

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский государственный технический университет

УДК 623.438.3-585.2-82

Рукопись одобрена кафедрой
колёсных и гусеничных машин
протокол № 6 от 26.02.2002 г.

Заведующий кафедрой
Ю.П. Волков

Рукописный фонд
кафедры колёсных и гусеничных машин

РАСЧЕТ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Методические указания к курсовой работе
для студентов специальностей 150100 и 150300

Авторы: Ю.П. Волков
И.М. Герасимов
В.Е. Ролле

С-Петербург
2002

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены основные вопросы расчета и исследования линейных систем автоматического управления на примере следящего электропривода поворотной платформы.

Курсовая работа включает в себя составление структурной схемы, определение параметров входящих в нее элементов, исследование устойчивости и качества работы линейной системы автоматического управления.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
3. СОСТАВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СИСТЕМЫ. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМЫ В ЦЕЛОМ.....	5
3.1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.	5
3.2. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ УСИЛИТЕЛЯ.....	8
3.3. УРАВНЕНИЕ ДАТЧИКА	8
3.4. УРАВНЕНИЕ РЕДУКТОРА.....	9
3.5. УРАВНЕНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	9
3.6. СОСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ	9
4. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ САУ	10
5. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ САУ	13
5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ.....	13
5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ	14
5.3. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА	15
6. ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕДУКТОРА	17
7. ПРИМЕР РАСЧЕТА СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	19
7.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	19
7.2. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ	19
7.3. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	22
7.3.1. <i>Исследование устойчивости разомкнутой системы</i>	<i>23</i>
7.3.2. <i>Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы.....</i>	<i>23</i>
7.3.3. <i>Оценка устойчивости и качества следящего привода по ЛАЧХ... </i>	<i>27</i>
7.3.4. <i>Построение характеристики переходного процесса</i>	<i>28</i>
7.4. ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА	31
8. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ.....	33
ЛИТЕРАТУРА	33
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	34

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Курсовая работа по теории и системам автоматического управления (САУ) механизмами транспортных машин предназначена для освоения навыков элементарных расчетов линейных САУ. В данном пособии рассматриваются расчет следящего электропривода.

Исходными данными для выполнения курсовой работы являются:

- приведенный момент инерции нагрузки J_n , кг·м²;
- приведенный момент сопротивления нагрузки M_n , Н·м;
- максимальная угловая скорость отработки ω_{max} , рад/с;
- время отработки t_p , с;
- перерегулирование δ , %.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Дистанционная следящая система электропривода управления положением объекта наведения, показанная на рис. 1, служит для дистанционной передачи угла поворота командной оси с одновременным усилением по мощности.

В состав системы входит элемент сравнения ЭС, собранный на потенциометрах $П_1$ и $П_2$, усилитель V , исполнительный двигатель M , согласующий редуктор и объект управления ОУ (в качестве объекта управления может выступать, например, поворотная платформа).

Задающее воздействие в виде угла поворота α_1 поступает на движок

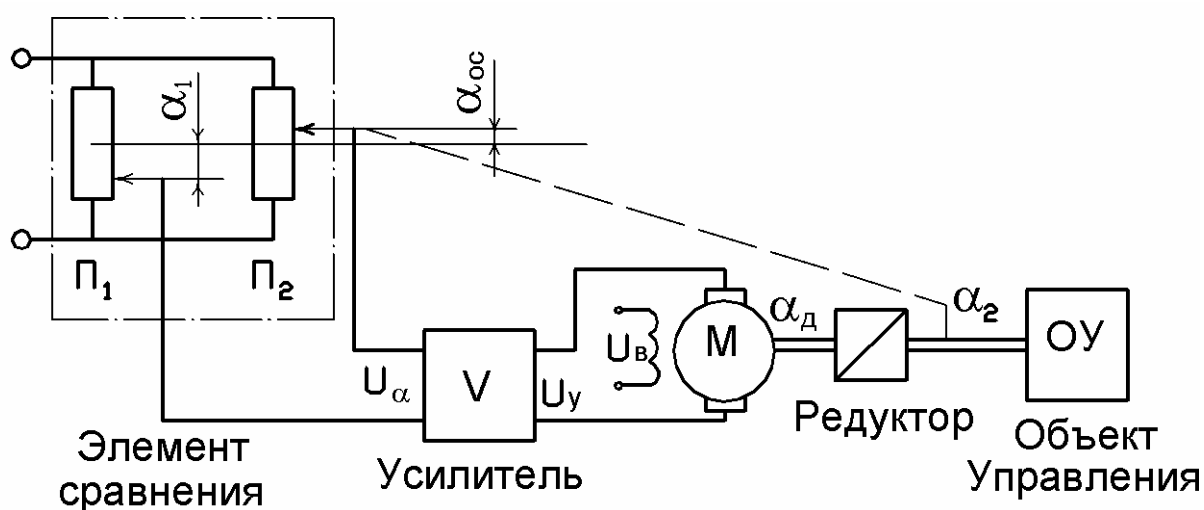


Рис. 1. Схема следящего электропривода управления объектом наведения

потенциометра Π_1 . При его повороте происходит рассогласование с положением движка потенциометра Π_2 , которое определяется углом поворота α_2 выходного вала редуктора. На выходе элемента сравнения возникает напряжение U_α пропорциональное углу $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$. Это напряжение U_α поступает на усилитель, где усиливается до значения U_y , причем величина и знак его будут зависеть от величины и знака угла рассогласования. Полученное напряжение U_y и определяет поворот двигателя в требуемую сторону на угол, пропорциональный α . Двигатель через редуктор поворачивает объект управления, а также движок потенциометра Π_2 до тех пор, пока поворот движка Π_2 не станет равен повороту движка потенциометра Π_1 и напряжение, снимаемое с элемента сравнения, не станет равным 0. Тем самым осуществляется жесткая обратная связь. В согласованном положении $\alpha_1 = \alpha_2$ двигатель не вращается.

Функциональная схема описанной системы приведена на рис.2

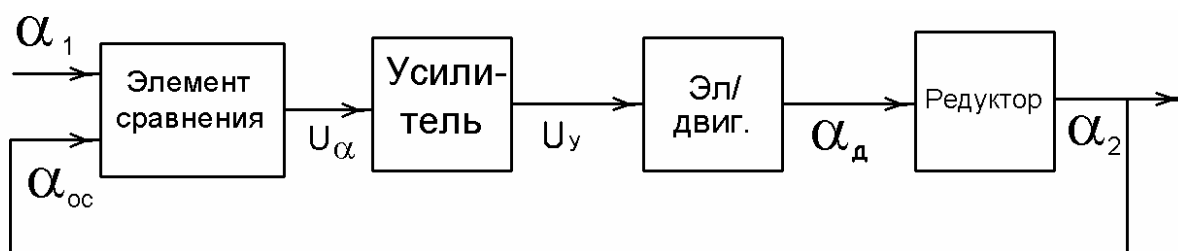


Рис. 2. Функциональная схема следящего электропривода

3. СОСТАВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СИСТЕМЫ. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМЫ В ЦЕЛОМ

Для анализа работы всей системы автоматического управления необходимо составить дифференциальные уравнения и передаточные функции, характеризующие поведение каждого входящего в систему звена.

3.1. Дифференциальное уравнение и передаточные функции электродвигателя.

Дифференциальное уравнение для двигателя постоянного тока с регулированием напряжения в цепи якоря выводится с учетом момента инерции J_n и момента сопротивления M_n нагрузки, которые приводятся к валу двигателя. Если пренебречь индуктивностью цепи якоря и силой вязкого трения, то уравнение динамического равновесия электродвигателя запишется в виде

$$M_j + M_n = M_\delta \quad \text{или}$$

$$J \frac{dn_\delta}{dt} = K_M I_\alpha - M_n.$$

Здесь M_j – момент сил инерции;

M_δ – момент двигателя;

n_δ – частота вращения двигателя;

I_α – ток в якорной цепи;

K_M – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров двигателя;

J – приведенный момент инерции якоря с учетом момента инерции нагрузки J_n :

$$J = J_\delta + K_p^2 J_n = \frac{GD^2}{4} + K_p^2 J_n,$$

$$K_p = \frac{1}{i_p}, \quad \text{где}$$

J_δ – момент инерции якоря;

i_p – передаточное отношение редуктора;

GD^2 – маховой момент якоря (обычно приводится в паспортных данных электродвигателя).

Учитывая, что $I_\alpha = \frac{U_y - K_e n_\delta}{r_{\alpha.ц.}}$, получим

$$J \frac{dn_\delta}{dt} + \frac{K_e K_M}{r_{\alpha.ц.}} n_\delta = \frac{K_M}{r_{\alpha.ц.}} U_y - M_n.$$

Заменяя $n_\delta = \frac{d\alpha_\delta}{dt}$, получим уравнение динамики для изменения угла поворота α_δ электродвигателя:

$$J \frac{d^2\alpha_\delta}{dt^2} + \frac{K_e K_M}{r_{\alpha.ц.}} \frac{d\alpha_\delta}{dt} = \frac{K_M}{r_{\alpha.ц.}} U_y - M_n. \quad (1)$$

Для выбранного электродвигателя коэффициенты K_e и K_M определяются по его номинальным параметрам следующим образом:

$$K_e = \frac{U_{y_{ном}} - r_{я.ц.} I_{я.ном}}{n_{ном}} \quad K_M = \frac{M_n}{I_{я.ном}},$$

или через конструктивные постоянные C_e и C_M :

$$K_e = C_e \Phi; \quad K_M = C_M \Phi, \quad \text{где}$$

$r_{я.ц.}$ – сопротивление якорной цепи;

Φ – поток возбуждения.

$$C_e = \frac{PN}{a \cdot 60}; \quad C_M = \frac{PN}{2\pi \cdot a}, \quad \text{где}$$

P – число полюсов двигателя;

N – число активных проводников якоря (равно удвоенному числу витков обмотки якоря $\omega_{я}$);

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Следует обратить внимание на соотношение:

$$C_e/C_M = K_e/K_M = 2\pi/60 = 0,105$$

При начальных условиях $U_y = U_{y0}$; $M_n = M_{n0}$ уравнение статики имеет вид:

$$\frac{K_M}{r_{я.ц.}} U_{y0} - M_{n0} = 0 \quad (2)$$

Так как уравнение (1) линейно (следовательно, не требуется проводить его линеаризацию) то, вычитая из него уравнение статики (2), получим выражение для уравнения динамики в приращениях:

$$J \Delta \left(\frac{d^2 \alpha_{\delta}}{dt^2} \right) + \frac{K_e K_M}{r_{я.ц.}} \Delta \left(\frac{d\alpha_{\delta}}{dt} \right) - \frac{K_M}{r_{я.ц.}} \Delta U_y + \Delta M_n = 0.$$

Здесь величины $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$; $\Delta U_y = U_y - U_{y0}$; $\Delta M = M_n - M_{n0}$ обозначают малые отклонения соответствующих переменных от их значений в статике α_0, U_{y0}, M_{n0} .

