

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Нижекамский химико-технологический институт (филиал)

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Кафедра Электротехники и энергообеспечения предприятий

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

**Контрольные задания**

**для студентов заочного отделения**

**специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и  
технологических комплексов»**

Нижекамск 2012

## Правила оформления контрольных работ

Контрольная работа оформляется в 12 листовой тетради. Задания переписываются полностью так, как они даны в листах заданий, решения сопровождаются подробными пояснениями, графические построения выполняются карандашом либо могут быть распечатаны на принтере с использованием программных обеспечений Microsoft Excel, MathCad и т.д. Вариант контрольного задания определяется порядковым номером студента по списку в таблице.

Подготовил: ст. преподаватель Ганиев Р. Н.

## ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ №1, 2

Расчет системы автоматического управления электропривода постоянного тока, построенной в виде системы подчиненного регулирования, по дисциплине «Системы автоматического управления электроприводов» для студентов специальности 140604.

В расчетно-пояснительной записке должны быть решены следующие вопросы:

1. Расчет основных параметров схемы «тиристорный преобразователь-двигатель».
  - 1.1. Расчет и выбор силового трансформатора.
  - 1.2. Расчет и выбор управляемых вентиляей.
  - 1.3. Расчет индуктивности и активного сопротивления якорной цепи.
  - 1.4. Определение статических и динамических характеристик силового преобразователя и двигателя.
2. Расчет и реализация регулятора тока по условиям технического оптимума.
3. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям технического оптимума.
4. Определение статических свойств контура скорости, настроенного на технический оптимум.
5. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям симметричного оптимума.
6. Построение графика переходной характеристики по управляющему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.
7. Построение графика переходной характеристики по возмущающему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.
8. Описание работы упрощенной принципиальной схемы системы автоматического управления электропривода постоянного тока.

Исходные данные для расчета берутся из таблицы согласно заданному преподавателем номеру варианта.

Контрольная работа №1 включает в себя пункты 1÷4, контрольная работа №2 – пункты 5÷8.

### ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Контрольная работа оформляется в виде пояснительной записки на стандартных листах белой бумаги формата А4 (297×210 мм) с соблюдением требований ГОСТ и ЕСКД. Иллюстрированный материал (графики, схемы) должны выполняться на листах миллиметровой бумаги, иметь сквозную нумерацию и поясняющие надписи.

Пояснительная записка должна иметь титульный лист, который оформляется в соответствии с требованиями отраслевого стандарта. В начале записки приводятся данные для выполнения контрольной работы с указанием исходных данных для расчетов. Текст записки включает расчетную часть, где должны быть представлены необходимые расчеты и соответствующие графики по всем пунктам задания.

В конце пояснительной записки приводится список использованной литературы из числа рекомендованной, а также использованной самостоятельно. В заключение на

отдельном листе дается содержание пояснительной записки с указанием ее основных разделов и номеров соответствующих страниц записки.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электропривод постоянного тока выполнен по схеме двухконтурной системы подчиненного регулирования (СПР) с внутренним контуром, замкнутым по току якоря, и внешним, замкнутым по скорости двигателя. Структурная схема линеаризованной модели СПР, справедливая при типовых допущениях [1], приведена на рис. 1.

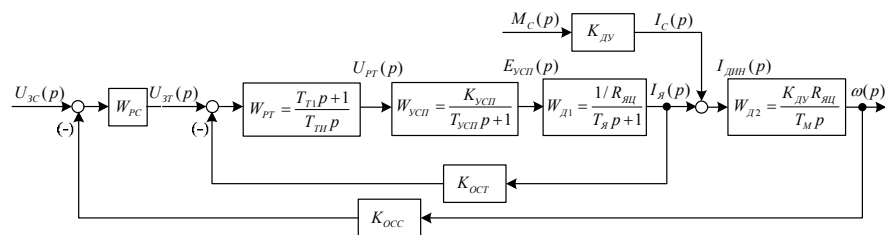


Рис. 1. Структурная схема линеаризованной модели СПР

Динамические свойства двигателя постоянного тока на этой схеме без учета действия внутренней обратной связи по ЭДС двигателя отражены звеньями с передаточными функциями  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$ . Входной переменной для первого звена является ЭДС управляемого силового преобразователя  $E_{всп}(p)$ , а выходной – ток якоря  $I_я(p)$ . Связь между изображениями этих переменных устанавливается передаточной функцией аperiodического звена:

$$W_{д1}(p) = \frac{I_я(p)}{E_{всп}(p)} = \frac{1/R_{яц}}{T_я p + 1},$$

где  $R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи;

$T_я$  – электромагнитная постоянная времени двигателя.

Динамические свойства второго звена, выходной переменной которого является скорость двигателя  $\omega(p)$ , описываются передаточной функцией интегрирующего звена:

$$W_{д2} = \frac{\omega(p)}{I_{я,дин}(p)} = \frac{K_{дв} R_{яц}}{T_м p};$$

$$I_{я,дин}(p) = I_я(p) - I_с(p),$$

где  $K_{дв}$  – коэффициент передачи двигателя;

$K_{ост}$  и  $K_{осс}$  – соответственно коэффициенты передачи звеньев обратной связи по току и скорости;

$T_м$  – электромеханическая постоянная времени двигателя;

$I_с(p)$ ,  $I_{я,дин}(p)$  – соответственно статическая и динамическая составляющие тока якоря.

Вентильный преобразователь приближенно описывается передаточной функцией аperiodического звена:

$$W_{ycn}(p) = \frac{E_{ycn}(p)}{U_{pr}(p)} = \frac{K_{ycn}}{T_{ycn}p + 1},$$

где  $K_{ycn}$ ,  $T_{ycn}$  – коэффициент передачи и постоянная времени вентильного (тиристорного) преобразователя.

Значение  $T_{ycn}$  при синтезе СПР обычно принимается в качестве малой некомпенсируемой постоянной токового контура:  $T_{\mu T} = T_{ycn}$ .

