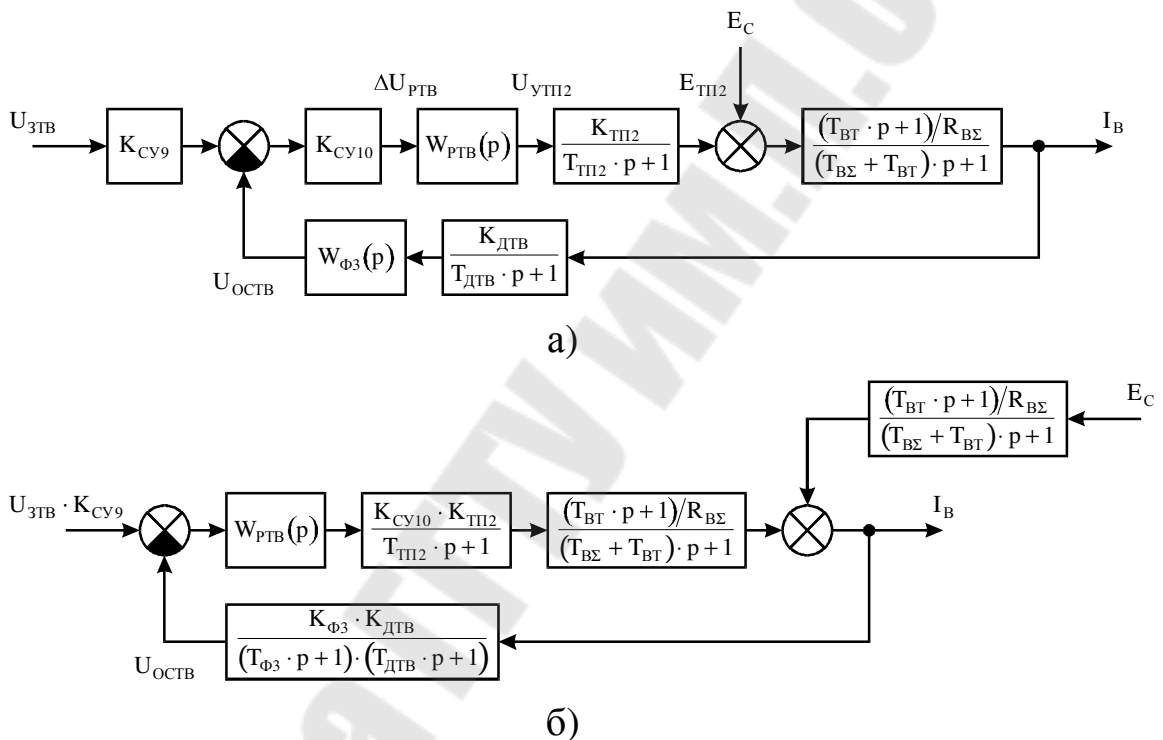


Рис. 2.2. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения: а) ненормализованная, б) нормализованная

Иногда структурные преобразования удобно осуществлять, совмещая графические перестроения по правилам приложения 2 с аналитическими преобразованиями операторных уравнений схемы.

Рассмотрим, как это делается, на примере преобразования фрагмента структурной схемы САУ, представленного на рис. 2.3. Такой вид будет иметь эта часть схемы при условии, что рассматривается работа якорного канала управления. При этом канал управления по возбуждению стабилен, то есть отклонение Φ_B равно нулю, а изменение $U_{\text{я}}$ не используется.

Операторные уравнения, описывающие данную часть схемы, будут иметь вид

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[E_{ТП1} + E_C - (T_{ДРС} \cdot p + 1) \cdot R_{ДРС} \cdot I_{Я} - K_E \cdot \Phi_{ВН} \cdot \omega \right] \times \\ & \times \frac{1}{R_{Я} \cdot (T_{Я} \cdot p + 1)} = I_{Я}, \\ & \frac{K_{ДТЯ}}{T_{ДТЯ} \cdot p + 1} \cdot I_{Я} = U_{ОСТЯ}, \\ & (K_M \cdot \Phi_{ВН} \cdot I_{Я} - M_{СТ}) \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} = \omega. \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$

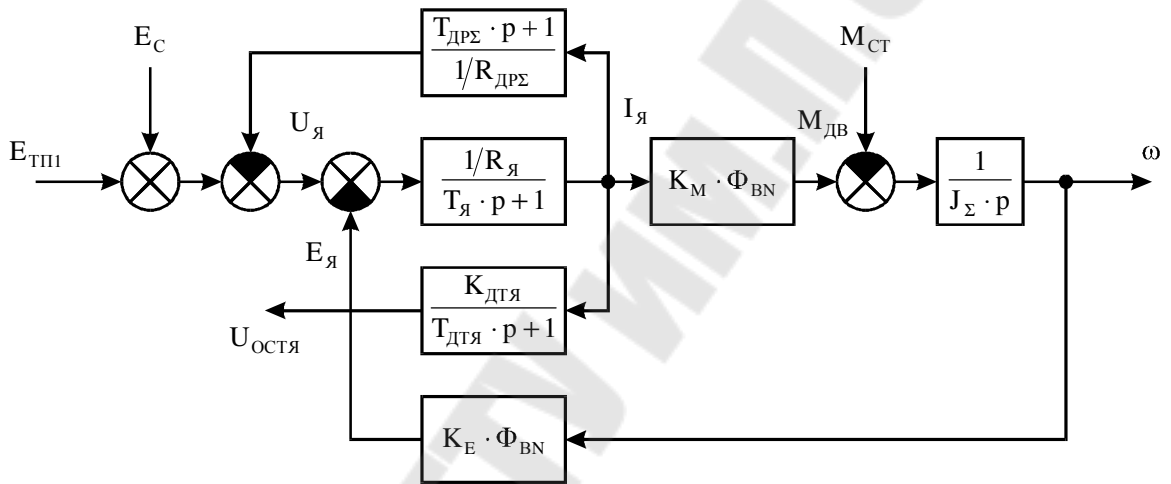


Рис. 2.3. Фрагмент структурной схемы САУ

Приводя подобные члены и обозначая

$$R_{Я\Sigma} = R_{Я} + R_{ДРС}, \quad T_{Я\Sigma} = \frac{L_{Я} + L_{ДРС}}{R_{Я} + R_{ДРС}},$$

первое уравнение представим в виде

$$E_{ТП1} + E_C - K_E \cdot \Phi_{ВН} \cdot \omega = R_{Я\Sigma} \cdot (T_{Я\Sigma} \cdot p + 1) \cdot I_{Я}.$$

Найдем отсюда $I_{Я}$, подставим в третье уравнение системы (2.2), решим получившееся уравнение относительно ω и получим

$$\omega = \frac{1/K_E \cdot \Phi_{ВН}}{T_{ЭМС} \cdot p \cdot (T_{Я\Sigma} \cdot p + 1) + 1} \cdot (E_{ТП1} + E_C) - \frac{T_{ЭМС} \cdot (T_{Я\Sigma} \cdot p + 1)}{J_{\Sigma} \cdot [T_{ЭМС} \cdot p \cdot (T_{Я\Sigma} \cdot p + 1) + 1]} \cdot M_{СТ}, \quad (2.3)$$

где $T_{\text{ЭМС}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{Я}\Sigma}}{(K_E \cdot \Phi_{\text{ВН}})^2}$ - электромеханическая постоянная времени.

мени.

Подставляя второе уравнение системы (2.2) в третье и решая его относительно $U_{\text{ОСТЯ}}$, найдём

$$U_{\text{ОСТЯ}} = \frac{K_{\text{ДТЯ}} \cdot J_{\Sigma} \cdot p}{K_E \cdot \Phi_{\text{ВН}} \cdot (T_{\text{ДТЯ}} \cdot p + 1)} \cdot \omega - \frac{K_{\text{ДТЯ}}}{K_M \cdot \Phi_{\text{ВН}} \cdot (T_{\text{ДТЯ}} \cdot p + 1)} \cdot M_{\text{СТ}} \quad (2.4)$$

Уравнения (2.3) и (2.4) графически изображаются в виде структурной схемы, представленной на рис. 2.4 и являющейся эквивалентом исходной схемы по рис.2.3.

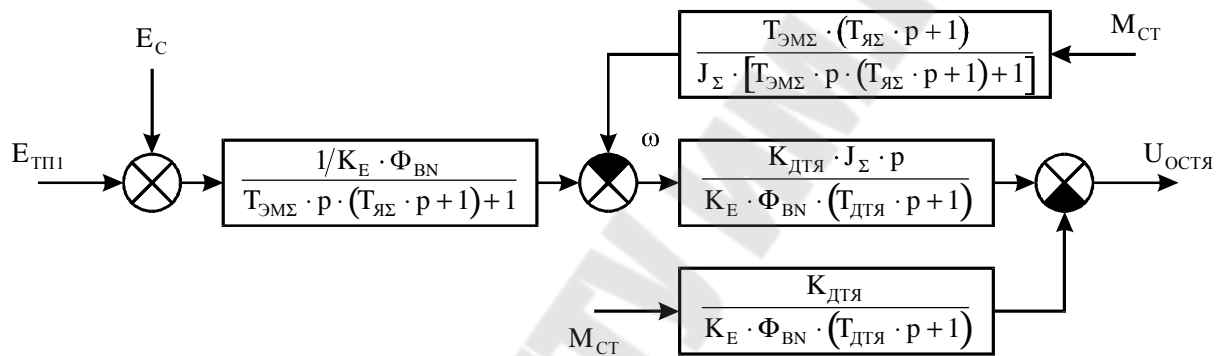


Рис. 2.4. Преобразованная структурная схема

3. Синтез регуляторов по методу модального управления

Как известно [1, 2, 4], при модальном управлении регулятор синтезируется так, чтобы корни характеристического уравнения САУ располагались на комплексной плоскости определенным, заранее выбранным образом. Это дает переходную характеристику САУ желаемого вида.