Разделив все члены уравнения на коэффициент при $\Delta(d\alpha_{\delta}/dt)$ и введя обозначения:

$$T_{\delta} = J \frac{r_{я.ц.}}{K_e K_M}; \quad K_{\delta} = \frac{1}{K_e}; \quad K_H = \frac{r_{я.ц.}}{K_e K_M}, \quad (3)$$

получим нормализованное уравнение динамики в приращениях,

$$T_{\delta} \Delta \left(\frac{d^2 \alpha_{\delta}}{dt^2} \right) + \Delta \left(\frac{d \alpha_{\delta}}{dt} \right) = K_{\delta} \Delta U_y - K_H \Delta M_n .$$

или в операторной форме:

$$p (T_{\delta} p + 1) \alpha_{\delta}(p) = K_{\delta} U_y(p) - K_H M_n(p).$$

При этом коэффициент T_{δ} имеет размерность в секундах и называется постоянной времени; коэффициенты K_{δ} и K_H являются безразмерными величинами и называются коэффициентами усиления.

Отсюда передаточная функция электродвигателя по управляющему воздействию:

$$W(p)_{\delta} = \left. \frac{\alpha_{\delta}(p)}{U_y(p)} \right|_{M_n=0} = \frac{K_{\delta}}{p(T_{\delta} p + 1)} .$$

Передаточная функция по возмущающему моменту

$$W(p)_H = \left. \frac{\alpha_{\delta}(p)}{M_n(p)} \right|_{U_y=0} = \frac{K_H}{p(T_{\delta} p + 1)} .$$

3.2. Передаточные функции усилителя

Тип усилителя определяется типом электродвигателя и его мощностью. Для двигателя постоянного тока, в котором управление скоростью вращения осуществляется изменением напряжения в якоре, могут применяться электронные, магнитные или электромашинные усилители, передаточная функция которых может быть получена аналогичным образом. При определенных допущениях для большинства усилителей она имеет вид

$$W(p)_y = \frac{U_y(p)}{U_{\alpha}(p)} = \frac{K_y}{T_y p + 1} , \text{ где}$$

K_y – коэффициент усиления усилителя;

T_y – постоянная времени усилителя.

3.3. Уравнение датчика

$$U_{\alpha} = K_{\alpha} \Delta \alpha, \text{ где } \Delta \alpha = \alpha_{oc} - \alpha_l;$$

U_{α} – напряжение на выходе датчика;

K_{α} – коэффициент усиления датчика.

Передаточная функция датчика:

$$W(p)_\alpha = \frac{U_\alpha(p)}{\Delta\alpha(p)} = K_\alpha.$$

3.4. Уравнение редуктора

$$\alpha_2 = K_p \alpha_\partial, \text{ где}$$

α_∂ – угол поворота на входе редуктора;

α_2 – угол поворота на выходе редуктора;

K_p – коэффициент передачи редуктора.

3.5. Уравнение обратной связи

$\alpha_{oc} = K_{oc} \alpha_2$, где K_{oc} – коэффициент обратной связи.

$$W(p)_{oc} = \frac{\alpha_2(p)}{\alpha_{oc}(p)} = K_{oc}.$$

Принимая коэффициент обратной связи равным 1 получим $\alpha_2 = \alpha_{OY}$.

3.6. Составление передаточных функций системы

В соответствии с передаточными функциями отдельных звеньев составляется структурная схема САУ. Для следящего электропривода структурная схема показана на рис. 3. Используя метод структурных преобразований определяются передаточные функции всей системы.

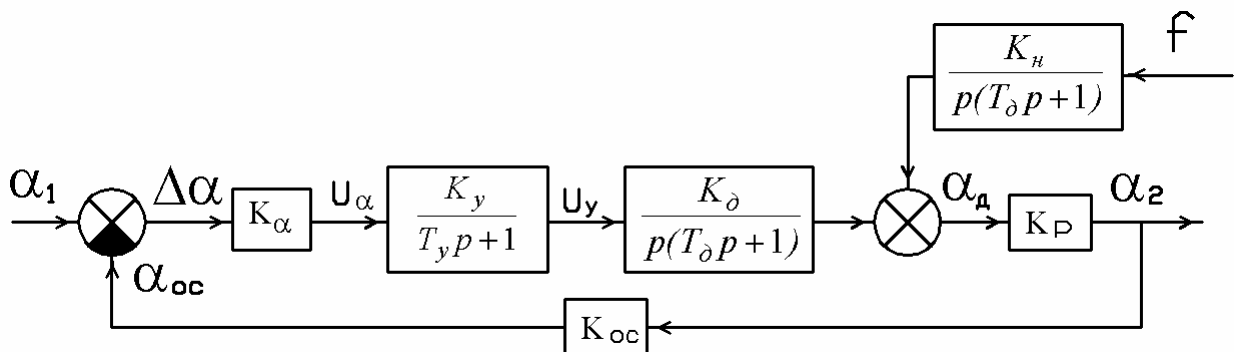


Рис. 3. Структурная схема следящего привода

САУ приведенная на рис. 3 является замкнутой системой с отрицательной главной обратной связью.

В теории САУ широко используются методы исследования замкнутых систем по поведению соответствующих им разомкнутых систем, которые получаются из замкнутых разрывом цепи главной обратной связи (рис. 3а). Для этой цели необходимо составить передаточные функции как замкнутой, так и разомкнутой систем.

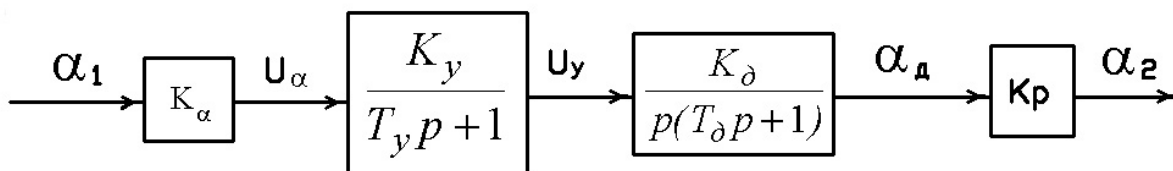


Рис. 3а. Соответствующая разомкнутая схема

Передаточная функция разомкнутой системы по управляющему сигналу выглядит следующим образом:

$$W(p)_\alpha = W_\alpha W_y W_\delta W_p = \frac{K}{p(T_y p + 1)(T_\delta p + 1)} \quad , \text{где} \quad (4)$$

$$K = K_\alpha K_y K_\delta K_p .$$

Передаточная функция замкнутой системы по управляющему сигналу

$$\Phi(p)_\alpha = \frac{W(p)_\alpha}{1 + W(p)_\alpha W(p)_{oc}} = \frac{K}{p(T_y p + 1)(T_\delta p + 1) + KK_{oc}} \quad (5)$$

4. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ САУ

После составления структурной схемы производится подбор основных элементов системы (исполнительного двигателя, основного усилителя мощности и т.д.) и определение их параметров: мощности, коэффициентов усиления, постоянных времени. При этом следует обеспечить правильное согласование элементов по виду энергии, роду тока, мощности управления и т.д. Параметры элементов определяются расчетным путём, а, при возможности, также и экспериментально на основании их статических и частотных характеристик. При проектировании электропривода основным моментом статического расчета является выбор мощности исполнительного двигателя. Рациональное значение мощности электродвигателя системы управления позволяет уменьшить потребление энергии, получить минимальные габариты и массу

САУ. В системах электропривода, как правило, используются двигатели постоянного тока.

В исполнительных устройствах с целью сокращения массы и габаритов системы чаще всего применяются электродвигатели, частота вращения которых превышает необходимые частоты вращения входного вала нагрузки. Поэтому двигатели соединяются с нагрузкой через редуктор. При выборе мощности исполнительного двигателя необходимо определить коэффициент передачи редуктора K_p , при котором обеспечивается заданная частота вращения и ускорения на входном валу нагрузки, а требуемая мощность двигателя минимальна.

Определение параметров позиционной следящей системы обычно проводится в следящей последовательности [1].

1. По заданной величине момента сопротивления нагрузки и скорости отработки определяется мощность двигателя:

$$P_{\partial.\max} = \lambda \frac{M_H \omega_{p.\max}}{\eta_p}, \text{ где}$$

λ – коэффициент запаса мощности. Для быстрого разгона объекта наведения специальных гусеничных машин и возможности его вращения на «горке» $\lambda=4\div6$;

ω_p – угловая скорость на выходе редуктора задается в пределах от $\omega_{p\min}$ до $\omega_{p\max}$. Для гусеничных машин специального назначения электропривод должен обеспечивать плавное управление объектом наведения в горизонтальной плоскости в диапазоне угловых скоростей от ω_{\min} до $\omega=0,04\div0,06$ 1/с, грубое наведение с $\omega=0,06\div0,18$ 1/с и режим переброса с $\omega=0,30\div0,60$ 1/с [2].

η_p – КПД редуктора. В зависимости от положения машины к горизонтали его значение колеблется в пределах $0,6\div0,9$.

2. По справочной литературе и каталогам выбирается марка электродвигателя по найденному значению $P_{\partial.\max}$ и выписываются его технические данные. Характеристика некоторых двигателей постоянного тока приведены в таблицах 1п, 2п, 3п Приложения.

3. Определяется значение коэффициента запаса мощности P равное отношению потребной мощности на привод к мощности выбранного двигателя.

$$P = \frac{P_{\delta.\max}}{\lambda P_{\delta}}$$

По графикам рис. 4, для полученного значения P находят поправочные коэффициенты q , λ и T .

