

3. Анализ систем первого и второго порядков

.....

Для характеристики свойств динамики переходного процесса используется ряд показателей качества, описанных в предыдущем разделе. Существуют технические условия на проектирование систем. Они представляют собой набор требований, которые должна выполнять система. Требования определяют допустимый диапазон значений рассматриваемых показателей качества.

Влияние случайных воздействий на работу системы в этом разделе не учитывается.

Таким образом, на основе сравнения показателей качества исследуемой системы и требований технических условий проводится анализ свойств системы, формируются заключения о соответствии их требованиям технических условий и намечаются мероприятия по устранению найденных несоответствий.

Рассматриваемый раздел посвящен изучению линеаризованных систем радиоавтоматики первого ($n = 1$) и второго порядка ($n = 2$). Для оценки показателей, характеризующих динамику переходного процесса, используются как временные, так и частотные характеристики.

Временные — это импульсно-переходная и переходная характеристики. Эти характеристики определяются численным интегрированием дифференциальных уравнений системы с применением программного продукта **Lab1**, разработанного на кафедре. Но существуют и более простые косвен-

ные методы изучения динамики систем, связанные с применением частотных характеристик системы:

- расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости;
- сопоставлением показателей качества системы, определяемых по виду логарифмических частотных характеристик (ЛАХ) и ряда других частотных характеристик.

Точность систем оценивается по значениям как регулярных, так и случайных ошибок.

3.1. Анализ системы первого порядка

Система задается передаточной функцией $W(s)$ в разомкнутом состоянии. В данном случае качество системы изучается на системах первого порядка (рис. 3.1), но применяемые методики во многом справедливы и для систем более высокого порядка.

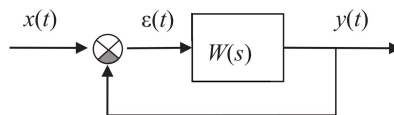


Рис. 3.1. Структурная схема системы

Статическая система

Статической называется система, передаточная функция $W(s)$ которой не содержит интегрирующих звеньев. В рассматриваемом случае

$$W(s) = \frac{k}{1 + sT},$$

$$W_3(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} = \frac{k_3}{1 + sT_3}, \quad T_3 = \frac{T}{k+1}, \quad k_3 = \frac{k}{k+1} \approx 1 \quad (k \gg 1).$$

Астатическая система первого порядка

$$W(s) = \frac{k}{s} = \frac{1}{sT}, \quad k = \frac{1}{T}.$$

$$W_3(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} = \frac{k_3}{1+sT_3}, \quad T_3 = \frac{1}{k}, \quad k_3 = 1.$$

Таким образом, в обоих случаях передаточная функция $W_3(s)$ системы описывается как инерционное звено, но при этом значения параметров T_3 и k_3 для статической и астатической систем различны.

Заключения:

1. Суть анализа системы по расположению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости состоит в приравнивании нулю характеристического полинома и решении полученного уравнения, при этом определяется значение единственного его корня:

$$A(s) = 1 + sT_3 = 0 \rightarrow s_1 = -1/T_3.$$

Корень вещественный и отрицательный, следовательно, обе системы устойчивые.

2. Анализ системы по виду переходной характеристики

Переходная характеристика — это выходная величина, когда на входе единичный скачок $h(t) = y(t)|_{x(t)=1(t)}$. $Y(s) = W_3(s) \cdot X(s)$.

Но изображение единичного скачка $X(s) = L^{-1}[1(t)] = \frac{1}{s}$. Следовательно, $H(s) = L[h(t)] = \frac{W_3(s)}{s}$.

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{W_3(s)}{s} \right] = L^{-1} \left[k_3 \frac{\frac{1}{T_3}}{\frac{1}{T_3} + s} \right].$$

Используя таблицу преобразования Лапласа, получим

$$h(t) = k_3 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_3}\right) \right).$$

Таким образом:

- характер переходного процесса — апериодический;
- установившееся значение переходной характеристики $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = k_3$.

