БОРОВКОВ Ю.Г.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

по дисциплине «Теория автоматического управления»
для студентов III курса специальности СОДП, специализаций СА, СТ, СЭ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Для успешного выполнения контрольной работы студент должен иметь представление об основных формах записи линейных дифференциальных уравнений, передаточных функций, временных и частотных характеристик элементарных динамических звеньев систем автоматического управления (САУ), а также ознакомится с основными понятиями и определениями теории автоматического управления. Прежде, чем приступить к выполнению контрольной работы студент должен изучить соответствующие разделы основной [1 и 2] и рекомендованной литературы [3].

Цель контрольной работы – закрепить знания, полученные студентом при самостоятельном изучении дисциплины.

Необходимые чертежи и графики выполняются карандашом на белой бумаге стандартных размеров: 297х210 мм. Пояснительная записка пишется от руки или машинописно на одной стороне стандартного листа аналогичного формата. Все листы записки, в том числе графики и таблицы, должны быть сброшюрованы и иметь сплошную нумерацию, показанную в правом верхнем углу каждого листа. Для замечаний рецензента слева оставляют поля шириной 4 см. Исправления по замечаниям делаются на чистой стороне листа рядом с замечаниями рецензента, которые нельзя удалять, и сопровождают надписью «Работа над ошибками».

Контрольная работа содержит задание, состоящее из трех задач. Пояснительная записка должна содержать условия и исходные данные к каждой задаче согласно своему варианту. Ход решения задачи должен сопровождаться краткими пояснениями с приложением необходимых таблиц с расчетными данными и графиков. Под графиками должно стоять конкретное его наименование, оси координат должны быть промасштабированы и обозначены с указанием принятой размерности функции и аргумента. Все чертежи с графиками вставляются в пояснительную записку сразу после той страницы, на которой имеется первая ссылка на него. Все пояснения выполненной работы, а также приводимые формулы должны быть разборчивыми для чтения. Сокращения слов в тексте, кроме общепринятых, не допускается. Также не допускается ксерокопирование текста, графиков или рисунков.

В конце пояснительной записки рекомендуется приводить список использованной литературы.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Задача 1. Расчет динамических характеристик линейных САУ

Определить весовую функцию $g(t)$ и переходную функцию $h(t)$ линейной САУ, состоящей из последовательного соединения апериодического и идеального интегрирующего звеньев, по заданным в табл. 1 параметрам ее передаточной функции в соответствии с последними двумя цифрами учебного шифра:

$$W(p) = \frac{K}{(T \cdot p + 1) \cdot p}, \text{ где } p \text{ – оператор Лапласа.}$$

Составить таблицу расчетных значений искомых временных характеристик и построить их графики для временного интервала: $t = 0 - 5T$ с шагом дискретизации, равным $0{,}5T$. Масштаб по оси ординат студентом выбирается самостоятельно, исходя из того, что высота графика должна быть не менее 8-10 см.

Таблица 1

Номер варианта		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
последняя цифра шифра	K	5	10	8	6	4	3	2	1	7	9
предпоследняя цифра шифра	T	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Пример. В качестве примера рассмотрим САУ, передаточная функция которой имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{10}{(0{,}1 \cdot p + 1) \cdot p}.$$

Известно, что изображение весовой функции $L[g(t)]$ любой линейной САУ есть ничто иное, как ее передаточная функция:

$$L[g(t)] = W(p) = \frac{10}{(0{,}1 \cdot p + 1) \cdot p}.$$

Для отыскания оригинала весовой функции $g(t) = L^{-1}[W(p)]$ разложим $W(p)$ на элементарные дроби, соответствующие передаточным функциям отдельных звеньев системы САУ, и воспользуемся методом неопределенных коэффициентов для определения неизвестных статических коэффициентов усиления этих звеньев (коэффициенты A и B в знаменателе элементарных дробей):

$$\frac{10}{(0{,}1\cdot p+1)\cdot p}=\frac{A}{p}+\frac{B}{0{,}1\cdot p+1}. \qquad (1)$$

После приведения правой части выражения (1) к общему знаменателю можно приравнять числители левой и правой частей полученного уравнения:

$$10 = A\cdot(0{,}1\cdot p + 1) + B\cdot p = p\cdot(0{,}1\cdot A + B) + A \qquad (2)$$