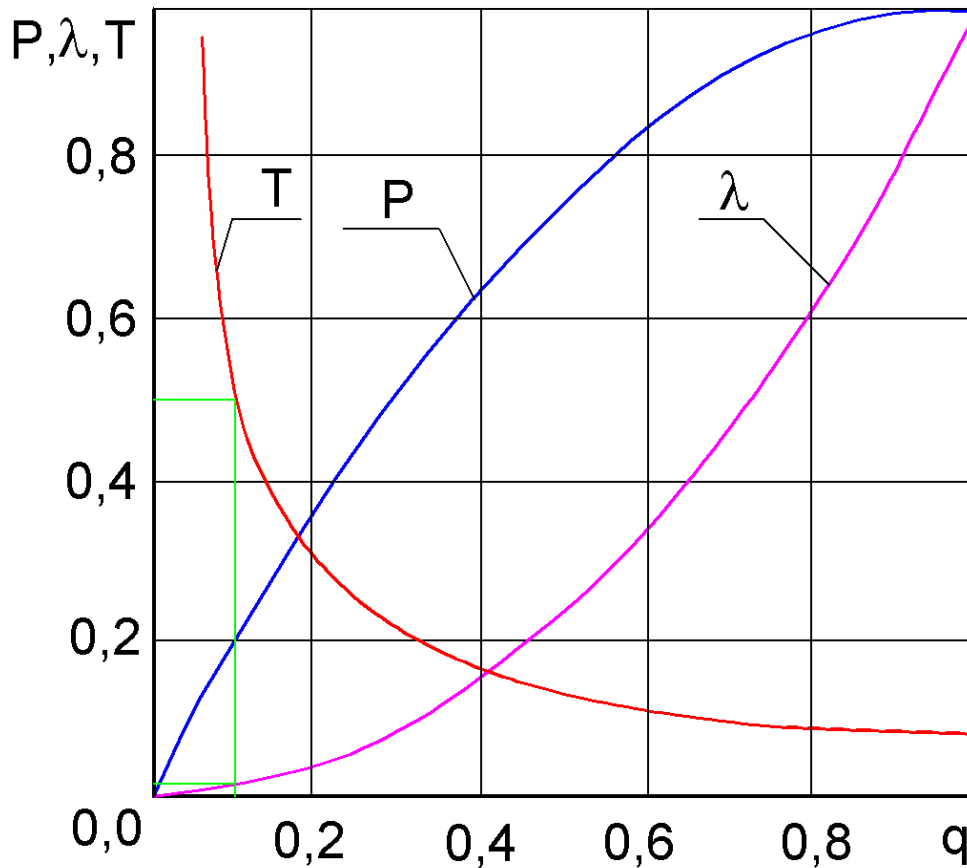


Рис. 4. Значения поправочных коэффициентов с примером нахождения поправочных коэффициентов: для $P=0,2$; $q \approx 0,11$; $T \approx 0,5$; $\lambda \approx 0,02$

4. Коэффициенты уравнения двигателя определяются из соотношений (3).

5. Коэффициент передачи редуктора

$$K_p = q \frac{M_n}{2M_H}, \text{ где}$$

M_n – пусковой момент нагрузки. Если его значение не приведено в технических данных, то принимают $M_n = 2,5 \cdot M_{\text{ном}}$.

Коэффициент передачи редуктора можно также определить по зависимости

$$K_p = \frac{2n_{H\max}}{n_{gxx}}, \text{ где } n_{gxx} = \frac{n_{\text{ном}}}{1 - \frac{r_{\text{я.ц.}} \cdot I_{\text{я.ном.}}}{U_{\text{ном}}}}$$

передаточное число редуктора $i_p = 1/K_p$.

6. Максимальное значение коэффициента передачи усилителя определяется как

$$K_{y.max} \geq U_{tr.max} / U_{\delta} .$$

Здесь $U_{tr.max}$ – максимальное значение напряжения трогания.

$$U_{tr.max} = U_{y.max} / 2. \text{ Обычно } U_{y.ном} = U_{ном}.$$

U_{δ} – минимальный сигнал, равный зоне нечувствительности системы, получаемый с датчика обратной связи. Обычно $U_{\delta} = (5 \div 10)\%$ от $U_{\alpha.max}$. С учетом поправочного коэффициента $K_y = q K_{y.max}$.

7. Коэффициент передачи датчика $K_{\alpha} = \frac{U_{\alpha \max}}{\alpha_{\max}}$

8. Коэффициент передачи привода к датчику обратной связи

$$K_{oc} = \frac{\alpha_{2 \max}}{\alpha_{oc.max}}$$

9. Коэффициент передачи системы (добротность системы)

$$K = K_{oc} K_{\alpha} K_y K_{\delta} K_p .$$

5. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ САУ

Целью динамического расчета является определение устойчивости и основных показателей качества системы. Поскольку обычно нескорректированная система не отвечает заданным требованиям, определение устойчивости и оценку качества целесообразно производить по логарифмическим частотным характеристикам, которые впоследствии используются для синтеза корректирующих устройств.

5.1. Исследование устойчивости системы

Для исследования устойчивости по логарифмическим характеристикам используется критерий Найквиста, который формулируется следующим образом:

Если разомкнутая система устойчива или нейтральна, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы принимала отрицательное значение раньше, чем фазовая характеристика достигает значения: $\varphi(\omega) = -\pi(-180^\circ)$, т.е., чтобы $\omega_{cp} < \omega_{\pi}$ (рис. 5). Таким образом, для ис-

следования устойчивости замкнутой системы автоматического управления по критерию Найквиста необходимо:

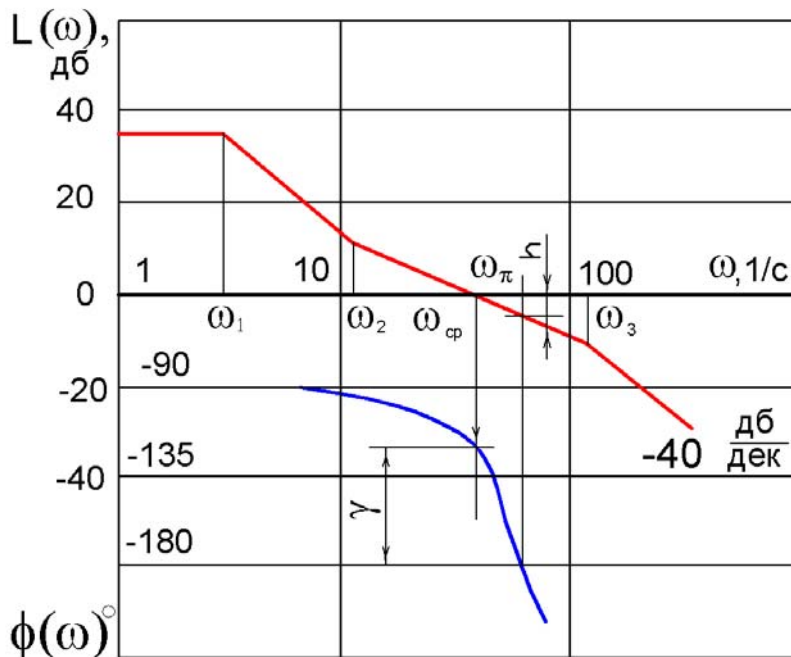


Рис. 5. Исследование устойчивости замкнутой системы по критерию Найквиста

Запас устойчивости системы по амплитуде h (рис. 5) определяется величиной амплитуды $L(\omega)$ в децибелах при частоте ω_π , которой соответствует переход фазовой характеристики через значение $\varphi = -\pi$. Запас устойчивости по фазе определяется по отклонению фазового угла от значения $\varphi = -\pi$ при частоте среза ω_{cp} : $\gamma = \varphi - (-\pi)$.

5.2. Исследование качества регулирования

Если для исследования системы используются логарифмические частотные характеристики $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, то приближенную оценку качества можно провести непосредственно по этим характеристикам.

Во-первых, о качестве регулирования можно судить по величине запаса устойчивости. Обеспечение требуемого запаса устойчивости по амплитуде h и по фазе γ – первое необходимое условие удовлетворительного качества регулирования.

1. Определить устойчивость разомкнутой системы (с помощью любого из известных способов, например, по критерию Гурвица);

2. Построить логарифмические амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой системы;

3. По построенным графикам сделать вывод об устойчивости замкнутой системы.

Во-вторых, быстродействие системы можно оценивать по величине частоты среза ω_{cp} разомкнутой системы. Чем она больше, тем выше быстродействие замкнутой системы.

В-третьих, по величине наклона характеристики $L(\omega)$ вблизи частоты ω_{cp} , можно судить о свойствах колебательной системы. Для обеспечения требуемого качества переходного процесса наклон логарифмической амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза ω_{cp} должен быть равен -20 дб/дек. При этом, чем шире участок с таким наклоном вблизи ω_{cp} , тем быстрее затухает переходный процесс, тем меньше переколебаний.

Установлено, что для обеспечения требуемого уровня перерегулирования, не превышающего $20\div 30\%$, необходимо, чтобы при найденной частоте среза ω_{cp} выполнялись следующие условия:

$$\frac{\omega_K}{\omega_H} \approx 10 \quad \text{и} \quad 2 < \frac{\omega_K}{\omega_{cp}} < 4 \quad (6)$$

где ω_H и ω_K – частоты начала и конца участка с наклоном -20 дб/дек, содержащего частоту ω_{cp} . В случае, представленном на рис. 5, $\omega_H = \omega_2$ и $\omega_K = \omega_3$.

Если эти условия не выполняются, то на логарифмической частотной характеристике проводится желаемая амплитудная характеристика, на основе которой осуществляется синтез корректирующих устройств. Построение амплитудной и фазовой логарифмических частотных характеристик показано в примере расчета, раздел 7.

Итак, высокая частота среза ω_{cp} разомкнутой системы и наклон амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты ω_{cp} , равный 20 дб/дек, при достаточной ширине этого участка, а также необходимые значения устойчивости. h и γ являются признаками достаточно хорошего качества переходного процесса.

5.3. Построение кривой переходного процесса

Кривая переходного процесса $H(t)$ при известной вещественной частотной характеристике $P(\omega)$ замкнутой системы с передаточной функцией (5) вычисляется по формуле:

$$H(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t \, d\omega. \quad (7)$$

Переходный процесс можно построить, используя современную вычислительную технику и соответствующее программное обеспечение (MathCad, MatLab, языки программирования). Мы же рассмотрим метод, позволяющий решить эту задачу при минимуме вычислений.

Сущность метода состоит в представлении вещественной частотной характеристики $P(\omega)$ в виде алгебраической суммы нескольких прямоугольных трапеций (рис. 6), для которых интеграл (7) вычисляется сравнительно просто. Для каждой трапеции находится кривая переходного процесса при помощи таблиц h -функций (см. табл. 4п приложения). Сумма кривых $H_i(t)$, полученных из отдельных трапеций, дает кривую переходного процесса системы $H(t)$.

