

О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н В. Кояин

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА СИСТЕМЫ
ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Методические указания к выполнению практических
работ по дисциплине «Системы управления электроприводов»
для направления 140400
«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Томск 2010

Цель работы: получение навыков решения задачи оптимизации отдельного контура регулирования многоконтурных систем подчиненного регулирования координат электропривода и формирование навыков исследования статических и динамических характеристик оптимизированного контура как системы автоматического регулирования.

1. Описание объекта исследования

Обобщенная структурная схема отдельного контура регулирования приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

$W_{\text{рег}}(p)$ – передаточная функция регулятора;

$W_1(p), W_2(p)$ – передаточные функции объекта регулирования;

$W_{\text{ф.вх}}(p)$ – передаточная функция входного фильтра;

$k_{\text{оу}}$ – коэффициент обратной связи контура;

$x(t)$ – управляющее воздействие;

$z(t)$ – возмущающее воздействие;

$y(t)$ – выходная координата;

$y_{\text{ос}}(t)$ – сигнал обратной связи;

$\Delta_{\text{ос}}(t)$ – ошибка регулирования (обратной связи) на входе регулятора;

$\Delta y(t)$ – действительная ошибка регулирования.

Варианты структурного состава и параметров объекта управления приведены в табл. 1. Задачей оптимизации является выбор типа регулятора и определение его параметров, определение необходимости включения фильтра на входе контура, выбор его передаточной функции и параметров.

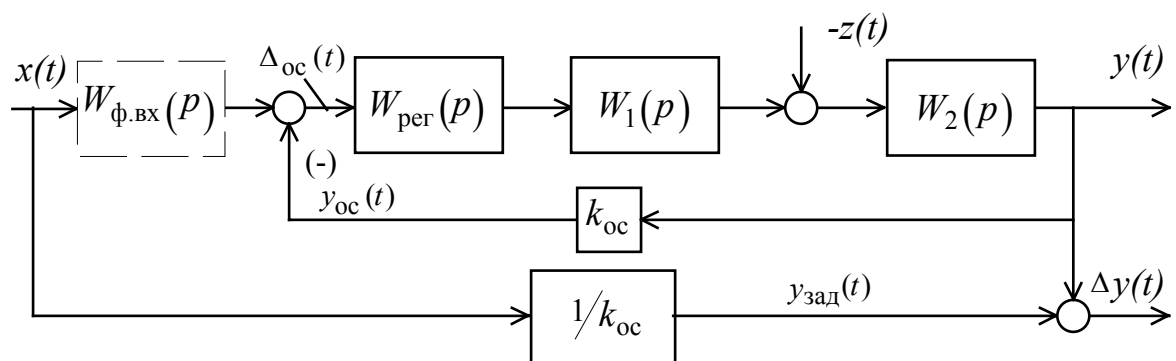


Рис. 1. Структурная схема САУ

Таблица 1

Параметры объекта регулирования

№ варианта	Передаточные функции		Параметры				U_{\max}
	$W_1(p)$	$W_2(p)$	k_1	T_1	k_2	T_2	
1	$\frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1}$	88	0.002	0.7	0.01	50
2					1.0	0.07	100
3					1.6	0.01	100
4					1.7	0.011	100
5					3.3	0.012	100
6			2		0.03	400	
7			2.5		0.02	400	
8			4		0.015	400	
9			10		0.015	800	
10			10		0.0225	800	
11	$\frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{k_2}{T_2 \cdot p}$	5	0.004	1.2	0.125	200
12					1.3	0.1	200
13					1.5	0.08	200
14					1.7	0.15	200
15					1.8	0.2	150
16			0.9		0.3	150	
17			1.0		0.125	150	
18			1.1		0.15	100	
19			1.2		0.2	100	
20			1.3		0.3	100	

2. Описание рабочего места

Работа выполняется с использованием аналитических методов и методов математического моделирования на базе имитационных моделей контура регулирования, составленных по заданной структурной схеме и параметрам элементов контура. Модели реализуются на основе стандартного (*CLASSIC, DORA, MATLAB*) или специализированного (*LACH, REPSEP*) программного обеспечения.

3. Методические указания

3.1. Общие сведения

В практике автоматизированного электропривода широкое распространение получили системы подчиненного регулирования (рис. 2) с каскадным включением регуляторов и многоконтурной структурой [4, 5]. Основным элементом таких систем является отдельный контур регулирования (напряжения, тока, скорости, положения). Каждый контур регулирования содержит регулятор и объект регулирования и оптимизируется отдельно.

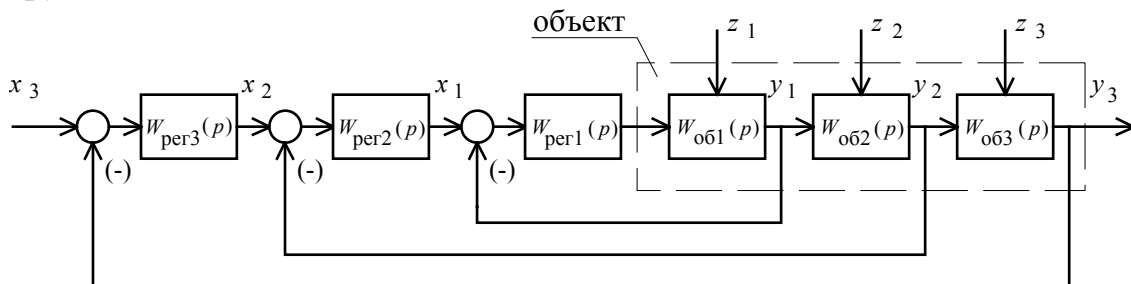


Рис. 2. Обобщенная структурная схема трехконтурной системы подчиненного регулирования: x , z , y - управляющее, возмущающее воздействия и выходная координата соответственно; $W_{\text{рег}}(p)$ и $W_{\text{об}}(p)$ - передаточные функции регулятора и объекта

