

Задание на курсовой проект

В работе необходимо разработать систему автоматического регулирования (САР) размеров камней в камнедробилке при переменной крупности поступающего на дробление материала или при переменной производительности дробильной установки.

Объект регулирования в такой системе представляет собой апериодического звено первого порядка в первом приближении. Точность поддержания размеров подаваемого на дробление материала зависит от точности регулирования скорости вращения приводного электродвигателя в требуемом диапазоне ее изменения.

Упрощенная функциональная схема САР размеров материала в камнедробилке изображена на рисунке 1.

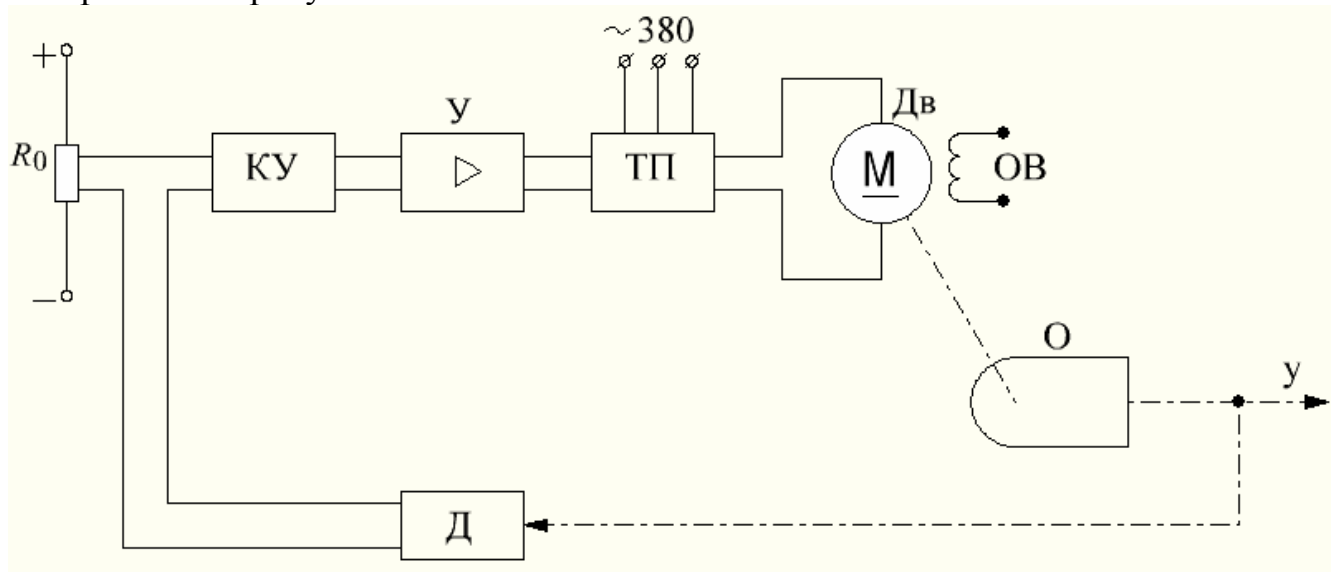


Рис.1 Функциональная схема САР крупности материала в камнедробилке

Состав схемы на рисунке 1:

КУ – корректирующее устройство;

У – усилитель;

ТП – тиристорный преобразователь;

Дв – электродвигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения (ОВ);

О – объект управления;

Д – датчик.

Электрические связи на функциональной схеме САР (рис. 1) показаны сплошными линиями, механические связи – штрих-пунктирными линиями. Датчик (Д) выполняет пропорциональное преобразование угловой скорости вращения ротора камнедробилки в сигнал электрического напряжения.

Элементы САР должны быть выбраны из условия обеспечения регулирования скорости электродвигателя в диапазоне, определяемом требованиями к объекту управления (О). Поставленная задача решается применением последовательной

коррекции. Скорость вращения электродвигателя постоянного тока регулируется напряжением в его якорной цепи с использованием тиристорного преобразователя (ТП). Пассивные цепи входящие в состав корректирующего устройства (КУ) разделяются промежуточными усилителями для исключения взаимного влияния. Корректирующий регулятор включает в себя пассивные цепи вместе с промежуточными усилителями.

Технические требования, предъявляемые к разрабатываемой САР

Согласно варианту поправочные коэффициенты: $\Gamma = 1$; $N = 31$.

Параметры системы:

- мощность двигателя, кВт: $P_n = 1,55N = 48,05$;
- напряжение якоря двигателя номинальное, В: $U_n = 220$;
- ток якоря двигателя номинальный, А: $I_n = 8N = 248$;
- скорость вращения двигателя номинальная, об/мин: $n_n = 750 \text{ об/мин}$;
- сопротивлению якорной цепи двигателя, Ом: $R_{я.ц} = \frac{3,2}{N} = 0,10323$;
- индуктивность якорной цепи, Гн: $L_{я.ц} = \frac{\Gamma}{40\sqrt{N}} = 4,4902 \text{ мГн}$;
- момент инерции системы электропривода, приведенный к якорю двигателя, кг·м²:
 $J = 0,02N^2 = 19,22$;
- постоянная времени объекта управления: $T_0 = 2T_{эм}$, где $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя, с;
- диапазон регулирования скоростей: $D = 3\Gamma : 1 = 3 : 1$;
- статическая ошибка регулирования выходного параметра, %: $\delta = 1,25\Gamma = 1,25$;
- допустимое перерегулирование, %: $\sigma = 10\Gamma = 10$;
- время регулирования, с: $t_p = 1,5\Gamma = 1,5$;
- произведение коэффициентов передачи объекта регулирования и датчика, В·с/рад: $k_0k_o = 0,1$;
- коэффициент передачи тиристорного преобразователя, А/В: $k_{ТП} = 30$.

Расчетная схема САР

САР молотковой или роторной камнедробилки можно пояснить по функциональной схеме рисунка 1. *Задающий* сигнал системы формируется потенциометром R_0 , который в виде электрического напряжения алгебраически суммируется с сигналом электрического напряжения датчика D , пропорционального угловой скорости вращения вала объекта O . Разностный сигнал этих напряжений подается на вход корректирующего устройства КУ, после которого усиливается усилителем $У$ до уровня необходимого для управления тиристорным преобразователем ТП, питающим якорь двигателя постоянного тока Дв. Двигатель раскручивает вал объекта O , скорость которого измеряется датчиком D . Таким образом, угловая скорость объекта управления O будет изменять до тех пор, пока разностный сигнал напряжений задатчика R_0 и

датчика Д не станет равным 0. При этом на выходе ТП сформируется определенное значение питающего якорь Дв напряжения и вал двигателя будет вращаться с постоянной скоростью. В случае возникновения нагрузки на валу Дв (засыпки в рабочую полость дробилки материала), т.е. появления *возмущающего* воздействия угловая скорость двигателя начнет снижаться, датчик Д выработает сигнал напряжения отличный от сигнала задачика R_0 и напряжение на выходе ТП изменится (повысится) что приведет к увеличению скорости вращения вала Дв. Таким образом, в системе осуществляется процесс автоматического поддержания скорости вращения рабочего вала объекта О (*регулируемого параметра*), пропорциональной задающему напряжению задачика R_0 . В САР осуществляется *управление по принципу отклонения управляемой переменной*, при котором обратная связь образует замкнутый контур. На управляемый объект подаётся воздействие, пропорциональное сумме (разности) между выходной переменной и заданным значением, так, чтобы эта сумма (разность) уменьшалась.