В схеме использован типовой ПИ-регулятор тока с передаточной функцией

$$W_{pr}(p) = \frac{T_{TI}p + 1}{T_{TI}p},$$

что обеспечивает настройку токового контура на технический оптимум (ТО).

Известно, что для внешнего скоростного контура электропривода в зависимости от требований к его статическим и динамическим характеристикам могут использоваться стандартные настройки на ТО и симметричный оптимум (СО). Желаемый тип настройки достигается использованием, соответственно, П- и ПИ-регуляторов с передаточными функциями:

$$W_{PC}^{MO}(p) = K_{PC};$$

$$W_{PC}^{CO}(p) = \frac{T_{CI}p + 1}{T_{CI}p}.$$

Отклик скоростного контура на скачок задающего сигнала при стандартных настройках системы показан на рис. 2. Скорость протекания переходных процессов в обоих случаях определяется величиной, эквивалентной некомпенсируемой постоянной времени  $T_{\mu C}$  скоростного контура, что определяет удобство построения теоретической кривой по оси абсцисс в относительных единицах времени ( $t/T_{\mu C}$ ), где  $T_{\mu C} = 2T_{\mu T}$ .

Важнейшими показателями качества переходного процесса по управляющему воздействию являются перерегулирование, определяемое как отношение максимального отклонения выходной координаты в переходном режиме от установившегося значения ( $\Delta\omega_{МАКС}$ ) к этому установившемуся значению ( $\omega_{уст}$ ):

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_{МАКС}}{\omega_{уст}} \cdot 100\%,$$

а также время переходного процесса  $t_{III}$ , определяемое как интервал времени с момента подачи воздействия на вход системы до момента вхождения значений выходной координаты в зону допустимых отклонений от установившегося значения. Величину зоны допустимых отклонений обычно принимают равной  $\pm 0,05\omega_{уст}$ .

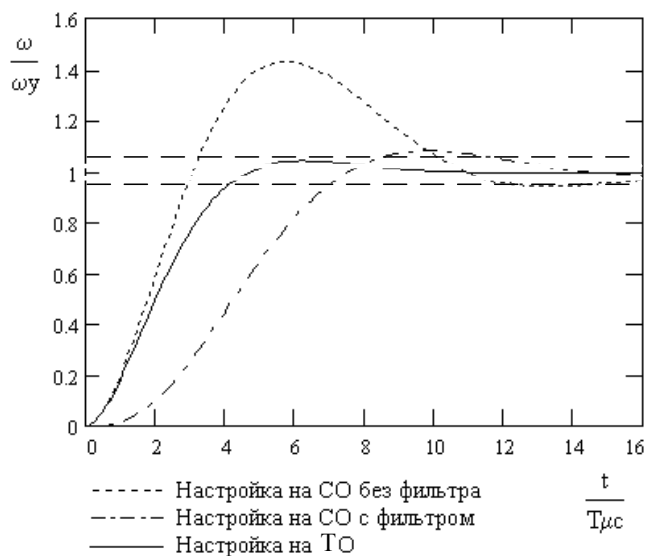


Рис. 2. Отклик скоростного контура на скачок задающего сигнала при стандартных настройках системы

Настройка скоростного контура на ТО (см. рис. 2) обеспечивает максимальное быстродействие системы. Однако жесткость механических характеристик электропривода при такой настройке, как правило, оказывается неудовлетворительной. В связи с этим при высоких требованиях к точности стабилизации скорости преимущественно используется настройка на СО, которая обеспечивает жесткие механические характеристики. Однако показатели качества переходного процесса в этом случае оказываются не всегда приемлемыми:  $\sigma = 43,3\%$ . Величину перерегулирования  $\sigma$  можно существенно снизить (до 8,1%) включением на входе системы аperiodического фильтра с передаточной функцией:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{4T_{\mu C}p + 1}.$$

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

**Важно:** Исходные данные для расчета берутся из таблицы согласно заданному преподавателем номеру варианта.

### Параметры двигателя:

Номинальная мощность:  $P_H$  [кВт].

Номинальная скорость:  $n_H$  [об/мин].

Номинальное напряжение:  $U_H$  [В].

Номинальный ток:  $I_H$  [А].

Номинальный момент:  $M_H$  [Н·м].

Маховой момент:  $GD^2$  [кг·м<sup>2</sup>].

Кратность пускового тока:  $\lambda$ .

Число пар полюсов:  $2p$ .

Активное сопротивление обмотки якоря при 15°С:  $R_{\text{я}}$  [Ом].

Число параллельных ветвей:  $2a$ .

Активное сопротивление обмотки добавочных полюсов:  $R_{\text{д}}$  [Ом].

Двигатели постоянного тока выпускаются со встроенным тахогенератором.

### Параметры нагрузки и силового преобразователя:

Диапазон регулирования скорости:  $D$ .

Допустимая статическая ошибка:  $\xi_{доп}$  [%].

Момент инерции исполнительного механизма:  $J_M$  [ $кг \cdot м^2$ ].

Постоянная времени управляемого силового преобразователя:  $T_{всп}$  [с].

Для всех вариантов берется один тип силовой схемы управляемого тиристорного преобразователя – реверсивная трехпульсная противоположная схема выпрямления с уравнительными дросселями.

### Значение коэффициентов силовой схемы

Коэффициент схемы по напряжению	$K_H = 0,922$
Коэффициент запаса по напряжению	$K_U = 1,1$
Коэффициент запаса, учитывающий неполное открытие вентилях при максимальном управляющем сигнале	$K_\alpha = 1,1..1,2$
Коэффициент запаса, учитывающий падение напряжения в вентилях и обмотках трансформатора	$K_R = 1,05$
Коэффициент схемы по току вторичной обмотки	$K_{T2} = 0,578$
Коэффициент, учитывающий отклонение формы тока от прямоугольной	$K_i = 1,1$
Коэффициент схемы по току первичной обмотки	$K_{T1} = 0,47$
Коэффициент схемы по мощности	$K_M = 1,45$
Коэффициент схемы по среднему току вентиля	$K_{TB} = 0,333$
Коэффициент схемы по максимальному напряжению вентиля	$K_{HB} = 2,25$

Дополнительные данные:

Следующие коэффициенты выбираются студентом произвольно в пределах указанных диапазонов.