В системах управления электроприводами наибольшее распространение получило расположение корней, предложенное Баттэрвортом, хотя находят применение и другие варианты: по Ньютону, Чебышеву, Бесселю, Папулису и т.д.

В практике проектирования САУ электроприводов подход к модальному управлению по Баттэрворту реализуется за счёт синтеза регуляторов по следующим критериям (их требуется использовать в данной курсовой работе).

3.1 Модульный, симметричный и улучшенный симметричный критерии оптимизации регуляторов

При синтезе регуляторов, оптимизируемых по тому или иному критерию, требуется обеспечить желаемую передаточную функцию по управляющему сигналу замкнутого контура $\Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p)$, в котором находится регулятор. Тогда передаточную функцию регулятора можно найти, согласно нормализованной структурной схеме контура (см. рис. 2.1), по следующему условию.

$$\Phi(p) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(p)}{X_{\text{ВХ}}(p)} \Big|_{f(p)=0} = \frac{W_P(p) \cdot W_{\text{ПР}}(p) \cdot W_{\text{ОР}}(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{\text{ПР}}(p) \cdot W_{\text{ОР}}(p)} = \Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p).$$

Решая относительно $W_P(p)$, определим

$$W_P(p) = \frac{\Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p)}{W_{\text{ПР}}(p) \cdot W_{\text{ОР}}(p) \cdot [1 - W_{\text{ОС}}(p) \cdot \Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p)]}. \quad (3.1)$$

Если

$$\Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1) + 1}, \quad (3.2)$$

где T_μ - малая, задаваемая проектировщиком постоянная времени.

Критерий оптимизации носит название модульного или технического оптимума (ТО). Он обеспечивает по каналу управления малое перерегулирование $\sigma_\% = 4.3 \%$, большой запас устойчивости $\Psi_0 = 63^\circ$, высокое быстродействие $t_{\text{РЕГ}} = 4.2 \cdot (2 \cdot T_\mu)$, нулевую статическую ошибку по управлению $\delta_{\text{СТ.У.}} = 0$ (контур получается астатическим первого порядка).

По каналу возмущения такой подход дает при наличии интегрирующих звеньев в $W_f(p)$ статическое регулирование (статическая ошибка по возмущению не нулевая).

При управлении ДПТ НВ по каналу якоря можно исключить ошибку и по возмущению, если использовать оптимизацию по симметричному оптимуму (СО), для которого

$$\Phi_{\text{ЖЕЛ}}(p) = \frac{4 \cdot T_\mu \cdot p + 1}{8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 (T_\mu \cdot p + 1) + 4 \cdot T_\mu \cdot p + 1}. \quad (3.3)$$

Такой подход, хотя и позволяет получить астатическое регулирование по каналу возмущения, но ухудшает переходную характеристику контура по управляющему воздействию так, что $\sigma_\% = 43.4 \%$, $\Psi_0 = 37^\circ$, $t_{\text{РЕГ}} = 16.5 \cdot (2 \cdot T_\mu)$.

Уравнение (3.1) дает общее решение задачи синтеза регулятора в контуре со структурой по рис. 2.1. Его непосредственное использование, без упрощающих допущений дает обычно сложную структурную схему регулятора, которую достаточно трудно реализовать и использовать в практической настройке САУ.

Надо стремиться при синтезе к таким упрощениям, чтобы передаточные функции, а значит и схемы регуляторов получались типовыми, представленными в приложении 1.

Покажем некоторые варианты упрощений на следующем примере.

$$W_{\text{ПР}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1}, \quad W_{\text{ОР}}(p) = \frac{K_2}{(T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_3 \cdot p + 1)}, \quad W_{\text{ОС}}(p) = 1,$$

причем $T_1 < T_2 \ll T_3$.

Тогда при синтезе по ТО согласно (3.1) и (3.2) получим

$$W_p(p) = \frac{[2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1) + 1]^{-1}}{\frac{K_1}{(T_1 \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_2}{(T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_3 \cdot p + 1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1) + 1} \right]} = \frac{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_3 \cdot p + 1)}{K_1 \cdot K_2 \cdot 2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}.$$

Если допустить, что малая постоянная времени $T_\mu = T_1 + T_2$ и учесть, что $(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \approx (T_1 + T_2) \cdot p + 1$ в рабочем диапазоне частот входного сигнала САУ, то получим

$$W_p(p) = \frac{T_3 \cdot p + 1}{K_1 \cdot K_2 \cdot 2 \cdot (T_1 + T_2) \cdot p},$$

что соответствует типовому ПИ-регулятору (приложение 1).

Если производится синтез по СО, то достаточно дополнить регулятор, оптимизированный на ТО, ПИ-регулятором с постоянной времени $4 \cdot T_\mu$. В рассматриваемом случае это дает

$$W_p(p) = \frac{(1 + T_3 \cdot p) \cdot [4 \cdot (T_1 + T_2) \cdot p + 1]}{K_1 \cdot K_2 \cdot 8 \cdot (T_1 + T_2)^2 \cdot p^2},$$

что соответствует последовательному соединению двух типовых ПИ-регуляторов.

Иногда используют оптимизацию на улучшенный симметричный оптимум (УСО), которая, сохраняя астатическое регулирование по возмущению, улучшает показатели регулирования по управляющему воздействию $\sigma_{\%} = 8.1 \%$, $t_{\text{РЕГ}} = 13.3 \cdot (2 \cdot T_\mu)$.

Эта оптимизация реализуется из оптимизации на СО за счет включения перед сравнивающим устройством апериодического фильтра с постоянной времени $4 \cdot T_\mu$ (п. 7. приложение 1).

Поскольку используемые упрощения синтеза регуляторов дают квазиоптимальный результат, то сравнивая показатели переходных характеристик спроектированной САУ (п. 5.1) с приведенными здесь количественными оценками оптимальных результатов, можно сделать вывод о допустимости принятых упрощений (п. 5.2).

3.2 Пример структурного и параметрического синтеза регуляторов в канале управления двигателем со стороны возбуждения

При использовании принципа последовательной оптимизации синтез регуляторов ведут, начиная с внутреннего контура регулирования и заканчивая внешним.

Проиллюстрируем этот принцип на примере синтеза регуляторов в канале управления электродвигателем со стороны возбуждения.

Сначала рассмотрим внутренний контур регулирования тока возбуждения, структурная схема которого, выделенная из общей структурной схемы канала, изображена на рис.2.2 а.

Будем производить оптимизацию регулятора тока возбуждения на технический оптимум (ТО). Наличие неединичной обратной связи ($W_{OC}(p) \neq 1$) не позволяет с помощью соотношений (3.1, 3.2) получить простую структуру регулятора. Можно найти приемлемое решение, если осуществить квазиоптимизацию по несколько “испорченной” желаемой передаточной функции

$$\Phi_{ЖЕЛ}(p) = \frac{1/W_{OC}(p)}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1) + 1}. \quad (3.4)$$

Подставляя (3.4) в (3.1), определим передаточную функцию регулятора тока возбуждения в виде

$$W_{РТВ}(p) = \frac{1}{W_{ПР}(p) \cdot W_{ОР}(p) \cdot W_{OC}(p) \cdot 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1)},$$

и, после подстановки выражений для передаточных функций (2.1) получим

$$W_{РТВ}(p) = \frac{R_{ВЭ} \cdot (T_{П2} \cdot p + 1) \cdot [(T_{ВЭ} + T_{ВТ}) \cdot p + 1] \cdot (T_{Ф3} \cdot p + 1) \cdot (T_{ДТВ} \cdot p + 1)}{K_{СУ10} \cdot K_{П2} \cdot K_{Ф3} \cdot K_{ДТВ} \cdot 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1) \cdot (T_{ВТ} \cdot p + 1)}.$$

Если положить $T_{Ф3} = T_{ВТ}$, $T_{\mu 1} = T_{П2} + T_{ДТВ}$ и учесть, что $(T_{П2} \cdot p + 1) \cdot (T_{ДТВ} \cdot p + 1) \approx (T_{П2} + T_{ДТВ}) \cdot p + 1$, то получим структуру ПИ-регулятора

$$W_{РТВ}(p) = K_{РТВ} \cdot \frac{T_{РТВ} \cdot p + 1}{T_{РТВ} \cdot p},$$

где $K_{РТВ} = \frac{R_{В\Sigma} \cdot (T_{В\Sigma} + T_{ВТ})}{K_{СУ10} \cdot K_{ТП2} \cdot K_{\Phi3} \cdot K_{ДТВ} \cdot 2 \cdot T_{\mu1}}$ - коэффициент передачи

регулятора;

$T_{РТВ} = T_{В\Sigma} + T_{ВТ}$ - постоянная времени регулятора, равная большей постоянной времени объекта регулирования в контуре;

$T_{\mu1} = T_{ТП2} + T_{ДТВ}$ - суммарная малая постоянная времени контура регулирования тока возбуждения.