Приравнивая коэффициенты левой и правой частей уравнения (2) при одинаковых степенях p, получим систему двух уравнений из двух неизвестных:

$$10 = A;$$
$$0 = 0{,}1\cdot A + B, \text{ откуда}$$
$$A = 10;\ B = -\,0{,}1\cdot A = -\,1.$$

Подставляя вычисленные значения коэффициентов A и B в уравнение (1), получим:

$$\frac{10}{(0{,}1\cdot p+1)\cdot p}=\frac{10}{p}-\frac{1}{0{,}1\cdot p+1}=10\cdot\left(\frac{1}{p}-\frac{0{,}1}{0{,}1\cdot p+1}\right)=10\cdot\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{p+10}\right). \qquad (3)$$

Переход от изображений элементарных функций $f(p)$ в операторной форме записи к их оригиналам, как функций времени $f(t)$, осуществляется, как правило, с использованием стандартных таблиц изображений, приводимых в справочной литературе. Так, например:

оригинал $L^{-1}[1/p]$ функции $1/p$ равен: $L^{-1}[1/p] = 1$.

оригинал $L^{-1}[1/(p + 10)]$ функции $1/(p + 10)$ равен: $L^{-1}[1/(p + 10)] = e^{-10\cdot t}$.

Заменив в правой части уравнения (3) изображения элементарных функций на их оригиналы, получим искомое выражение для весовой функции:

$$g(t) = 10\cdot(1 - e^{-10\cdot t}) \qquad (4)$$

Задаваясь различными значениями t, заполним таблицу расчетных значений и построим график $g(t)$.

По известной весовой функции $g(t)$ можно найти переходную функцию $h(t)$, принимая во внимание, что $h(t) = \int g(t)\cdot dt$.

Изображение $L[h(t)]$ функции $h(t)$ можно получить путем умножения передаточной функции $W(p)$ исходной САУ на передаточную функцию $1/p$ идеального интегрирующего звена, что соответствует включению последовательно с САУ интегрирующего звена.

$$L[h(t)] = W(p)\cdot 1/p = \frac{10}{(0{,}1\cdot p+1)\cdot p\cdot p}. \qquad 5)$$

Разложим правую часть уравнения (5) на элементарные дроби с тем, чтобы получить более простые изображения функций для нахождения их оригиналов.

$$\frac{10}{(0{,}1\cdot p+1)\cdot p\cdot p} = \frac{A}{p}+\frac{B}{p\cdot p}+\frac{C}{0{,}1\cdot p+1}. \qquad (6)$$

После приведения правой части выражения (6) к общему знаменателю приравняем числители левой и правой частей полученного уравнения:

$$10 = A\cdot p\cdot(0{,}1\cdot p+1) + B\cdot(0{,}1\cdot p + 1) + C\cdot p^2. \qquad (7)$$

Приравнивая коэффициенты левой и правой частей уравнения (7) при одинаковых степенях p, получим систему трех уравнений из трех неизвестных:

$$10 = B;$$
$$0 = 0{,}1\cdot B + A;$$
$$0 = 0{,}1\cdot A + C, \text{ откуда}$$
$$B= 10;\quad A = -\,0{,}1\cdot B = -\,1;\quad C = -\,0{,}1\cdot A = 0{,}1.$$

Подставляя вычисленные значения коэффициентов A, B и C в уравнение (6), получим:

$$\frac{10}{(0{,}1\cdot p+1)\cdot p\cdot p} = -\frac{1}{p}+\frac{10}{p^2}+\frac{0{,}1}{0{,}1\cdot p+1} = 10\cdot\left(-\frac{0{,}1}{p}+\frac{1}{p^2}+\frac{0{,}01}{0{,}1\cdot p+1}\right) =$$
$$= 10\cdot\left(\frac{1}{p^2}-0{,}1\cdot(\frac{1}{p}-\frac{1}{p+10})\right).$$

(8)

Воспользовавшись известными таблицами изображений, найдем оригиналы простейших функций:

$$L^{-1}[1/p] = 1;$$
$$L^{-1}[1/p^2] = t;$$
$$L^{-1}[1/(p + 10)] = e^{-10\cdot t}.$$

Заменив в правой части уравнения (8) изображения элементарных функций на их оригиналы, получим искомое выражение для переходной функции:

$$h(t) = 10\cdot[t - 0{,}1\cdot(1 - e^{-10\cdot t})] \qquad (9)$$

Задаваясь различными значениями t, заполним таблицу расчетных значений и построим график $h(t)$.