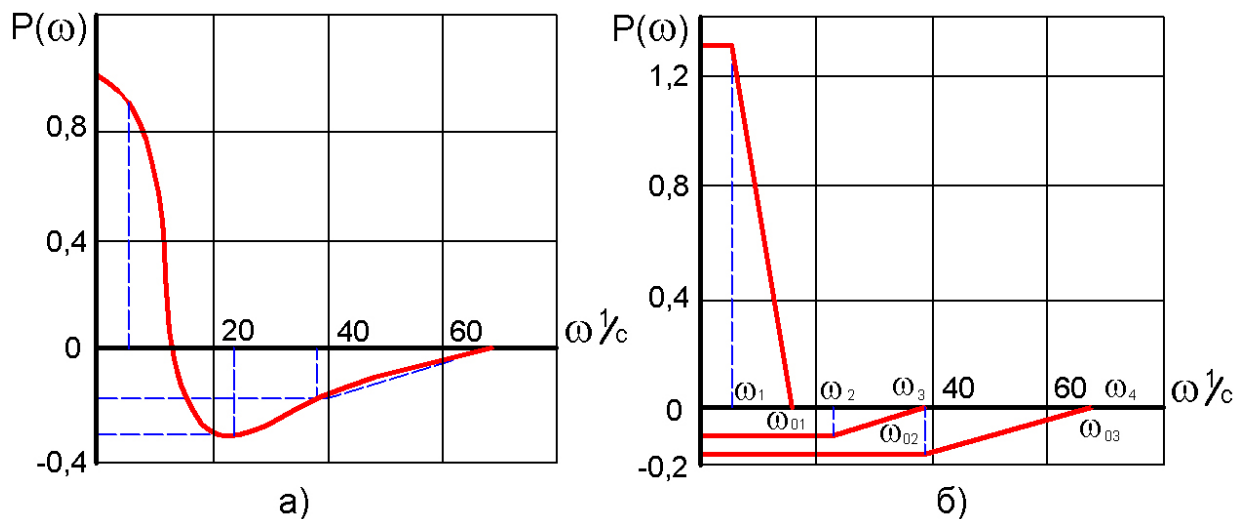


Рис. 6. Пример разбивки вещественной частотной характеристики на трапеции

При разбивке вещественной частотной характеристики на трапеции необходимо выполнить следующие условия:

1) Все трапеции должны быть прямоугольными и примыкать своими прямыми углами к оси ординат.

2) Алгебраическая сумма высот $P_i(\omega)$ всех трапеций должна быть равна величине аппроксимируемой частотной характеристике $P(\omega)$ при $\omega=0$:

$$\sum_{i=1}^n P_i(0) = P(0).$$

3) Боковая сторона каждой трапеции должна как можно точнее совпадать с соответствующим аппроксимируемым участком функции $P(\omega)$.

Вычисление переходной функции $H_i(t)$ для i -той трапеции производится в следующем порядке:

1. Определяются параметры: $P_i(0)$, ω_i , ω_{0i} и вычисляется коэффициент наклона $\chi_i = \frac{\omega_i}{\omega_{0i}}$ (рис. 6)

2. По таблицам h -функций, задаваясь значениями относительного времени τ и вычисленного коэффициента χ_i находят значения переходной функции $h(\tau)$.

3) Переход к искомой функции $H_i(t)$, осуществляется путем умножения каждой ординаты $h(\tau)$ на высоту трапеции $P_i(0)$, а переход от относительного времени τ к абсолютному t – путем деления τ на ω_{0i} :

$$H_i(t) = P_i(0)h(\tau); \quad t_i = \frac{\tau}{\omega_{0i}}.$$

Пример построения переходной функции $H(t)$ для следящего электропривода приведен в разделе 7.3.2.

6. ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕДУКТОРА

Обычно редуктор, соединяющий ротор электродвигателя с валом объекта наведения дополняется ручным приводом, элементами блокировки и выборки люфтов, задающим устройством. Совокупность этих узлов и агрегатов составляет механизм поворота объекта наведения. По взаимодействию ручного и моторного приводов механизмы поворота делятся на механизмы раздельного действия, с переключателями, которыми необходимо воспользоваться для перехода с ручного режима на моторный и обратно, и механизмы независимого действия, с планетарными рядами, допускающими одновременную и поочередную работу ручного и моторного приводов без всяких переключений. На рис.7 показана кинематическая схема механизма поворота независимого действия. Механизм поворота состоит из корпуса 1, моторного привода с дисковым тормозом 3 и предохранительным фрикционом 4, ручного привода с необратимой червячной передачей 5, суммирующего планетарного ряда 6, конечной шестерни 7 с люфтоввыбирающим устройством 8. При

неработающем электроприводе тормоз исключает самопроизвольный поворот объекта наведения. Выключается тормоз электромагнитом, напряжение на обмотки которого подается одновременно с подачей напряжения к электродвигателю.

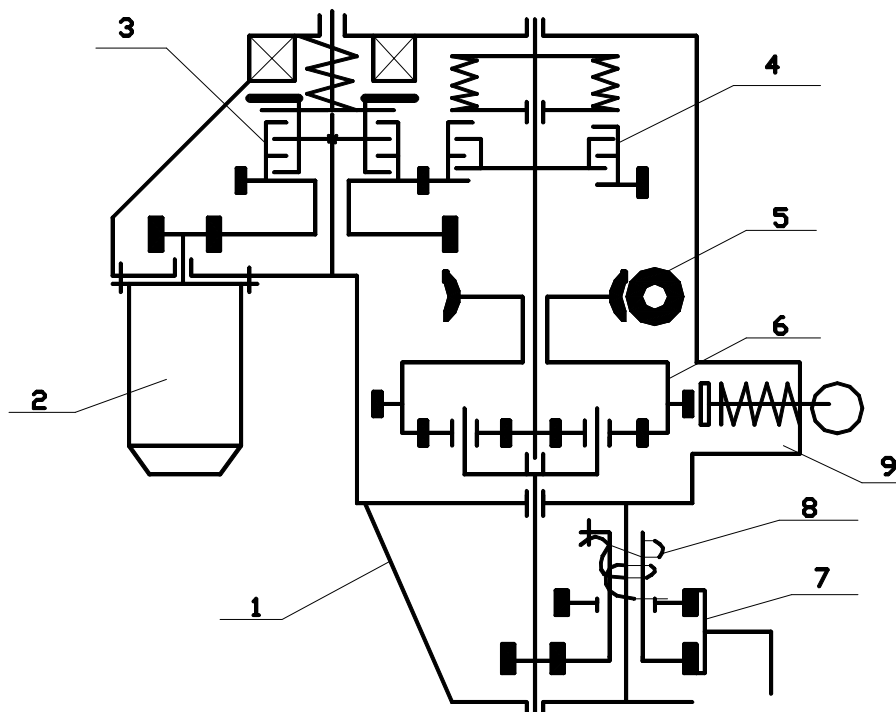


Рис. 7. Кинематическая схема электропривода

При разработке кинематической схемы руководствуются компоновочными соображениями, удобством работы оператора, общемашиностроительными нормами, обеспечивая при этом найденное общее передаточное число моторного привода $i = i_1 i_2 i_{nl} i_3 i_k$.

Для получения большого общего передаточного числа механизма поворота приходится применять 2÷3 последовательно включенные цилиндрические пары шестерен с $i = 3 \div 3,5$ в каждой паре, планетарный ряд с передачей от солнечной шестерни к водилу с наибольшим передаточным числом $i_{nl} = 1 + K$ до 6,5 при простом сателлите и до 10 при двойном. Передаточное число зацепления конечной шестерни i_k находится в пределах 14÷20. Силовая нагрузка в кинематической цепи механизма поворота от мотора к объекту наведения непрерывно нарастает, поэтому шестерни первой от мотора пары имеют малый модуль 2,5÷3 мм, а конечная шестерня изготавливается с широким зубом и с модулем 5 мм. Дисковый тормоз и предохранительный фрикцион для уменьшения их размеров размещают ближе к электромотору.

Передаточное число ручного привода определяется таким образом, чтобы усилие P_p на рукоятке маховика с радиусом $R=100$ мм не превышало

$$3 \div 5 \text{ кгс: } i_p = \frac{M_H}{\eta_p P_p R}, \text{ где } \eta_p - \text{кпд ручного привода.}$$

Ручной привод обычно включает однозаходную червячную передачу с большим передаточным числом $i_{ч.н.}$, равным числу зубьев червячного колеса. Общее передаточное число ручного привода: $i_p = i_{ч.н.} \cdot i_{нл} \cdot i_3 \cdot i_k$.

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

7.1. Исходные данные

- приведенный момент инерции нагрузки, $J_n = 240 \text{ кг м}^2$;
- приведенный момент сопротивления нагрузки, $M_n = 20 \text{ Нм}$;
- максимальная угловая скорость наведения, $\omega_{max} = 15 \text{ \%с (0,26 рад/с)}$;
- время отработки t_p не более 2 с;
- перерегулирование $\delta < 25\%$;

Пример расчета приводится для дистанционного следящего электропривода, принципиальная схема которого показана на рис. 1, а функциональная и структурная схема соответственно на рис. 2 и рис. 3. Численные значения коэффициентов передачи и постоянных времени определяются для передаточных функций системы, вывод которых дан в разделе 3.

7.2. Статический расчет системы

Потребная мощность привода на выходном валу редуктора:

$$P_{max} = \frac{M_n \omega_{max}}{\eta_p} = \frac{20 \cdot 15}{0,7 \cdot 57,3} = 7,5 \text{ Вт}$$

Здесь $\omega_{max} [\text{рад/с}] = \omega_{max} [\text{\%/с}] / 57,3$; $\eta_p = 0,7 \dots 0,9$.

Потребная мощность двигателя

$$P_{дв.н} = \lambda P_{max} = 4 \cdot 7,5 = 30 \text{ Вт}$$

По таблице 2п выбран двигатель постоянного тока с независимым возбуждением типа СЛ-321.

$$\begin{aligned} U_{ном} &= 110 \text{ В}, & n_{ном} &= 3000 \text{ мин}^{-1}, \\ I_{я.ном} &= 0,58 \text{ А}, & r_{я.ц.} &= 25,8 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$M_n = 0,304 \text{ Нм}, \quad P_{\text{гном}} = 38 \text{ Вт},$$

$$J_\delta = 0,0006 \text{ кг} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{ном}} = 0,123 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Коэффициент использования двигателя по мощности

$$P = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{д.ном}}} = \frac{7,5}{38} = 0,2$$

По графику, приведенному на рис. 4 определяются значения поправочных коэффициентов, с целью обеспечения устойчивости САУ.

$$q = 0,11; \quad T = 5; \quad \lambda_q = 0,02$$

Коэффициенты приближенного уравнения динамики электродвигателя

$$K_e = \frac{U_{\text{ном}} - \alpha_t r_{\text{я.ц.}} I_{\text{я.ном.}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{110 - 1,2 \cdot 25,8 \cdot 0,58}{3000} = 0,0307 \text{ В} \cdot \text{мин}$$

и $K_M = \frac{K_e}{0,105}; \quad K_M = \frac{1}{0,105} 0,0307 = 0,292 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$

Здесь $\alpha_t = 1,2$ – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмотки якоря при нагреве.