После синтеза регулятора структурная схема контура примет вид, представленный на рис. 3.1, а передаточная функция замкнутого контура

$$\Phi_{ТВ}(p) = \frac{(T_{ВТ} \cdot p + 1) \cdot (T_{ДТВ} \cdot p + 1)}{K_{\Phi3} \cdot K_{ДТВ} \cdot \{2 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p \cdot [(T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p + 1] + 1\}} \quad (3.5)$$

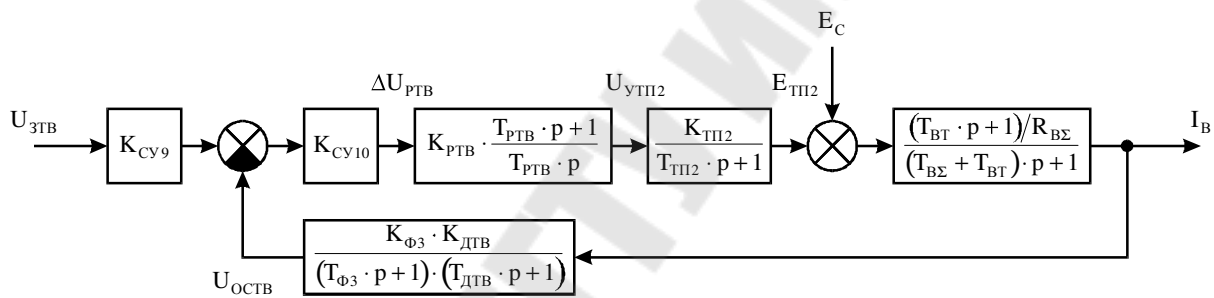


Рис. 3.1. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения с синтезированным ПИ-регулятором

Теперь можно приступить к оптимизации контура регулирования ЭДС якоря.

Его структурная схема, выделенная из общей схемы (см. рис. 1.2) системы двухзонного управления, будет иметь вид с учетом полученного результата по контуру тока, представленный на рис. 3.2.

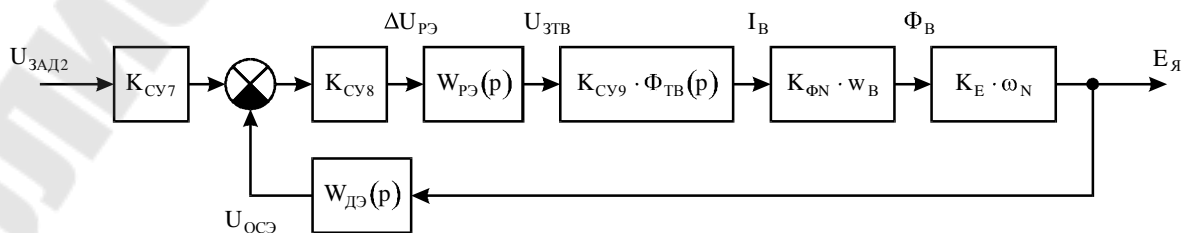


Рис. 3.2. Структурная схема контура регулирования ЭДС якоря

Здесь через $W_{дэ}(p)$ обозначена передаточная функция датчика ЭДС якоря, который согласно схемы на рис. 1.2 вырабатывает напряжение обратной связи

$$\begin{aligned}
 U_{осэ} &= K_{сy5} \cdot \left[\frac{K_{сy6} \cdot W_{\Phi 2}(p) \cdot K_{дн} \cdot U_{я} -}{T_{дн} \cdot p + 1} - \frac{K_{дтj} / R_{я}}{(T_{дтj} \cdot p + 1) \cdot (T_{я} \cdot p + 1)} \cdot (U_{я} - E_{я}) \right] = \\
 &= \frac{K_{сy5} \cdot K_{дтj} / R_{я}}{(T_{дтj} \cdot p + 1) \cdot (T_{я} \cdot p + 1)} \cdot E_{я} + \\
 &+ \left[\frac{K_{сy5} \cdot K_{сy6} \cdot K_{дн} \cdot W_{\Phi 2}(p)}{T_{дн} \cdot p + 1} - \frac{K_{сy5} \cdot K_{дтj} / R_{я}}{(T_{дтj} \cdot p + 1) \cdot (T_{я} \cdot p + 1)} \right] \cdot U_{я}.
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Если фильтр синтезировать так, что

$$W_{\Phi 2}(p) = \frac{K_{дтj} \cdot (T_{дн} \cdot p + 1) / R_{я}}{K_{сy6} \cdot K_{дн} \cdot (T_{дтj} \cdot p + 1) \cdot (T_{я} \cdot p + 1)} \approx \frac{K_{\Phi 2}}{T_{\Phi 2} \cdot p + 1},$$

$$\text{где } T_{дн} \approx T_{дтj}, \quad T_{\Phi 2} = T_{я}, \quad K_{\Phi 2} = \frac{K_{дтj} / R_{я}}{K_{сy6} \cdot K_{дн}},$$

то уравнение (3.6) запишется как

$$U_{осэ} = \frac{K_{сy5} \cdot K_{дтj} / R_{я}}{(T_{дтj} \cdot p + 1) \cdot (T_{я} \cdot p + 1)} \cdot E_{я}. \tag{3.7}$$

Обозначив коэффициент передачи датчика ЭДС через $K_{дэ} = K_{сy5} \cdot K_{дтj} / R_{я}$, а постоянную времени через $T_{дэ} = T_{я} + T_{дтj}$, для рабочей области частот получим из (3.7) передаточную функцию датчика ЭДС в виде

$$W_{дэ}(p) = \frac{U_{осэ}(p)}{E_{я}(p)} \approx \frac{K_{дэ}}{T_{дэ} \cdot p + 1}.$$

Теперь, проводя по рис. 3.2 квазиоптимизацию на ТО согласно (3.4), получим для регулятора ЭДС с учетом (3.5) передаточную функцию

$$W_{PЭ}(p) = \frac{K_{Ф3} \cdot K_{ДТВ}}{K_{СУ8} \cdot K_{ДЭ} \cdot K_{ФN} \cdot w_B \cdot K_E \cdot \omega_N \cdot K_{СУ9}} \times \\ \times \frac{(T_{ДЭ} \cdot p + 1) \cdot \left\{ 2 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p \cdot \left[(T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p + 1 \right] + 1 \right\}}{(T_{ВТ} \cdot p + 1) \cdot (T_{ДТВ} \cdot p + 1) \cdot 2 \cdot T_{\mu2} \cdot p \cdot (T_{\mu2} \cdot p + 1)}. \quad (3.8)$$

Обратим внимание на то, что здесь нет постоянных времени больших для контура ЭДС, так как постоянные времени $T_{ВТ}$, $T_{ДЭ}$, большие для контура регулирования тока возбуждения, существенно меньше электромеханической постоянной времени $T_{ЭМ}$, через которую в конечном итоге регулирование ЭДС якоря $E_{я}$ сказывается на быстродействии регулирования частоты вращения ω .

Поэтому для рабочего диапазона частот можно принять

$$W_{PЭ}(p) \approx \frac{K_{PЭ}}{T_{PЭ} \cdot p}, \quad (3.9)$$

где согласно (3.8) коэффициент передачи регулятора ЭДС обозначен через

$$K_{PЭ} = \frac{K_{Ф3} \cdot K_{ДТВ}}{K_{СУ8} \cdot K_{ДЭ} \cdot K_{ФN} \cdot w_B \cdot K_E \cdot \omega_N \cdot K_{СУ9}},$$

а постоянная времени через

$$T_{PЭ} = 4 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}) = 2 \cdot T_{\mu2} = 4 \cdot T_{\mu1}.$$

При выводе передаточной функции (3.9) было принято, что

$$T_{ДЭ} \approx T_{ВТ} + T_{ДТВ},$$

$$2 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p \cdot \left[(T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p + 1 \right] + 1 \approx 2 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}) \cdot p + 1,$$

$$T_{\mu2} = 2 \cdot (T_{ТП2} + T_{ДТВ}).$$

Теперь структурная схема канала регулирования электродвигателя со стороны возбуждения с синтезированными регуляторами и фильтрами примет вид, представленный на рис. 3.3.