Этот результат можно получить путем непосредственного интегрирования весовой функции $g(t)$:

$$h(t) = \int_0^t g(x)\cdot dx = 10\cdot\int_0^t (1 - e^{-10\cdot x})\cdot dx = 10\cdot[t - 0{,}1\cdot(1 - e^{-10\cdot t})]$$

Задача 2. Расчет частотных характеристик линейных САУ

Определить круговую частоту ω, с которой устройство САУ, состоящее из последовательно включенных двух апериодических и одного идеального интегрирующего звеньев, дает заданный сдвиг по фазе между выходным и входным сигналами. При этом следует определить амплитуду выходного сигнала Y_m на данной частоте, если известна амплитуда входного сигнала X_m.

Передаточная функция заданной САУ имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1\cdot p + 1)\cdot(T_2\cdot p + 1)\cdot p}. \qquad (10)$$

Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер варианта	Последняя цифра шифра			Предпоследняя цифра шифра	
	K	T_1, с	T_2, с	X_m	φ, град
1	10	0,05	0,5	2	- 150
2	9	0,1	0,05	4	- 160
3	8	0,02	0,2	6	- 170
4	7	0,01	0,1	8	- 150
5	6	0,1	0,03	10	- 160
6	5	0,2	0,02	3	- 170
7	4	0,4	0,04	5	- 140
8	3	0,8	0,08	4	- 150
9	2	0,5	0,05	1	- 160
0	1	0,025	0,25	7	- 170

Пример. По передаточной функции $W(p)$, представленной в операторной форме, найдем выражение для частотной передаточной функции $W(j\omega)$ путем замены в выражении (10) оператора Лапласа p на комплексную переменную $j\omega$.

$$W(j\omega) = \frac{K}{(1 + j\omega \cdot T_1) \cdot (1 + j\omega \cdot T_2) \cdot j\omega} = H(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \qquad (11)$$

где: $H(\omega) = \dfrac{K}{\sqrt{1 + (\omega \cdot T_1)^2} \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot T_2)^2} \cdot \omega}$ - модуль частотной передаточной функции, представляющий собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) системы САУ;

$\varphi(\omega) = -90^{o} - \mathrm{arctg}(\omega \cdot T_1) - \mathrm{arctg}(\omega \cdot T_2)$ – аргумент частотной передаточной функции, представляющий собой фазочастотную характеристику (ФЧХ) системы САУ.

Задаваясь значениями круговой частоты ω с шагом 1-2 рад/с определим значения функции φ(ω), занесем их в таблицу расчетных значений и построим график ФЧХ, на котором проведем горизонтальную прямую через точку, соответствующую заданному углу сдвига фаз φ, до пересечения с кривой ФЧХ. Через найденную точку пересечения проведем горизонтальную прямую до пересечения с осью частот, на которой отметим искомую круговую частоту $\omega_и$, которая дает заданный табл. 2 сдвиг фазы $\varphi(\omega_и) = \varphi$.

Подставляя найденное значение круговой частоты $\omega_и$ в выражение для модуля $H(\omega)$ частотной передаточной функции вычислим его значение $H(\omega_и)$.

Затем определяем искомую амплитуду выходного сигнала, как

$$Y_m = H(\omega_и) \cdot X_m.$$

Задача 3. Построение логарифмических частотных характеристик и годографа АФЧХ

1. Построить асимптотическую логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) и логарифмическую фазочастотную характеристику ЛФЧХ для линейной системы САУ, состоящей из четырех последовательно включенных звеньев:

одного реального дифференцирующего звена с передаточной функцией $W_1(p) = K_1 \cdot (T_1 \cdot p + 1)$;

двух апериодических звеньев первого порядка с передаточными функциями $W_2(p) = K_2/(T_2 \cdot p + 1)$ и $W_3(p) = K_3/(T_3 \cdot p + 1)$;

одного идеального интегрирующего звена с передаточной функцией K_4/p.