Разработка структурной схемы САР

Обобщенное позиционное изображение структурной схемы разрабатываемой САР приведено на рисунке 2.

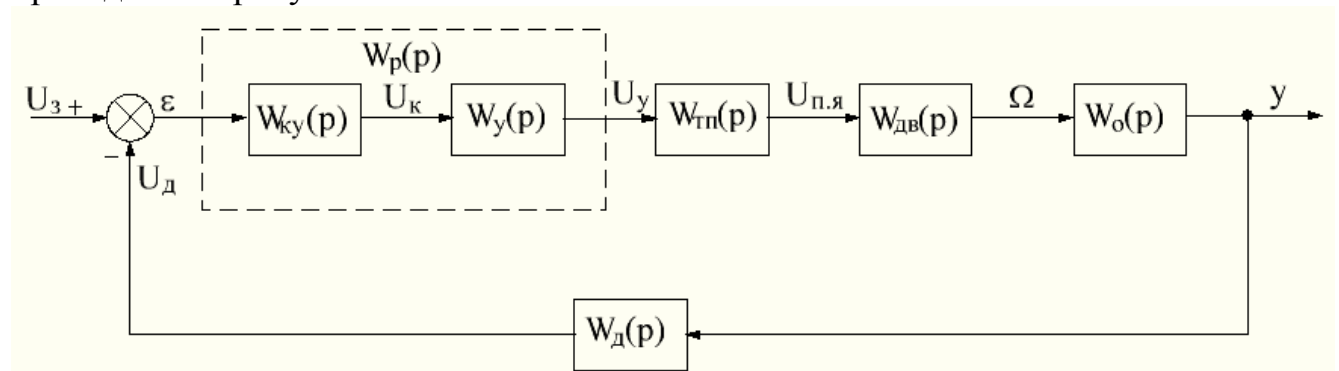


Рис. 2. Обобщенная структура САР камнедробилки

Структура САР (рис. 2) состоит из шести динамических звеньев, математически описывающих каждый элемент ее функциональной схемы (рис. 1).

$W_{кy}(p)$, $W_y(p)$ – передаточные функции корректирующего устройства и усилителя соответственно;

$W_p(p) = W_{кy}(p) \cdot W_y(p)$ – передаточная функция регулятора;

$W_{тп}(p)$ – передаточная функция тиристорного преобразователя;

$W_{дв}(p)$ – передаточная функция двигателя;

$W_о(p)$ – передаточная функция объекта.

Динамические свойства системы оцениваются относительно входного задающего сигнала $U_з$ и выходного сигнала датчика Д $U_д$, пропорционального изменению управляемой величины y . Компаратор формирует сигнал рассогласования ε , который преобразовывается в регуляторе согласно его уравнению в сигнал напряжения управления тиристорным преобразователем U_y , который формирует пропорциональный ему угол управления силовыми вентилями ТП, тем самым изменяя среднее значение выпрямленного напряжения $U_{п.я}$, приложенное к якорю

двигателя. Согласно системе электрического и механического равновесия двигателя постоянного тока, происходит преобразование величины питающего напряжения в угловую скорость вала, которая в объекте управления преобразуется в некоторую величину y . Величиной y может выступать угловая скорость рабочего вала камнедробилки.

Определим параметры динамических звеньев структуры САР, изображенной на рисунке 2.

Номинальная угловая скорость двигателя:

$$\Omega_n = \frac{\pi}{30} n_n = \frac{\pi}{30} \cdot 750 = 78,54 \text{ с}^{-1}.$$

Коэффициент передачи двигателя по каналу «напряжение якоря – скорость вращения»:

$$k_{ос} = \frac{\Omega_n}{U_{я.ц}} = \frac{78,54}{220} = 0,357.$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя:

$$T_{я.ц} = \frac{L_{я.ц}}{R_{я.ц}} = \frac{0.00449}{0.103} = 0.0435 \text{ с}.$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_{эм} = k_{ос}^2 \cdot J \cdot R_{я.ц} = 0.357^2 \cdot 19.22 \cdot 0.103 = 0.09027 \text{ с}.$$

Поскольку $4T_{я.ц} > T_{эм}$, то двигатель представляет собой колебательное звено с передаточной функцией:

$$W_{ос}(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{я.ц}(p)} = \frac{k_{ос}}{T_{я.ц} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1} = \frac{0.357}{0.00393 p^2 + 0.09027 p + 1}.$$

Передаточная функция объекта с датчиком:

$$W_o(p) \cdot W_{ос}(p) = \frac{k_o k_{ос}}{T_o p + 1} = \frac{0,1}{0,181 p + 1}.$$

Структурная схема САР с учетом характеристик динамических звеньев изображена на рисунке 3.

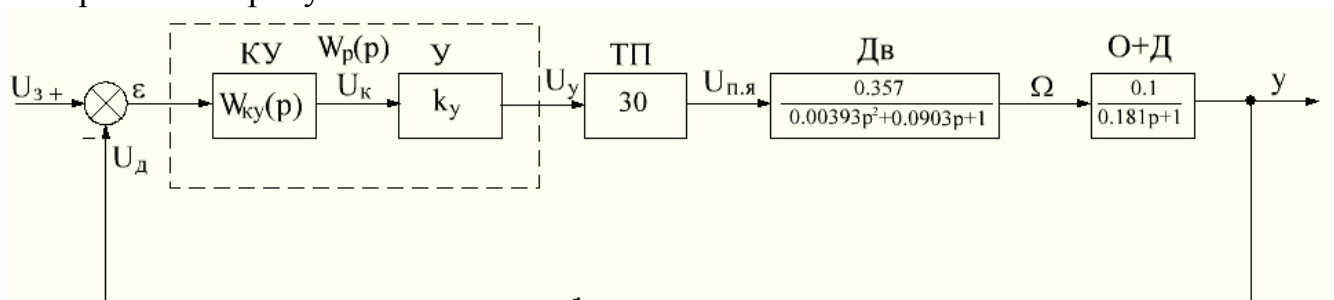


Рис.3 Структурная схема САР с обозначением параметров ее неизменяемой части

Статический расчет системы

Относительное изменение скорости электродвигателя в разомкнутой системе:

$$\delta_p = \frac{\Delta\Omega_p}{\Omega_n} \cdot 100\% = \frac{k_{ог} I_{ян} R_{ян}}{\Omega_n} \cdot 100\% = \frac{0.357 \cdot 248 \cdot 0.10323}{78.54} \cdot 100\% = 11.64\%.$$