Коэффициент, учитывающий индуктивность обмотки якоря для некомпенсированных машин  $K_L = 5..12$

Относительное значение индуктивной составляющей напряжения короткого замыкания трансформатора для трансформаторов типа ТТ  $U_L = 0,08..0,1$

Относительное значение активной составляющей напряжения короткого замыкания трансформатора для трансформаторов типа ТТ  $U_a = 0,025..0,035$

Частота сети:  $f$  [Гц]=50.

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_n, кВт$	$n_n, об/мин$	$U_n, В$	$I_n, А$	$M_n, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{дл}, Ом$	$K_J$	$T_{усп}, сек$		
1	ПБВ112L	1,1	500	50	28	21	0,2	7	4	0,144	2	0,7 $R_{я}$	2	0,006
2	1ПИ12.07	0,24	1000	36	6,8	2,3	0,024	7	4	1,0	2	0,7 $R_{я}$	1	0,004
3	21МВН	2,2	1000	81	18	21	0,132	7	4	0,115	2	0,7 $R_{я}$	2	0,007
4	2ПБВ100М	0,8	1000	47	20	7,5	0,076	7	4	0,22	2	0,7 $R_{я}$	2	0,005
5	2ПБВ112S	1,6	100	55	28	15	0,136	7	4	0,11	2	0,7 $R_{я}$	2	0,006



Номер варианта	Тип	Двигатель										Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
		Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_n, кВт$	$n_n, об/мин$	$U_n, В$	$I_n, А$	$M_n, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{усп}, сек$		
			0											
6	2ПБВ100L	1,2	1000	47	25	11	0,152	7	4	0,14	2	0,7 $R_{я}$	2	0,006
7	2ПБВ112М	2	1000	69	35	18,5	0,168	7	4	0,123	2	0,7 $R_{я}$	2	0,008
8	2ПБВ132S	3,89	1000	73	54	37	0,696	7	4	0,057	2	0,7 $R_{я}$	2	0,007
9	ДК1-1,7	0,27	1500	36	8	1,7	0,018	7	4	0,75	2	0,7 $R_{я}$	1	0,004
10	ДК1-3,5	0,74	200	65	7,5	3,5	0,044	7	4	1,15	2	0,7 $R_{я}$	2	0,006

Номер варианта	Тип	Двигатель										Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
		Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_n, кВт$	$n_n, об/мин$	$U_n, В$	$I_n, А$	$M_n, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{усп}, сек$		
			0											
11	ДК1-2,3	0,36	1500	48	7,5	2,3	0,028	7	4	0,95	2	0,7 $R_{я}$	1	0,005
12	ДК1-5,2	0,55	1000	110	6,5	5,2	0,032	7	4	2,1	2	0,7 $R_{я}$	1	0,005
13	ПБВ100М	0,75	1000	52	18	7,16	0,04	7	4	0,222	2	0,7 $R_{я}$	1	0,006
14	ПБВ100L	1,1	1000	56	24	10,5	0,06	7	4	0,139	2	0,7 $R_{я}$	2	0,007
15	ПБВ112S	1,1	750	44	31,5	14	0,07	7	4	0,109	2	0,7 $R_{я}$	2	0,004

Номер варианта	Тип	Двигатель										Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
		Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_n, кВт$	$n_n, об/мин$	$U_n, В$	$I_n, А$	$M_n, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{усп}, сек$		
16	ПБВ112М	1,1	600	47	29	17,5	0,084	7	4	0,123	2	$0,7 R_{я}$	2	0,008
17	МИ32	0,37	1000	110	4,2	3,61	0,053	4	4	1,46	2	0,75	1	0,005
18	МИ42	1,1	1000	110	12,6	10,7	0,26	4	4	0,435	2	0,32	0,5	0,006
19	МИ32	0,45	1500	110	5,0	2,93	0,053	4	4	0,605	2	0,7	1	0,005

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей	Сопротивление добавочных полюсов		
$P_n, кВт$	$n_n, об/мин$	$U_n, В$	$I_n, А$	$M_n, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{усп}, сек$		
20	МИ41	1,1	1500	110	13,0	7,15	0,16	4	4	0,42	2	0,25	0,5	0,004
21	МИ42	1,6	1500	110	18,2	10,4	0,26	4	4	0,133	2	0,19	0,5	0,008
22	МИЗ1	0,37	2000	110	4,4	1,8	0,036	4	4	0,757	2	0,403	1	0,004
23	МИЗ2	0,76	2500	110	8,2	2,96	0,053	4	4	0,237	2	0,154	1	0,007
24	МИ41	1,6	2500	110	19,2	6,25	0,16	4	4	0,147	2	0,102	1	0,008
25	МИ42	0,32	2500	110	36,3	12,5	0,26	4	4	0,06	2	0,0285	1	0,005

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей	Сопротивление добавочных полюсов		
$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$M_n$ , Н·м	$GD^2$ , кг·м <sup>2</sup>	$\lambda$	$2p$	$R_{я}$ , Ом	$2a$	$R_{д}$ , Ом	$K_J$	$T_{усп}$ , сек		
26	МИЗ 1	0,45	3000	110	5,6	1,46	0,036	4	4	0,345	2	0,24	1	0,004
27	ПСТ 51	0,18	1000	110	2,4	1,75	0,032	4	2	3,9	2	3,1	0,5	0,004
28	ПСТ 52	0,25	1000	110	3,2	2,44	0,04	4	2	2,4	2	1,7	0,5	0,005
29	ПСТ 53	0,37	1000	110	4,3	3,6	0,046	4	2	1,47	2	1,12	0,5	0,005
30	ПСТ 42	0,18	1500	110	2,3	1,17	0,015	4	2	2,6	2	1,75	0,5	0,004
31	ПСТ 51	0,25	1500	110	3,2	1,62	0,032	4	2	2,1	2	1,3	0,5	0,004
3	ПСТ	0,3	1500	11	4,4	2,4	0,04	4	2	1,25	2	0,76	1	0,005