3.2. Анализ системы второго порядка

Система (рис. 3.1) задана передаточной функцией $W(s)$ в разомкнутом состоянии:

$$W(s) = \frac{k}{s(1+sT)}, \quad k_1 = 200 \text{ с}^{-1}, \quad k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}, \quad T = 0,001 \text{ с}.$$

Проводится анализ двух вариантов системы с различными коэффициентами усиления k_1 и k_2 , целями которого являются:

- знакомство с методиками анализа систем;
- изучение влияния значения коэффициента усиления k системы в разомкнутом состоянии на точность и на свойства динамики переходного процесса.

3.2.1. Анализ системы по расположению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

Записав согласно формуле (2.7) передаточную функцию $W_3(s)$ системы в замкнутом состоянии и приравняв нулю ее знаменатель, получим характеристическое уравнение изучаемой системы

$$A(s) = Ts^2 + s + k = 0.$$

1. Первый вариант

Пусть $k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$.

Корни вышеприведенного уравнения равны соответственно $s_1 = -0,28 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $s_2 = -0,72 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Их расположение на комплексной плоскости представлено на рис. 3.2, *a*.

Корни вещественные и отрицательные, следовательно:

- система устойчива, поскольку оба корня находятся в левой полуплоскости;
- характер переходного процесса аperiodический (корни вещественные);
- расстояние от ближайшего корня до мнимой оси $\eta = 0,28 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, время переходного процесса $t_{\text{п}} = \frac{3}{\eta} \approx 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

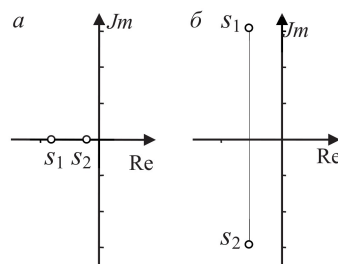


Рис. 3.2. Расположение корней на комплексной плоскости:

a — при $k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$; *b* — при $k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}$

2. Второй вариант

Пусть $k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}$.

В рассматриваемом случае корни характеристического уравнения

$$s_{1,2} = (-0,5 \pm j1,32) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Их расположение на комплексной плоскости представлено на рис. 3.2, *b*.

Корни комплексно-сопряженные, с отрицательной вещественной частью:

- поэтому система устойчива (оба корня находятся в левой полуплоскости);

- переходный процесс колебательный;
- время переходного процесса $t_n = \frac{3}{\eta} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, поскольку $\eta = 0,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

3.2.2. Анализ качества системы по виду ЛАХ

На рис. 3.3 изображены ЛАХ системы в разомкнутом состоянии. Показатели качества системы, найденные по этим характеристикам, приведены в таблице ниже.

Показатель качества	$k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$	$k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}$
$\omega_{\text{ср}}, \text{ с}^{-1}$	200	1400
$\omega_{\text{кр}}$	∞	∞
ΔL	∞	∞
$\Delta\varphi, ^\circ$	80	40

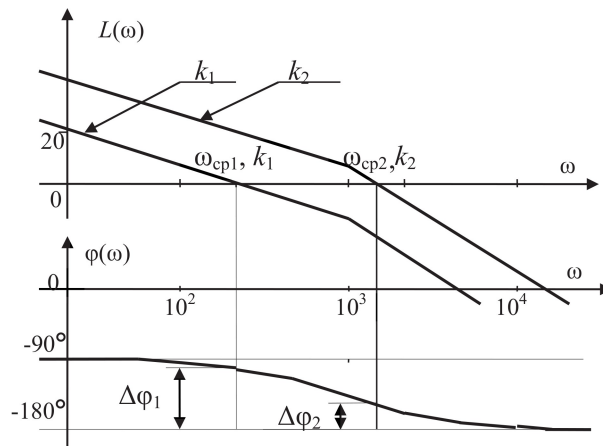


Рис. 3.3. Логарифмические частотные характеристики

Анализ приведенных показателей качества позволяет оценить свойства системы:

