

## АСТАТИЧЕСКАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С МОДАЛЬНЫМ И ИНТЕГРАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРАМИ

Губарь Ю. В.  
Каф. ЭВМ ДонГТУ  
gubar@cs.dgtu.donetsk.ua

**Abstract**

*Gubar Y. V. Astatic a combined regulating system of speed by modal and integrated regulators. On the base of strategies of system syntheses from conditions to the module optimum and modal management happen to correlations, allowing choose system parameters.*

Система тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока (ТП-Д) с модальным регулятором (МР) является статической как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям. Для того, чтобы сделать эту систему астатической, можно дополнить ее контуром регулирования скорости (КРС) с интегральным регулятором (И-РС).

Для увеличения быстродействия системы регулирования скорости (СРС) при отработке управляющего воздействия применим задатчик интенсивности (ЗИ) с компаундирующими связями  $U_{k1}$  и  $U_{k2}$  [1]. Структурная схема такой системы приведена на рис. 1, где введены следующие обозначения:  $\omega$  - угловая скорость двигателя;  $I$  - ток якорной цепи;  $M$ ,  $M_c$  - электромагнитный и статический моменты;  $E_p$ ,  $E_d$  - ЭДС преобразователя и двигателя;  $R_{я}$  - активное сопротивление якорной цепи системы ТП-Д;  $T_{я}$ ,  $T_M$  - электромагнитная и электромеханическая постоянные времени привода;  $K_p$ ,  $T_{\mu}$  - коэффициент усиления и постоянная времени ТП;  $C_D$  - конструктивная постоянная двигателя;  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  - коэффициенты МР;  $J$  - момент инерции привода;  $K_{\omega}$  - коэффициент обратной связи по скорости.

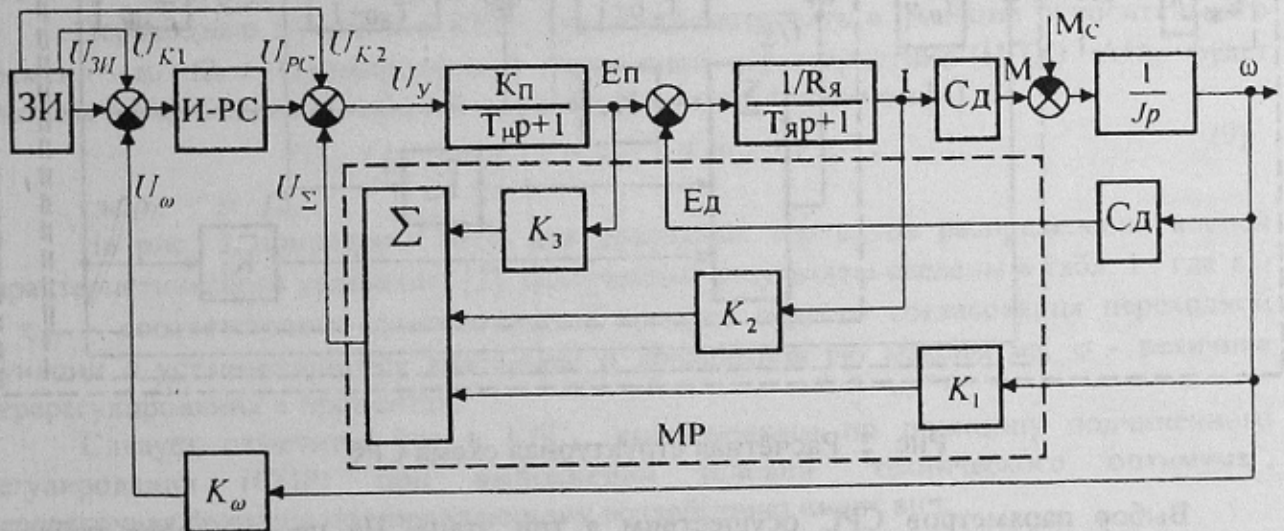


Рис. 1. Структурная схема СРС

Учитывая, что коэффициент передачи контура с модальным регулятором определяется выражением

$$\left. \frac{\omega(p)}{U_{PC}(p)} \right|_{p=0} = \frac{K_{\Pi} / C_{Д}}{\frac{C_{Д}}{C_{Д}} \bar{K}_3 + K_{\Pi} K_1 + 1} \quad (1)$$

передаточная функция И-РС будет иметь вид

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{T_{И} p} \cdot \frac{C_{Д} \left( \frac{K_{\Pi}}{C_{Д}} K_3 + K_{\Pi} K_1 + 1 \right)}{K_{\Pi} K_{\omega}} \quad (2)$$

где  $T_{И}$  – постоянная времени интегрирования интегратора И-РС.