Требуемый коэффициент передачи системы по условию обеспечения заданной статической точности регулирования скорости в требуемом диапазоне ее изменения:

$$k_{CAP} = \frac{\delta_p D}{\delta_c} - 1 = \frac{11.64 \cdot 3}{0.8 \cdot 1.25} - 1 = 33.91.$$

Требуемый коэффициент передачи регулятора (КУ+У):

$$k_p = \frac{k_{CAP}}{k_{ТП} \cdot k_{ог} \cdot k_o k_d} = \frac{33.91}{30 \cdot 0.357 \cdot 0.1} = 31.66.$$

Исследование устойчивости системы

Передаточная функция разомкнутой САР без коррекции динамических свойств:

$$W_p(p) = \frac{k_{CAP}}{(T_{яц} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) \cdot (T_o p + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутой нескорректированной САР:

$$W_3(p) = \frac{k_{CAP}}{(T_{яц} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) \cdot (T_o p + 1) + k_{CAP}}.$$

Характеристический полином замкнутой нескорректированной САР:

$$D(p) = (T_{яц} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) \cdot (T_o p + 1) + k_{CAP} = T_{яц} T_{эм} T_o p^3 + (T_{яц} T_{эм} + T_o T_{эм}) p^2 + (T_o + T_{эм}) p + 1 + k_{CAP}.$$

Коэффициенты характеристического полинома нескорректированной замкнутой САР:

$$a_3 = T_{яц} T_{эм} T_o = 7.089 \cdot 10^{-4};$$

$$a_2 = T_{яц} T_{эм} + T_o T_{эм} = 2.022 \cdot 10^{-2};$$

$$a_1 = T_o + T_{эм} = 0.271;$$

$$a_0 = 1 + k_{CAP} = 34.91.$$

Анализ устойчивости нескорректированной САР по Гурвицу

Составим главную матрицу Гурвица и ее диагональные миноры меньших порядков из коэффициентов характеристического полинома D(p):

$$G = \begin{bmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 & 0 \\ 7.089 \cdot 10^{-4} & 0.271 & 0 \\ 0 & 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 \end{bmatrix};$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 \\ 7.089 \cdot 10^{-4} & 0.271 \end{bmatrix};$$

$$G_1 = a_2 = 2.022 \cdot 10^{-2}.$$

Найдем определители матриц G и G_2 :

$$|G| = \begin{vmatrix} 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 & 0 \\ 7.089 \cdot 10^{-4} & 0.271 & 0 \\ 0 & 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 \end{vmatrix} = -0.673;$$

$$|G_2| = \begin{vmatrix} 2.022 \cdot 10^{-2} & 34.91 \\ 7.089 \cdot 10^{-4} & 0.271 \end{vmatrix} = -0.019.$$

Поскольку оба определителя отрицательны, то согласно алгебраическому критерию Гурвица, замкнутая САР будет неустойчивой.

Анализ устойчивости нескорректированной САР по Раусу

Составим таблицу Рауса, используя коэффициенты характеристического полинома $D(p)$:

-	$c_{11} = a_3 = 7.089 \cdot 10^{-4}$	$c_{21} = a_1 = 0.271$
-	$c_{12} = a_2 = 2.022 \cdot 10^{-2}$	$c_{22} = a_0 = 34.91$
$r_3 = \frac{c_{11}}{c_{12}} = 0.035$	$c_{13} = c_{21} - r_3 c_{22} = -0.953$	$c_{23} = 0$
$r_4 = \frac{c_{12}}{c_{13}} = -0.021$	$c_{14} = c_{22} - r_3 c_{23} = 34.91$	$c_{24} = 0$

Согласно критерию Рауса в устойчивой замкнутой системе все коэффициенты первого столбца должны быть положительны. Для заданной САР $c_{13} < 0$, следовательно, она не устойчива.

Оценка устойчивости САР по критерию Найквиста

Имеем выражение передаточной функции разомкнутой системы в виде:

$$W_p(p) = \frac{k_{САР}}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Выполним подстановку аргумента $p = j\omega$ в выражение $W_p(p)$:

$$\begin{aligned}
W_p(j\omega) &= \frac{k_{CAP}}{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + ja_1\omega + a_0} = \frac{k_{CAP}}{1 - a_2\omega^2 + j(a_1\omega - a_3\omega^3)} = \dots \\
&\dots = \frac{k_{CAP} \cdot (1 - a_2\omega^2 - j(a_1\omega - a_3\omega^3))}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2} = \dots \\
&\dots = \frac{k_{CAP}(1 - a_2\omega^2)}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2} + j \frac{k_{CAP}(a_3\omega^3 - a_1\omega)}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2}.
\end{aligned}$$

Вещественная и мнимая частотные характеристики разомкнутой системы:

$$P(\omega) = \operatorname{Re}[W_p(j\omega)] = \frac{k_{CAP}(1 - a_2\omega^2)}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2};$$

$$Q(\omega) = \operatorname{Im}[W_p(j\omega)] = \frac{k_{CAP}(a_3\omega^3 - a_1\omega)}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2}.$$

Выражения АЧХ и ФЧХ разомкнутой САР:

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} = \frac{\sqrt{[k_{CAP}(1 - a_2\omega^2)]^2 + [k_{CAP}(a_3\omega^3 - a_1\omega)]^2}}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2} = \dots$$

$$\dots = \frac{k_{CAP} \sqrt{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_3\omega^3 - a_1\omega)^2}}{(1 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2};$$

$$\varphi(\omega) = \arg[W_p(j\omega)] = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{a_3\omega^3 - a_1\omega}{1 - a_2\omega^2}.$$

По выражения ВЧХ, МЧХ, АЧХ и ФЧХ составим таблицу значений для диапазона частот $0 \dots 100 \text{ с}^{-1}$:

$\omega, \text{ с}^{-1}$	$P(\omega)$	$Q(\omega)$	$A(\omega)$	$\varphi(\omega), \text{ град.}$
0	33.91	0	33.91	0
1	32.165	-8.87	33.36	-15.41
5	9.08	-23.25	24.96	-68.66
7	0.11	-20.52	20.52	-89.67
10	-6.88	-13.44	15.1	-117.1
15	-7.82	-3.68	8.64	-154.8
20	-4.78	0.17	4.78	177.94
30	-1.4	0.895	1.66	147.36
40	-0.49	0.538	0,727	132.23
50	-0.21	0.315	0.377	123.43
60	-0.102	0.194	0.219	117.68
70	-0.066	0.143	0.158	114.7
80	-0.033	0.087	0.093	110.6
90	-0.021	-3.68	8.64	-2.7
100	-0.014	0.046	0.048	106.44

На рисунке 4 изображена АФЧХ разомкнутой САР, построенная по значениям функций $P(\omega)$, $Q(\omega)$.