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные					
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов			
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей				Сопротивление добавочных полюсов
$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$M_n$ , Н·м	$GD^2$ , кг·м <sup>2</sup>	$\lambda$	$2p$	$R_{я}$ , Ом	$2a$	$R_{д}$ , Ом	$K_J$	$T_{усп}$ , сек			
2	52	7		0											
33	ПСТ 53	0,55	1500	110	6,2	3,58	0,046	4	2	0,77	2	0,58	1	0,007	
34	ПСТ 42	0,25	2200	110	3,1	1,17	0,015	4	2	1,4	2	0,96	0,5	0,005	
35	ПСТ 51	0,37	2200	110	4,4	1,64	0,035	4	2	1,13	2	0,9	0,5	0,006	
36	ПСТ 52	0,55	2200	110	6,2	2,44	0,04	4	2	0,66	2	0,48	0,5	0,007	
37	ПСТ 53	0,75	2200	110	8,2	3,32	0,046	4	2	0,365	2	0,3	0,5	0,008	
38	ПСТ 31	0,18	3000	110	2,4	0,58	0,010	4	2	2,2	2	1,75	1	0,005	

Номер варианта	Двигатель											Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$M_n$ , Н·м	$GD^2$ , кг·м <sup>2</sup>	$\lambda$	$2p$	$R_{я}$ , Ом	$2a$	$R_{д}$ , Ом	$K_J$	$T_{усп}$ , сек		
39	ПСТ 41	0,25	3000	110	3,2	0,83	0,012	4	2	1,2	2	0,96	1	0,004
40	ПСТ 42	0,37	3000	110	4,4	1,2	0,015	4	2	0,77	2	0,55	1	0,005

Силовая схема тиристорного электропривода представлена на рис. 3, содержит силовой трансформатор TV, шесть тиристоров VS1-VS6, два ограничивающих реактора L1, L2 и якорь М двигателя постоянного тока.

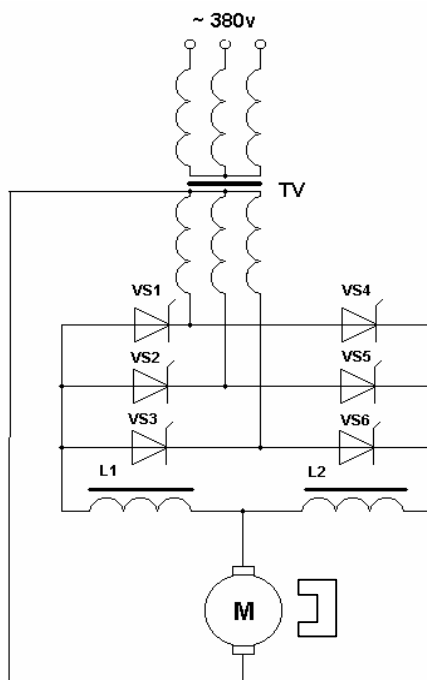


Рис. 3. Силовая схема тиристорного электропривода

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

### 1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ»

#### 1.1. Расчет мощности силового трансформатора TV

Схема «тиристорный преобразователь-двигатель» предусматривает использование трансформатора с соединением обмоток звезда/звезда и первичным напряжением 380 В.

Теоретическое значение ЭДС вторичной обмотки:  $E_2 = K_H \cdot U_H$  [В].

Напряжение вторичной обмотки:  $U_2 = K_U \cdot K_\alpha \cdot K_R \cdot E_2$  [В].

Ток вторичной обмотки:  $I_2 = K_i \cdot K_{T2} \cdot I_H$  [А].

Ток первичной обмотки:  $I_1 = \frac{K_i \cdot K_{T1}}{\left(\frac{220}{U_2}\right)} \cdot I_H$  [А].

Расчетная мощность трансформатора:

$$P_T = K_M \cdot K_U \cdot K_\alpha \cdot K_i \cdot U_H \cdot I_H \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]}.$$

По мощности  $P_T$  выбирается типовой трансформатор из серии ТТ.



## 1.2. Выбор силовых тиристоров VS

Среднее значение тока вентиля:  $I_{BH} = K_{TB} \cdot I_H$  [А].

Максимальная величина обратного напряжения:

$$U_{об\_MAX} = K_{HB} \cdot K_U \cdot K_a \cdot K_R \cdot U_H$$
 [В].

Тип тиристора выбирается по среднему значению тока вентиля и максимальной величине обратного напряжения, прикладываемого к вентилю [5].

## 1.3. Определение индуктивности и активного сопротивления якорной цепи

Индуктивность обмотки якоря (определяется по приближенной формуле):

$$L_{я} = \frac{K_L \cdot U_H}{2 \cdot p \cdot n_H \cdot I_H}$$
 [Гн].

Индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока:  $X_T = U_L \frac{U_2}{I_2}$  [Ом].

Индуктивность трансформатора, приведенная к контуру двигателя:

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f}$$
 [Гн].

Индуктивность одного реактора при двух ограничивающих реакторах с ограничением уравнивающего тока до 30% от номинального:

$$L_v = 1,4 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H}$$
 [Гн],

тогда индуктивность якорной цепи будет:  $L_{яц} = L_{я} + L_T + L_v$  [Гн].

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока:  $R_T = \frac{U_2}{I_2} \cdot U_a$  [Ом].

Сопротивление, вносимое за счет перекрытия анодных токов:

$$R_{II} = \frac{3 \cdot X_T}{2 \cdot \pi}$$
 [Ом].