С целью упрощения анализа и синтеза СРС пронормируем исходную структурную схему рис. 1, используя следующие базовые величины:

$$\omega_B = \omega_0; \quad E_{ПБ} = E_{ДБ} = E_0 = C_{Д} \omega_0; \quad I_B = I_{КЗ} = E_0 / R_{Я}; \quad M_B = M_{КЗ} = C_{Д} I_{КЗ};$$

$$U_{\omega Б} = U_{\Sigma ИБ} = U_{K1Б} = K_{\omega} \omega_0; \quad U_{УБ} = U_{\Sigma Б} = U_{PCБ} = U_{K2Б} = E_0 / K_{\Pi},$$

где  $\omega_0, E_0$  – скорость и ЭДС в режиме холостого хода;

$I_{КЗ}, M_{КЗ}$  – ток и момент короткого замыкания.

Тогда расчетная структурная схема системы в относительных единицах будет иметь вид, показанный на рис. 2, где относительные величины обозначены как

$$\bar{K}_1 = K_1 K_{\Pi}; \quad \bar{K}_2 = K_2 K_{\Pi} / R_{Я}; \quad \bar{K}_3 = K_3 K_{\Pi} / C_{Д}. \quad (3)$$

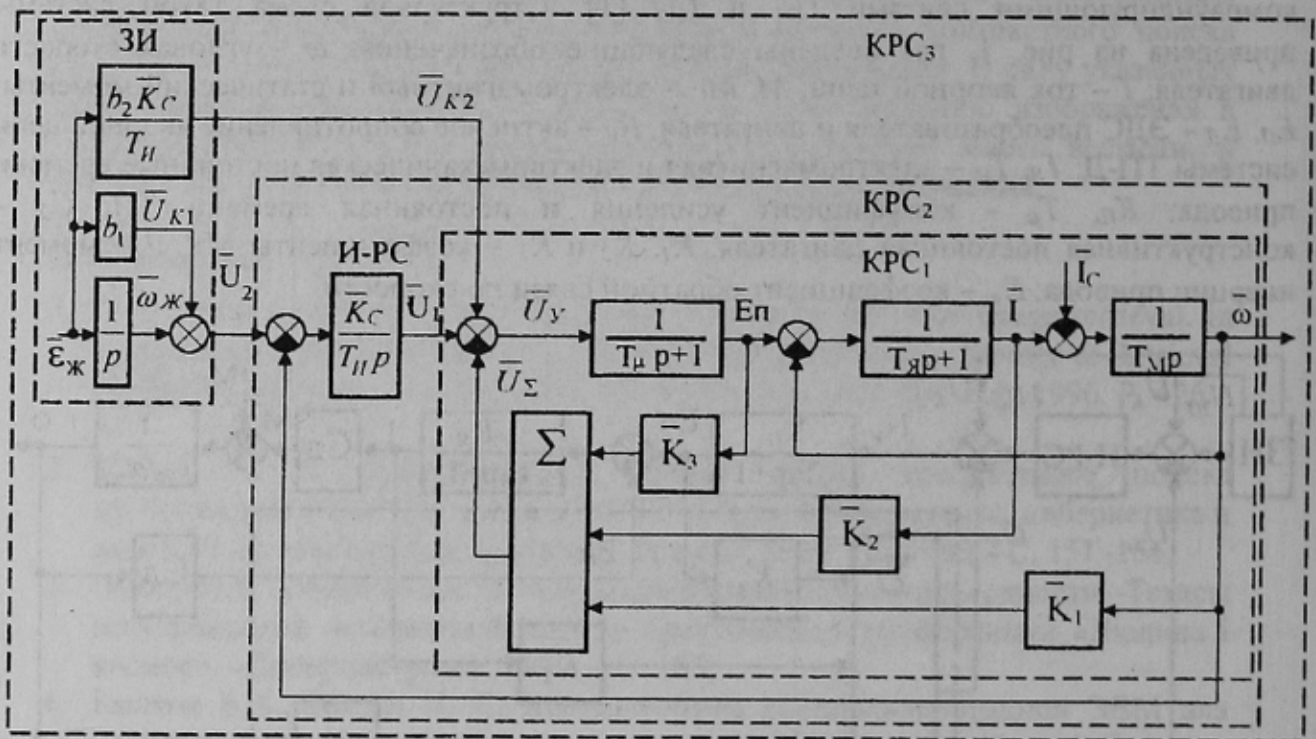


Рис. 2. Расчётная структурная схема СРС

Выбор параметров СРС осуществим в три этапа. На первом этапе найдём оптимальные значения коэффициентов  $\bar{K}_1 \div \bar{K}_3$  МР, позволяющие придать замкнутому контуру регулирования скорости КРС<sub>1</sub> заранее выбранное распределение корней характеристического уравнения системы. На втором этапе синтеза при известных значениях коэффициентов  $\bar{K}_1 \div \bar{K}_3$  определим величину  $T_{И}$ , обеспечивающую выполнение условий оптимизации по модульному оптимуму (МО) в КРС<sub>2</sub>. На третьем этапе при найденных параметрах МР и И-РС выбираются значения корректирующих коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  из условий МО, позволяющие осуществить принцип



комбинированного управления и улучшить динамические характеристики СРС по управляющему воздействию.

**Этап 1.** Передаточные функции КРС<sub>1</sub> в относительных величинах по управляющему и возмущающему воздействиям имеют вид:

$$\bar{K}_{y1}(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{\bar{K}_c} \cdot \frac{1}{G_3(p)} = \frac{1}{\bar{K}_c} \cdot \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad (4)$$