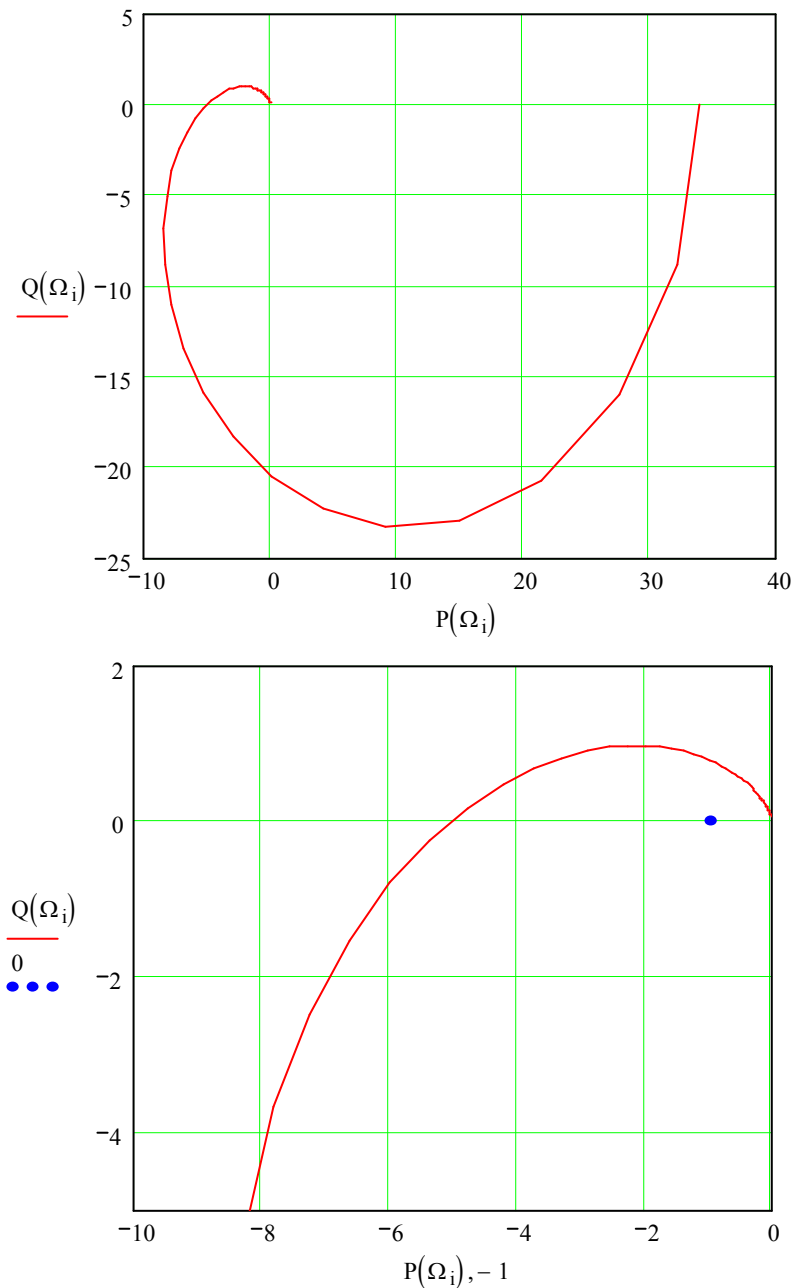


Рис. 4. АФЧХ разомкнутой САР в двух масштабах

Замкнутая САР не устойчива по Найквисту, поскольку АФЧХ охватывает критическую точку с координатами $(-1, j0)$.

Построение логарифмических частотных характеристики нескорректированной САР

Высота подъема ЛАЧХ по оси ординат на низких частотах:

$$20 \lg k_{САР} = 20 \lg(0.357) = 30.606 \text{ дБ.}$$

Определим сопрягающие частоты асимптотической ЛАЧХ разомкнутой САР:

$$\omega_{c1} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{0,181} = 5,54 \text{ c}^{-1};$$

$$\omega_{c2} = \frac{1}{\sqrt{T_{я.ц} \cdot T_{эм}}} = \frac{1}{\sqrt{0,043 \cdot 0,09}} = 15,96 \text{ c}^{-1}.$$

Асимптотическая ЛАЧХ разомкнутой САР (рис. 5) состоит из трех отрезков прямых с наклонами:

- 1) 0 дБ/дек в диапазоне до ω_0 ;
- 2) -20 дБ/дек в диапазоне до $\omega_0 \dots \omega_1$;
- 3) -40 дБ/дек в диапазоне от ω_1 .

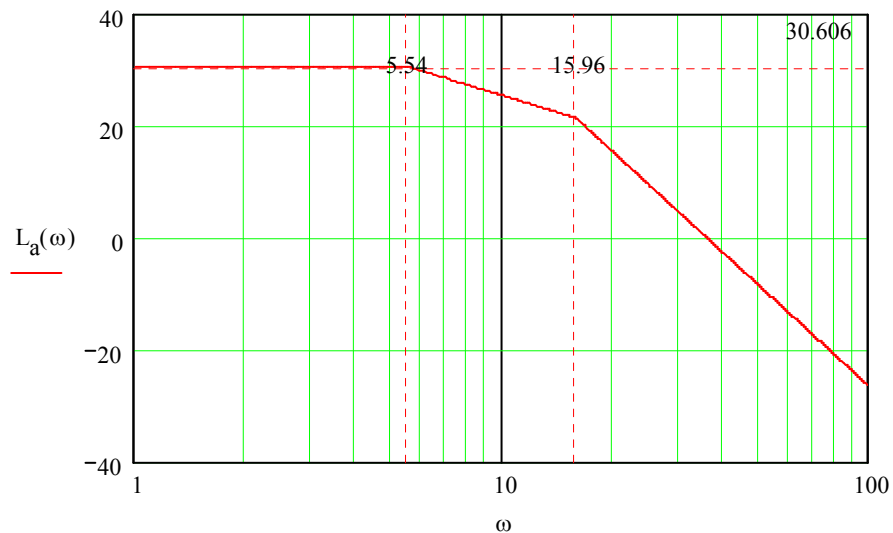


Рис. 5. Асимптотическая ЛАЧХ разомкнутой нескорректированной САР

График ЛФЧХ разомкнутой САР построим по выражению, приведенному выше для функции $\varphi(\omega)$ в логарифмическом масштабе частот $1 \dots 100 \text{ c}^{-1}$ (рис. 6).