Сопротивление щеточного контакта:  $R_{щ} = \frac{2}{I_H}$  [Ом].

Сопротивление реактора:  $R_v = 2 \cdot L_v$  [Ом],

тогда суммарное сопротивление цепи якоря:

$$R_{яц} = 1,2 \cdot R_{яд} + R_T + R_{II} + R_{щ} + R_v$$
 [Ом],

где  $R_{яд} = R_{я} + R_d$  [Ом].

Суммарное эквивалентное сопротивление якорной цепи:

$$R_{\Sigma} = 1,2 \cdot R_{яд} + X_T + R_{II} + R_{щ} + R_v$$
 [Ом].

## 1.4. Определение статических и динамических параметров силового преобразователя и двигателя

Электромагнитная постоянная времени двигателя:  $T_{я} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$  [с].

Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_D + J_M \text{ [кг} \cdot \text{м}^2],$$

где  $J_D = \frac{GD^2}{4} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]$  – момент инерции двигателя;

$J_M = K_J \cdot J_D \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]$  – момент инерции исполнительного механизма, приведенный к валу двигателя.

Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_M = \frac{J \cdot R_{\Sigma}}{(C_D \Phi)^2} \text{ [с]},$$

где  $C_D \Phi = \frac{U_H - I_H \cdot 1,2 \cdot R_{яц}}{\omega_H} \text{ [Вс/рад]}$ , где  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \text{ [рад/с]}$ .

Коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию:

$$K_{ДУ} = \frac{1}{C_D \Phi} \text{ [рад/Вс]}.$$

Коэффициент передачи управляемого силового преобразователя, тиристорного преобразователя:

$$K_{УСП} = \frac{U_H}{U_{РТ\_МАХ}} = \frac{U_H}{10},$$

где  $U_{РТ\_МАХ}$  – максимальное напряжение на выходе регулятора тока.

Коэффициент передачи тахогенератора-датчика скорости:

$$K_{БР} = K_{ДС} = \frac{U_{БР}}{\omega_{БР}} = \frac{20}{105} \text{ [Вс]}.$$

Коэффициент передачи двигателя по возмущающему воздействию:

$$K_{ДВ} = \frac{R_{яц}}{(C_D \Phi)^2} \text{ [рад/сНм]}.$$

## 2. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ПО УСЛОВИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОПТИМУМА

Структурная схема контура тока представлена на рис. 4.

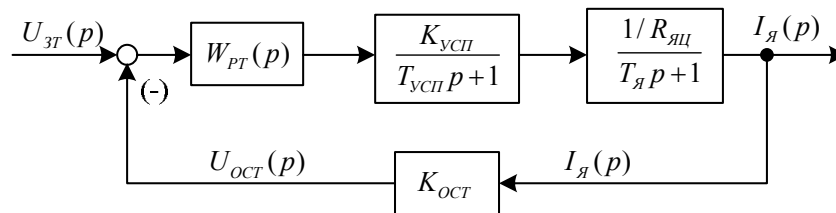


Рис. 4. Структурная схема контура тока

Настроим контур тока на технический оптимум. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура будет иметь вид:

$$W_{РЖ}^{ТО}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{УСП} \cdot p \cdot (T_{УСП} \cdot p + 1)},$$

где  $T_{усп} = T_{\mu T}$ , так как принимаем  $T_{усп}$  за малую постоянную времени токового контура, а  $T_{я}$  – за большую постоянную времени.

В качестве датчика обратной связи по току используем сопротивление добавочных полюсов:

$K_{дт} = R_{д}$  [Ом] – коэффициент передачи датчика тока.

Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_p(p) = W_{рТ}(p) \cdot \frac{K_{усп}}{(T_{усп} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ост} \cdot \frac{1}{R_{яц}}$$

Приравняем правые части выражений  $W_{рж}^{то}(p)$  и  $W_p(p)$  и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора тока  $W_{рТ}(p)$ :

$$W_{рТ}(p) = \frac{T_{я} \cdot p + 1}{\frac{2 \cdot T_{усп} \cdot K_{усп} \cdot K_{ост} \cdot p}{R_{яц}}}$$

Из этого выражения следует, что регулятор тока должен быть реализован схемой ПИ-регулятора, приведенной на рис. 5.

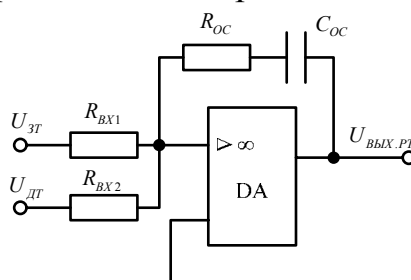


Рис. 5. Принципиальная схема регулятора тока

В схеме регулятора тока используются два входа операционного усилителя с входными сопротивлениями  $R_{BX1}$  и  $R_{BX2}$ , предназначенные, соответственно, для подачи задающего сигнала  $U_{ЗТ}$  и сигнала обратной связи по току  $U_{ДТ}$ . В структурной схеме на рис. 2 эти воздействия суммируются непосредственно, в связи с чем необходимо выполнить эквивалентное приведение сигналов к одному входу. При подаче напряжения обратной связи по току на второй вход соответствующая составляющая напряжения на выходе операционного усилителя

$$U_{ВЫХ.РТ}(p) = U_{ДТ}(p) \cdot \frac{Z_{oc}(p)}{R_{BX2}}$$

Так как

$$U_{ВЫХ.РТ}(p) = U_{ДТ}(p) \cdot \frac{Z_{oc}(p)}{R_{BX1}} \cdot \frac{R_{BX1}}{R_{BX2}},$$

поэтому такой же сигнал  $U_{ВЫХ.РТ}(p)$  создается при подаче на первый вход воздействия

$$U_{дт}(p) \cdot \frac{R_{БХ1}}{R_{БХ2}}.$$

Отсюда следует, что для приведения к первому входу достаточно увеличить сигнал обратной связи  $U_{дт}$  в  $R_{БХ1}/R_{БХ2}$  раз, принимая вместо  $U_{дт}$ , величину  $U_{ост}$ , т.е.  $U_{ост} = U_{дт} \cdot \frac{R_{БХ1}}{R_{БХ2}}$ .