Идеальная оптимизация контура регулирования была бы достигнута в том случае, если бы выходная координата y мгновенно и без перерегулирования повторяла бы входное воздействие x и никак не реагировала бы на возмущение z [2], т.е.

$$\frac{y(p)}{x(p)} = 1 \text{ при } k_{\text{ос}} = 1 \text{ или } \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{1}{k_{\text{ос}}} \text{ при } k_{\text{ос}} \neq 1; \frac{y_{\text{ос}}(p)}{x(p)} = 1; \frac{y(p)}{z(p)} = 0$$

Препятствием для такого поведения контура является инерционность объекта управления, обусловленная всеми его звеньями. Инерционность объекта регулирования может быть компенсирована за счет уп-

реждающего действия регулятора. Однако, абсолютная компенсация инерционности в контуре нецелесообразна и практически нереализуема. На практике ограничиваются частичной компенсацией, при которой за счет действия регулятора компенсируют большие и средние инерционности объекта регулирования. При этом стремятся к достижению возможно более высокого быстродействия контура при сохранении его помехозащищенности.

Обычно оптимизацию сводят к получению предельных или заданных показателей качества регулирования, понимая под этим показатели переходных процессов при обработке ступенчатого управляющего или возмущающего воздействия. Для отдельного контура регулирования с типовой структурой и известными параметрами задача оптимизации существенно упрощается и после выбора стандартного типа регулятора [2] сводится к решению задачи его параметрической оптимизации.

Учитывая, что показатели качества зависят от вида (управляющее или возмущающее) и типа входного воздействия, задача оптимизации должна решаться для конкретного воздействия. На практике обычно ограничиваются следующими типовыми входными сигналами (рис. 3):

$g(t) = g_0$ - ступенчатый (при $g_0 = 1$ - единичный);

$g(t) = g_1 \cdot t$ - линейный;

$g(t) = g_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ - гармонический.

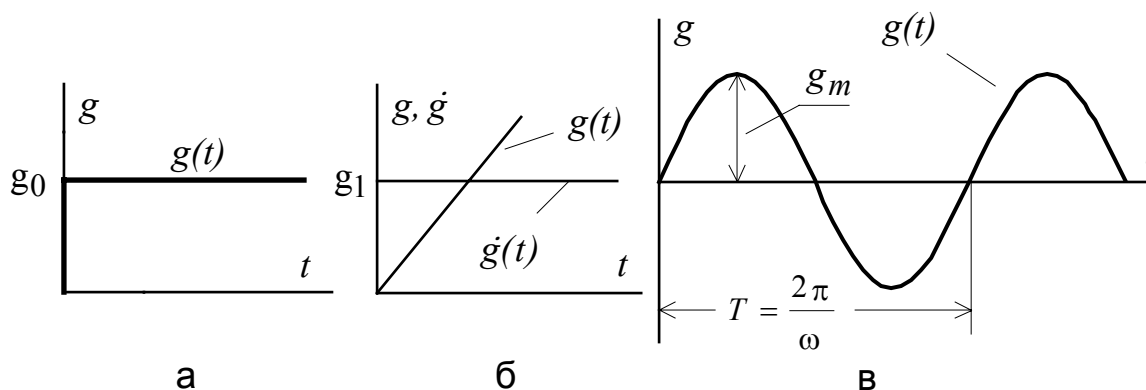


Рис. 3. Типовые воздействия: а - ступенчатое; б - линейное; в - гармоническое (синусоидальное)

3.2. Технические методы оптимизации контуров систем подчиненного регулирования

Практически реальные контуры регулирования могут быть приведены к простейшим типовым контурам второго или третьего порядка [3], содержащим инерционные звенья первого порядка с большой постоянной времени (одно или два, в числе которых может быть и интегрирующее) и с малой постоянной времени. Оптимизация контура дости-

гается путем «пригонки» модуля амплитудно-фазовой частотной передаточной функции замкнутого контура (рис. 4) на возможно широком интервале частот управляющего воздействия к постоянному значению

$$|W_{3.у}(j\omega)| = \frac{1}{k_{ос}}$$

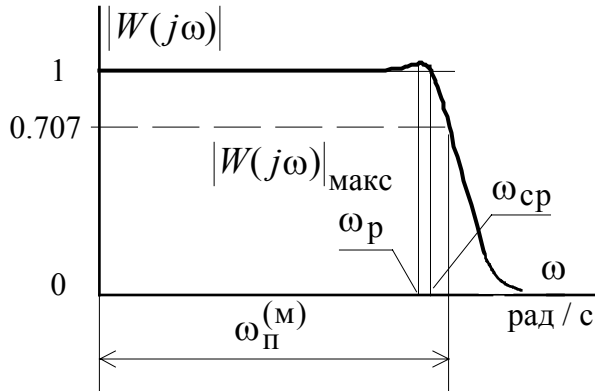


Рис. 4. График зависимости модуля передаточной функции замкнутого оптимизированного контура при $k_{ос} = 1$ от частоты: ω_p - резонансная частота; $\omega_{п}^{(м)}$ - полоса пропускания контура по модулю

В зависимости от требований к характеру переходного процесса наибольшее применение получили два критерия оптимизации контуров регулирования: модульный (или технический) оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО) [2, 3].

Настройке на МО соответствуют передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура регулирования вида:

$$W_p(p) = \frac{1}{a_k \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} p + 1)},$$

$$W_{3.у}(p) = \frac{1}{a_k \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} p + 1) + 1},$$

где T_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени;

$a_k = 2$ – коэффициент оптимизации.

Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура регулирования, оптимизированного по СО, имеют вид:

$$W_p(p) = \frac{b_k \cdot a_k \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}{b_k \cdot a_k^2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)};$$

$$\begin{aligned} W_{3.у}(p) &= \frac{b_k \cdot a_k \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}{b_k \cdot a_k^2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1) + b_k \cdot a_k \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{b_k \cdot a_k \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}{b_k \cdot a_k^2 \cdot T_{\mu}^3 \cdot p^3 + b_k \cdot a_k^2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 + b_k \cdot a_k \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}, \end{aligned}$$

где $b_k = a_k = 2$ – коэффициенты оптимизации.

При установке в канале задания (на входе контура рис. 1) инерционного звена (сглаживающего фильтра) с передаточной функцией

$$W_{\text{вх.ф.}}(p) = \frac{1}{b_k \cdot a_k \cdot T_\mu \cdot p + 1}$$

принимает вид

$$W_{3.y}(p) = \frac{1}{b_k \cdot a_k^2 \cdot T_\mu^3 \cdot p^3 + b_k \cdot a_k^2 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + b_k \cdot a_k \cdot T_\mu \cdot p + 1}.$$

Временные характеристики замкнутого контура $y(t)$, $\Delta y(t)$, $y_{\text{ос}}(t)$, $\Delta_{\text{ос}}(t)$ снимаются при подаче на соответствующий вход управляющего $x(t)$ или возмущающего $z(t)$ воздействия выбранного типа и численных значений параметров. Обработка временных характеристик контура с целью определения прямых показателей качества переходных процессов осуществляется по методике, изложенной в [2].

Отработка ступенчатого управляющего воздействия $x(t) = x_0$, где $x_0 = \text{const}$

Показатели переходного процесса при отработке **ступенчатого управляющего воздействия $x(t) = x_0$** , где $x_0 = \text{const}$ (см. рис. 5):

$\Delta y_{\text{уст}} = \Delta y_{\text{ст.у}} = (y_{\text{зад}} - y_{\text{уст}})$ - статическая ошибка по управлению.

Если $\Delta y_{\text{ст.у}} = 0$, то система регулирования по управлению астатическая и тогда коэффициент усиления замкнутого контура

$$k_{3.y} = \frac{y_{\text{уст}}}{x_{\text{зад}}} = \frac{y_{\text{зад}}}{x_{\text{зад}}} = \frac{1}{k_{\text{ос}}}, \text{ где } y_{\text{зад}} = \frac{x_{\text{зад}}}{k_{\text{ос}}}, x_{\text{зад}} = x_0,$$

если $\Delta y_{\text{ст.у}} \neq 0$, то система регулирования статическая,

$$k_{3.y} = \frac{y_{\text{уст}}}{x_{\text{зад}}} = \frac{y_{\text{уст}}}{x_0} < \frac{1}{k_{\text{ос}}}$$

и для нее можно записать

$$\Delta y_{\text{уст}} = \left(\frac{1}{k_{\text{ос}}} - k_{3.y} \right) \cdot x_0;$$

$\Delta y_{\text{макс}} = y_{\text{макс}} - y_{\text{уст}}$ - перерегулирование в абсолютных единицах;

$\sigma = \frac{\Delta y_{\text{макс}}}{y_{\text{уст}}}$ - перерегулирование, о.е. ($\times 100$, %).

$t_{\text{ру1}}^{(\Delta)}$ - время первого вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $y_{\text{уст}}$, с;

$t_{\text{ру1}}^{(0)}$ - время первого достижения (согласования) уровня установившегося значения $y_{\text{уст}}$, с;

$t_{\text{рум}}$ - время достижения максимума выходной величины $y_{\text{макс}}$, с;
 $t_{\text{пу}2}^{(\Delta)}$ - время переходного процесса (окончательного вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $y_{\text{уст}}$), с;
 $\Delta = 0.05 \cdot y_{\text{уст}}$ (или $\Delta = 5\%$) или $\Delta = 0.02 \cdot y_{\text{уст}}$ (или $\Delta = 2\%$);
 $\omega_{\text{к}} = 2\pi/T_{\text{к}}$ - частота свободных колебаний, где $T_{\text{к}}$ - период колебаний, для колебательных переходных процессов, рад/с.