$$\bar{K}_{B1}(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{I_c(p)} = \frac{p^2 T_{\text{Я}} T_{\mu} + p [T_{\text{Я}} (\bar{K}_3 + 1) + T_{\mu}] + (\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1)}{G_3(p)}; \quad (5)$$

где  $G_3(p) = p^3 T_M T_{\text{Я}} T_{\mu} + p^2 T_{\mu} [T_{\text{Я}} (\bar{K}_3 + 1) + T_{\mu}] + p [T_M (\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1) + T_{\mu}] + (\bar{K}_3 + \bar{K}_1 + 1);$  (6)

$$a_1 = T_M (\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1) + T_{\mu}; \quad a_2 = T_M [T_{\text{Я}} (\bar{K}_3 + 1) + T_{\mu}];$$

$$a_3 = T_M T_{\text{Я}} T_{\mu}; \quad \bar{K}_c = 1 / (1 + \bar{K}_1 + \bar{K}_3) \quad \text{— это величина, обратная коэффициенту усиления КРС}_1.$$

Желаемый полином стандартной формы третьего порядка имеет вид [2]:

$$G_{3\text{ж}}(p) = p^3 + \alpha_1 \Omega_0 p^2 + \alpha_2 \Omega_0^2 p + \Omega_0^3; \quad (7)$$

где  $\Omega_0$  — среднегеометрический корень, определяющий быстродействие КРС<sub>1</sub>;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты, определяемые в зависимости от размещения корней характеристического уравнения.

Из (6) и (7) находим значения коэффициентов МР [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{K}_1 &= T_{\mu} \left( \Omega_0^3 T_{\text{Я}} T_M - \alpha_1 \Omega_0 + \frac{1}{T_{\text{Я}}} \right); & \bar{K}_2 &= T_{\mu} \left( \alpha_2 \Omega_0^2 - \alpha_1 \Omega_0 - \frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_{\text{Я}}} \right); \\ \bar{K}_3 &= T_{\mu} \left( \alpha_1 \Omega_0 - \frac{1}{T_{\text{Я}}} - \frac{1}{T_{\mu}} \right). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Переходные функции в КРС<sub>1</sub> будем рассматривать в функции относительного времени  $\tau_H = \Omega_0 t$ . Нормированной переходной характеристике (НПХ)  $h(\tau_H)$  будет соответствовать нормированный характеристический полином [4]

$$G_{\text{жн}}(p_H) = p_H^3 + \alpha_1 p_H^2 + \alpha_2 p_H + 1 = 0; \quad (9)$$

где  $p_H = p \Omega_0$ .