- в обоих вариантах система устойчива, поскольку частоты среза $\omega_{\text{ср1}}$ и $\omega_{\text{ср2}}$ меньше критических частот $\omega_{\text{кр}}$;
- запасы устойчивости достаточны, но $\Delta\varphi_1 > \Delta\varphi_2$;
- частота среза $\omega_{\text{ср1}}$ меньше частоты среза $\omega_{\text{ср2}}$, следовательно, система первого варианта ($k = k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$) обладает меньшим быстродействием;
- наклон кривой $L = L(\omega)$ в районе частоты среза $\omega_{\text{ср1}}$ равен -20 дБ/дек , а в районе частоты среза $\omega_{\text{ср2}}$ равен -40 дБ/дек . Из этого следует, что характер переходного процесса в первом случае апериодический, а во втором — колебательный (ближе к колебательной границе устойчивости).

3.2.3. Анализ системы по виду АФХ

АФХ — это годограф комплексного коэффициента передачи, изображенный в масштабе на комплексной плоскости (рис. 3.4).

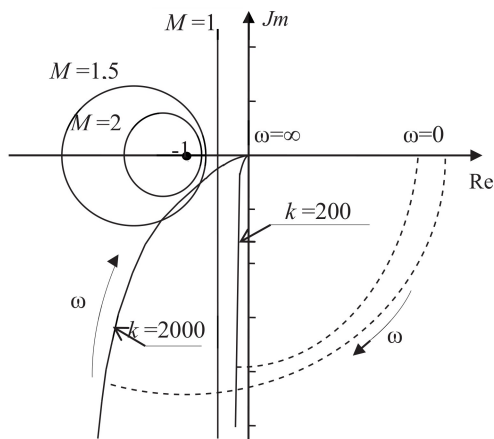


Рис. 3.4. Амплитудно-фазовая характеристика

Изучается астатическая система первого порядка астатизма, следовательно, полученные графики АФХ нужно дополнить дугами бесконечно большого радиуса, поворачивающих низкочастотные части характеристик против часовой стрелки на угол, равный 90° .

На этой же плоскости изображаются два семейства линий постоянного уровня показателя колебательности M . На комплексной плоскости, на которой изображена АФХ, эти семейства представляют собой окружности [5, разд. 2.7.2, с. 81].

Концы диаметров окружностей находятся в точках $\left(-\frac{M}{M-1}, 0\right)$ и $\left(-\frac{M}{M+1}, 0\right)$.

$$M = 2, \frac{M}{M-1} = 2, \frac{M}{M+1} = 0,67.$$

$$M = 1,5, \frac{M}{M-1} = 3, \frac{M}{M+1} = 0,60.$$

В том случае, если $M = 1$, линией постоянного уровня является прямая, параллельная мнимой оси и проходящая через точку с координатой $(-0,5; 0)$.

Анализ АФХ позволяет сделать следующие выводы:

1. Система в обоих случаях устойчивая, поскольку АФХ не охватывает точку $(-1, 0)$ на комплексной плоскости.
2. По АФХ могут быть определены характерные частоты $\omega_{ср}$ и $\omega_{кр}$ и запасы устойчивости ΔA и $\Delta \varphi$. Их значения должны совпадать с полученными ранее с использованием ЛАХ.
3. Колебательность системы оценивается по величине показателя колебательности M :
 - система при $k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$ имеет апериодический характер переходного процесса, поскольку ее АФХ не пересекает вертикаль, проходящую через точку $(-0,5; 0)$, на которой значение показателя колебательности $M = 1$;
 - система при $k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}$ имеет колебательный характер переходного процесса. Ее АФХ пересекает линию

постоянного уровня при $M = 1,5$, но не пересекает при $M = 2$. Следовательно, для этого варианта системы $1,5 < M < 2$ и в соответствии с таблицей на с. 30 ее следует считать среднеколебательной.