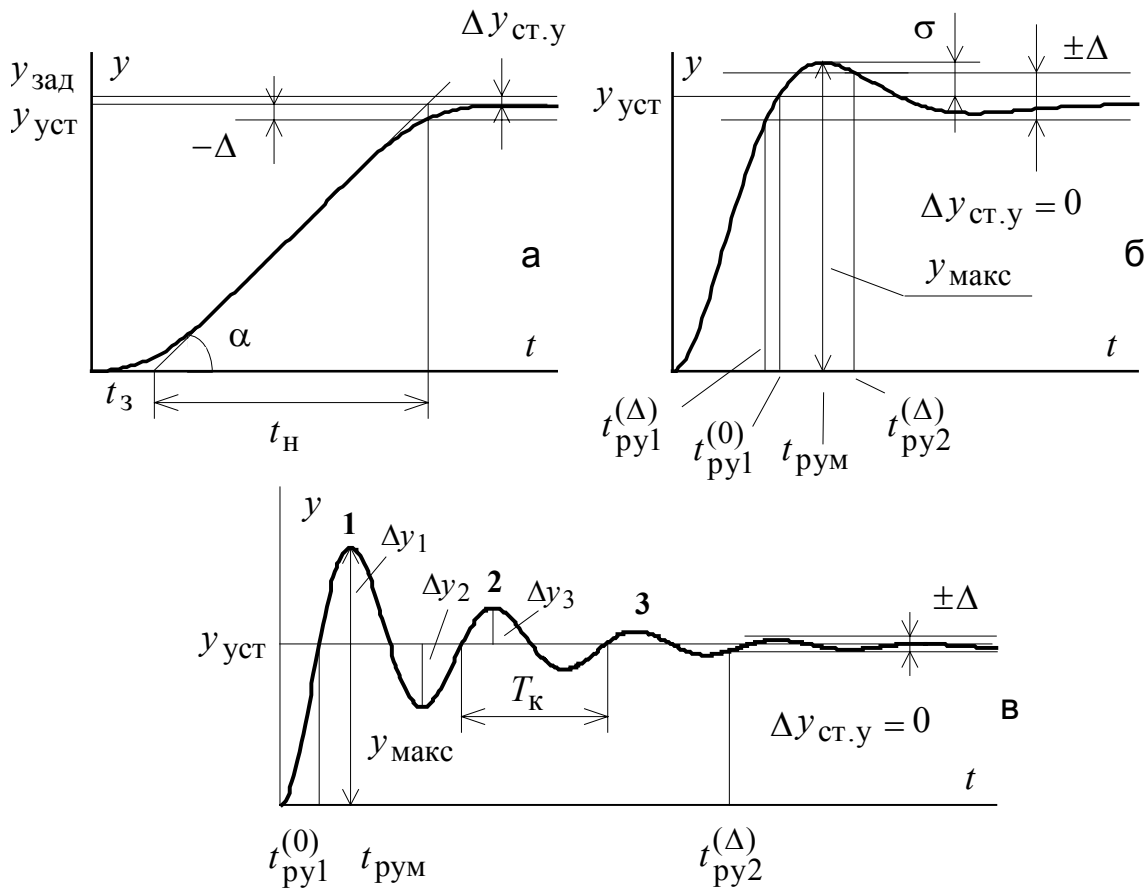


Рис. 5. Переходные процессы при обработке ступенчатых управляющих воздействий: а - монотонный апериодический; б - колебательный с одним переуправлением; в - колебательный

При обработке контуром ступенчатого возмущающего воздействия ($z(t) = z_0 = \text{const}$, $x = 0$ или в общем случае $x = \text{const}$) (см. рис. 6):

$\Delta y_{\text{уст}} = \Delta y_{\text{ст.в}} = y_{\text{нач}} - y_{\text{уст}}$ - статическая ошибка по возмущению. Если $\Delta y_{\text{ст.в}} = 0$, то система регулирования по возмущению астатическая и коэффициент передачи замкнутого контура по возмущению

$$k_{3.В} = \frac{\Delta y_{ст.В}}{z_0} = 0,$$

если $\Delta y_{ст.В} \neq 0$, то система регулирования статическая по возмущению,

$$k_{3.В} = \frac{\Delta y_{ст.В}}{z_0} > 0$$

и для нее можно записать

$$\Delta y_{ст.В} = k_{3.В} \cdot [-z_0];$$

$\Delta y_{в.макс}$ - максимальная ошибка, представляющая собой динамический перепад (провал или всплеск) выходной координаты;

$t_{рвм}$ - время достижения максимума ошибки, с;

$t_{рв1}$ - время первого вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $y_{уст}$, с;

$t_{рв2}$ - время переходного процесса (окончательного вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $y_{уст}$), с;

$\Delta = 0.1 \cdot \Delta y_{в.макс}$ или $\Delta = 0.1 \cdot \Delta y_{ст.В}$ в зависимости от характера переходного процесса.

В общем случае, когда к контуру одновременно приложены ступенчатые управляющее $x(t) = x_0 = \text{const}$ и возмущающее $z(t) = z_0 = \text{const}$ воздействия, статическая ошибка будет равна сумме ошибок по управлению и возмущению

$$\Delta y_{ст} = \Delta y_{ст.у} + \Delta y_{ст.в}.$$

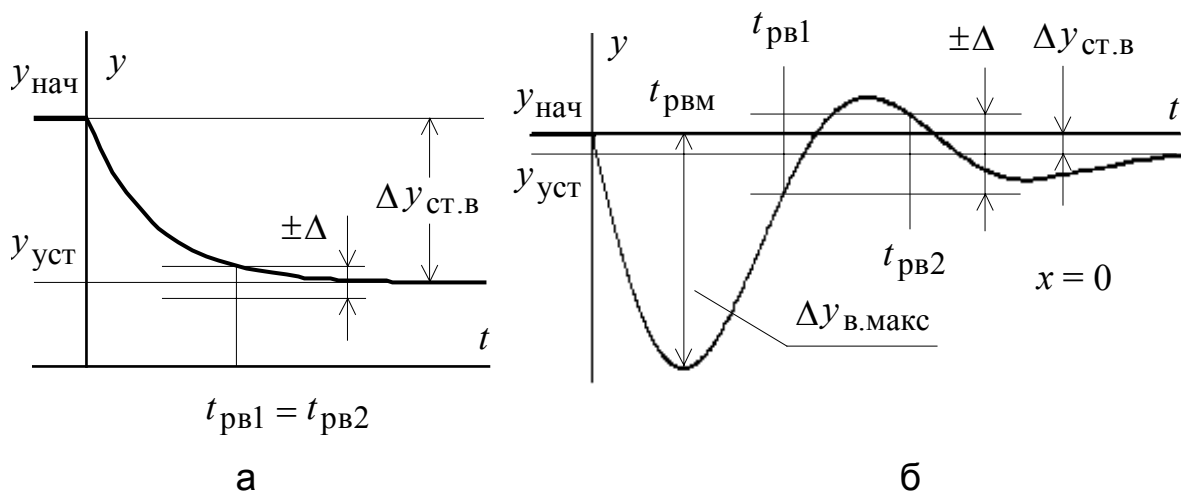


Рис. 6. Переходные процессы при обработке ступенчатых возмущающих воздействий: а - монотонный; б - колебательный

При обработке контуром **линейного управляющего воздействия** ($x(t) = x_1 \cdot t$, $x_1 = \text{const}$, $z = 0$) (см. рис. 7):

$\Delta u_{\text{дин.уст}} = \Delta u_{\text{ск}}$ - скоростная ошибка контура;

$\Delta u_{\text{дин.макс}}$ - максимальная динамическая ошибка;

$t_{\text{рум}}$ - время достижения максимума, с;

$t_{\text{ру1}}$ - время первого вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $\Delta u_{\text{дин.уст}}$, с;

$t_{\text{ру2}}$ - время переходного процесса (окончательного вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $\Delta u_{\text{дин.уст}}$), с;

$\Delta = 0.1 \cdot u_{\text{дин.макс}}$ или $\Delta = 0.1 \cdot u_{\text{дин.уст}}$ в зависимости от характера переходного процесса;

$$D_{\text{ск}} = \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{\Delta u_{\text{ск}}} = \frac{\dot{x}}{\Delta_{\text{ос}}} - \text{добротность контура по скорости изменения}$$

(производной) координаты y ;

\dot{x} - первая производная управляющего воздействия;

$\Delta_{\text{ос}}$ - ошибка обратной связи на входе контура.