Зная, что  $U_{ост.макс} = U_{зт.макс}$ , а максимально допустимый ток якоря равен  $I_{я.макс} = I_H \cdot \lambda$ , получим

$$K_{ост} = \frac{U_{ост.макс}}{I_{я.макс}} = \frac{10}{\lambda \cdot I_H} \text{ [Ом]},$$

причем  $K_{ост} = K_{дт} \cdot \frac{R_{БХ1}}{R_{БХ2}}$ , так как  $U_{ост} = U_{дт} \cdot \frac{R_{БХ1}}{R_{БХ2}}$ .

Передаточная функция ПИ-регулятора на базе операционного усилителя с RC-цепью обратной связи относительно сигнала на первом входе примет вид:

$$W_{пир}(p) = \frac{R_{ос} \cdot C_{ос} \cdot p + 1}{R_{БХ1} \cdot C_{ос} \cdot p}.$$

Приравнивая теперь соответствующие коэффициенты при  $p$  в выражениях  $W_{рт}(p)$  и  $W_{пир}(p)$ , получим систему выражений:

$$\begin{cases} R_{ос} \cdot C_{ос} = T_я \\ R_{БХ1} \cdot C_{ос} = \frac{2 \cdot T_{усп} \cdot K_{усп} \cdot K_{ост}}{R_{яц}} \end{cases}$$

Добавляя выражение

$$\frac{K_{ост}}{K_{дт}} = \frac{R_{БХ1}}{R_{БХ2}},$$

можно рассчитать параметры  $R$  и  $C$  регулятора тока, задавшись, например, емкостью  $C_{ос} = 1.2$  мкФ (выбирается студентом произвольно из заданного диапазона), по следующим выражениям:

$$R_{ос} = \frac{T_я}{C_{ос}} \text{ [Ом]},$$

$$R_{БХ1} = \frac{2 \cdot K_{усп} \cdot K_{ост}}{R_{яц} \cdot C_{ос}} \cdot T_{усп} \text{ [Ом]},$$

$$R_{БХ2} = R_{БХ1} \cdot \frac{K_{дт}}{K_{ост}} \text{ [Ом]}.$$

### 3. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОПТИМУМА

Структурная схема контура скорости представлена на рис. 6.

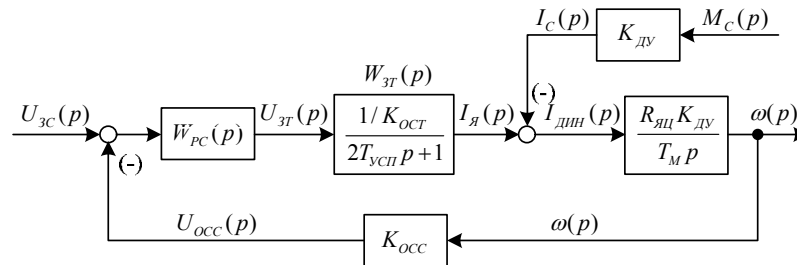


Рис. 6. Структурная схема контура скорости

Настроим контур скорости на технический оптимум (ТО). Так как  $T_M > 2T_{ycп}$ , то примем  $2T_{ycп}$  за малую постоянную времени контура скорости  $T_{\mu c}$ , а электромеханическую постоянную времени  $T_M$  – за большую постоянную времени контура скорости.

Известно, что желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет следующий вид:

$$W_{рж}^{TO}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{ycп} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{ycп} \cdot p + 1)}.$$

Из структурной схемы скоростного контура (см. рис. 4) следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_p(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{1}{K_{ocт} \cdot (2T_{ycп} \cdot p + 1)} \cdot \frac{R_{яц} \cdot K_{дв}}{T_M \cdot p} \cdot K_{ocс}.$$

Приравняем правые части выражений  $W_{рж}^{TO}(p)$  и  $W_p(p)$  и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости  $W_{pc}^{TO}(p)$ :

$$W_{pc}^{TO}(p) = \frac{K_{ocт} \cdot T_M}{4 \cdot T_{ycп} \cdot R_{яц} \cdot K_{дв} \cdot K_{ocс}}.$$

Из этого выражения видно, что регулятор скорости представляет собой П-регулятор, то есть

$$W_{pc}^{TO}(p) = K_{pc}.$$

Принципиальная схема регулятора скорости представлена на рис. 7.

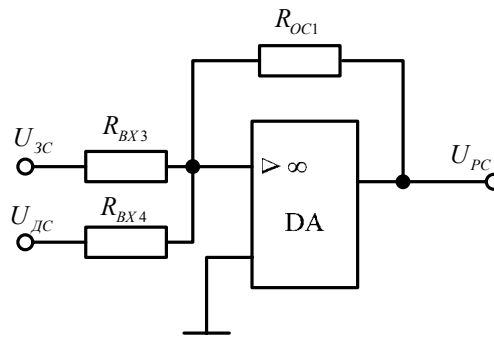


Рис. 7. Принципиальная схема регулятора скорости при настройке на ТО

Рассчитаем параметры схемы, допуская, что  $U_{3C\_MAX} = U_{OCC\_MAX} = 10$  В. Рассуждая аналогично тому, как при расчете в контуре тока сигнал обратной связи по скорости, приведенный к первому входу регулятора скорости равен:

$$U_{OCC} = K_{BR} \cdot \frac{R_{BX3}}{R_{BX4}} \cdot \omega.$$

Задаваясь  $R_{BX3} = 5..10$  кОм (выбирается студентом произвольно из заданного диапазона), получим  $R_{BX4} = \frac{K_{DC} \cdot R_{BX3}}{K_{OCC}}$  [Ом],

так как  $K_{DC} = K_{BR}$ , то  $K_{OCC} = K_{DC} \cdot \frac{R_{BX3}}{R_{BX4}}$ ,

где  $K_{OCC} = \frac{U_{OCC\_MAX}}{\omega_H} = \frac{10}{\omega_H}$ , а  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$  [рад/Вс].