На рис. 3 приведены НПХ для различных вариантов распределения корней характеристического уравнения [2]. Полученные результаты сведены в табл. 1., где  $\tau_{\text{н}}$  и  $\tau_{\text{мн}}$  — соответственно относительные времена первого согласования переходной функции с установившимся значением и достижения ею максимума;  $\sigma$  — величина перерегулирования в процентах.

Следует отметить, что в КРС<sub>1</sub>, выполненным по принципу подчиненного регулирования (СПР) при выполнении условий "технического оптимума", передаточная функция по управляющему воздействию имеет вид

$$\bar{K}_{\text{спр}}(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{8T_{\mu}^3 p^3 + 8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1} \quad (10)$$

Поэтому

$$\Omega_0^* = \sqrt[3]{\frac{1}{8T_{\mu}^3}} = \frac{0,5}{T_{\mu}}; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 2. \quad (11)$$

Следовательно, для системы третьего порядка коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , определяющие распределение корней характеристического полинома системы, по распределению Баттерворта и из условий "технического оптимума" совпадают.

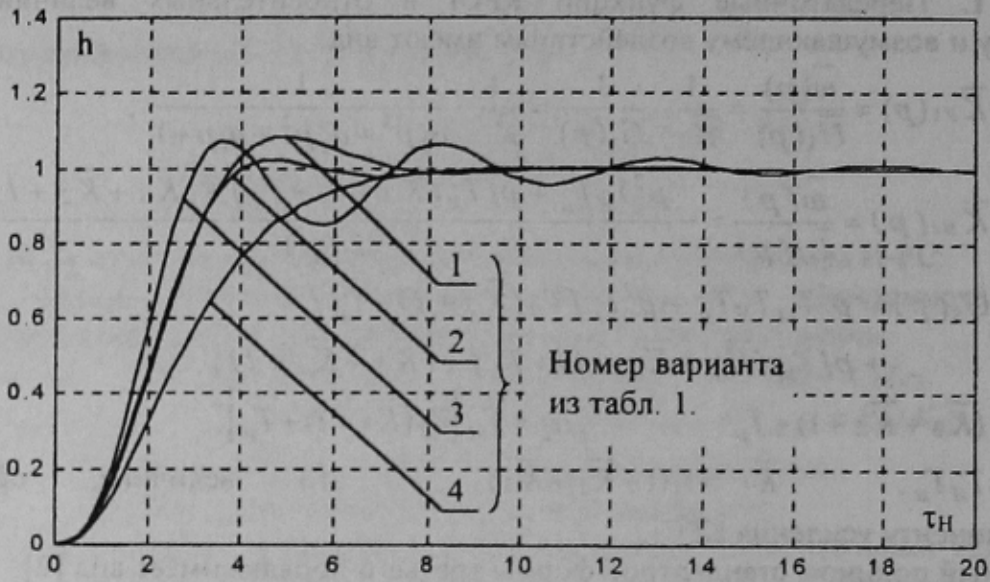


Рис. 3. Графики зависимостей  $h(\tau_H)$  для КРС<sub>1</sub>

Таблица 1 - Показатели нормированных переходных функций для КРС<sub>1</sub>

Вариант распределения корней	Коэффициенты		Показатели $h(\tau_H)$		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\tau_{сн}$	$\tau_{зн}$	$\sigma, \%$
1. Распределение по Баттерворту (технический оптимум)	2	2	4	5	8,12
2. Минимум $\int_0^{\infty} t  e(t)  dt$	1,75	2,15	4,25	4,75	1,94
3. Минимум интегральной квадратичной ошибки	1	2	3,25	3,5	7,05
4. Биномиальное распределение	3	3	-	-	-

В СРС, работающей от ЗИ, параметры и форма НПХ соответствуют нормированному току якоря двигателя  $\bar{I}_H(\tau_H)$  на начальном участке ускорения (замедления) привода. Анализ графиков рис. 3 и данных табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что в качестве оптимальной НПХ для комбинированной СРС целесообразно выбрать первый или второй варианты, характеризующиеся малыми величинами перерегулирования  $\sigma$  и практически отсутствием колебательности НПХ. Третий вариант обладает повышенной колебательностью переходного процесса, а четвертый – характеризуется аperiodической характеристикой с низкими временными показателями.