3.2.4. Анализ точности по регулярному входному воздействию

Зависимость регулярной ошибки от входного воздействия определяется соотношением (2.9). Для нахождения требуемых коэффициентов ошибок составляются уравнения (2.10), которые для системы второго порядка имеют вид:

- $a_2\gamma_0 = c_2 \rightarrow \gamma_0 = \frac{c_2}{a_2}$;
- $a_2\gamma_1 + a_1\gamma_0 = c_1 \rightarrow \gamma_1 = \frac{c_1 - a_1\gamma_0}{a_2}$;
- $a_0\gamma_2 + a_1\gamma_1 + a_0\gamma_0 = c_0 \rightarrow \gamma_2 = \frac{c_0 - a_1\gamma_1 - a_0\gamma_0}{a_2}$.

Представляя передаточную функцию рассматриваемой системы в разомкнутом состоянии в формулу (2.4), а в замкнутом состоянии в формулу (2.5), определяют коэффициенты полиномов и искомые коэффициенты ошибок:

$$C(s) = c_0s^2 + c_1s + c_2 = Ts^2 + s, \quad c_2 = 0, \quad c_1 = 1, \quad c_0 = T.$$

$$A(s) = a_0s^2 + a_1s + a_2 = Ts^2 + s + k, \quad a_2 = k, \quad a_1 = 1, \quad a_0 = T.$$

$$\gamma_0 = 0, \quad \gamma_1 = \frac{1}{k}, \quad \gamma_2 = \frac{T - \frac{1}{k}}{k}.$$

Таким образом,

- $x(t) = a \rightarrow \varepsilon_{\text{уст}}(t) = 0$;
- $x(t) = vt \rightarrow \varepsilon_{\text{уст}}(t) = \frac{v}{k}$;

$$\bullet \quad x(t) = \frac{wt^2}{2} \rightarrow \varepsilon_{\text{уст}}(t) = \frac{w \left(T - \frac{1}{k} \right)}{k}.$$

По сравнению с вариантом при $k_1 = 200 \text{ с}^{-1}$ ошибка по скорости входного воздействия системы при $k_2 = 2000 \text{ с}^{-1}$ меньше в десять раз, а по ускорению — почти в сто раз.

3.2.5. Ошибки, вызванные действием случайной помехи $f(t)$

Случайная составляющая $\varepsilon_{\text{сл}}(t) = \varepsilon_f(t)$ ошибки системы вызывается действием суммарной помехи $f(t)$. Помеха $f(t)$ — стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью $S_f(0)$. Ее дисперсия определяется выражением [5, формулы (2.87), (2.88), с. 91]

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{S_f(0)}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{\varepsilon_f}(j\omega)|^2 d\omega = S_f(0) \cdot J_n,$$

$$J_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{C(j\omega)}{D(j\omega)} \right|^2 d\omega, \quad C(j\omega) = \sum_{k=0}^{n-1} c_k (j\omega)^k, \quad D(j\omega) = \sum_{k=0}^n d_k (j\omega)^k.$$

Передаточная функция ошибки по помехе (см. формулу (2.3))

$$W_{\varepsilon_f}(s) = \left. \frac{E(s)}{F(s)} \right|_{x(t)=0} = - \left. \frac{Y(s)}{F(s)} \right| = \frac{-W(s)}{1+W(s)} = -W_3(s).$$

Тогда комплексный коэффициент передачи по помехе имеет вид

$$K_{\varepsilon_f}(j\omega) = W_{\varepsilon_f}(s)|_{s=j\omega} = -W_3(j\omega).$$