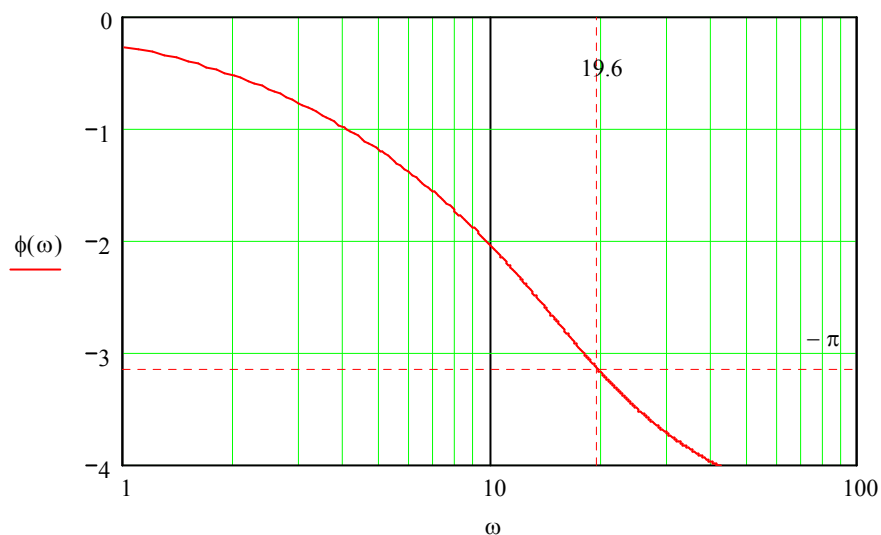


Рис.6 ЛФЧХ разомкнутой нескорректированной САР

Поскольку частота перехода через уровень $-\pi$ (19.6 c^{-1}) ЛФЧХ меньше частоты среза ас. ЛАЧХ (примерно 37 c^{-1}), то замкнутая САР будет неустойчивой.

Построение желаемой асимптотической ЛАЧХ скорректированной САР в разомкнутом состоянии

Определим требуемый запас устойчивости по фазе:

$$\Delta\varphi_c = \arcsin\left(1 - \frac{\sigma}{100}\right) = \arcsin\left(1 - \frac{10}{100}\right) = 1.12 \text{ рад} (64.17^\circ).$$

Частота среза желаемой ЛАЧХ:

$$\omega_c^{\text{жс}} = \frac{k\pi}{t_p} = \frac{3\pi}{1.5} = 6.283 \text{ с}^{-1}.$$

Фаза желаемой ЛАЧХ на частоте среза при запасе устойчивости 1.12 рад:

$$\Delta\varphi_c - \pi = -2.022 \text{ рад} (-115,8^\circ).$$

Покажем уровень -2.022 рад и частоту среза желаемой ЛАЧХ на графике ЛФЧХ (рис. 7):

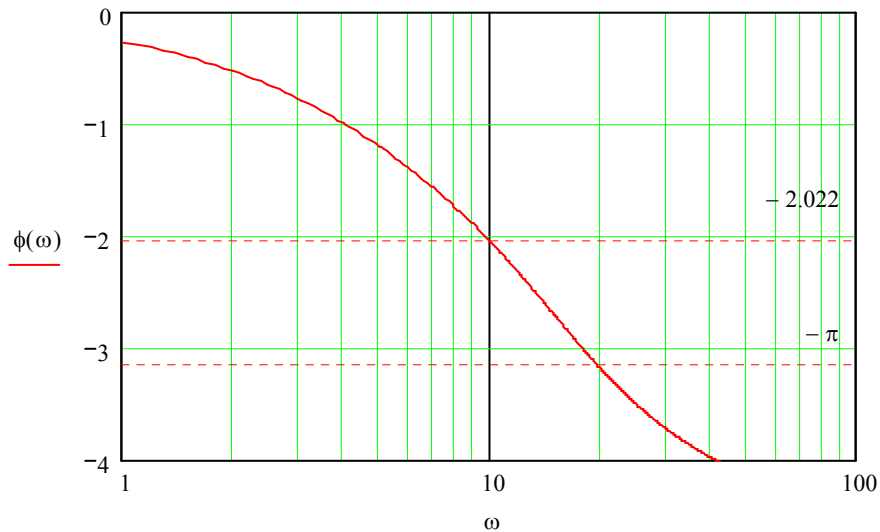


Рис.7 График ЛФЧХ разомкнутой САР для уточнения частоты среза ас. ЛАЧХ

Графическое значение частоты среза составляет порядка 10 с^{-1} , что несколько больше расчетного.

Построим среднечастотную асимптоту на фоне ас. ЛАЧХ исходной САР с наклоном -20 дБ/дек, проходящую через расчетное значение частоты среза (рис. 8):

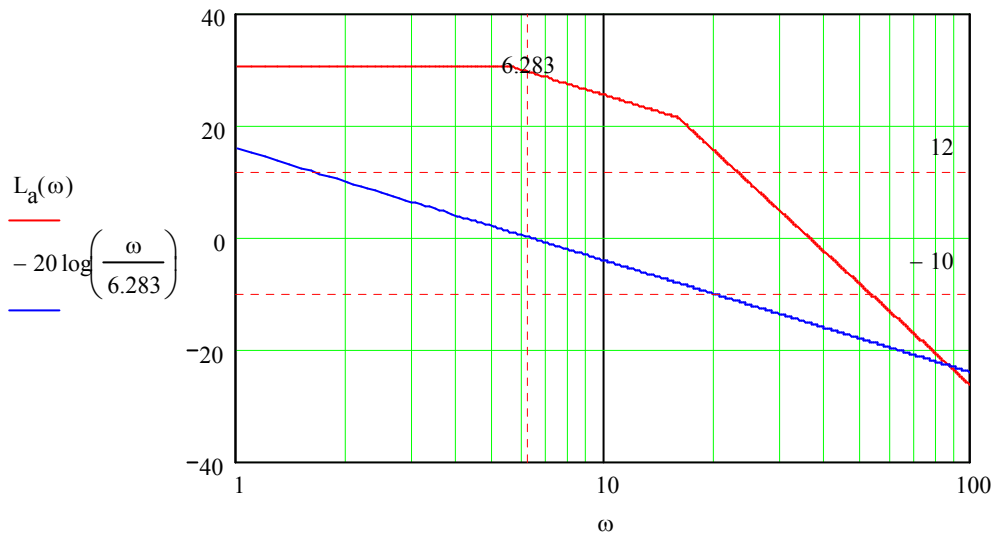


Рис. 8. СЧ-асимптота к построению желаемой ас. ЛАЧХ

Уровни 12 дБ и -10 дБ фиксируются для изломов желаемой ЛАЧХ в области НЧ и ВЧ соответственно.