Из (5) и (6) определим статическое падение скорости  $\Delta\bar{\omega}_c$  при набросе нагрузки

$$\Delta\bar{\omega}_c = - \frac{I + \bar{K}_2 + \bar{K}_3}{I + \bar{K}_1 + \bar{K}_3} \cdot \bar{I}_c \quad (12)$$

После подстановки в последнее выражение коэффициентов  $\bar{K}_1 \div \bar{K}_3$  из (8), получаем:

$$\Delta\bar{\omega}_c = - \frac{I}{\Omega_0^3 T_M} \left[ \alpha_2 \Omega_0^2 - \frac{I}{T_{Я} T_M} \right] \cdot \bar{I}_c \quad (13)$$



Приравнивая правую часть выражения (13) к нулю, определим значения частоты  $\Omega_{0a}$ , при которой КРС<sub>1</sub> становится астатическим по возмущению.

$$\Omega_{0a} = \sqrt{\frac{I}{T_{Я}T_{М}\alpha_2}} \quad (14)$$

Нетрудно показать, что в реальном диапазоне изменения параметров привода ( $T_{М}$ ,  $T_{Я}$  и  $T_{\mu}$ ) астатические по возмущению свойства КРС<sub>1</sub> приобретает при низких значениях частоты  $\Omega_0 = (0,05 \div 0,2) / T_{\mu}$ , что приводит к снижению быстродействия СРС. Последнее неприемлемо для приводов, работающих в пуско – тормозных режимах.

**Этап 2.** На этом этапе определим постоянную времени интегрирования  $T_{II}$  КРС<sub>2</sub> из условий модульного оптимума [5].

Передаточная функция КРС<sub>2</sub> по управляющему воздействию  $\bar{\omega}_{ж}(p)$  без компаундирующих связей ЗИ ( $b_1 = b_2 = 0$ ) имеет вид:

$$\bar{K}_{y2}(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{\bar{\omega}_{ж}(p)} = \frac{1}{a_3T_{II}p^4 + a_2T_{II}p^3 + a_1T_{II}p^2 + T_{II}p + 1} \quad (15)$$

Из условия оптимизации КРС<sub>2</sub> по МО [5]

$$T_{II}^2 - 2a_1T_{II} = 0 \quad (16)$$

получаем

$$T_{II} = \frac{2}{K_C} [T_{М}(\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1) + T_{\mu}] \quad (17)$$

**Этап 3.** Корректирующие коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  ЗИ определим из передаточной функции

$$\bar{K}_{y3}(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{\bar{\omega}_{ж}(p)} = \frac{b_2p^2 + b_1p + 1}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} \quad (18)$$

где  $a_1 = T_{II}$ ;  $a_2 = T_{II}[T_{М}(\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1) + T_{\mu}] / \bar{K}_C$ ;  
 $a_3 = T_{II}T_{М}[T_{Я}(\bar{K}_3 + 1) + T_{\mu}] / \bar{K}_C$ ;  $a_4 = T_{II}T_{М}T_{Я}T_{\mu} / \bar{K}_C$ .

Нетрудно показать, что при настройке компаундирующих связей ЗИ из условий МО, коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  могут быть выбраны из формул:

$$b_2 = \sqrt{a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_4}; \quad b_1 = \sqrt{a_1^2 - 2a_2 - 2b_2} \quad (19)$$

Другим вариантом реализации астатической СРС является система с модальным регулятором, параметрами которого являются коэффициенты  $\bar{K}_1$ ,  $\bar{K}_2$ ,  $\bar{K}_3$  и постоянная интегрирования  $T_{II}$ . Назовём эту систему СРС-2, в отличие от рассмотренной ранее СРС-1.

Расчётная структурная схема определения параметров СРС-2 остаётся той же (рис. 2), однако синтез выполняется в два этапа.