Передаточная функция рассматриваемой системы в замкнутом состоянии в обычных обозначениях имеет вид

$$W_3(s) = \frac{k}{s^2 T + s + k},$$

а в обозначениях интеграла J_n передаточная функция и комплексный коэффициент передачи имеют вид

$$K_{\varepsilon f}(j\omega) = -W_3(j\omega) = \frac{c_0}{s^2 d_2 + s d_1 + d_0},$$

$$c_0 = k, c_1 = 0, d_0 = k, d_1 = 1, d_2 = T.$$

Согласно формуле (2.12) $J_2 = \frac{c_1^2 d_0 + c_0^2 d_2}{2d_0 d_1 d_2} = \frac{k}{2},$

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = S_f(0) \cdot J_2 = S_f(0) \cdot k/2.$$

Эквивалентная шумовая полоса рассматриваемой системы

$$\Delta F_{\varepsilon} = 0,5 J_2 = k/4.$$

4. Анализ систем третьего порядка

.....

Предлагаемый раздел посвящен описанию методов анализа систем радиоавтоматики в соответствии с показателями качества, характеризующими точность и динамику переходного процесса. Анализ проводится на примере анализа трех типов систем: статических и астатических первого и второго порядков астатизма. Изучается влияние наиболее значимых параметров рассматриваемых систем на показатели динамики и точности.

Изучаемые системы задаются структурной схемой (см. рис. 3.1) и передаточной функцией $W(s)$ системы в разомкнутом состоянии.

Рассматриваются три типа систем:

- $W(s) = \frac{k}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)}$ — статическая система, из-

меняемый параметр — коэффициент усиления k ;

- $W(s) = \frac{k}{s(1+sT_1)(1+sT_2)}$ — астатическая система первого

порядка астатизма, изменяемый параметр T_1 — наибольшая из постоянных времени инерционных звеньев;

- $W(s) = \frac{k(1+s\tau)}{s^2(1+sT)}$ — астатическая система второго порядка

астатизма, изменяемый параметр — постоянная времени τ форсирующего звена, где k — коэффициенты усиления систем в разомкнутом состоянии; T_1, T_2, T_3, τ, T — постоянные времени инерционных и форсирующего звеньев.

4.1. Статическая система

Система задана передаточной функцией $W(s)$:

$$W(s) = \frac{k}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)},$$

где $T_1 = 0,05$ с, $T_2 = 0,002$ с, $T_3 = 0,0005$ с.

Изменяемый параметр — коэффициент усиления k , принимающий четыре значения: $k = 20, 50, 100, 200$, что позволит оценить влияние этого параметра на качество системы.

4.1.1. Показатели качества, определяемые по виду ЛАХ

Передаточная функция $W(s)$ представляется как произведение передаточных функций усилительного звена и трех инерционных звеньев. На рис. 4.1 изображены суммарные логарифмические частотные характеристики систем для четырех значений коэффициента k .

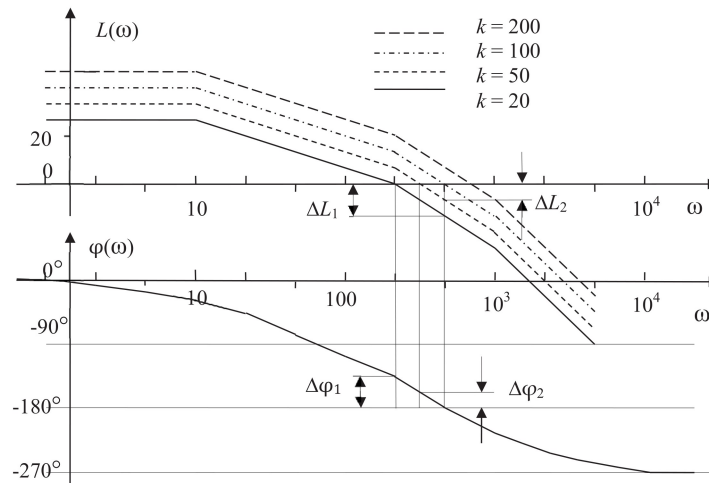


Рис. 4.1. ЛАХ статической системы

Значения характерных частот $\omega_{\text{ср}}$, $\omega_{\text{кр}}$ помещены ниже в таблицу результатов (табл. 4.1). Сравнение этих частот показывает, что система устойчива только при $k = 20$ и $k = 50$ ($\omega_{\text{ср}} < \omega_{\text{кр}}$). При $k = 100$ система находится на границе устойчивости, а при $k = 200$ — неустойчивая.