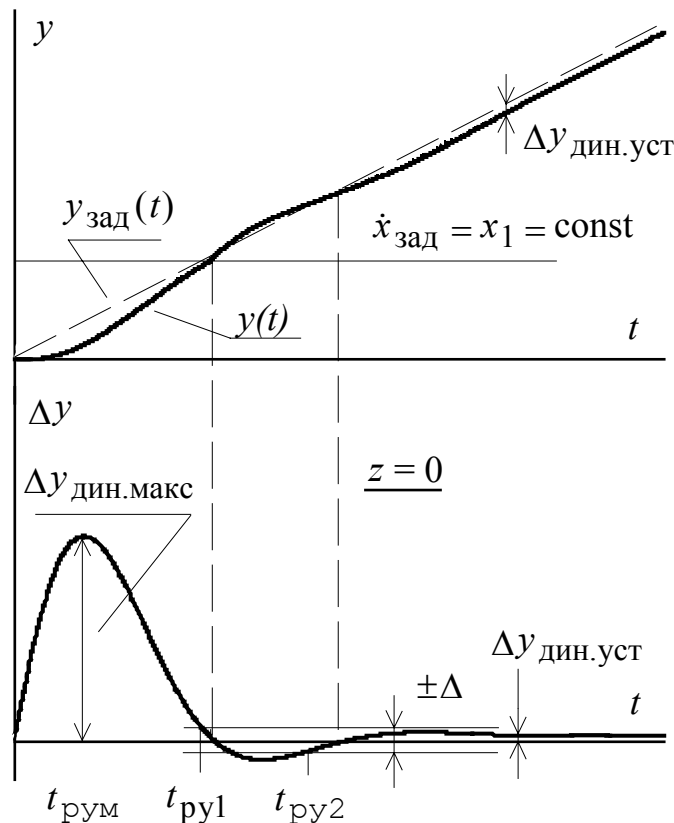


Рис. 7. Переходные процессы при обработке линейного управляющего воздействия

Приложение возмущающего воздействия вида $z(t) = z_0 = \text{const}$ в статической по возмущению системе регулирования приводит к появлению дополнительной постоянной составляющей установившейся ошибки. Так, например, для астатической системы первого порядка по управлению

$$\Delta y_{\text{дин.уст}} = \Delta y_{\text{ск}} + \Delta y_{\text{в.ст.}}$$

При обработке **гармонического управляющего воздействия** ($x(t) = x_m \cdot \sin \omega t$, $x_m = \text{const}$, $\omega = \text{const}$, $z = 0$) (см. рис. 8):

$\Delta y_{\text{дин.макс}}$ - максимальное значение динамической ошибки;

$t_{\text{рум}}$ - время достижения максимума ошибки, с;

$t_{\text{ру2}}$ - время переходного процесса (окончательного вхождения в зону $\pm \Delta$ относительно $\Delta y_{\text{уст}}(t)$), с;

$$\Delta = 1.1 \cdot \Delta y_{\text{м.уст}}$$

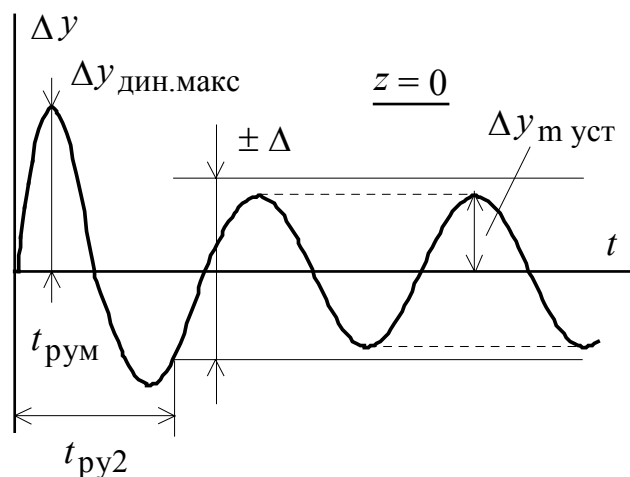


Рис. 8. Переходные процессы при обработке гармонического управляющего воздействия

Частотные характеристики замкнутого контура снимаются при подаче на соответствующий вход контура гармонического управляющего или возмущающего воздействия постоянной амплитуды и переменной частоты:

$$x(t) = x_m \cdot \sin(\omega_y \cdot t),$$

где

x_m — амплитуда входного сигнала.

$\omega_y = 2 \cdot \pi \cdot f_y$ — частота входного сигнала, рад/с.