**Этап 1.** На этом этапе определим параметры МР ( $\bar{K}_1$ ,  $\bar{K}_2$ ,  $\bar{K}_3$ ,  $T_{II}$ ) и выберем коэффициенты  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , определяющие желаемые показатели нормированной переходной функции. Передаточная функция КРС<sub>2</sub> по управляющему воздействию  $\bar{\omega}_{ж}(p)$  при  $b_1 = b_2 = 0$  имеет вид:

$$\bar{K}_y(p) = \frac{\bar{\omega}(p)}{\bar{\omega}_{ж}(p)} = \frac{1}{(i_4(p))} = \frac{1}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} \quad (20)$$

$$\text{где } \bar{\omega}_{\text{ж}}(p) = T_M T_Y T_\mu p^4 + T_H T_M [T_Y (1 + \bar{K}_3) - T_\mu] p^3 + T_H [T_M (1 + \bar{K}_2 + \bar{K}_3) + T_\mu] p^2 - T_H (1 + \bar{K}_1 + \bar{K}_3) p + 1; \quad (21)$$

$$\begin{cases} \bar{a}_1 = \bar{T}_2 (1 + \bar{K}_1 + \bar{K}_3); & \bar{a}_2 = \bar{T}_2 [T_M (\bar{K}_3 + \bar{K}_2 + 1) + T_\mu]; \\ \bar{a}_3 = \bar{T}_2 T_M [T_Y (\bar{K}_3 + 1) + T_\mu]; & \bar{a}_4 = \bar{T}_2 T_M T_Y T_\mu. \end{cases} \quad (22)$$

Желаемый полином стандартной формы четвертого порядка имеет вид [2]:

$$G_{\text{ж}}(p) = p^4 + \alpha_1 \Omega_0 p^3 + \alpha_2 \Omega_0^2 p^2 + \alpha_3 \Omega_0^3 p + \Omega_0^4. \quad (23)$$

Из (21) и (23) находим значения коэффициентов МР и постоянной  $T_H$ .

$$\begin{cases} T_H = \frac{1}{\Omega_0^4 T_M T_Y T_\mu}; & \bar{K}_1 = T_\mu \left( \alpha_3 \Omega_0^3 T_M T_Y - \alpha_1 \Omega_0 + \frac{1}{T_Y} \right); \\ \bar{K}_2 = T_\mu \left( \alpha_2 \Omega_0^2 T_Y - \alpha_1 \Omega_0 + \frac{1}{T_Y} - \frac{1}{T_M} \right); & \bar{K}_3 = T_\mu \left( \alpha_1 \Omega_0 - \frac{1}{T_Y} - \frac{1}{T_M} \right). \end{cases} \quad (24)$$

На рис. 4 приведены НПХ для различных вариантов распределения корней характеристического уравнения системы. Полученные результаты сведены в табл. 2.