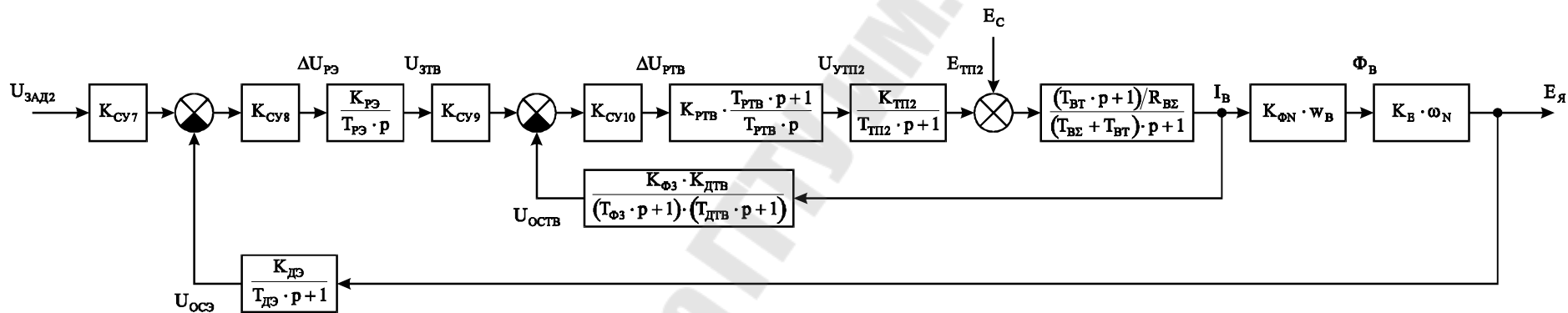


Рис. 3.3. Структурная схема канала регулирования электродвигателя со стороны возбуждения с синтезированными регуляторами тока возбуждения и ЭДС якоря

4. Статический расчет САУ

После синтеза регуляторов производят расчет САУ в установившемся режиме (статический расчет), с целью получения статической характеристики электропривода, расчета недостающих коэффициентов передачи, определения статической ошибки, диапазона регулирования и других технических показателей.

Этот расчет производят по уравнению привода в установившемся режиме, которое получают по его передаточным функциям при $p = 0$. Рассмотрим, как это делается, на примере расчета канала регулирования электродвигателя со стороны возбуждения.

За основу для расчета возьмем операторное уравнение канала возбуждения по частоте вращения

$$E_{\text{я}}(p) = \Phi_{U_{\text{зАД}}} (p) \cdot U_{\text{зАД2}}(p) + \Phi_{E_{\text{с}}} (p) \cdot E_{\text{с}}(p), \quad (4.1)$$

где $\Phi_{U_{\text{зАД}}} (p) = \left. \frac{E_{\text{я}}(p)}{U_{\text{зАД2}}(p)} \right|_{p=0}$ - передаточная функция замкнутой

системы управления по управлению;

$\Phi_{E_{\text{с}}} (p) = \left. \frac{E_{\text{я}}(p)}{E_{\text{с}}(p)} \right|_{p=0}$ - передаточная функция замкнутой системы

управления по возмущению.

Для установившегося режима (4.1) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{я}} &= \Phi_{U_{\text{зАД}}} (p) \Big|_{p=0} \cdot \Delta U_{\text{зАД2}} + \Phi_{E_{\text{с}}} (p) \Big|_{p=0} \cdot \Delta E_{\text{с}} = \\ &= K_{U_{\text{зАД}}} \cdot \Delta U_{\text{зАД2}} + K_{E_{\text{с}}} \cdot \Delta E_{\text{с}}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Поскольку для статического расчета требуются передаточные отношения

$$K_{U_{\text{зАД}}} = \Phi_{U_{\text{зАД}}} (p) \Big|_{p=0} \text{ и } K_{E_{\text{с}}} = \Phi_{E_{\text{с}}} (p) \Big|_{p=0},$$

то, с целью упрощения аналитических преобразований, в исходной структурной схеме по рис. 3.3 примем $p = 0$, кроме интегрирующих звеньев, и перейдем к приближенной (расчетной) схеме по рис. 4.1. Используя структурные преобразования и приравнявая $p = 0$, как только это становится возможным, получим для канала управления по рис. 4.1

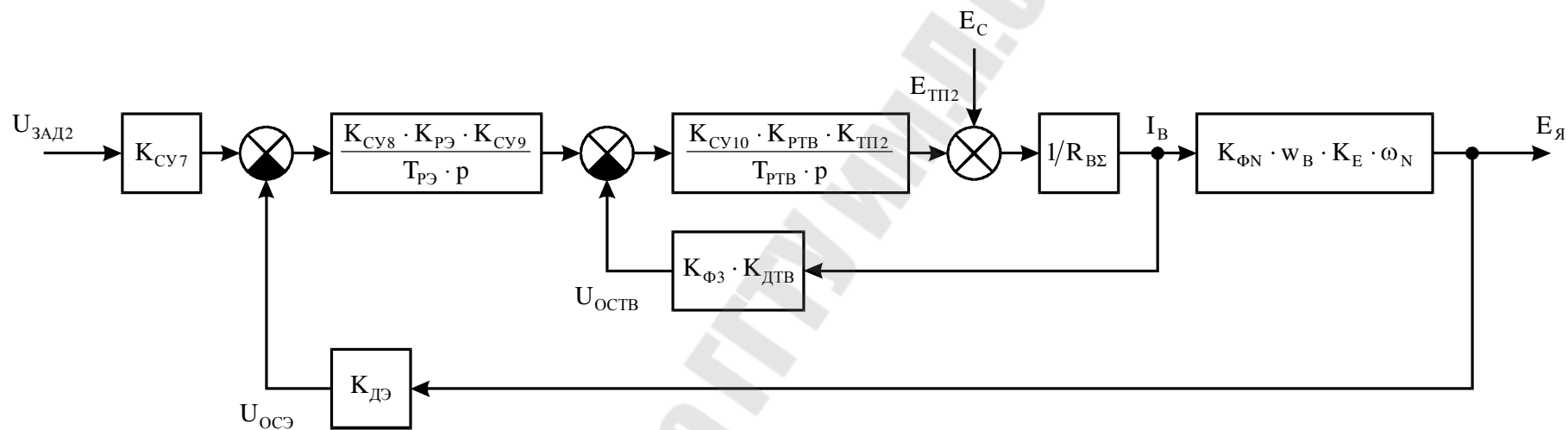


Рис. 4.1. Упрощенная структурная схема для статического расчета

$$K_{U_{3AD}} = \frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}}. \quad (4.3)$$

Для канала возмущения аналогичным образом найдем $K_{E_C} = 0$, что говорит о наличии в САУ астатизма по возмущению при синтезированных регуляторах.

Итак, уравнение статической характеристики канала возбуждения в приращениях переменных (рассматривалась линеаризованная система) в соответствии с (4.1 – 4.3) примет вид

$$\Delta E_{я} = \frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}} \cdot \Delta U_{3AD2}.$$

Переходя к полным переменным $U_{3AD2} = U_{3AD2N} + \Delta U_{3AD2}$, $E_{я} = E_{яN} + \Delta E_{я}$ запишем уравнение статики следующим образом

$$E_{я} = \left(E_{яN} - \frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}} \cdot U_{3AD2N} \right) + \frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}} \cdot U_{3AD2}.$$

Для обеспечения прохождения статической характеристики через начало координат необходимо выполнение равенства

$$E_{яN} = \frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}} \cdot U_{3AD2N}, \quad (4.4)$$

которое будет являться расчетным для K_{CY7} и $K_{DЭ}$.

Статическая характеристика будет тогда определяться уравнением

$$E_{я} = \frac{E_{яN}}{U_{3AD2N}} \cdot U_{3AD2}. \quad (4.5)$$

Например для электродвигателя с номинальными данными: $U_{яN} = 70$ В, $I_{яN} = 50$ А, $R_{я} = 0.2$ Ом для $U_{3AD2N} = 8$ В, получим расчетную связь по (4.4)

$$\frac{K_{CY7}}{K_{DЭ}} = \frac{E_{яN}}{U_{3AD2N}} = \frac{U_{яN} - I_{яN} \cdot R_{я}}{U_{3AD2N}} = \frac{70 - 50 \cdot 0.2}{8} = 7.5 \text{ В}$$

и по (4.5) расчетную статическую характеристику

$$E_{я} = 7.5 \cdot U_{3AD2}.$$

5. Динамический расчет САУ

Расчет динамики заключается в определении показателей качества регулирования САУ во время переходного процесса: перерегулирования $\sigma_{\%}$ показателя колебательности M , времени регулирования (длительность переходного процесса) $t_{\text{РЕГ}}$ и сравнения их с заданными в ТЗ или типовыми, соответствующими оптимизации на ТО, СО или УСО.

Расчет переходных процессов при скачках задания $U_{\text{ЗАД1}}$ или $U_{\text{ЗАД2}}$ и возмущения E_C и M_C , равных 10 % от номинальных значений, производится с помощью ПЭВМ.

В качестве программного обеспечения используются стандартные программы, например Matlab Simulink.

Пример модели структурной схемы контура тока якоря ДПТ НВ в Matlab Simulink представлен на рис. 5.1.