При этом выходная координата будет также изменяться по гармоническому закону (см. рис. 9):

$$y(t) = y_m \cdot \sin[\omega_y \cdot t + \varphi(\omega_y)].$$

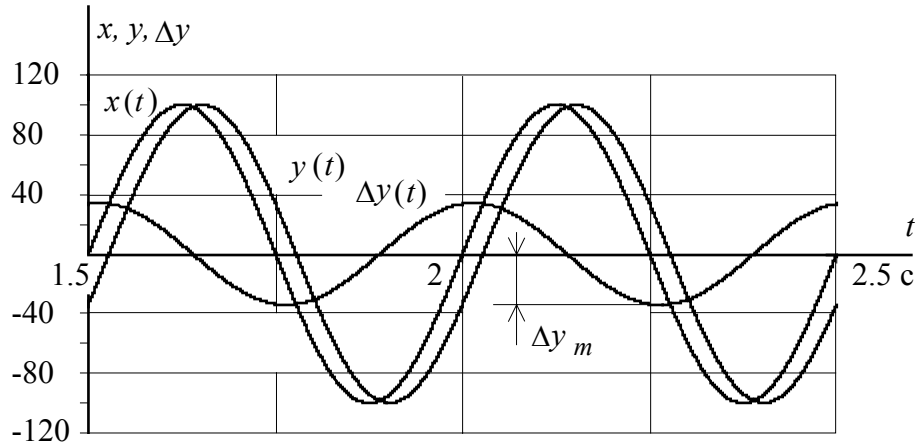


Рис. 9. Кривые установившегося переходного процесса обработки контуром гармонического входного сигнала с частотой 2 Гц

Частотные характеристики контура по выбранному входному воздействию, например по управлению, строятся по точкам для ряда фиксированных значений угловой частоты ω_y входного воздействия следующим образом:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{y_m(\omega_y)}{x(\omega_y)} \text{ – амплитудная частотная характеристика}$$

замкнутого контура по управлению, имеющая физический смысл коэффициента усиления замкнутого контура на конкретной частоте ω_y гармонического входного воздействия;

$L(\omega) = 20 \cdot \lg A(\omega)$ – логарифмическая амплитудная частотная характеристика замкнутого контура по управлению (ЛАЧХ);

$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_y)$ – фазовая частотная характеристика замкнутого контура по управлению (ФЧХ), представляющая собой фазовый сдвиг выходного сигнала контура относительно входного на частоте ω_y , строится в логарифмическом масштабе и называется логарифмической фазовой частотной характеристикой (ЛФЧХ).

Аналогично могут быть сняты частотные характеристики разомкнутого контура.

По ЛЧХ, используя изложенную в [2] методику, определяют следующие показатели качества оптимизированного контура:

– по ЛЧХ разомкнутого контура (рис. 10):

$\Delta\varphi$ - запас устойчивости по фазе, град.;

ΔL - запас устойчивости по модулю, дБ;

$k_p = |W(j\omega)_p|_{\omega=0}$ – коэффициент усиления разомкнутой статической системы;

k – коэффициент астатизма;

$\omega_{\text{ср}}$ - частота среза разомкнутого контура;

$h = \frac{\omega_3}{\omega_2}$ - протяженность участка с наклоном - 20 дБ/дек;

– по ЛЧХ замкнутого контура (рис. 11):

$k_{3.у}$ – коэффициент усиления замкнутой системы по управлению;

ω_p – резонансная частота;

$\omega_{\Pi}^{(M)}$ – граничная частота полосы пропускания замкнутого контура по модулю, соответствующая значению модуля передаточной функции, равному $0.707 \cdot |W(j\omega)_{3.у}|_{\omega=0}$;

$\omega_{\Pi}^{(\Phi)}$ – граничная частота полосы пропускания по фазе, соответствующая значению фазы $\varphi(\omega) = -90$ град;

$M = \frac{|W(j\omega)_{3.у}|_{\text{макс}}}{|W(j\omega)_{3.у}|_{\omega=0}}$ – показатель колебательности.

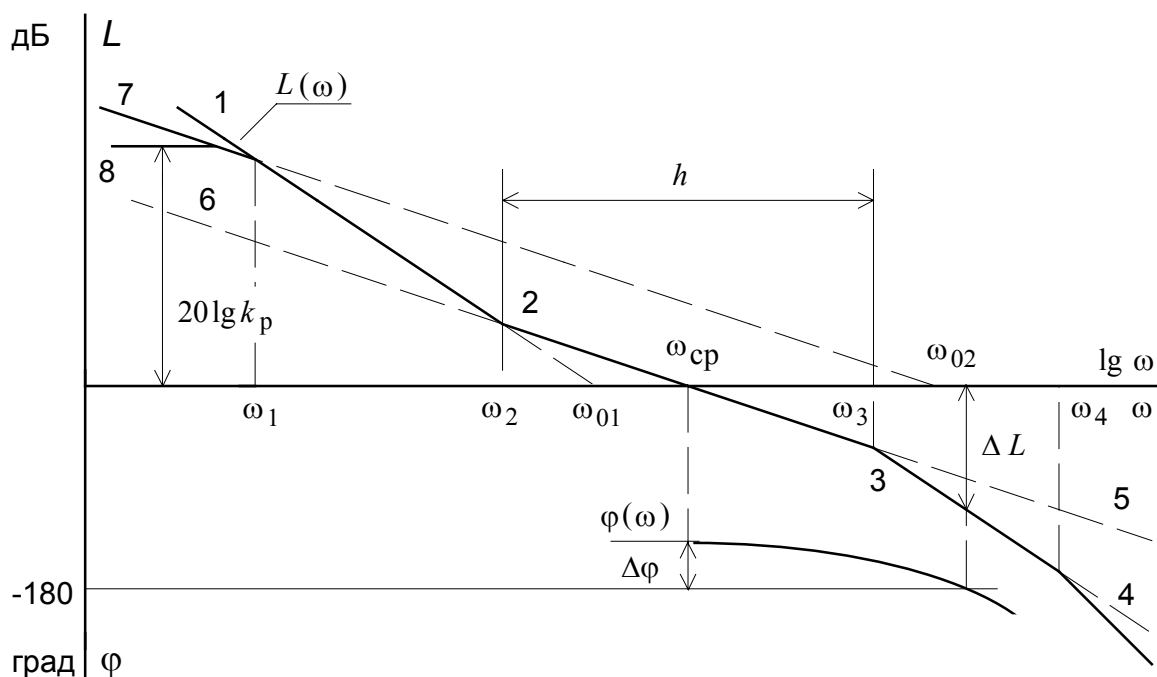


Рис. 10. ЛЧХ разомкнутого контура: $L(\omega)$ - асимптотическая амплитудная; $\varphi(\omega)$ - фазовая