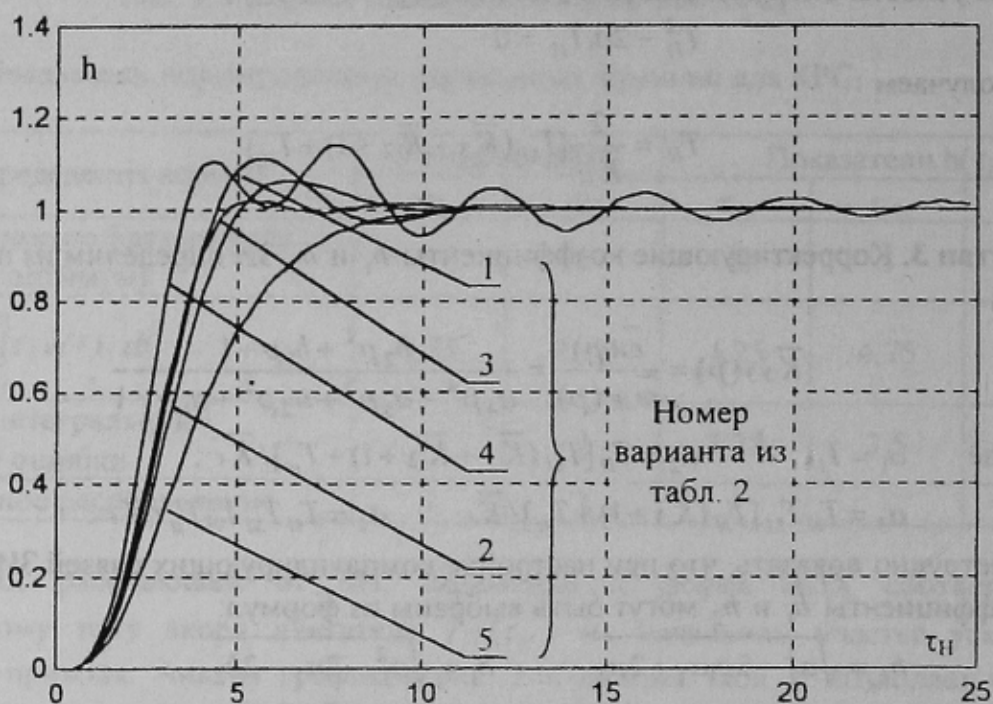


Рис. 4. Графики зависимостей  $h(\tau_H)$  для КРС<sub>2</sub>

Анализ графиков рис. 4 и данных табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что в качестве оптимальной НПХ для СРС-2 целесообразно выбрать второй или третий варианты, характеризующиеся достаточно хорошими показателями  $\tau_{сн}$ ,  $\tau_{шн}$  и  $\sigma$ .

**Этап 2.** На этом этапе при найденных значениях коэффициентов МР, определим коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  ЗИ. Передаточная функция СРС-2 по управляющему воздействию  $\bar{\omega}_{\text{ж}}(p)$  при  $b_1 \neq 0$  и  $b_2 \neq 0$  совпадает с (18), где в качестве коэффициентов  $a_1 \div a_4$  следует подставлять (22). В этом случае коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  могут быть найдены из формул (19).

Таблица 2 - Показатели нормированных переходных функций для КРС<sub>2</sub>

Варианты распределения корней	Коэффициенты			Показатели $h(\tau_H)$		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\tau_{CH}$	$\tau_{MH}$	$\sigma, \%$
1. Распределение по Баттерворту	2,6	3,4	2,6	4,5	5,5	11,15
2. Технический оптимум	2,83	4	2,83	5,25	6,25	6,2
3. Минимум $\int_0^{\infty}  e(t)  dt$	2,1	3,4	2,7	4,75	5,25	1,88
4. Минимум интегральной квадратичной ошибки	1	3	2	3,5	7,75	14,15
5. Биномиальное распределение	4	6	4	-	-	-

### Исследование переходных процессов

Анализ переходных процессов в рассматриваемой СРС выполнялся методом математического моделирования. Исследования проводились на частотах  $\Omega_0 = 0,5/T_\mu$  и  $\Omega_0 = 1/T_\mu$  при следующих параметрах привода:  $T_\mu = 0,004$  с.;  $T_H = 4T_\mu$ ;  $T_M = 4T_H$ . Расчётные значения коэффициентов МР, И-РС и ЗИ для СРС-1 и СРС-2 сведены соответственно в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3 - Параметры СРС-1

Частота $\Omega_0$	Номер варианта из табл. 1	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$T_{II}$	$h_1/T_\mu$	$h_2/T_\mu^2$
$\frac{0,5}{T_\mu}$	1	7,25	1,19	-0,25	0,032	4,75	11,3
	2	7,37	1,46	-0,0375	0,0344	6,58	21,67
$\frac{1}{T_\mu}$	1	62,25	6,18	0,75	0,016	2,38	2,83
	2	62,5	7,04	0,05	0,0172	3,3	5,4

Таблица 4 - Параметры СРС-2

Частота $\Omega_0$	Номер варианта из табл. 2	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$T_{II}$	$h_1/T_\mu$	$h_2/T_\mu^2$
$\frac{0,5}{T_\mu}$	2	21,5	2,77	0,165	0,001	3,36	5,63
	3	19,75	2,28	0,05	0,001	1,2	0,8
$\frac{1}{T_\mu}$	2	178,5	13,36	1,58	$6,25 \cdot 10^{-5}$	1,68	1,4
	3	164	11,2	1,35	$6,25 \cdot 10^{-5}$	0,6	0,2



Показатели переходных функций контуров регулирования рассмотренных СРС при найденных выше значениях коэффициентов для выбранных "оптимальных" вариантов распределения корней приведены в табл. 5 (для СРС-1) и табл. 6 (для СРС-2).