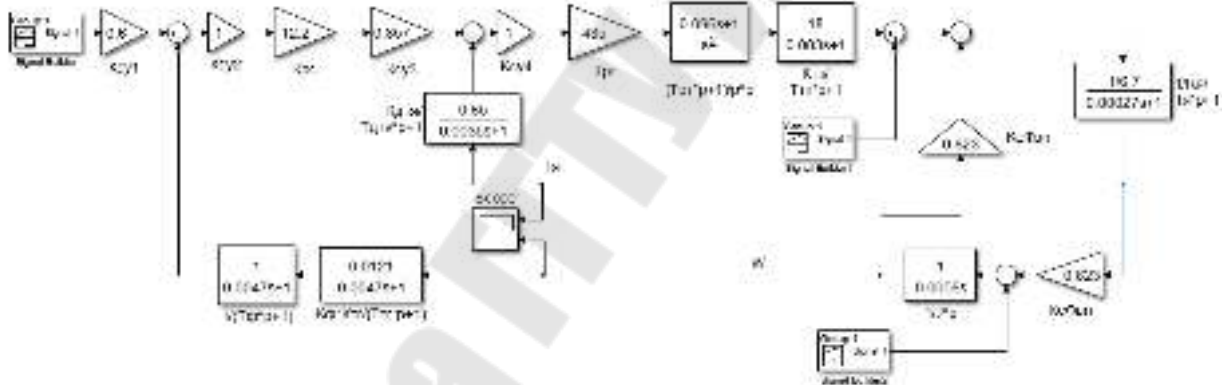


Рис. 5.1. Схема контура скорости якорного канала ДПТ НВ в Matlab Simulink

По рассчитанным переходным процессам оценивается правильность синтеза структуры регуляторов и расчета их параметров, то есть, как говорят, проверяется качество их «настройки».

В разделе 3.1 было указано, что оптимизация на технический оптимум (ТО) должна обеспечивать отсутствие статической ошибки по управлению (по возмущению ошибка может быть или не быть), перерегулирование $\sigma_{\%} = 4.3 \%$, быстродействие $t_{\text{РЕГ}} \leq 4.2 \cdot (2 \cdot T_{\mu})$.

Оптимизация на симметричный оптимум (СО) должна давать отсутствие статических ошибок по управлению и возмущению, перерегулирование $\sigma_{\%} = 43.4 \%$, время регулирования $t_{\text{РЕГ}} \leq 16.5 \cdot (2 \cdot T_{\mu})$.

Улучшенная симметричная оптимизация (УСО) должна обеспечивать отсутствие статических ошибок по управлению и возмущению, перерегулирование $\sigma_{\%} = 8.1 \%$, время регулирования $t_{\text{РЕГ}} \leq 13.3 \cdot (2 \cdot T_{\mu})$.

Эти показатели можно взять за контрольные и путем сравнения их с полученными по рассчитанным переходным процессам сделать вывод о качестве настройки регуляторов.

Так, например, на рис. 5.2 и 5.3 представлены переходные процессы в якорном канале регулирования. Причем переходные процессы в контуре тока рассчитывались при разорванном контуре регулирования скорости, и сигнал задания тока якоря подавался на блок $K_{\text{СУЗ}}$.

Малые постоянные времени контуров регулирования тока якоря и скорости соответственно равны $T_{\mu 1} = 3.33 \text{ мс}$, $T_{\mu 2} = 10.34 \text{ мс}$. Регулятор тока был настроен на ТО, а скорости - на СО. Ожидаемое быстродействие контуров составляет

$$t_{\text{РЕГ1}} = 4.2 \cdot 2 \cdot T_{\mu 1} = 8.4 \cdot 3.33 \cdot 10^{-3} = 27.97 \text{ мс},$$

$$t_{\text{РЕГ2}} = 16.5 \cdot 2 \cdot T_{\mu 2} = 33 \cdot 10.34 \cdot 10^{-3} = 0.34 \text{ с}.$$

Из переходных характеристик получим при отработке задания (рис. 5.2а, 5.3а)

$$t_{\text{РЕГ1}} = 38.6 \text{ мс}, \quad t_{\text{РЕГ2}} = 0.201 \text{ с},$$

а при отработке возмущения (рис. 5.2б, 5.3б)

$$t_{\text{РЕГ1}} = 0.113 \text{ с}, \quad t_{\text{РЕГ2}} = 0.195 \text{ с}.$$

Причем быстродействие контура скорости в переходном процессе по возмущению следует оценивать по кривой тока, т.к. на кривую скорости будет оказывать влияние величина скачка момента сопротивления и, в зависимости от начального значения скорости, будет изменяться величина 2-х процентной зоны.

Видно, что быстродействие контура тока хуже, а контура скорости лучше, чем ожидаемое.

Перерегулирование по рис. 5.2а, 5.3а

$$\sigma_{\%1} = 16.13 \%, \quad \sigma_{\%1} = 50.67 \%, \text{ что выше нормы.}$$

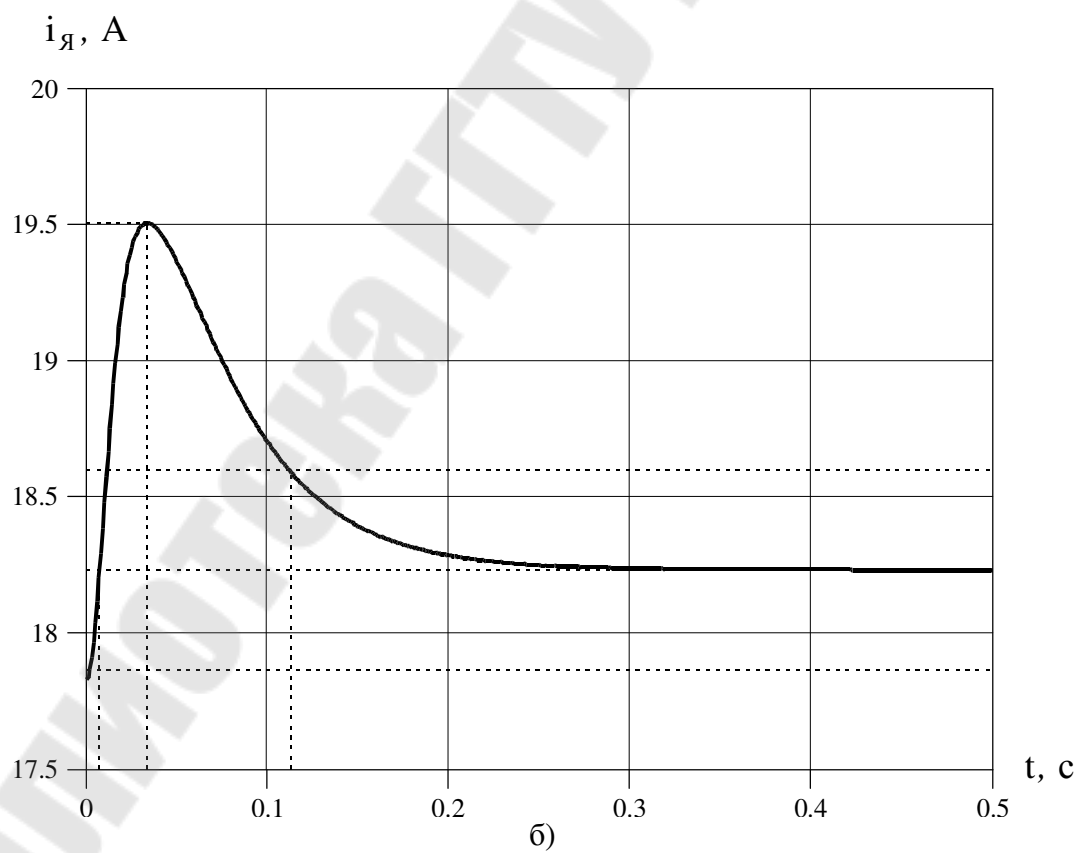
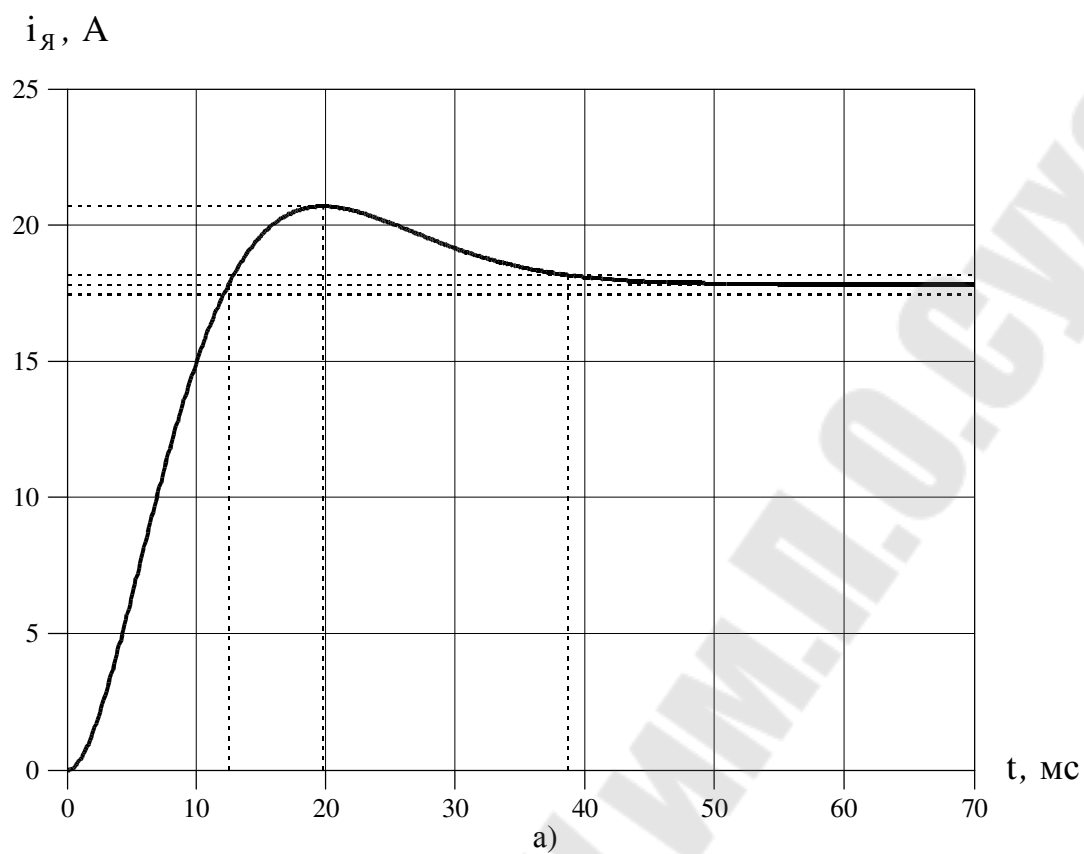