Коэффициент передачи двигателя по управляющему сигналу:

$$K_\delta = \frac{1}{K_e} = \frac{1}{0,0307} = 32,57 \frac{1}{\text{мин} \cdot \text{В}} \left(3,4 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}} \right).$$

Коэффициент передачи двигателя по изменению нагрузки (по возмущению):

$$K_H = \frac{\alpha_t r_{\text{я.ц.}}}{K_e K_M} = \frac{1,2 \cdot 25,8}{0,0307 \cdot 0,292} = 3453,7 \frac{1}{\text{мин} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} \left(361,5 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} \right)$$

Коэффициент передачи редуктора выбирается из условия обеспечения максимального быстродействия (минимального времени обработки)

$$K_p = q \frac{M_n}{2M_n} = 0,11 \frac{0,304}{2 \cdot 20} = 0,00084$$

Для сравнения вычисляем величину K_p из условия использования максимальной мощности электродвигателя

$$K_p = 2 \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{хх}} = 2 \cdot 0,26 / 363,5 = 0,00144,$$

где $\omega_{\text{хх}}$ – угловая скорость холостого хода

$$\omega_{\partial} = \frac{\pi}{30} \frac{n_{ном}}{1 - \frac{r_{я.ц.} \cdot I_{я.ном.}}{U_{ном}}} = \frac{3,14}{30} \left(\frac{3000}{1 - \frac{25,8 \cdot 0,58}{110}} \right) = 363,5 \frac{рад}{с}$$

$$\omega_{max} = 15/57,3 = 0,26 \text{ рад/с}$$

Принимаем $K_p = 0,0011$ (среднее значение).

Передаточное число редуктора $i_p = 1/K_p = 1/0,0011 = 910$.

Время отработки рассогласования $\Delta\alpha = 180^\circ$ составит

$$t = \frac{\Delta\alpha}{K_p \omega_{xx}} = \frac{3,14}{0,0011 \cdot 314} = 9,1 \text{ с,}$$

$$\text{где } \omega_{xx} = \frac{\pi n_{xx}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \frac{рад}{с}$$

Момент инерции на валу двигателя с учетом момента инерции нагрузки $J = \alpha_t J_{\partial} + K_p^2 J_H = 1,2 \cdot 0,0006 + 0,0011^2 \cdot 240 = 0,0001 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Постоянная времени двигателя

$$T_{\partial} = \frac{1}{9,55} J \frac{\alpha_t r_{я.ц.}}{K_e K_M} = \frac{K_H \cdot J}{9,55} = \frac{0,001 \cdot 3453,7}{9,55} = 0,36 \text{ с, где}$$

$1/9,55$ – переводной коэффициент ω [рад/с] = $1/9,55 \cdot n$ [об/мин].

Коэффициент передачи датчика

$$K_{\alpha} = \frac{U_{\alpha_{max}}}{\alpha_{max}} = \frac{24 \cdot 57,3}{90} = 15,3 \text{ В/рад}$$

Выбираем питание датчика $U_{\alpha_{max}} = 24\text{В}$, а угол поворота движка потенциометра наведения $\alpha_{1max} = 90^\circ$.

Коэффициент передачи привода к датчику обратной связи

$$K_{oc} = \frac{\alpha_{oc}}{\alpha_2} = \frac{90^\circ}{360^\circ} = 0,25$$

Коэффициент передачи усилителя определяется из условия получения заданной точности отработки, которая в свою очередь задается зоной нечувствительности сигнала, снимаемого с датчика обратной связи в %.

$$\delta\alpha = (5 \div 10)\% \alpha_{oc.max}. \text{ Для } \alpha_{oc.max} = 90^\circ \quad \delta\alpha = 9^\circ (0,157 \text{ рад})$$

Минимальный сигнал на входе усилителя при этом составит:

$$U_{\delta} = K_{\alpha} \cdot \delta\alpha = 15,3 \cdot 0,157 = 2,4 \text{ В}$$

Коэффициент передачи усилителя

$$K_y = qK_{y.\max} = q \frac{U_{mp.\max}}{U_{\delta}} = 0,11 \frac{55}{2,4} = 2,52$$

Здесь $U_{mp.\max}$ – максимальное значение напряжения, подаваемого на обмотки якоря при трогании. Обычно принимают $U_{mp.\max} = U_{y.\max}/2$. При $U_{y.\max} = U_{ном}$, $U_{mp.\max} = 110/2 = 55 \text{ В}$.

В приводе с электродвигателем постоянного тока тип усилителя выбирается исходя из потребной мощности. При мощности от нескольких десятков долей Ватт до нескольких десятков Ватт используются электронные и полупроводниковые усилители, а свыше – электромашинные. Широко применяются комбинированные усилители, состоящие из двух-трех и более типов усилителей, где используются достоинства каждого типа. Постоянная времени T_y чаще всего определяется при расчете усилителя или определяется экспериментально. В данном случае при предварительном расчете САУ постоянную времени T_y можно задать для электронных и полупроводниковых усилителей со сглаживающим фильтром $T_y = 0,01 \div 0,1 \text{ с}$, а для электромашинного усилителя $T_y = 0,05 \div 0,25 \text{ с}$.

Выбираем полупроводниковый усилитель с $T_y = 0,05 \text{ с}$.

Коэффициент передачи разомкнутой системы (добротность):

$$K = K_{\alpha} K_y K_{\delta} K_p = 15,3 \cdot 2,52 \cdot 3,4 \cdot 0,0011 = 0,144 \text{ с}^{-1}.$$

7.3. Анализ динамических свойств следящего электропривода

Оценка устойчивости и качества работы следящего электропривода осуществляется по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам (ЛАЧХ) и по приближенным кривым переходного процесса.

В соответствии с изложенным в разделе 5.1, при исследовании устойчивости замкнутой системы по критерию Найквиста сначала требуется определить устойчивость соответствующей разомкнутой системы и построить ее ЛАЧХ.

7.3.1. Исследование устойчивости разомкнутой системы

Передаточная функция разомкнутой системы представлена формулой (4). Подставляя в нее значения найденных коэффициентов K , T_y , T_g , получим:

$$W(P) = \frac{0,144}{p(0,05p + 1)(0,36p + 1)} \quad (8)$$

Характеристическим уравнением разомкнутой системы является выражение, стоящее в знаменателе передаточной функции (8):

$$p(0,05p + 1)(0,36p + 1) = 0 \quad (9)$$

Для исследования знака корней этого уравнения нет необходимости прибегать к использованию какого-либо критерия устойчивости, так как корни легко находятся приравниванием каждого сомножителя в (9) нулю:

$$p_1 = 0; \quad p_2 = -1/0,05; \quad p_3 = -1/0,36 .$$

Для устойчивости линейной САУ необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения были отрицательны. Наличие нулевого корня в характеристическом уравнении позволяет судить, что разомкнутая система находится на границе устойчивости (то есть, система нейтральна).

7.3.2. Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы

Заменяя в (8) оператор P на $j\omega$, получим выражение для амплитудно-частотной характеристики.

$$W(j\omega) = \frac{0,144}{j\omega(0,05j\omega + 1)(0,36j\omega + 1)} . \quad (10)$$

После чего находится логарифмическая амплитудно-частотная характеристика:

$$20\lg|W(j\omega)| = 20\lg 0,144 - 20\lg|j\omega| - 20\lg|0,05j\omega + 1| - 20\lg|0,36j\omega + 1|.$$

Строим асимптотические характеристики, которые представляют собой отрезки прямых линий, сопрягающиеся при частотах $\omega = 1/T$, где T – постоянная времени звена. Рассматриваемая система состоит из одного интегрирующего звена, усилительного звена и двух апериодических звеньев первого порядка. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика интегрирующего звена представляет прямую с наклоном 20 дБ/дек, проходящую через точку $\omega=1$ на оси частот.

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики апериодических звеньев при $K=1$ состоят из двух прямых – одной, совпадающей с осью частот, и второй, проходящей с наклоном 20 дБ/дек к оси частот. Обе прямые сопрягаются на оси частот в точке $\omega=1/T$. Сопрягающие частоты равны

$$\omega_1 = 1/0,05 = 20; \quad \omega_2 = 1/0,36 = 28.$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика, соответствующая усилительному звену с коэффициентом передачи $K=0,144$ представляет собой прямую, параллельную оси частот и отстоящую от нее на расстоянии $20\lg 0,144 = -16,8$ дБ. Складывая характеристики звеньев, получим искомую логарифмическую амплитудно-частотную характеристику системы $L(\omega)$. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики изображены на рис. 8.

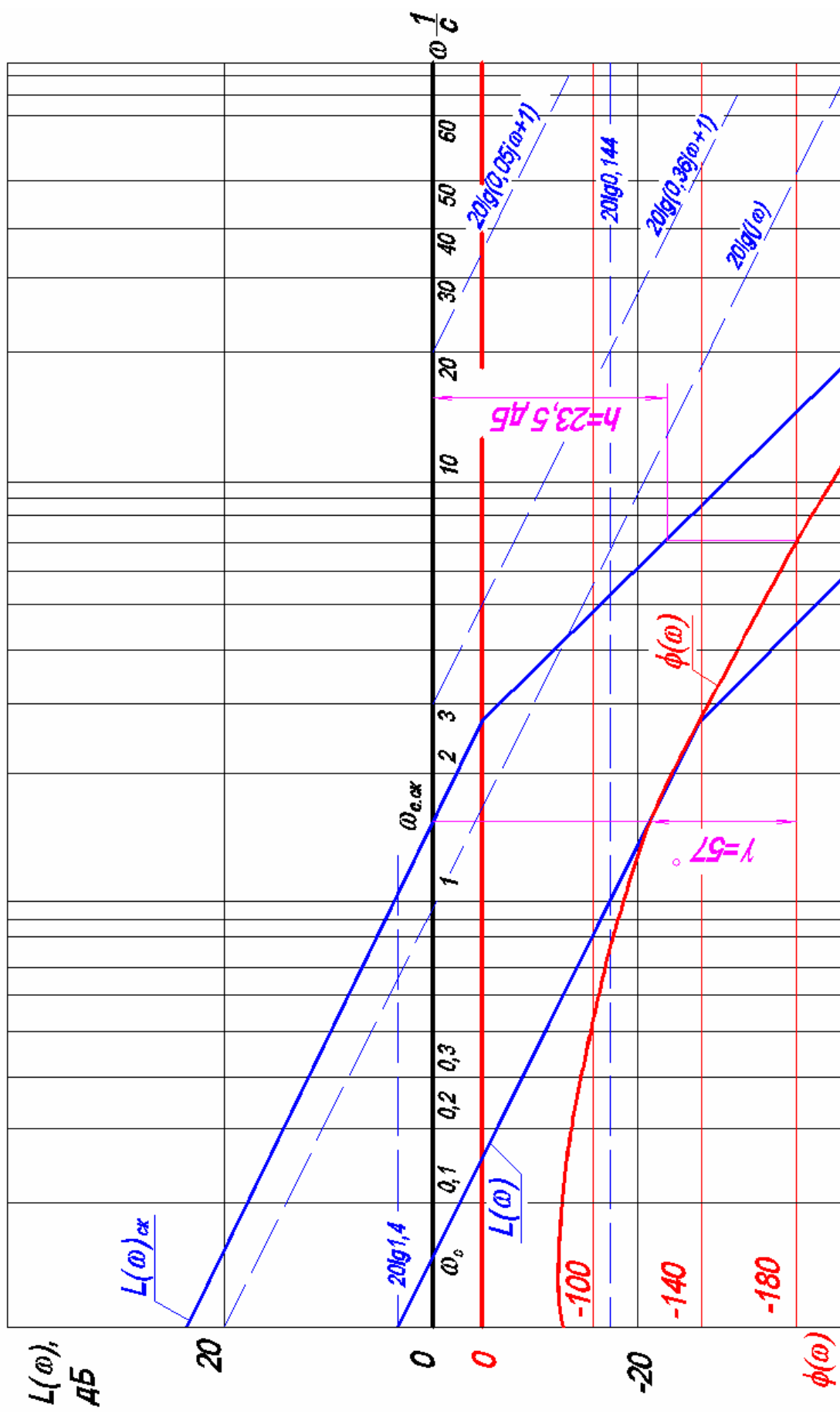


Рис. 8. Определение запасов устойчивости по частотным характеристикам системы

Для построения логарифмических фазовых частотных характеристик звеньев определяем фазовый угол φ для каждого звена:

$$\varphi = \operatorname{arctg}[V(\omega)/U(\omega)]$$

Просуммировав значения фазовых углов для определенных частот получим фазовую характеристику системы $\varphi(\omega)$. Для этого передаточную характеристику разомкнутой системы представляем в виде произведения трех частотных характеристик:

$$W_1(j\omega)=1/j\omega; \quad W_2(j\omega)=1/(0,05j\omega+1); \quad W_3(j\omega)=1/(0,36j\omega+1),$$

умноженных на $K=0,144$.