Известно, что  $R_{OCC1} = K_{PC} \cdot R_{BX3}$ , поэтому можно определить

$$R_{OCC1} = \frac{K_{OCT} \cdot T_M}{4T_{УСП} \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДВ} \cdot K_{OCC}} \cdot R_{BX3} \text{ [Ом]}.$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА ТЕХНИЧЕСКИЙ ОПТИМУМ

Падение скорости  $\Delta\omega_3$ , вызванное действием нагрузки  $M_C = M_H$ :

$$\Delta\omega_3 = \frac{4T_{УСП}}{T_M} \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДВ}^2 \cdot M_H.$$

Соответствующая относительная ошибка  $\varepsilon_1$  на нижнем пределе диапазона регулирования скорости:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta\omega_3 \cdot D}{\omega_H} \times 100\%.$$

Если  $\varepsilon_1 > \varepsilon_{ДОП}$ , то такая настройка контура скорости не обеспечивает требуемых статических свойств, предъявляемых к электроприводу, и необходимо выполнить расчет по п. 5.

## 5. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПО УСЛОВИЯМ СИММЕТРИЧНОГО ОПТИМУМА

При настройке на симметричный оптимум (СО) желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет вид:

$$W_{РЖ}^{CO}(p) = \frac{4 \cdot 2T_{УСП} \cdot p + 1}{4 \cdot 2T_{УСП} \cdot p} \times \frac{1}{2 \cdot 2T_{УСП} \cdot p \cdot (2T_{УСП} \cdot p + 1)} =$$

$$= \frac{8T_{УСП} \cdot p + 1}{32T_{УСП}^2 \cdot p^2 \cdot (2T_{УСП} \cdot p + 1)}$$

Из структурной схемы скоростного контура (см. рис. 4) следует, что передаточная функция разомкнутого скоростного контура:

$$W_p(p) = W_{PC}^{CO}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCT} \cdot (2T_{УСП} \cdot p + 1)} \cdot \frac{R_{ЯЦ} \cdot K_{ДУ} \cdot K_{ОСС}}{T_M \cdot p}$$

Приравнивая правые части этих выражений  $W_{РЖ}^{CO}(p)$  и  $W_p(p)$ , из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{PC}^{CO}(p) = \frac{8T_{УСП} \cdot p + 1}{\left[ \frac{32T_{УСП}^2 \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДУ} \cdot K_{ОСС}}{K_{OCT} \cdot T_M} \right] \cdot p}$$

Из этого выражения следует, что регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор.

Принципиальная схема ПИ-регулятора представлена на рис. 8, а его передаточная функция:

$$W_{ПИ}(p) = \frac{R_{OC1} \cdot C_{OC1} \cdot p + 1}{R_{BX3} \cdot C_{OC1} \cdot p}$$

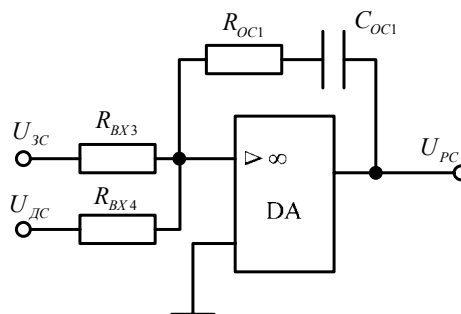


Рис. 8. Принципиальная схема регулятора скорости при настройке на СО

Приравнивая коэффициенты при  $p$  в последних двух выражениях  $W_{PC}^{CO}(p)$  и  $W_{ПИ}(p)$ , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_{OC1} \cdot C_{OC1} = 8T_{УСП} \\ R_{BX3} \cdot C_{OC1} = \frac{32T_{УСП}^2 \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДУ} \cdot K_{ОСС}}{K_{OCT} \cdot T_M} \end{cases}$$

Задаваясь той же величиной сопротивления ( $R_{BX3}$ ), что и в варианте настройки на технический оптимум, рассчитаем сопротивление  $R_{BX4}$  по выражению:

$$R_{BX4} = \frac{K_{ДС} \cdot R_{BX3}}{K_{ОСС}} [\text{Ом}],$$

а затем, используя вышеприведенную систему двух уравнений, рассчитаем последовательно сначала емкость  $C_{ОС1}$ , а потом сопротивление  $R_{ОС1}$ :

$$C_{ОС1} = \frac{32T_{УСП}^2 \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДУ} \cdot K_{ОСС}}{K_{ОСТ} \cdot T_M \cdot R_{BX3}} [\Phi],$$

$$R_{ОС1} = \frac{8 \cdot T_{УСП}}{C_{ОС1}} [\text{Ом}].$$

## 6. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА СИММЕТРИЧНЫЙ ОПТИМУМ

Структурная схема контура скорости имеет вид, представленный на рис. 9.