Рис. 5.2. Переходные процессы контура регулирования тока якоря: а) по заданию, б) по возмущению

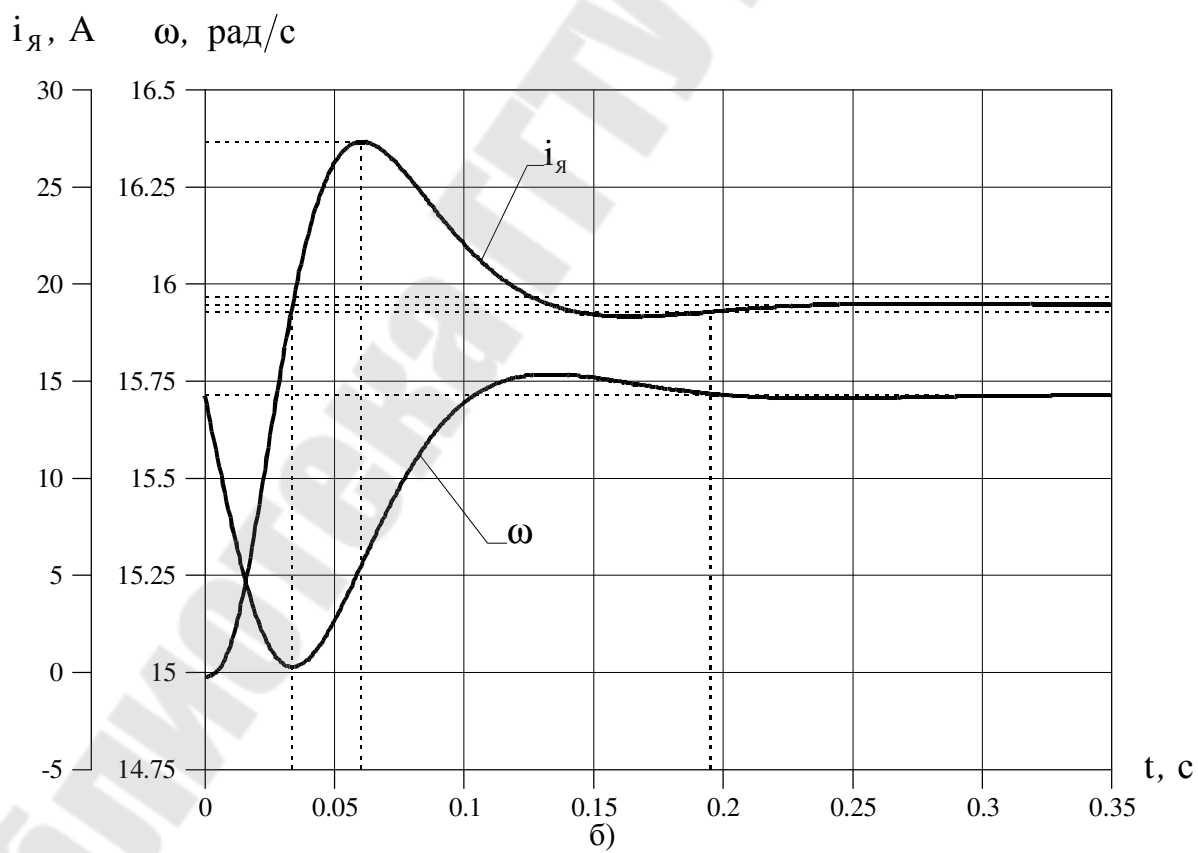
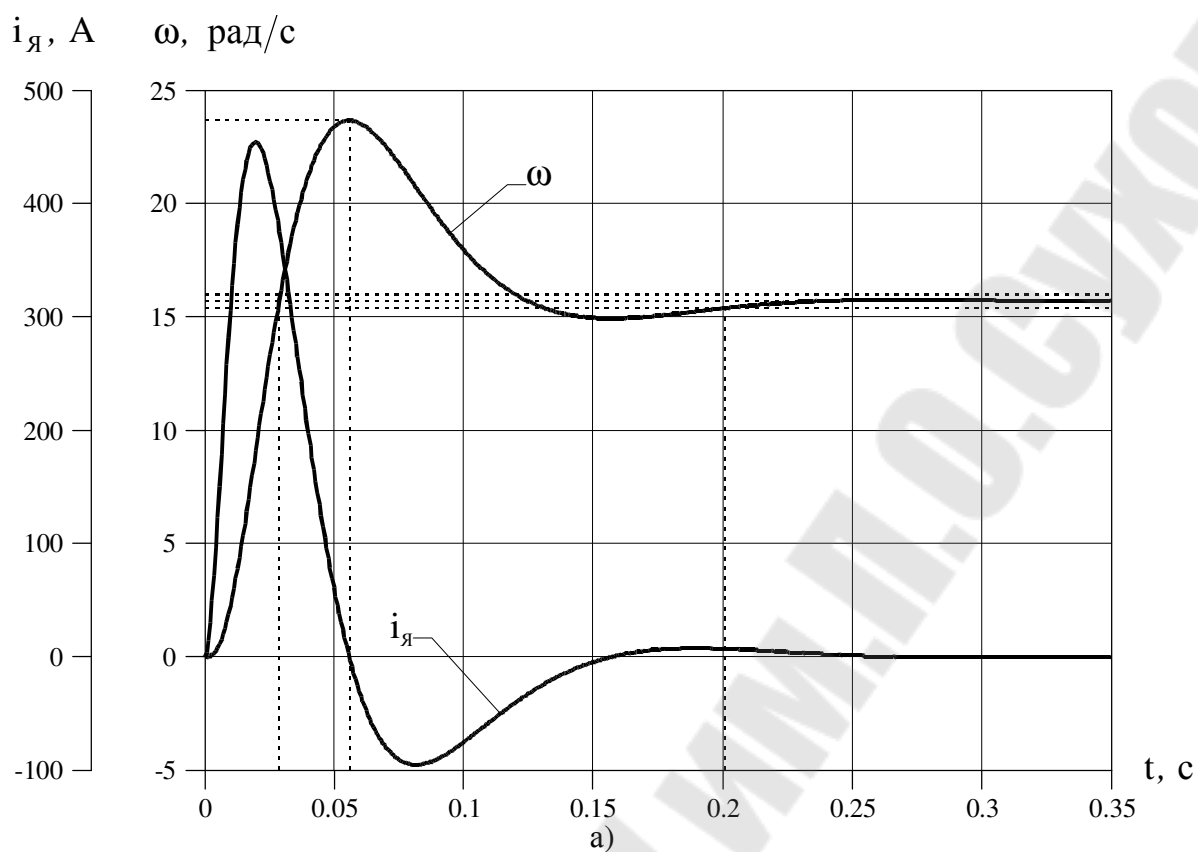


Рис. 5.3. Переходные процессы якорного канала: а) по заданию, б) по возмущению

6. Синтез электрических схем регуляторов САУ

В разделе 3 показано, каким образом производят синтез структуры регуляторов, дающий вид его передаточной функции и значения параметров: коэффициента передачи и постоянных времени.

Здесь же будет рассмотрен синтез принципиальной электрической схемы регулятора с расчетом ее пассивных RC-элементов.

Пусть, например, синтезирован типовой ПИД-регулятор с передаточной функцией

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

По приложению 1 выбирают электрическую схему ПИД-регулятора. Если взять за основу выбора критерий экономичности, то предпочтительней окажется первая схема, имеющая пять RC-элементов, если же - удобство в наладке (настройке) САУ действующего электропривода, то лучшей оказывается вторая схема, в которой, хотя и шесть элементов, но параметры K , T_1 , T_2 можно регулировать независимо.