Выделяя вещественную и мнимую часть, получим вещественные и мнимые частотные характеристики звеньев.

$$W_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = -j \frac{1}{\omega}; \quad U_1(\omega) = 0; \quad V_1 = -\frac{1}{\omega}.$$

$$W_2(j\omega) = \frac{1}{0,05j\omega + 1} = \frac{-0,05j\omega + 1}{0,0025\omega^2 + 1}; \quad U_2(\omega) = \frac{1}{0,0025\omega^2 + 1};$$

$$V_2(\omega) = -\frac{0,05\omega}{0,0025\omega^2 + 1}.$$

$$W_3(j\omega) = \frac{1}{0,36j\omega + 1} = \frac{-0,36j\omega + 1}{0,1296\omega^2 + 1}; \quad U_3(\omega) = \frac{1}{0,1296\omega^2 + 1};$$

$$V_3(\omega) = -\frac{0,36\omega}{0,1296\omega^2 + 1};$$

Расчет фазовой характеристики приведен в таблице 1, а ее графическая зависимость показана на рис. 8.

Таблица 1

Пример расчета фазовой характеристики $\varphi(\omega)$

$\frac{\omega}{1/c}$	0,1	1,00	5,00	10,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	200	500
V_1	-10,00	-1,000	-0,200	-0,100	-0,050	-0,025	-0,017	-0,012	-0,010	-0,005	-0,002
U_1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
φ_1	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90
V_2	-0,005	-0,050	-0,235	-0,400	-0,500	-0,400	-0,300	-0,235	-0,192	-0,099	-0,040
U_2	0,999	0,997	0,941	0,800	0,500	0,200	0,100	0,059	0,038	0,010	0,002
φ_2	-0,29	-2,86	-14,04	-26,56	-45,000	-63,43	-71,56	-75,92	-78,82	-84,23	87,13
V_3	-0,036	-0,319	-0,423	-0,257	-0,136	-0,069	-0,046	-0,035	-0,028	-0,014	-0,005
U_3	0,999	0,885	0,235	0,071	0,019	0,005	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
φ_3	-2,06	-19,80	-60,98	-74,56	-82,040	-85,85	-87,51	-88,01	-88,34	-89,17	-90,00

φ^* -92,35 -112,5 -165,0 -191,1 -217,0 -239,2 -249,0 -253,9 -257,1 -263,4 -267,0

$$*\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$$

7.3.3. Оценка устойчивости и качества следящего привода по ЛАЧХ

Воспользовавшись формулировкой критерия Найквиста, убеждаемся, что построенная замкнутая система управления является устойчивой, так как соответствующая разомкнутая система нейтральна, а переход фазовой характеристики $\varphi(\omega)$ через ось частот ($\varphi(\omega) = -180^\circ$) осуществляется при отрицательных значениях $L(\omega)$ (рис. 8).

Анализируя результаты построения логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики видим, что замкнутая система следящего электропривода имеет большие запасы устойчивости по амплитуде $h=42,5$ дБ и по фазе $\gamma = -90^\circ \div -180^\circ = 90^\circ$. При частоте среза $\omega_{cp} = 0,135$ амплитудная ха-

рактеристика $L(\omega)$ имеет наклон -20 дБ/дек. Для выполнения условия $2 \leq \frac{\omega_K}{\omega_{cp}} \leq 4$ с целью обеспечения требуемых показателей качества САУ, на

рис. 8 построена скорректированная амплитудная характеристика $L(\omega)_{ск}$. Она проведена параллельно характеристике $L(\omega)$ через частоту среза $\omega_{cp ск}$, которая находится из условия (6):

$$\omega_{cp ск} = \omega_K / 2 = 28 / 2 = 14 \text{ 1/с, так как в данном случае } \omega_K = \omega_I = 28 \text{ 1/с.}$$

Для того, чтобы система имела такую ЛАЧХ необходимо, чтобы её добротность составила 1,4 с. Требуемая добротность САУ определяется по величине $L(\omega)_{ск}$ при $\omega=1$.

$L(\omega=1)_{ск} = 20 \lg K_{ск} = 3$ дБ, $\lg K_{ск} = 3/20$, откуда получаем $K_{ск} \approx 1,4$. Для получения значения $K=1,4$ увеличиваем коэффициент передачи усилителя:

$$K_y = K_{ск} / (K_\alpha K_\delta K_p) = 1,4 / (15,3 \cdot 3,4 \cdot 0,0011) = 24,5 \text{ с.}$$

7.3.4. Построение характеристики переходного процесса

Для определения показателей качества строится переходная характеристика $H(t)$. Она рассчитывается по вещественной частотной характеристике замкнутой системы. Передаточная функция скорректированной замкнутой системы по управляющему сигналу представлена формулой (5). После подстановки численных значений она будет иметь вид

$$\Phi(p) = \frac{1,4}{p(0,05p+1)(0,36p+1)+0,35} = \frac{1,4}{0,017p^3 + 0,41p^2 + p + 0,35} \text{ .Заме}$$

нив оператор P на $j\omega$, разделелим вещественную и мнимую части

$$\begin{aligned} \Phi(j\omega) &= \frac{1,4}{-0,017j\omega^3 - 0,41\omega^2 + j\omega + 0,35} = \frac{1,4}{(0,35 - 0,41\omega^2) + j(\omega - 0,017\omega^3)} = \\ &= \frac{1,4(0,35 - 0,41\omega^2) - j1,4(\omega - 0,017\omega^3)}{(0,35 - 0,41\omega^2)^2 + (\omega - 0,017\omega^3)^2} \end{aligned}$$

Вещественная характеристика

$$P(\omega) = \frac{0,49 - 0,574\omega^2}{(0,35 - 0,41\omega^2)^2 + (\omega - 0,017\omega^3)^2}$$

Таблица 2

Расчет характеристики $P(\omega)$

ω 1/c	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
$P(\omega)$	4,00	3,72	3,09	1,12	0,19	-0,09	-0,33	-0,35	-0,33	-0,00

Вещественная характеристика $P(\omega)$ и ее разбиение на трапеции показано на рис. 9. Параметры трапеций:

$$P_1(0) = 4,4 ; \quad \omega_1 = 0,15 ; \quad \omega_{01} = 0,9 ; \quad \chi_1 = \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \frac{0,15}{0,9} = 0,17 ;$$

$$P_2(0) = -0,4 ; \quad \omega_2 = 2,5 ; \quad \omega_{02} = 4,25 ; \quad \chi_2 = \frac{\omega_2}{\omega_{02}} = \frac{2,5}{4,25} = 0,59 .$$

По таблице h -функций для каждого значения времени находятся переходной функции для единичной трапеции.

Таблица 3

Значения функции $h(\tau)$

	Время τ							
	0	1	2	4	10	15	20	25
$\chi_1=0,17$	0	0,363	0,669	1,013	1,027	1,010	1,00	0,997
$\chi_2=0,59$	0	0,490	0,878	1,158	0,993	1,002	0,992	1,004

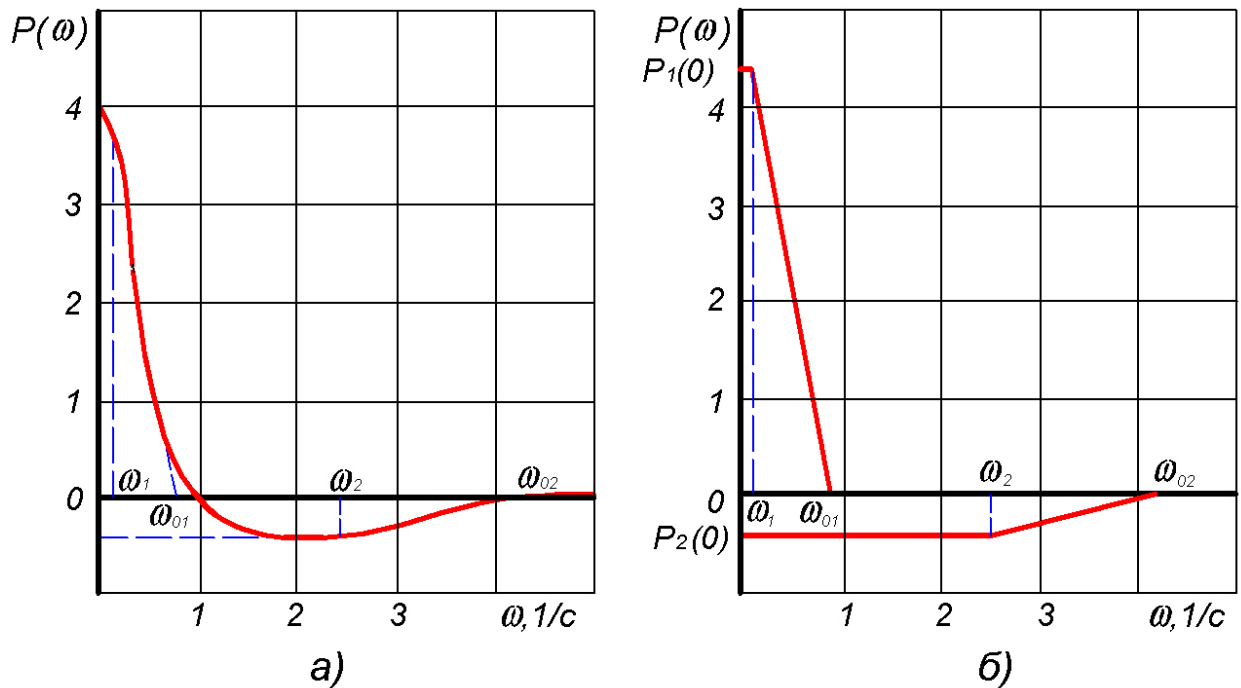


Рис. 9. Пример разбиения на трапеции вещественной характеристики

Умножая ординаты на начальную высоту трапеции $P(0)$ деля время τ на частоты ω_{0i} , равные соответственно 0,9 и 4,25 1/с, получим две кривые переходного процесса $H_1(t)$, $H_2(t)$ сумма которых соответствует переходному процессу системы $H(t)$.