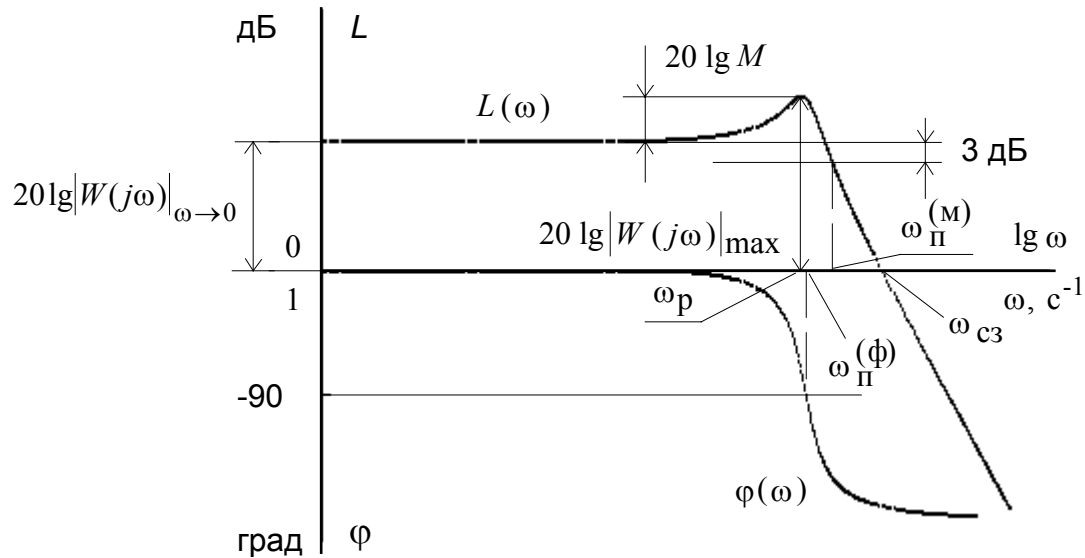


Рис. 11. ЛЧХ по управлению замкнутой системы: $L(\omega)$ - амплитудная; $\varphi(\omega)$ - фазовая

4. Программа работы

1. Записать выражения для передаточных функций контура рис. 1 с учетом передаточных функций входящих в него звеньев:

– разомкнутого контура по управлению

$$W_{p.y}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = W_{\text{рег}}(p) \cdot W_{\text{об1}}(p) \cdot W_{\text{об2}}(p);$$

– разомкнутого контура по возмущению

$$W_{p.в}(p) = \frac{y(p)}{-z(p)} = W_{\text{об2}}(p);$$

– разомкнутого контура

$$W_p(p) = W_{\text{рег}}(p) \cdot W_{\text{об1}}(p) \cdot W_{\text{об2}}(p) \cdot W_{\text{ос}}(p);$$

– замкнутого контура по управлению

$$W_{3.y}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{W_{p.y}(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{W_{\text{ос}}(p)} \cdot \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)};$$

– замкнутого контура и возмущению $W_{3.в}(p)$

$$W_{3.в}(p) = \frac{y(p)}{-z(p)} = \frac{W_{p.в}(p)}{1 + W_p(p)}.$$

Принять $x_{\text{макс}} = 10$; $k_{\text{ос}} = \frac{x_{\text{макс}}}{y_{\text{макс}}}$; $W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}} = 1$.

2. Рассчитать и построить статическую характеристику по управлению $Y = f(X)$ при $Z = 0$

$$Y = W_{3,y}(p)|_{p=0} \cdot X.$$

Результаты свести в табл. 2 и представить в виде графика.

Таблица 2

Статическая характеристика по управлению

X	0	$X_{\text{макс}} = 10$
Y		

3. Рассчитать и построить семейство статических характеристик по возмущению $Y = f(Z)$ при $X = \text{var}$

$$Y = W_{3,y}(p)|_{p=0} \cdot X - W_{3,b}(p)|_{p=0} \cdot Z.$$

Результаты свести в табл. 3 и представить в виде графика.

Таблица 3

Статические характеристики по возмущению

	$X = 10$		$X = 5$		$X = 1$		$X =$		$X = 0$
Z	0		0		0		0		0
Y							0		

4. Определить величину статической ошибки по управлению при $Z = 0$

$$\Delta Y_{\text{ст.у}} = Y_{\text{зад}} - Y = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \cdot X_{\text{зад}} - W_{3,y}(p)|_{p=0} \cdot X_{\text{зад}},$$

и величину статической ошибки по возмущению при $X=0$

$$\Delta Y_{\text{ст.в}} = W_{3,b}(p)|_{p=0} \cdot Z.$$

Оценить диапазон регулирования выходной координаты при выбранном значении возмущающего воздействия.

5. Выполнить имитационное моделирование контура при обработке типовых входных воздействий, оценить характер переходных процессов и их основные показатели.

6. Оптимизировать контур по управлению с применением типовой методики оптимизации:

6.1. Выбрать тип регулятора и определить параметры его настройки.

6.2. Записать выражения для передаточных функций разомкнутого контура $W_p(p)$ и замкнутого оптимизированного контура по управлению $W_{3,y}(p)$ и возмущению $W_{3,b}(p)$ с учетом выбранного регулятора.

6.3. Определить ожидаемые показатели качества работы контура по управлению. Результаты свести в табл.4.

Таблица 4

Показатели переходных процессов контура по управлению

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta u_{ст.у}$
<i>Ожидаемые показатели</i>			
<i>Результаты моделирования</i>			

Примечание. Определение ожидаемых показателей качества переходных процессов и частотных характеристик следует производить по [2, пункты 2.3 и 2.4].