Пусть выбрана вторая электрическая схема, для которой известно, что

$$K = \frac{R_2}{R_1}, \quad T_1 = R_4 \cdot C_3, \quad T_2 = R_1 \cdot C_1, \quad R_{\text{огр}} \ll R_1.$$

Условий для расчета RC-элементов четыре, причем второе независимо от трех остальных. Этого недостаточно для однозначного расчета шести элементов, поэтому будем использовать на первой стадии метод подбора, основываясь на том, что типовые современные операционные усилители надежно работают при сопротивлениях резисторов на входе и в обратной связи от единиц до десятков кОм.

Решим численную задачу для $K = 6.4$, $T_1 = 0.152$ с, $T_2 = 0.044$ с.

По шкале номинальных значений сопротивлений резисторов в приложении 3 зададим $R_4 = 100$ кОм, тогда

$$C_3 = \frac{T_1}{R_4} = \frac{0.152}{10^5} = 1.52 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 1.52 \text{ мкФ}.$$

Выберем теперь $R_1 = 20$ кОм, тогда

$$C_1 = \frac{T_2}{R_1} = \frac{0.044}{2 \cdot 10^4} = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 2.2 \text{ мкФ},$$

кроме того

$$R_2 = K \cdot R_1 = 6.4 \cdot 2 \cdot 10^4 = 12.8 \cdot 10^4 \text{ Ом} = 128 \text{ кОм},$$

а значение

$$R_{\text{ОГР}} = 1 \text{ кОм} \ll R_1 = 20 \text{ кОм}.$$

Из рассчитанных величин C_1 , C_3 и R_2 , $R_{\text{ОГР}}$ только $R_{\text{ОГР}}$ и C_1 точно соответствуют шкалам номинальных значений сопротивлений резисторов и емкости конденсаторов (приложение 3). Выберем $C_3 = 1.5 \text{ мкФ}$ и $R_2 = 120 \text{ кОм}$, ближайшие к расчетным значениям. Из-за этого приближения, а также из-за того, что реальные резисторы и конденсаторы имеют разброс параметров до 10%, точно обеспечить заданные значения K , T_1 и T_2 не удастся. Поэтому в реальной схеме регулятора каждое из сопротивлений R_1 , R_2 , R_4 составляют из резисторов постоянного и переменного сопротивлений, с целью обеспечения их регулировки при настройке регулятора действующей САУ электропривода.

Если при проектировании САУ синтезирован не типовой по структуре регулятор, то, исходя из удобства настройки, его надо идентифицировать либо с ближайшим типовым, либо с комбинацией из типовых регуляторов. Когда такой подход принципиально невозможен, то следует обратиться к специальной литературе по синтезу электрических схем активных фильтров, например по структурам Саллен Ки, Рауха, Марше и др.

Заключение

В результате выполнения курсовой работы студент должен получить принципиальную электрическую схему заданного канала регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, в которой должны быть представлены синтезированные электрические схемы регуляторов контуров, оптимизированных по заданным критериям.

Электрические схемы остальных узлов выбираются типовыми и поэлементно не рассчитываются.

При компоновке схемы необходимо внимательно следить за инвертированием знаков электрических сигналов, чтобы строго обеспечить отрицательные обратные связи в контурах.

В расчетно-пояснительной записке должны быть обязательно изложены процесс и результаты численного анализа переходных процессов на ПЭВМ, подтверждающие правильность синтеза регуляторов.

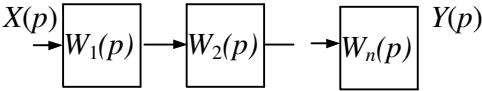

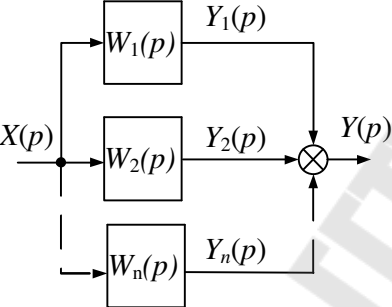
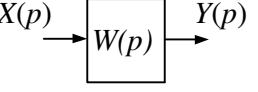
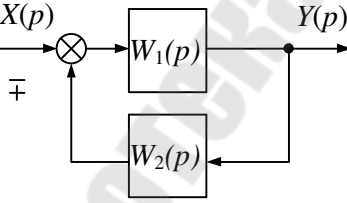
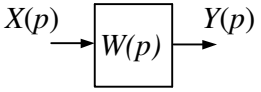
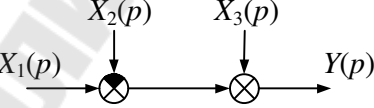
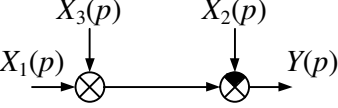
Литература

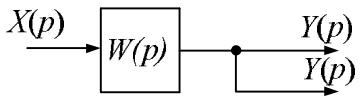
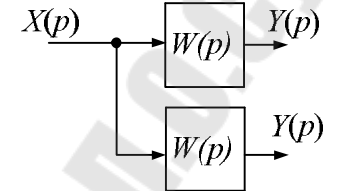
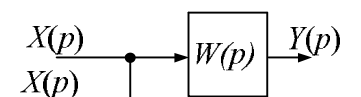
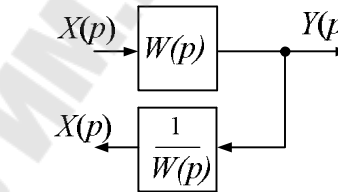
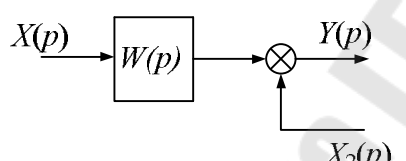
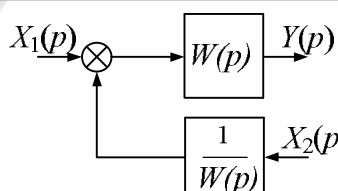
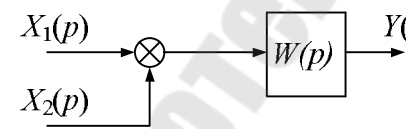
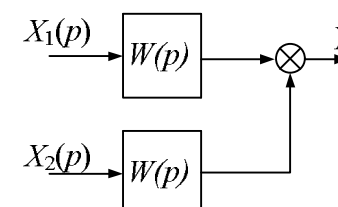
1. Анхимюк, В.Л. Теория автоматического управления / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко, Н.Н. Михеев. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000 – 352с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. - М.: Наука, 1987.
3. Усатенко С.Т. и др. Выполнение электрических схем по ЕСКД. - М.: Изд. стандартов, 1992. - 316с.
4. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопопов [и др.] ; под ред. чл.-кор. РАН Ю. М. Соломенцева. – изд. 3-е стереотипное. — М.: Высш. шк., 2000. — 270 с.
5. Луковников В.И., Захаренко В.С. Практическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Теория автоматического управления». - Гомель: ГГТУ, 1999. - 62с.
6. Луковников В.И. Теория автоматического управления : метод. указания к курсовой работе по одноим. по дисциплине для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заоч. формы обучения / В.И. Луковников. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. - 37с.
7. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. –288с.

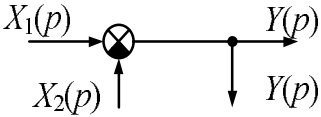
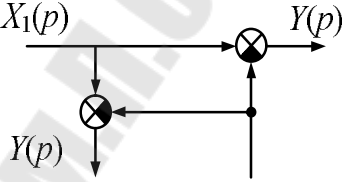
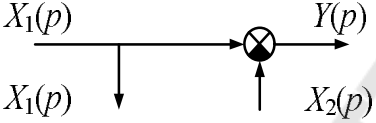
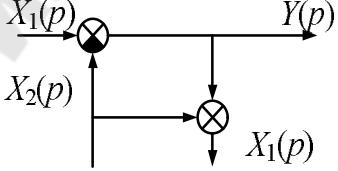
Приложение 1

Таблица П.1.1

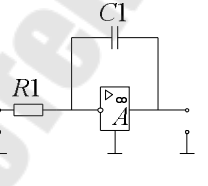
ПРАВИЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