Таблица 4

Значения переходной функции

t_1 , сек	0	1,1	2,2	4,4	11,1	16,7	22,2	27,8
$H_1(t)$	0	1,6	2,94	4,46	4,52	4,44	4,40	4,39
t_2 , сек	0	0,23	0,47	0,94	2,35	3,53	4,71	5,88
$H_2(t)$	0	-0,2	-0,35	-0,46	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40

Кривые $H_1(t)$, $H_2(t)$ для двух трапеций и общая кривая переходного процесса показаны на рис. 10.

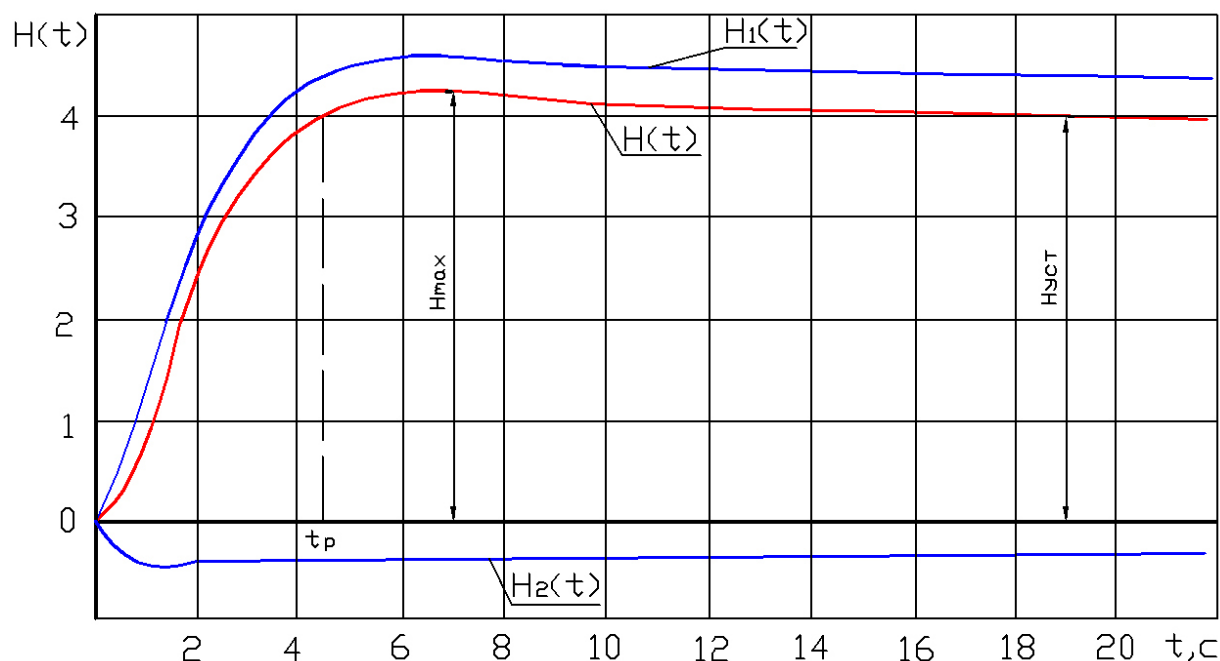


Рис. 10. Построение кривой переходного процесса

По переходной характеристике определяется время регулирования $t_p=4,5$ и максимальное перерегулирование δ :

$$\delta = \frac{H_{Max} - H_{уст}}{H_{уст}} 100 = \frac{0,25}{4} 100 = 6,25 \%$$

Сравнивая полученные показатели с заданными ($t_p < 2$ с и $\delta < 25\%$), приходим к выводу о необходимости введения дополнительных корректирующих устройств, увеличивающих быстродействие системы.

Вопросы выбора корректирующих элементов в данной курсовой работе не рассматриваются.

7.4. Выбор кинематической схемы механизма поворота

Для механизма поворота выбрана кинематическая схема приведенная на рис. 7. Передаточное число моторного привода $i_p=910$, определяется следующими составляющими:

$$i_p = i_1 i_2 i_{nn} i_3 i_{kn}, \text{ где}$$

i_1 – передаточное число первой от электромотора пары шестерен;

i_2 – передаточное число второй от электромотора пары шестерен;

i_{nn} – передаточное число планетарной передачи (от солнечной шестерни к водилу);

i_3 – передаточное число предпоследней пары зацепления;

i_{kn} – передаточное число зацепления конечной шестерни.

На основании рекомендаций принимаем для зубчатого венца, закрепленного на объекте управления, диаметром 1600 мм модуль $m=5$ мм. Число зубьев при этом $Z=1600/5=320$. Передаточное число конечной пары зацепления обычно принимают $i_{kn}=14 \div 20$. Задаемся $i_{kn}=14$. Число зубьев ведущей шестерни конечной пары найдем как $Z_{3-2}=320/14=22,86$. Принимаем $Z_{3-2}=20$, тогда $i_{kn}=320/20=16$. Задаемся числом зубьев ведущей шестерни предпоследней передачи $Z_{3-1}=11$, откуда $i_3 = \frac{z_{3-2}}{z_{3-1}} = \frac{20}{11} = 1,85$. Передаточное число планетарного ряда $i_{nn} = 1+K$, где K – параметр планетарного ряда. При

$K=3,5$ $i_{nn}=1+3,5=4,5$. Если принять, что $i_1 = \frac{z_{1-2}}{z_{1-1}} = \frac{33}{11} = 3$ равно макси-

мально возможному значению передаточного числа для цилиндрических шестерен, то передаточное число второй пары зацепления найдем из общего

значения i_p : $i_2 = \frac{i_p}{i_1 i_{III} i_3 i_{KII}} = \frac{910}{3 \cdot 4,5 \cdot 1,45 \cdot 16} = 2,9$ Числа зубьев для этой

пары выбирают с учетом межцентрового расстояния, зависящего от размеров тормоза и предохранительного фрикциона. При $Z_{2-2}=50$, $Z_{2-1}=50/2, =17,2$. Принимаем $Z_{2-1}=17$ и $i_2=2,9$.

Момент предохранительного фрикциона определяется по величине наибольшего пускового момента электродвигателя M_n

$$M_{\phi} = M_n \cdot i_{m-\phi} \cdot \eta_{m-\phi} = 0,304 \cdot 8,8 \cdot 0,94 = 2,5 \text{ Нм,}$$

где $i_{m-\phi} = i_1 \cdot i_2 = 3 \cdot 2,94 = 8,8$;

$$\eta_{m-\phi} = 0,97 \cdot 0,97 = 0,94.$$

Передаточное число ручного привода

$$i_{pn} = \frac{K_3 M_n}{RP \eta_{pn}} = \frac{10 \cdot 20}{0,1 \cdot 50 \cdot 0,4} = 100, \text{ где}$$

K_3 – коэффициент запаса ($K_3=8...10$);

R – радиус рукоятки, $R=0,1$ м;

P – допустимое усилие на рукоятке, $P=3\div 5$ кг;

η_{pn} – КПД ручного привода. Для червячной передачи $\eta_{pn}=0,4\div 0,7$.

$$i_{pn} = i_{чп} \cdot i_{nn}^* \cdot i_3 \cdot i_{кп}, \text{ где}$$

$$i_{nn}^* = (1 + k)/k = (1 + 3,5)/3,5 = 1,3;$$

$$i_{чп} = \frac{i_{pn}}{i_{nn}^* i_3 i_{кп}} = \frac{100}{1,3 \cdot 1,45 \cdot 16} = 17.$$

Выбираем однозаходную червячную передачу. Число зубьев червячного колеса $Z=17$.

8. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ

Работа должна иметь титульный лист, введение, в котором указывается назначение привода и исходные данные для расчета. В разделе 1 приводится принципиальная и функциональная схема САУ, описание её работы, уравнения динамических звеньев, передаточные функции и структурная схема. В разделе 2 приводятся результаты статического расчета по выбору типа двигателя и определения коэффициентов передаточной функции системы. В разделе 3 приводится анализ устойчивости и качества САУ. В разделе 4 приводится кинематическая схема механизма поворота, описание её состава и работы, расчёт числа зубьев шестерен. В выводах указывается марка и мощность выбранного электродвигателя, приводятся значения полученных коэффициентов и параметров характеризующих устойчивость и качество САУ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов В.Н.** Основы теории автоматического регулирования и управления. М.: «Высшая школа», 1977.
- 2. Расчет автоматических систем.** Под редакцией А.В. Фатеева. М.: «Высшая школа», 1973.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1п

Технические данные двигателей постоянного тока с независимым возбуждением серии МИ