Таблица 4.1

Таблица результатов

k	$\omega_{\text{ср}}$, с	$\omega_{\text{кр}}$, с	ΔL , дБ	$\Delta\varphi$, °	γ_0	γ_1 , с	γ_2 , с ²	$\Delta F_{\text{э}}$, Гц	M	σ , %	$t_{\text{п}}$, с
20	500	1000	14	40	0,048	$2,45 \times 10^{-3}$	$-2,38 \times 10^{-6}$	108	1,15	30	0,012
50	700	1000	6	15	0,020	$1,01 \times 10^{-3}$	$1,38 \times 10^{-7}$	378	1,33	43	0,017
100	1000	1000	0	0	—	—	—	—	∞	100	∞
200	1400	1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Среди устойчивых вариантов запасы устойчивости ΔL и $\Delta\varphi$ выше у варианта с меньшим значением k . Следует ожидать, что система при $k = 50$ обладает большей колебательностью, поскольку для нее функция $L = L(\omega)$ пересекает ось ω с наклоном, равным -40 дБ/дек.

Таким образом, анализ системы с использованием ЛАХ системы показывает, что чем меньше коэффициент усиления k , тем лучше свойства динамики системы.

4.1.2. Ошибки по регулярному воздействию $x(t)$

Для вычисления регулярных ошибок применяется метод коэффициентов ошибок. Вычисляют регулярные ошибки в установившемся режиме работы системы при заданном входном воздействии $x = x(t)$ по уравнению (2.9). Для вычисления значений коэффициентов ошибок для системы третьего порядка преобразуются уравнения (2.10):

- $a_3\gamma_0 = c_3$;
- $a_3\gamma_1 + a_2\gamma_0 = c_2$;
- $a_3\gamma_2 + a_2\gamma_1 + a_1\gamma_0 = c_1$.

(4.1)

Для вычисления коэффициентов полиномов в уравнениях (4.1) передаточная функция $W(s)$ представляется в виде

$$W(s) = \frac{B(s)}{C(s)} = \frac{k}{T_1T_2T_3s^3 + (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)s^2 + (T_1 + T_2 + T_3)s + 1}, \quad (4.2)$$

$$A(s) = B(s) + C(s). \quad (4.3)$$

Подставляя постоянные времени в знаменатель выражения (4.2) и учитывая соотношение (4.3), получаем коэффициенты полиномов

$$a_0 = c_0 = 5 \cdot 10^{-8}, \quad a_1 = c_1 = 1,26 \cdot 10^{-4}, \quad a_2 = c_2 = 0,0525, \quad a_3 = k + 1, \quad c_3 = 1.$$

Решая уравнения (4.1), вычисляем значения коэффициентов ошибок при $k = 20$ и $k = 50$ и заносим в таблицу результатов (табл. 4.1).

Анализ полученных результатов показывает, что для системы при $k = 20$ коэффициенты ошибок выше, чем при $k = 50$, а значит, и соответствующие значения регулярных ошибок больше по всем составляющим входного воздействия. Следовательно, точность системы повышается с увеличением коэффициента усиления k системы в разомкнутом состоянии.

Показатели ΔF_3 , M , σ , t_n , помещенные в табл. 4.1, получены с применением программного продукта **PA_system**. Графические изображения характеристик, позволяющие оценить эти показатели, будут изучены в ходе лабораторного практикума.

Значение шумовой полосы ΔF_3 характеризует помехоустойчивость системы. Чем шире шумовая полоса ΔF_3 , тем хуже помехоустойчивость системы. С увеличением коэффициента усиления k шумовая полоса увеличивается, следовательно, помехоустойчивость системы ухудшается.