Определим частоты изломов СЧ-асимптоты при указанных уровнях:

$$-20 \lg \frac{\omega_1}{6.283} = 12 \Rightarrow \omega_1 = 6.283 \cdot 10^{\frac{12}{-20}} = 1.578 c^{-1};$$

$$-20 \lg \frac{\omega_2}{6.283} = -10 \Rightarrow \omega_2 = 6.283 \cdot 10^{\frac{-10}{-20}} = 19.87 c^{-1}.$$

На частоте ω_1 наклон желаемой ЛАЧХ должен измениться до -40 дБ/дек, чтобы желаемая ЛАЧХ вышла на уровень 30.606 дБ в НЧ-области. Частоту сопряжения отрезка с наклоном -40 дБ/дек и прямой на уровне 30.606 дБ определим из уравнения:

$$30.606 = -40 \lg \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right) + 12 \Rightarrow \omega_0 = \omega_1 \cdot 10^{\frac{30.606-12}{-40}} = 0,54 c^{-1}.$$

Покажем процесс сопряжения на графике (рис. 9):

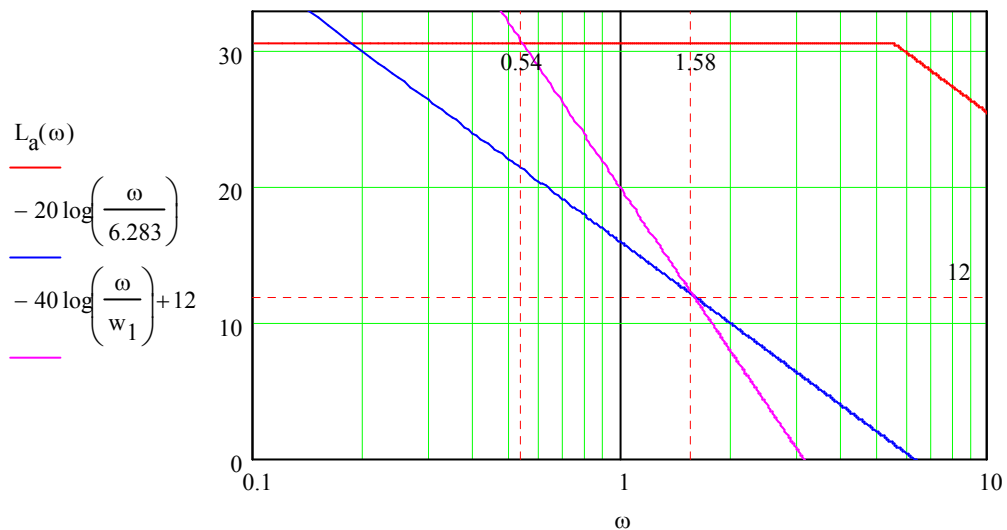


Рис. 9. Определение точки сопряжения НЧ-асимптоты желаемой ЛАЧХ

В области высоких частот желаемая ЛАЧХ будет повторять наклоны ЛАЧХ нескорректированной системы, поскольку необходимо получить наиболее простую реализацию корректирующего устройства. Таким образом, наклон ВЧ-асимптоты желаемой ЛАЧХ составит -40 дБ/дек.

На рисунке 10 изображен график ас. ЛАЧХ желаемой САР на фоне ас. ЛАЧХ исходной системы, а также их разностная ас. ЛАЧХ корректирующего устройства.

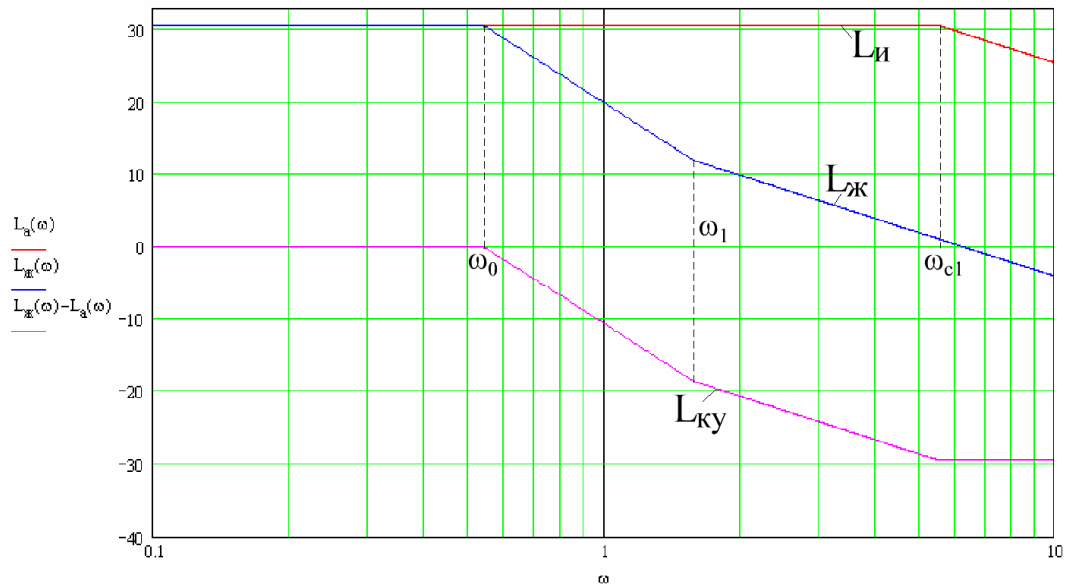


Рис. 10, а)