Тип двиг.	U _{НОМ} В	n _{НОМ} мин ⁻¹	P _{НОМ} кВт	I _{я.НОМ} А	I _{в.НОМ} А	r _{я.ц} Ом	r _а Ом	M _{НОМ} НМ 9,81 10 ⁻²	GD ² кг м ²
МИ-11	60	3000	0,12	2,86	0,27	0,460	223	3,9	0,006
	60	2000	0,10	2,27	0,27	0,940	223	4,9	0,006
	110	3000	0,12	1,53	0,17	1,480	642	3,9	0,006
	110	2000	0,10	1,22	0,17	3,000	642	4,9	0,006
МИ-12	60	3000	0,20	4,57	0,28	0,230	218	6,4	0,008
	60	2000	0,12	2,72	0,28	0,520	218	5,8	0,008
	110	3000	0,20	2,46	0,20	0,756	560	6,4	0,008
	110	2000	0,12	1,46	0,20	1,740	560	5,8	0,008
МИ-21	60	3000	0,25	5,60	0,20	0,284	306	8,0	0,014
	60	2000	0,20	4,30	0,20	0,645	306	9,7	0,014
	110	3000	0,25	3,05	0,13	0,945	827	8,0	0,014
	110	2000	0,20	2,33	0,13	2,200	827	9,7	0,014
МИ-22	60	3000	0,37	8,20	0,23	0,195	264	11,9	0,016
	60	2000	0,25	5,50	0,23	0,360	264	12,2	0,016
	60	1000	0,12	2,60	0,23	1,440	264	11,6	0,016
МИ-22	110	3000	0,37	4,40	0,14	0,546	934	12,0	0,016
	110	2000	0,25	2,90	0,14	1,290	790	12,0	0,016
	110	1000	0,12	1,40	0,14	4,580	790	11,7	0,016
МИ-31	60	3000	0,45	10,30	0,41	0,204	145	14,5	0,036
	60	2000	0,37	8,20	0,41	0,405	145	18,0	0,036
	60	1000	0,20	4,40	0,41	1,320	145	19,5	0,036
МИ-31	110	3000	0,45	5,60	0,24	0,585	460	14,5	0,036
	110	2000	0,37	4,40	0,24	1,160	460	18,0	0,036
	110	1000	0,20	2,40	0,24	3,930	460	19,4	0,036
МИ-32	110	2500	0,76	8,20	0,43	0,391	258	29,5	0,053
	110	1500	0,45	5,00	0,43	0,975	258	29,2	0,053
	110	1000	0,37	4,20	0,43	2,210	258	35,9	0,053
МИ-32	220	2500	0,76	4,10	0,23	1,360	950	29,5	0,160
	220	1500	0,45	2,50	0,23	3,810	950	29,2	0,160
	220	1000	0,37	2,10	0,23	8,570	950	35,9	0,160
МИ-42	110	2500	3,20	36,30	0,62	0,100	178	121,0	0,260
	110	1500	1,60	18,20	0,62	0,320	178	103,8	0,260
	110	1000	1,10	12,60	0,62	0,750	178	106,7	0,260
МИ-42	220	2500	3,20	18,00	0,31	0,376	715	121,0	0,260
	220	1500	1,60	9,10	0,31	1,280	715	103,8	0,260
	220	1000	1,10	6,30	0,31	2,950	715	106,7	0,260
МИ-51	220	2500	5,00	27,20		0,164	435	194,7	0,500
	220	1500	3,20	17,10		0,460	435	207,7	0,500
	220	1000	1,60	8,70		1,100	435	155,7	0,500
МИ-52	220	2500	7,00	37,00		0,088	312	272,5	0,600
	220	1500	4,50	23,30		0,260	312	292,0	0,600
	220	1000	2,50	13,10		0,569	312	243,3	0,600
МИ-41	110	2500	1,60	19,20	0,43	0,249	255	62,0	0,160
	110	1500	1,10	13,00	0,43	0,670	255	71,4	0,160
	110	1000	0,76	9,00	0,43	1,300	255	74,0	0,160
МИ-41	220	2500	1,60	9,50	0,33	0,930	670	62,0	0,260
	220	1500	1,10	6,40	0,33	2,630	670	71,4	0,260
	220	1000	0,76	4,50	0,33	5,320	670	73,7	0,260

Технические данные маломощных двигателей постоянного тока СЛ

Тип двигателя	$U_{\text{НОМ}}$ В	$n_{\text{НОМ}}$ МИН ⁻¹	$P_{\text{НОМ}}$ Вт	$I_{\text{ЯНОМ}}$ А	$r_{\text{я.ц}}$ Ом ($t=20^{\circ}\text{C}$)	$M_{\text{НОМ}}$ Нм $9,81 \cdot 10^4$	M_{H} Нм 10^{-3}	$J_{\text{г}}$, КГ·М ² $9,8110^{-5}$
СЛ-121	110	4500	7,5	0,16	240	14	42	0,039
СЛ-161	110	4000	8,6	0,17	170	21	80	0,053
СЛ-221	110	3600	13	0,25	117	35	90	0,140
СЛ-221А	110	3600	13	0,25	117	35	90	0,140
СЛ-261	110	3600	24	0,41	51	65	200	0,200
СЛ-281	24	5200	26	2,16	1,15	50	125	0,200
СЛ-321	110	3000	38	0,58	25,8	125	310	0,600
СЛ-361	110	3000	50	0,75	20,5	160	400	0,700
СЛ-369	110	3600	55	0,80	15,2	150	450	0,700
СЛ-521	110	3000	77	1,07	8,5	250	650	1,700
СЛ-521К	110	1000	20	0,37	74	200	635	1,700
СЛ-569	110	3600	175	1,96	3,6	475	925	2,700
СЛ-569К	110	850	36	0,58	40	420	1020	2,700
СЛ-621	110	2400	172	2,08	3,0	700	1250	6,750
СЛ-661	110	2400	230	2,66	1,73	925	1550	9,350
СЛ-571К	24	2200	95	6,15	0,31	420	750	2,700

Технические данные высокооборотных двигателей постоянного тока

Тип двигателя	$U_{\text{НОМ}}$ В	$n_{\text{НОМ}}$ ОБ/МИН	$P_{\text{НОМ}}$ Вт	$I_{\text{Я.НОМ}}$ А	$r_{\text{Я.Ц}}$ Ом	$M_{\text{НОМ}}$ Н·М 10^{-4}	J_g кг·м ² 10^{-4}
Д-61	15	3300	1,0	0,17	34,0	30	0,011
Д-61Г	28	3300	1,0	0,12	94,0	30	0,002**
ДМ-1,6-8	27	8000	1,6	0,30	38,0	20	0,006
Д-62	28	2600	4,0	0,35	34,0	150	0,028
ДРВ-56	27	10000	5,0	1,00	11,0	48	0,004**
ДК-11	26	5500	5,6	0,60	18,0	100	0,005**
СД-8	27	5500	8,0	1,40	8,0	130	0,010**
Д-82	28	4200	8,6	0,70	17,0	200	0,010**
ДМ-10-6	27	6000	10,0	1,50	7,5	160	0,038
Д-10-12	27	12000	10,0	0,93	12,0	80	0,150
ДПМ-30-Н6-024	28	6000	11,0	0,65	17,0	50	0,060
СА-10А	60/27*	6000	20,0	0,70	36,0	330	0,040
Д-25-1С	27	8400	20,0	1,60	7,0	290	0,010**
ДРВ-20А	27	10000	20,5	2,50	4,5	200	0,150
ДПМ-30-Н6-01	28	9000	22,5	1,20	10,0	70	0,800
ДМ-25-6А	27	6000	25,0	1,60	7,0	405	0,165
ДМ-40-6	27	6000	40,0	2,70	4,0	650	0,393
Д-40	27	7000	50,0	3,50	3,0	700	0,200**
Д-55	27	4500	55,0	4,00	3,0	970	0,170**
2Д-60А	27	7500	60,0	4,50	2,5	780	0,850
Д-100	26	5200	63,0	4,40	2,5	1050	0,280**
СД-75-7,5	60/27*	7500	75,0	2,00	12,6	1000	0,015**
ДРВ-150Б	27	7500	150,0	12,00	0,8	1950	1,830
СД-250А	60/27*	6000	250,0	6,50	4,0	4000	0,450**
Д-64	27	7700	1430,0	80,00	0,1	18000	7,000
ЭРМ-88Б	27	9150	2000,0	120,00	0,1	22000	9,500**

* — $U_{\text{НОМ. якорной цепи}}/U_{\text{НОМ. возбужд.}}$

** — Значения получены расчетным путем

Таблица 4п

Значения h-функций

$\tau \backslash \chi$	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,138	0,165	0,176	0,184	0,192	0,199	0,207	0,215	0,223	0,231
1,0	0,310	0,325	0,340	0,356	0,371	0,386	0,402	0,417	0,432	0,447
2,0	0,571	0,560	0,628	0,655	0,682	0,709	0,732	0,761	0,785	0,810
4,0	0,856	0,898	0,937	0,974	1,008	1,039	1,066	1,090	1,110	1,127
6,0	0,903	0,945	0,981	1,013	1,037	1,054	1,065	1,070	1,068	1,062
8,0	0,911	0,951	0,983	1,007	1,020	1,024	1,021	1,011	0,998	0,982
10,0	0,939	0,980	1,009	1,025	1,030	1,027	1,018	1,005	0,994	0,985
12,0	0,950	0,990	1,015	1,025	1,024	1,015	1,004	0,994	0,998	0,990
14,0	0,951	0,990	1,010	1,015	1,008	0,997	0,987	0,983	0,985	0,991
16,0	0,961	0,998	1,015	1,014	1,006	0,995	0,990	0,992	0,999	1,007
18,0	0,966	1,002	1,015	1,012	1,002	0,994	0,994	1,000	1,007	1,010
20,0	0,967	1,001	1,011	1,004	0,995	0,991	0,994	1,001	1,004	1,001
25,0	0,975	1,006	1,008	0,999	0,995	0,999	1,004	1,004	0,999	0,996

$\tau \backslash \chi$	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,240	0,248	0,255	0,259	0,267	0,275	0,282	0,290	0,297	0,304	0,314
1,0	0,461	0,476	0,490	0,505	0,519	0,534	0,547	0,561	0,575	0,590	0,602
2,0	0,831	0,856	0,878	0,899	0,919	0,938	0,957	0,974	0,991	1,008	1,022
4,0	1,141	1,151	1,158	1,162	1,163	1,161	1,156	1,150	1,141	1,132	1,119
6,0	1,051	1,036	1,020	1,001	0,984	0,956	0,949	0,934	0,922	0,914	0,907
8,0	0,966	0,952	0,941	0,934	0,932	0,936	0,944	0,955	0,970	0,986	1,002
10,0	0,982	0,984	0,993	1,006	1,020	1,036	1,049	1,059	1,063	1,062	1,056
12,0	0,997	1,007	1,018	1,026	1,029	1,025	1,015	1,000	0,984	0,970	0,958
14,0	0,999	1,005	1,005	0,998	0,987	0,975	0,965	0,961	0,965	0,976	0,991
16,0	1,010	1,008	1,001	0,994	0,990	0,993	1,003	1,018	1,031	1,040	1,039
18,0	1,008	1,001	0,997	0,997	1,004	1,014	1,020	1,018	1,008	0,993	0,978
20,0	0,995	0,991	0,992	0,998	1,003	1,001	0,991	0,980	0,972	0,975	0,986
25,0	1,000	1,004	1,004	0,998	0,996	1,000	1,007	1,008	0,998	0,984	0,975

Таблица 4

Варианты заданий

№ п/п	$M_H, H \cdot m$	$J_H, кг \cdot m^2$
1	0,10	0,04
2	0,20	0,08
3	0,31	0,12
4	0,42	0,16
5	0,54	0,20
6	1,60	3,0
7	3,40	4,0
8	4,80	6,0
9	6,50	8,0
10	7,00	9,0
11	9,50	12
12	12,0	15
13	12,8	16
14	16,0	20
15	19,0	24
16	22,2	28
17	24,0	30
18	50,0	200

№ п/п	$M_H, H \cdot m$	$J_H, кг \cdot m^2$
19	80,0	300
20	100	400
21	150	500
22	200	800
23	230	900
24	250	1000
25	300	1300
26	310	1350
27	350	1400
28	400	1600
29	450	1700
30	470	1800
31	500	2000
32	550	2200
33	600	2300
34	630	2400
35	750	2600
36	800	3000