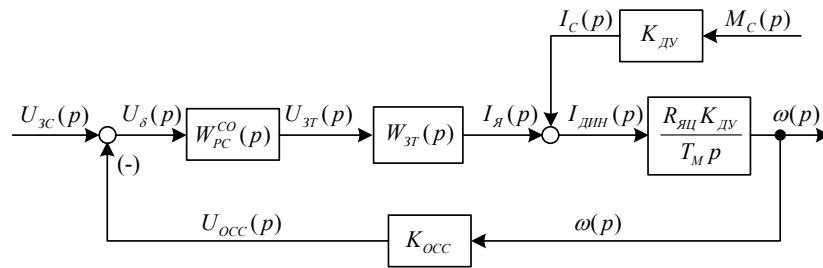


Рис. 9. Структурная схема контура скорости

По этой схеме можно определить передаточную функцию замкнутого контура скорости по управляющему воздействию  $U_{3C}$ :

$$W_{3C}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3C}(p)} = \frac{W_{РЖ}^{CO}(p)}{1 + W_{РЖ}^{CO}(p)} = \frac{\frac{1}{K_{ОСС}} \cdot (4T_{\mu C} \cdot p + 1)}{8T_{\mu C}^3 \cdot p^3 + 8T_{\mu C}^2 \cdot p^2 + 4T_{\mu C} \cdot p + 1},$$

так как  $W_{РЖ}^{CO}(p) = \frac{4T_{\mu C} \cdot p + 1}{8T_{\mu C}^2 \cdot p^2 (T_{\mu C} \cdot p + 1)}$ ,

где  $T_{\mu C} = 2T_{УСП}$ ,

или

$$W_{3C}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3C}(p)} = \frac{4T_{\mu C} \cdot p + 1}{K_{ОСС} \cdot (4T_{\mu C}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu C} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu C} \cdot p + 1)}.$$

Тогда выражение для скорости будет иметь вид:

$$\omega(p) = W_{3C}(p) \cdot U_{3C}(p) = \frac{4T_{\mu C} \cdot p + 1}{K_{ОСС} \cdot (4T_{\mu C}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu C} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu C} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{p},$$

где  $U_{3C}(p) = \frac{1}{p}$ .



Расчет отклика  $\omega(t)$  на единичный скачок задающего воздействия  $U_{3C}$  производится по параметрам изображения  $\omega(p)$  на компьютере по методике, изложенной в §1.2 и 2.4 [8].

## 7. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА СИММЕТРИЧНЫЙ ОПТИМУМ

Структурная схема контура скорости имеет вид, представленный на рис. 10.

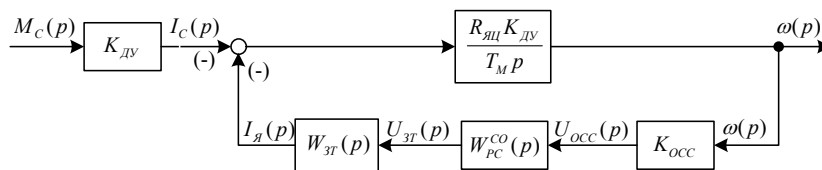


Рис. 10. Структурная схема контура скорости по возмущающему воздействию

По этой схеме можно определить передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущающему воздействию  $M_C$ :

$$W_B(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M \cdot p} \cdot \frac{1}{1 + W_{рж}^с(p)} =$$

$$= -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M} \cdot p \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{8T_{\mu c}^3 \cdot p^3 + 8T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 4T_{\mu c} \cdot p + 1}$$

или

$$W_B(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M} \cdot p \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{(4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)}$$

Тогда выражение для скорости будет иметь вид:

$$\omega(p) = W_B(p) \cdot M_C(p) = -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2 \cdot M_H}{T_M} \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{(4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)}$$

где  $M_C(p) = \frac{M_H}{p}$ .

Расчет отклика  $\omega(t)$  на скачок возмущающего воздействия  $M_C$  производится по параметрам изображения  $\omega(p)$  на компьютере по методике, изложенной в §1.2 и 2.5 [8].

## 8. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УПРОЩЕННОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 11 в качестве примера приведена упрощенная принципиальная схема двухконтурной системы регулирования скорости реверсивного

тиристорного электропривода с регулированием тока якоря. Силовые цепи показаны в схеме условно, в однолинейном исполнении. Системы импульсно-фазового управления (СИФУ-В и СИФУ-Н) осуществляют согласованное регулирование напряжения обеих групп преобразователей (условно ТВ и ТН), получая общий управляющий сигнал от ПИ-регулятора тока РТ. Сигнал обратной связи по току якоря снимается с выхода датчика тока ДТ и подается на входное сопротивление  $r_{\text{вх}2}$  РТ. Назначением ДТ, включенного на шунт  $r_{\text{ш}}$ , является преобразование тока якоря в пропорциональное ему напряжение, соответствующее уровню стандартного напряжения элементов системы управления, а также гальваническая развязка якорной цепи двигателя и цепей управления. Сигнал задания с выхода П-регулятора скорости РС подается на другой вход РТ с сопротивлением  $r_{\text{вх}1}$ . Напряжение обратной связи по скорости с якоря тахогенератора ТГ поступает на вход РС с сопротивлением  $r_{\text{вх}4}$ , а напряжение задания скорости – с выхода задатчика интенсивности ЗИ или непосредственно на входное сопротивление  $r_{\text{вх}3}$ . Ограничение максимального тока якоря осуществляется с помощью блока ОУТ [1]. При выборе ПИ-регулятора скорости на его входе, как правило, используется входной фильтр.

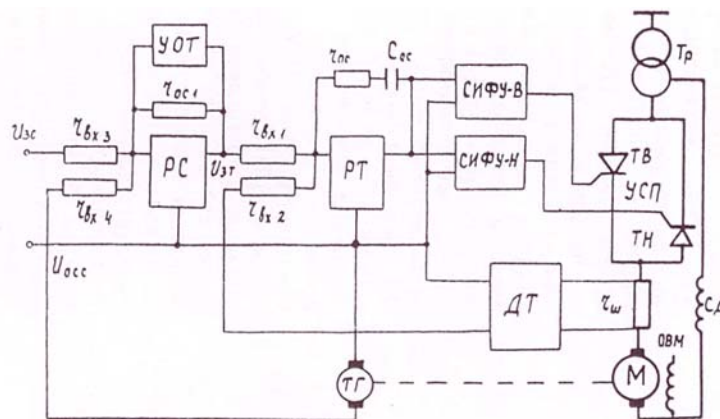


Рис. 11. Упрощенная принципиальная схема двухконтурной СПР