Показатели колебательности M и перерегулирования σ , а также время переходного процесса t_n , характеризующего быстроедействие системы, с увеличением коэффициента k увеличиваются. Это еще раз свидетельствует об ухудшении свойств динамики переходного процесса.

Таким образом, проведенный анализ статической системы показал, что с повышением коэффициента усиления k системы в разомкнутом состоянии ухудшаются свойства динамики переходного процесса, но повышается точность системы.

4.2. Астатическая система первого порядка астатизма

Система задана передаточной функцией $W(s)$ (см. рис. 3.1):

$$W(s) = \frac{k}{s(1+sT_1)(1+sT_2)},$$

где $k = 500 \text{ с}^{-1}$, $T_2 = 0,0005 \text{ с}$.

Изменяемый параметр — наибольшая из постоянных времени T_1 . Ее значения T_1 равны 0,05, 0,01 и 0,002 с.

На рис. 4.2 изображено семейство ЛАХ рассматриваемой системы, а в табл. 4.2 занесены значения показателей качества, которые определены по этим графическим изображениям. Во второй строке в скобках указаны более точные значения частот, полученные на компьютере. Этот факт характеризует неточность некоторых результатов, получаемых при анализе по ЛАХ.

Кроме того, для осуществления возможности проведения полного анализа системы таблица дополнена рядом параметров, оцененных по характеристикам, полученным с помощью программного продукта *PA_sistem*.

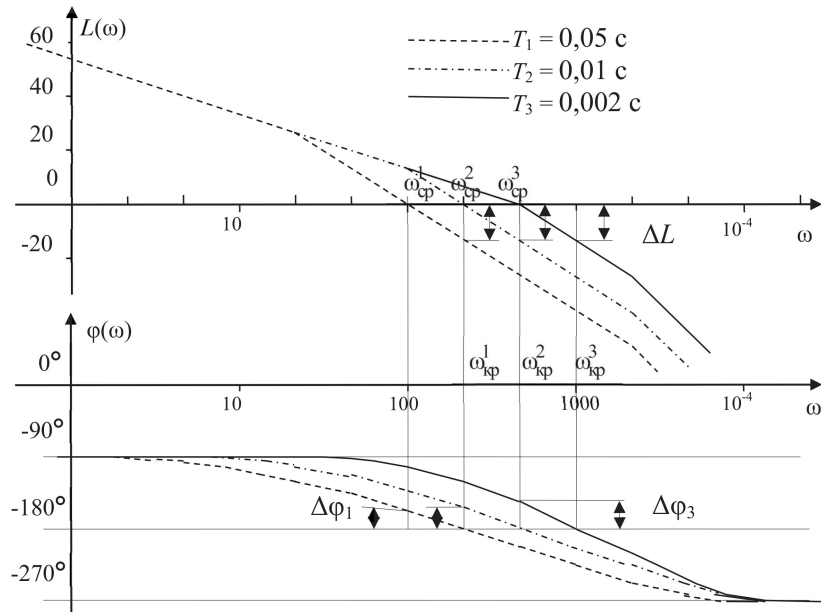


Рис. 4.2. ЛАХ астатической системы первого порядка

Таблица 4.2

Показатели качества ЛАХ астатической системы первого порядка

№ П/П	$T_1, \text{с}$	$\omega_{\text{ср}}, \text{с}^{-1}$	$\omega_{\text{кр}}, \text{с}^{-1}$	$\Delta L, \text{дБ}$	$\Delta\varphi, ^\circ$	M	$t_{\text{п}}, \text{с}$	r
1	0,05	100	200	14	10	6,5	0,389	6
2	0,01	200 (220)	500 (450)	14	25	2,8	0,076	3
3	0,002	500	1000	14	30	1,4	0,017	1

Полученные результаты демонстрируют исключительное влияние инерционного звена с большой постоянной времени. Как показывают данные табл. 4.2, система при $T_1 = 0,05 \text{ с}$ обладает такой высокой колебательностью, что становится неработоспособной. Уменьшить такое влияние наибольшей постоянной времени можно с помощью местных обратных

связей [5, разд. 2.8.2, с. 96]. В зависимости от физического исполнения элемент системы типа инерционного звена охватывается жесткой обратной связью. Благодаря этому постоянная времени результирующего звена может быть уменьшена. Уменьшается и результирующий коэффициент усиления, но, если требуется, применяется дополнительное усиление.