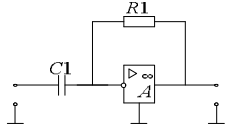
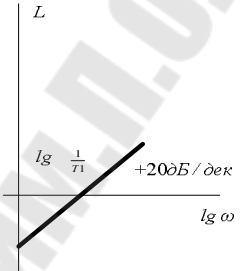
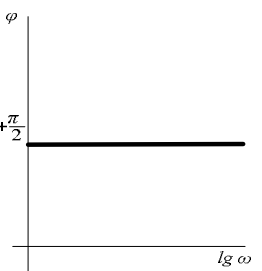
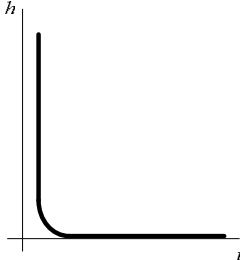
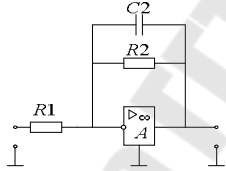
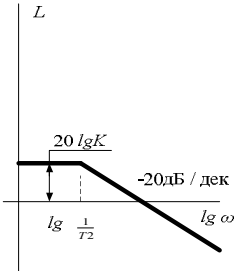
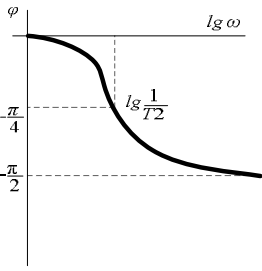
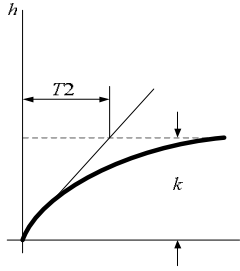
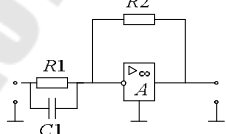
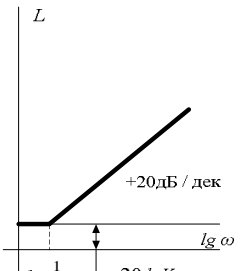
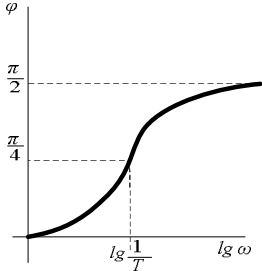
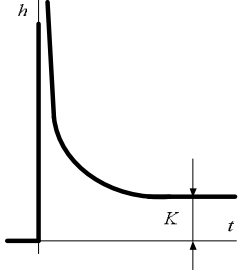
№ п/п	Название операции	Исходная схема	Преобразованная схема	Уравнение
1	Объединение последовательно соединенных звеньев			$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p)$
2	Объединение параллельно соединенных звеньев			$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$
3	Объединение замкнутого контура			$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) \cdot W_2(p)}$
4	Перестановка сумматоров			$Y(p) = X_1(p) - X_2(p) + X_3(p)$

№ п/п	Название операции	Исходная схема	Преобразованная схема	Уравнение
5	Перенос точки съема через звено на его вход			$Y(p) = X(p) \cdot W(p)$
6	Перенос точки съема через звено на его выход			$X(p) = Y(p) \cdot \frac{1}{W(p)}$
7	Перенос сумматора через звено на его вход			$Y(p) = X_1(p) \cdot W(p) + X_2(p)$
8	Перенос сумматора через звено на его выход			$Y(p) = [X_1(p) + X_2(p)] \cdot W(p)$

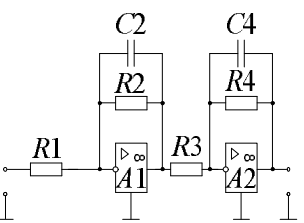
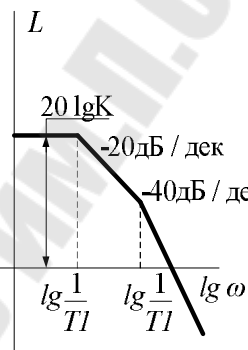
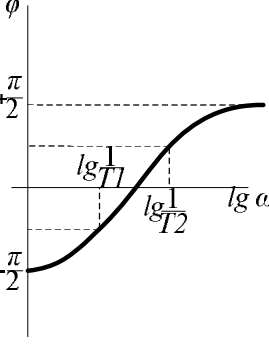
№ п/п	Название операции	Исходная схема	Преобразованная схема	Уравнение
9	Перенос сумматора через точку съема			$Y(p) = X_1(p) - X_2(p)$
10	Перенос точки съема через сумматор			$Y(p) = X_1(p) - X_2(p)$

Типовые регуляторы линейных САУ электроприводов

№ п/п	Название регулятора	Передаточная функция	Схема реализации на операционном усилителе	Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика	Фазовая частотная характеристика	Переходная характеристика
1	П-регулятор	K	 <p style="text-align: center;">$K = \frac{R2}{R1}$</p>	 <p style="text-align: center;">$20lg K$</p>		 <p style="text-align: center;">k</p>
2	И-регулятор	$\frac{1}{T1p}$	 <p style="text-align: center;">$T1 = R1C1$</p>	 <p style="text-align: center;">-20дБ/дек</p> <p style="text-align: center;">$lg \frac{1}{T}$</p>	 <p style="text-align: center;">$\frac{\pi}{2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$T1$</p>

№ п/п	Название регулятора	Передаточная функция	Схема реализации на операционном усилителе	Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика	Фазовая частотная характеристика	Переходная характеристика
3	Д-регулятор	$T1p$	 <p>$T1=R1C1$</p>	 <p>$lg \frac{1}{T1}$ $+20дБ / дек$ $lg \omega$</p>	 <p>φ $+\frac{\pi}{2}$ $lg \omega$</p>	 <p>h t</p>
4	Апериодический регулятор 1-го порядка	$\frac{K}{1+T2p}$	 <p>$K=\frac{R2}{R1}$, $T2=R2C2$</p>	 <p>$20 lgK$ $lg \frac{1}{T2}$ $-20дБ / дек$ $lg \omega$</p>	 <p>φ $lg \omega$ $lg \frac{1}{T2}$ $-\frac{\pi}{2}$</p>	 <p>h $T2$ k t</p>
5	Форсирующий регулятор 1-го порядка (ПД-регулятор)	$K(T1p+1)$	 <p>$K=\frac{R2}{R1}$, $T1=R1C1$</p>	 <p>$lg \frac{1}{T}$ $+20дБ / дек$ $lg \omega$ $20 lgK$</p>	 <p>φ $\frac{\pi}{2}$ $\frac{\pi}{4}$ $lg \omega$ $lg \frac{1}{T}$</p>	 <p>h K t</p>

№ п/п	Название регулятора	Передаточная функция	Схема реализации на операционном усилителе	Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика	Фазовая частотная характеристика	Переходная характеристика
6	И-регулятор с форсированием (ПИ-регулятор)	$\frac{T_2 p + 1}{T_1 p}$	<p>$T_1 = R_1 C_2,$ $T_2 = R_2 C_2$</p>			
7	Д-регулятор с замедлением	$\frac{T_2 p}{T_1 p + 1}$	<p>$T_1 = R_1 C_1,$ $T_2 = R_2 C_2$</p>			
8	И-регулятор с замедлением	$\frac{K}{T_1 p (T_2 p + 1)}$	<p>$T_1 = R_1 C_1, K = R_3 / R_2,$ $T_2 = R_3 C_3$</p>			

№ п/п	Название регулятора	Передаточная функция	Схема реализации на операционном усилителе	Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика	Фазовая частотная характеристика	Переходная характеристика
9	Апериодический регулятор 2-го порядка	$\frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$ $T_{1,2} = T(\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1})$	 $K = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$ $T_1 = R_2 C_2, T_2 = R_4 C_4$			
10	ПИД-регулятор	$\frac{K(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_2 p}$	 $K = \frac{R_2}{R_1}$ $T_1 = R_1 C_1, T_2 = R_2 C_2$			

Приложение 3

**Шкалы номинальных значений сопротивлений
резисторов и емкостей конденсаторов**

Таблица П.3.1

Шкала резисторов, кОм							
1,0	3,0	6,2	18	39	82	240	510
1,2	3,3	6,8	20	43	91	270	560
1,5	3,6	7,5	22	47	100	300	620
1,8	3,9	8,2	24	51	120	330	680
2,0	4,3	9,1	27	56	150	360	750
2,2	4,7	10	30	62	180	390	820
2,4	5,1	12	33	68	200	430	910
2,7	5,6	15	36	75	220	470	1000
Шкала конденсаторов, мкФ							
0,01	–	0,1	–	1,0	3,3	10	–
0,012	0,04	0,12	0,4	1,2	4,0	12	40
0,015	0,047	0,15	0,47	1,5	4,7	15	–
0,018	0,05	0,18	0,5	1,8	5,0	18	50
–	0,06	–	0,6	2,0	6,0	20	60
0,022	0,068	0,22	0,68	2,2	6,8	22	–
0,025	0,07	0,25	0,7	2,5	7,0	25	–
0,03	0,08	0,3	0,8	3,0	8,0	30	–

Содержание

Введение.....	3
1. Задания на курсовую работу по теории автоматического управления.....	4
1.1. Краткие сведения о типовой двухзонной САУ с подчиненными контурами регулирования токов якоря и возбуждения электропривода постоянного тока.....	9
1.2. Линеаризованная структурная схема двухзонной САУ подчиненного регулирования.....	11
2. Преобразование структурных схем контуров регулирования к нормированному виду.....	16
3. Синтез регуляторов по методу модального управления.....	20
3.1. Модульный, симметричный и улучшенный симметричный критерии оптимизации регуляторов.....	20
3.2. Пример структурного и параметрического синтеза регуляторов в канале управления двигателем со стороны возбуждения.....	23
4. Статический расчет СА.....	28
5. Динамический расчет САУ.....	31
6. Синтез электрических схем регуляторов САУ.....	35
Заключение.....	37
Литература.....	38
Приложение 1. Типовые регуляторы САУ электроприводов....	39
Приложение 2. Правила преобразований структурных схем....	42
Приложение 3. Шкала номинальных значений активных сопротивлений нерегулируемых резисторов и емкостей нерегулируемых конденсаторов	46

Дорощенко Игорь Васильевич

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие
к курсовой работе
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 15.05.19.

Рег. № 53Е.

<http://www.gstu.by>