7. Рассчитать и построить статические характеристики замкнутого оптимизированного контура по управлению $Y = f(X)$ (табл. 5) и по возмущению $Y = f(Z)$ (табл. 6). Сравнить результаты расчета с результатами, полученными в п. 2 и 3.

Таблица 5

Статическая характеристика по управлению

X	0	$X_{\max} = 10$
Y		

Таблица 6

Статические характеристики по возмущению

	$X = 10$		$X = 5$		$X = 1$		$X =$	
Z	0		0		0		0	
Y								

8. Набрать имитационную модель оптимизированного контура по структурной схеме рис. 1 с учетом выбранного регулятора.

9. Снять кривые переходных процессов для выходной координаты $y(t)$ и ошибки $\Delta y(t)$ контура при ступенчатом управляющем воздействии $x(t) = const$ и $z=0$. Определить качественные показатели $\Delta u_{ст.у}$, σ , $t_{py1}^{(5)}$, $t_{py2}^{(5)}$ и свести их в табл.4. Оценить влияние численного значения скачка задания на характер и параметры переходного процесса $y(t)$.

10. Снять кривые переходных процессов для выходной координаты $y(t)$ и ошибки $\Delta y(t)$ контура при ступенчатом возмущающем воздействии $z(t) = const$ и $x=0$. Определить качественные показатели и свести их в табл.7. Оценить влияние численного значения скачка возмущающего воздействия на характер и параметры переходного процесса $y(t)$.

Таблица 7

Показатели качества переходных процессов по возмущению

$t_{рв}^{(10)}$	$\Delta y_{в.макс}$	$\Delta y_{ст.в}$

11. Получить ЛЧХ разомкнутого контура и определить запасы устойчивости оптимизированного контура по модулю ΔL , дБ и фазе $\Delta\phi$. Результаты свести в табл. 8.

12. Получить ЛЧХ замкнутого контура по управлению и определить полосу пропускания по модулю $\omega_{п}^{(м)}, \frac{рад}{с}$, $f_{п}^{(м)}$, Гц и фазе $\omega_{п}^{(\phi)}, \frac{рад}{с}$, $f_{п}^{(\phi)}$, Гц (табл. 8).

Таблица 8

Частотные показатели качества

Запас устойчивости		Полоса пропускания	
по модулю ΔL , дБ	по фазе $\Delta\phi$, град	по модулю $\Delta\omega_{п}^{(м)}$, рад/с	по фазе $\Delta\omega_{п}^{(\phi)}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
Результаты моделирования			

13. Получить ЛЧХ замкнутого контура по возмущению. Объяснить полученные результаты.

14. Повторить п. 9 при ступенчатом управляющем воздействии $x(t)=const$ возмущении $z(t)=const$. Найти и объяснить связь полученных показателей качества с результатами, полученными в п. 9 и 10.

15. Снять кривые переходных процессов для выходной координаты $y(t)$ и ошибки $\Delta y(t)$ контура при линейном управляющем воздействии $x(t) = x_0 \cdot t$ и $z=0$. Определить качественные показатели. Оценить влияние численного значения скорости изменения входного воздействия x_0 на характер и параметры переходного процесса $y(t)$, $\Delta y(t)$.

16. Повторить п. 14 при возмущении $z(t)=const$. Найти и объяснить связь полученных показателей качества с результатами, полученными в п.14.

17. Повторить п. 15 при гармоническом управляющем воздействии $x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega_y \cdot t)$ и $z=0$. Определить качественные показатели.

18. При гармоническом управляющем воздействии $x(t) = x_m \cdot \sin(\omega_y \cdot t)$ при $x_m = const$ и $\omega_y = var$ экспериментально снять и построить амплитудную и фазовую частотные характеристики замкнутого контура в обычном $A(\omega)$ и логарифмическом масштабе $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ (табл. 9). Определить показатели качества.

Таблица 9

Амплитудная и фазовая частотные характеристики по управлению

ω_y , рад/с	10	100	...		
$y_m(\omega)$					
$A(\omega) = \frac{y_m(\omega)}{x_m(\omega)}$					
$20 \cdot \lg A(\omega)$, дБ					
$\varphi(\omega)$, град					

19. При гармоническом возмущающем воздействии $z(t) = z_m \cdot \sin(\omega_y \cdot t)$ при $z_m = const$ и $\omega_y = var$ экспериментально снять и построить ЛЧХ замкнутого контура (табл. 10). Сравнить их вид с ЛЧХ для управляющего воздействия и объяснить.

Таблица 10

Амплитудная и фазовая частотные характеристики по возмущению

ω_y , рад/с	10	100	...		
$y_m(\omega)$					
$A(\omega) = \frac{y_m(\omega)}{z_m(\omega)}$					
$20 \cdot \lg A(\omega)$, дБ					
$\varphi(\omega)$, град					

20. Оценить влияние неправильного выбора параметров регулятора (или неправильного определения параметров объекта) на качество работы оптимизированного контура. Провести исследования при условии, что каждый из параметров регулятора при постоянных значениях параметров объекта или параметры объекта при оптимальных параметрах регулятора могут принимать одно из следующих значений в относительных единицах: 0.5, 1, 2. Объяснить полученные результаты.

21. Оценить влияние насыщения регулятора на характер и качество переходных процессов (принять $|U_{\text{рег}}| \leq 10\text{В}$). Повторить исследования по п. 9, 10, 17, 18. Сделать выводы.

22. Предложить другие методы оптимизации и провести исследования, подтверждающие эффективность предложенных настроек.

Литература

1. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. -М.: Энергия, 1970. -200 с. (гл. 2).

2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 156 с.

3. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.

4. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: Пер. с нем. -М.: Энергия, 1973. -192 с. (гл. 5).

5. Шипилло В.П. Автоматизированный электропривод. -М.: Энергия, 1969. -400 с. (разделы 7.2 и 7.3).