Исходные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта	Последняя цифра шифра		Предпоследняя цифра шифра	
	K	T_1, с	T_2, с	T_3, с
1	100	0,125	0,2	0,02
2	50	0,1	0.2	0.01

3	40	0.2	0,5	0,01
4	20	0,5	1,0	0,05
5	10	0,8	1,5	0,05
6	4	0,5	2,0	0,1
7	1	0,8	5,0	0,2
8	0,5	0,5	5,0	0,1
9	0,2	0,4	4,0	0,04
0	10	0,1	2,0	0,5

По условиям задачи передаточная функция заданной линейной САУ имеет следующий вид:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) = \frac{K \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_3 \cdot p + 1)}, \qquad (12)$$

где $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$.

2. Построить годограф АФЧХ $W(j\omega)$ заданной САУ.

Пример. Найдем выражение для логарифмической АЧХ и ФЧХ, для чего сначала определим АФЧХ системы по ее передаточной функции $W(p)$, заменяя в ней оператор Лапласа p на комплексную переменную $j\omega$.

$$W(j\omega) = \frac{K \cdot (1 + j\omega \cdot T_1)}{(1 + j\omega \cdot T_2) \cdot (1 + j\omega \cdot T_3) \cdot j\omega} = H(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \qquad (13)$$

где: $H(\omega) = \dfrac{K \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot T_1)^2}}{\sqrt{1 + (\omega \cdot T_2)^2} \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot T_3)^2} \cdot \omega}$ - амплитудно-частотная характеристику (АЧХ) системы САУ;

$\varphi(\omega) = [-\,90^{\circ} + \mathrm{arctg}(\omega \cdot T_1) - \mathrm{arctg}(\omega \cdot T_2) - \mathrm{arctg}(\omega \cdot T_3)]$ – аргумент частотной передаточной функции, представляющий собой фазочастотную характеристику (ФЧХ) системы САУ.

По известной АЧХ определим выражение для ЛАЧХ $L(\omega)$:

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg H(\omega) =$$

$$= 20 \cdot \lg K - 20 \lg \omega + 20 \lg \sqrt{1 + (\omega \cdot T_1)^2} - 20 \lg \sqrt{1 + (\omega \cdot T_2)^2} - 20 \lg \sqrt{1 + (\omega \cdot T_3)^2}\ \text{, дБ} \qquad (14)$$

Асимптотическую ЛАЧХ строим путем замены непрерывной кривой ЛАЧХ несколькими прямыми отрезками, которые сопрягаются между собой в точках, соответствующих круговым частотам ω_c (сопрягающим частотам), численно равным обратной величине от постоянных времени, входящих в выражение (14). В нашем примере имеем три сопрягающие частоты:

$$\omega_{c1} = 1/T_1, \text{ рад/с}; \omega_{c2} = 1/T_2, \text{ рад/с}; \omega_{c3} = 1/T_3, \text{ рад/с}.$$

Расположим сопрягающие частоты в порядке возрастания при следующих исходных данных нашего примера: $K = 10$; $T_1 = 0{,}4$ с; $T_2 = 2$ с; $T_3 = 0{,}02$ с.

Учитывая, что чем больше значение постоянной времени, тем меньше значение сопрягающей частоты, можем написать следующее неравенство:

$$\omega_{c2} = 0{,}5 < \omega_{c1} = 2{,}5 < \omega_{c3} = 50 \text{ рад/с}.$$

Выбираем масштаб для одной декады частот так, чтобы в этом масштабе на оси абсцисс (частот) разместить три декады логарифмической шкалы. Если значения всех сопрягающих частот больше или равно 1 ($\omega_c \geq 1$рад/с), то в качестве границ декад выбираем круговые частоты 1, 10, 100 и 1000 рад/с. В том случае, когда значение хотя бы одной из сопрягающих частот находится в диапазоне $0{,}1 \leq \omega_c < 1$, то границы декад необходимо сместить влево на одну декаду, т.е. выбрать 0,1, 1, 10 и 100 рад/с.

В пределах каждой декады можно выделить промежуточные значения частот, используя для этих целей логарифмическую шкалу. Затем на логарифмической оси частот отмечаем точки, соответствующие сопрягающим частотам ω_{c1}, ω_{c2}, ω_{c3}, и проводим через них вертикальные пунктирные линии. Ось ординат проводим через частотную отметку 1 рад/с и выбираем соответствующий масштаб, исходя из значения величины $20 \cdot \lg K$, так, чтобы можно было отложить значения $(20 \cdot \lg K + 20)$ и $(20 \cdot \lg K - 40)$, дБ.