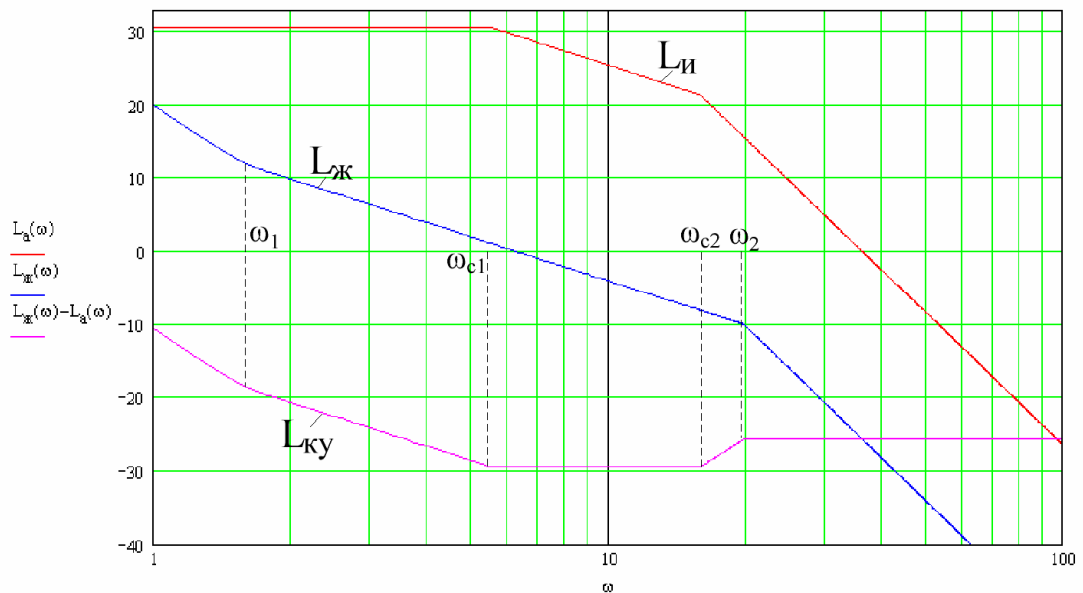


Рис. 10, б)

Выбор и расчет корректирующего устройства

На основании изображения ас. ЛАЧХ корректирующего устройства (рис. 10) запишем его передаточную функцию:

$$W_{KY}(p) = \frac{\left(\frac{p}{\omega_1} + 1\right) \left(\frac{p}{\omega_{c1}} + 1\right) \left(\frac{p}{\omega_{c2}} + 1\right)}{\left(\frac{p}{\omega_0} + 1\right)^2 \left(\frac{p}{\omega_2} + 1\right)} = \frac{(0.633p + 1)(0.181p + 1)(0.063p + 1)}{(1.848p + 1)^2 (0.05p + 1)}.$$

Анализ ПФ КУ показывает, что оно состоит из трех последовательно включенных реальных форсирующих звена типа:

$$W_i(p) = \frac{\tau_i p + 1}{T_i p + 1},$$

где τ_i , T_i – соответственно постоянные времени форсирующей и инерционной частей.

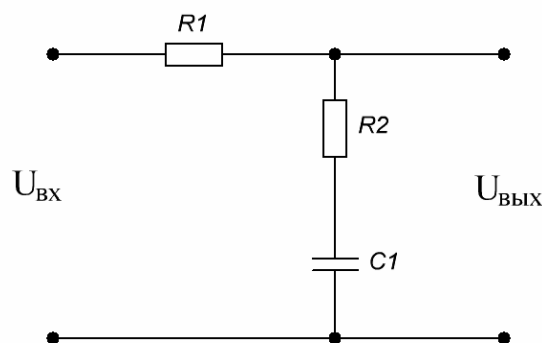
Полученная ПФ КУ состоит из звеньев с ПФ вида:

$$W_1(p) = \frac{0.633p + 1}{1.848p + 1};$$

$$W_2(p) = \frac{0.181p + 1}{1.848p + 1};$$

$$W_3(p) = \frac{0.063p + 1}{0.05p + 1}.$$

Первые два звена реализуются электрической цепью вида:



в которых при заданном сопротивлении $R_2 = 500$ кОм, получаем:

- для первого звена:

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_2} = 1,267 \text{ мкФ};$$

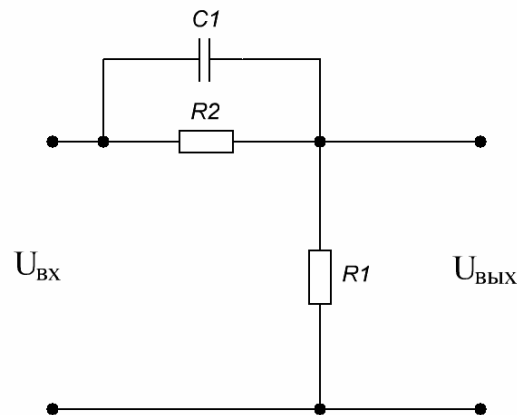
$$R_1 = \frac{T_1}{C_1} - R_2 = 959,2 \text{ кОм};$$

- для второго звена:

$$C_1 = \frac{\tau_2}{R_2} = 0,36 \text{ мкФ};$$

$$R_1 = \frac{T_2}{C_1} - R_2 = 4,62 \text{ МОм}.$$

Для третьего звена применим электрическую схему с ослаблением вида:



для которой зададим $R_1 = 500 \text{ кОм}$ и рассчитаем параметры остальных элементов:

$$C_1 = \frac{\tau_3}{R_1} = 0,125 \text{ мкФ};$$

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{\tau_3}{T_3} - 1 \right) = 0,123 \text{ МОм};$$

$$k_{осл} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,803.$$

После третьего звена необходимо применить дополнительную операционную усилительную схему с $K = 1/k_{осл} = 1.245$.

Моделирование САР на ЭВМ

Выполним моделирование САР с применением программного обеспечения Mathcad V11. С помощью указанной программы произведем расчеты частотных характеристики скорректированной САР и ее переходную функцию.

Расчет частотных характеристик

$$i := 0..999 \quad \Omega_i := i \cdot 0.1$$

$$P(x) := \operatorname{Re}(W_{ky}(j \cdot x) \cdot W_p(j \cdot x)) \quad Q(x) := \operatorname{Im}(W_{ky}(j \cdot x) \cdot W_p(j \cdot x))$$

$$A(x) := \sqrt{P(x)^2 + Q(x)^2} \quad \phi(x) := \operatorname{atan2}(P(x), Q(x))$$

$$P(\Omega_i) =$$

33.909
31.288
24.857
17.459
11.13
6.515
3.441
1.494
0.298
-0.419
-0.84
-1.077
-1.201
-1.257
-1.271
-1.261