Таблица 5 - Показатели переходных функций СРС-1 при частоте  $\Omega_0 = 0,5/T_\mu$

Контур	Номер варианта из табл. 1	$\tau_c = t/T_\mu$	$\tau_M = l/T_\mu$	$\sigma, \%$
КРС <sub>1</sub>	1	7,6	9,8	8
	2	8,25	9,25	1,97
КРС <sub>2</sub> (УО)	1	14,3	18	6,2
	2	17,5	22,75	3,85
КРС <sub>3</sub> (КУ)	1	7,5	10	5,9
	2	4,5	6,5	14

Таблица 6 - Показатели переходных функций СРС-2 при частоте  $\Omega_0 = 0,5/T_\mu$

Контур	Номер варианта из табл. 2	$\tau_c = l/T_\mu$	$\tau_M = l/T_\mu$	$\sigma, \%$
КРС <sub>2</sub> (УО)	2	10,25	12,75	6,2
	3	9	11,25	11,1
КРС <sub>3</sub> (КУ)	2	5,25	7,25	5,9
	3	7,75	10	10,5

Из данных табл. 5 и табл. 6 видно, что комбинированное управление (КУ) с найденными здесь параметрами  $b_1$  и  $b_2$  позволяет существенно повысить быстродействие СРС по сравнению с аналогичной системой, работающей только по отклонению (УО). В последнем случае  $b_1 = b_2 = 0$ .

Из выбранных на первом этапе вариантов распределения корней как для комбинированной СРС-1, так и для комбинированной СРС-2, более предпочтительным является первый вариант "технического оптимума", так как при других вариантах в комбинированных СРС имеет место повышенное перерегулирование по току, что нежелательно.

При одинаковой частоте  $\Omega_0$  динамические свойства СРС=2 несколько лучше аналогичных показателей СРС-1.

На частоте  $\Omega_0 = 0,5/T_\mu$  динамические характеристики СРС-1 по принципу подчиненного регулирования (СПР) и СРС-1 с МР (СМУ), настроенных по модульному оптимуму, эквивалентны. На первый взгляд можно предположить, что СМУ обладает тем преимуществом перед СПР, что может реализовать любую требуемую частоту  $\Omega_0$  и, тем самым, обеспечить более высокое быстродействие. Однако, если внимательно проанализировать структуру СМУ, то можно заметить, что в ней вентильный преобразователь охватывается жесткой обратной связью. Последнее эквивалентно тому, что вентильный преобразователь заменяется апериодическим звеном с инерционностью меньшей чем  $T_\mu$ . Это как раз и позволяет увеличить частоту  $\Omega_0$  и быстродействие СРС при модальном управлении. Однако, эту операцию можно осуществить и в СПР, добиваясь тех же результатов.



## Выводы

1. Из рассмотренных вариантов распределения корней наиболее предпочтителен для комбинированной СРС вариант оптимизации систем из условий технического оптимума, так как он обеспечивает наиболее приемлемые показатели переходных процессов в пуско – тормозных режимах.

2. Комбинированное управление позволяет повысить быстродействие СРС как подчинённого, так и модального управления.

## Литература

1. Коцегуб П. Х., Толочко О. И., Губарь Ю. В. Анализ и синтез комбинированной цифроаналоговой системы регулирования скорости. – Известия вузов. Электромеханика, 1984, №2, с. 45 – 51.

2. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. - М.: Машиностроение, 1976.- 184 с.

3. Толочко О. И., Тищенко А. А. Система модального управления приводом постоянного тока с узлом токоограничения. - Сб. науч. трудов ДонГТУ. Серия “Электротехника и энергетика”, вып. 4. - Донецк: ДонГТУ, 1999, с. 42- 45.

4. Бургин Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем. - Новосибирск: Новосибирский электротехн. ин-т, 1992. - 199 с.

5. Коцегуб П. Х., Толочко О. И. Оптимизация систем управления вентильными электроприводами по модулю амплитудно – частотной характеристики. - Известия вузов. Электромеханика, 1977, №6, с. 679 – 684.