4.3. Астатическая система второго порядка астатизма

Система задана передаточной функцией $W(s)$:

$$W(s) = \frac{k(1+s\tau)}{s^2(1+sT)},$$

где $k = 4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-2}$, $T = 0,001 \text{ с}$.

Изменяемый параметр — постоянная времени форсирующего звена τ . Ее значения τ равны 0,05, 0,01 и 0,002 с.

На рис. 4.3 изображено семейство ЛАХ рассматриваемой системы, а в табл. 4.3 занесены значения показателей качества, которые определены по этим графическим изображениям. Таблица дополнена рядом параметров, оцененных по характеристикам, полученным с помощью программного продукта *PA_sistem*.

Таблица 4.3

Показатели качества ЛАХ астатической системы второго порядка

№ П/П	$\tau, \text{ с}$	$\omega_{\text{ср}}, \text{ с}^{-1}$	$\omega_{\text{кр}}, \text{ с}^{-1}$	$\Delta L, \text{ дБ}$	$\Delta\varphi, ^\circ$	M	$t_{\text{п}}, \text{ с}$	r
1	0,05	1420	∞	∞	34	6,5	0,389	6
2	0,01	400	∞	∞	24	2,8	0,076	3
3	0,002	200	∞	∞	11	1,4	0,017	1

При отсутствии форсирующего звена данная система структурно неустойчива. Наличие форсирующего звена с постоянной

времени $\tau = 0,002$ с явно недостаточно. Система неработоспособна. Наилучшее значение параметра $\tau = 0,01$ с. Таким образом, для каждой системы необходимо подбирать оптимальное значение постоянной времени τ форсирующего звена.

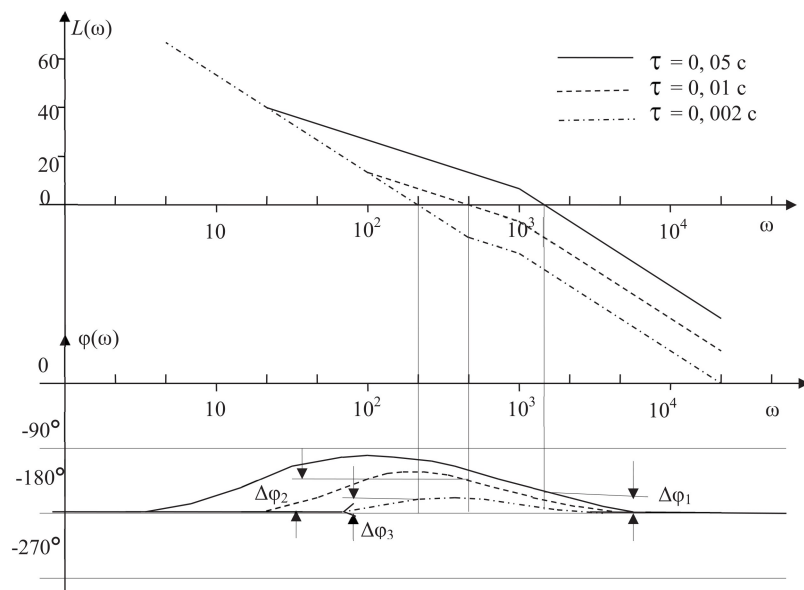


Рис. 4.3. ЛАХ астатической системы второго порядка астатизма