$$Q(\Omega_i) =$$

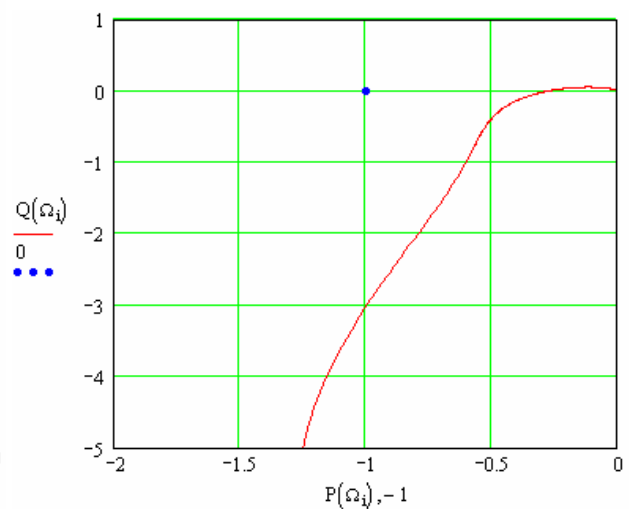
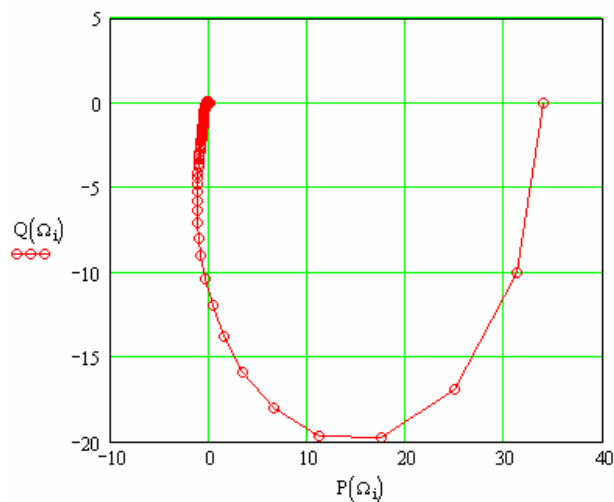
0
-10.025
-16.924
-19.803
-19.692
-18.047
-15.903
-13.794
-11.93
-10.357
-9.055
-7.983
-7.1
-6.367
-5.756
-5.241

$$A(\Omega_i) =$$

33.909
32.855
30.071
26.4
22.619
19.187
16.271
13.875
11.934
10.365
9.093
8.055
7.201
6.49
5.895
5.391

$$\phi(\Omega_i) =$$

0
-0.31
-0.598
-0.848
-1.056
-1.224
-1.358
-1.463
-1.546
-1.611
-1.663
-1.705
-1.738
-1.766
-1.788
-1.807



На АФЧХ разомкнутой скорректированной САР можно сделать вывод о ее устойчивости, поскольку годограф АФЧХ не охватывает критическую точку $(-1, j0)$.

Расчет переходной характеристики САР и определение ее качественных показателей

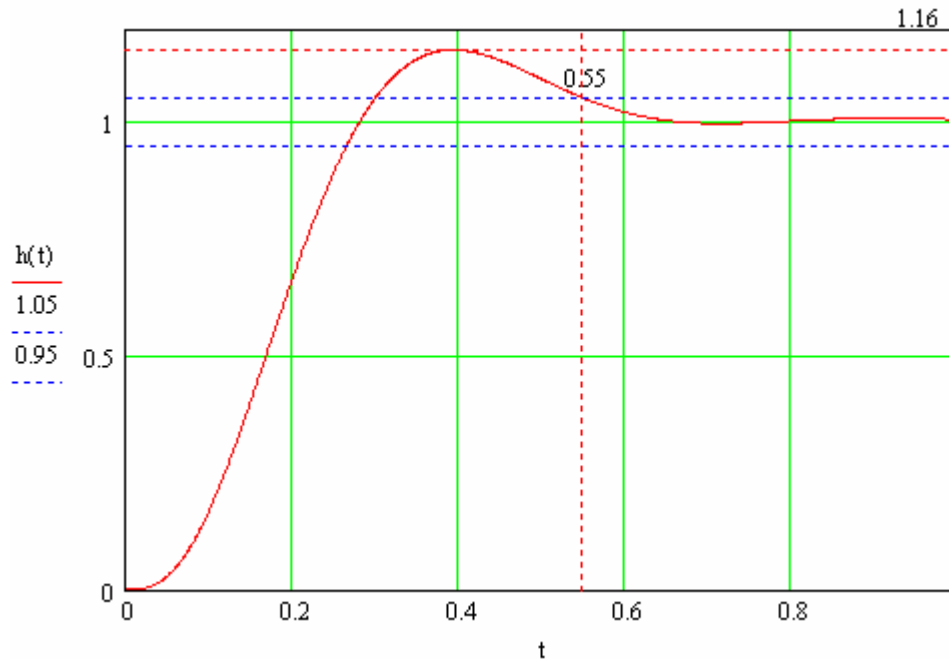
$$W_{жк}(p) = W_{ky}(p) \cdot W_p(p)$$

$$W_s(p) := \frac{W_{жк}(p)}{1 + W_{жк}(p)}$$

$$H(p) = \frac{1}{p} \cdot W_s(p)$$

$$H(p) = H(p) \left| \begin{array}{l} \text{convert, parfrac, p} \\ \text{float, 6} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-0.110741}{p + 22.1745} - \frac{0.912176}{p + 9.23428} + \frac{0.182521}{p + 1.79812} + \frac{0.971354}{p} - 1481.23 \cdot \frac{8.07199 \cdot 10^{-3} + 8.84114 \cdot 10^{-5} \cdot p}{p^2 + 10.7342 \cdot p + 140.438}$$

$$h(t) = H(p) \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{float, 6} \end{array} \right. \rightarrow -0.110741 \cdot \exp(-22.1745 \cdot t) - 0.912176 \cdot \exp(-9.23428 \cdot t) + 0.182521 \cdot \exp(-1.79812 \cdot t) + 0.971354 - 130958 \cdot \exp(-5.36710 \cdot t) \cdot \cos(10.5656 \cdot t) - 1.06512 \cdot \exp(-5.36710 \cdot t) \cdot \sin(10.5656 \cdot t)$$



По графику переходной функции определяем качественные показатели скорректированной САР:

- перерегулирование:

$$\sigma = \frac{1.16 - 1}{1} \cdot 100\% = 16\%;$$

- время регулирования:

$$t_p = 0.55 \text{ с.}$$

Выводы:

- 1) Скорректированная САР не удовлетворяет требованиям задания по перерегулированию. Перерегулирование САР достигает 16%.
- 2) Скорректированная САР удовлетворяет требованиям задания по времени регулирования. Время регулирования САР составляет 0.55 с, что существенно меньше требуемого времени.
- 3) Абсолютная и относительная ошибки скорректированной САР:
 $\Delta h = 1 - 0.971354 = 0.029$;
 $\partial h = 100\% \cdot \Delta h = 2.9\%$.