В нашем случае откладываем на оси ординат следующие точки:

$$20 \cdot \lg 10 = 20;\ 20 \cdot \lg 10 + 20 = 40;\ 20 \cdot \lg 10 - 40 = -20 \text{ дБ}.$$

С целью удобства построения асимптотической ЛАЧХ выбираем масштаб 1 см на 10 дБ. Проводим через точку $20 \cdot \lg K$ вправо от оси ординат прямую линию с наклоном -20 дБ на декаду, для чего соединяем эту точку с точкой $(20 \cdot \lg K - 20)$, расположенной на частотной отметке 10 рад/с. Так как в нашем примере первая по порядку следования сопрягающая частота $\omega_{c2} < 1$, то продолжим эту прямую влево от оси ординат до пересечения с вертикальной пунктирной линией, исходящей из точки 0,1 рад/с на оси частот. Очевидно, что ордината точки пересечения равна $(20 \cdot \lg K + 20) = 40$ дБ.

На отрезке логарифмической оси частот $0{,}1 \leq \omega \leq \omega_{c2}$ асимптотическая ЛАЧХ описывается выражением: $L(\omega) = 20 \cdot \lg K - 20 \cdot \lg \omega$ и представляет собой отрезок проведенной ранее прямой с наклоном -20 дБ/дек, соединяющий точки ее пересечения с вертикальными пунктирными линиями, проведенными из точек 0,1 и ω_{c2} и имеющими ординаты, соответственно: $L(0{,}1) = 20 \cdot \lg 10 - 20 \cdot \lg 0{,}1 = 40$ дБ и $L(\omega_{c2}) = L(0{,}5) = 20 \cdot \lg 10 - 20 \cdot \lg 0{,}5 = (40 - 20 \cdot \lg 5)$ дБ.

Первая сопрягающая частота ω_{c2} принадлежит инерционному звену, поэтому после этой частоты асимптотическая ЛАЧХ на отрезке частотной оси $\omega_{c2} \le \omega \le \omega_{c1}$ описывается выражением: $L(\omega) = 20 \cdot \lg K - 20 \cdot \lg\omega - 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_2)$ и, следовательно, ее наклон увеличивается на -20 дБ/дек и становится равным -40 дБ/дек. Соединяя ординаты ($40 - 20 \cdot \lg 5$) в точке $\omega_{c2} = 0{,}5$ рад/с с ординатой ($- 20 \cdot \lg 5$) в точке $\omega = 10 \cdot \omega_{c2} = 5$ рад/с пунктирной линией получим отрезок прямой с наклоном -40 дБ/дек, который пересекает вертикальную пунктирную линию, соответствующую круговой частоте ω_{c1} = 2,5 рад/с, в точке с ординатой $L(\omega_{c1}) = L(2{,}5) = 20 \cdot \lg 10 - 20 \cdot \lg 2{,}5 - 20 \cdot \lg(2{,}5 \cdot 2)$ $= (20 - 20 \cdot \lg 12{,}5) = (-20 \lg 1{,}25)$ дБ. Соединяя ординату $L(\omega_{c2}) = (40 - 20 \cdot \lg 5)$ дБ сплошной прямой линией с ординатой $L(\omega_{c1}) = (-20 \cdot \lg 1{,}25)$, соответствующей точке пересечения наклонной пунктирной линии с вертикальной пунктирной линией), получим на отрезке логарифмической оси частот $\omega_{c2} \le \omega \le \omega_{c1}$ очередную асимптоту ЛАЧХ с наклоном -40 дБ/дек.

Вторая сопрягающая частота ω_{c1} принадлежит дифференцирующему звену, поэтому после этой частоты асимптотическая ЛАЧХ на отрезке частотной оси $\omega_{c1} \le \omega \le \omega_{c3}$ описывается выражением: $L(\omega) = 20 \cdot \lg K - 20 \cdot \lg\omega - 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_2) + 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_1)$ и, следовательно, ее наклон уменьшается на 20 дБ/дек и становится вновь равным -20 дБ/дек. Соединяя пунктирной линией ординаты ($-20 \cdot \lg 1{,}25$) в точке $\omega_{c1} = 2{,}5$ рад/с с ординатой ($-20 - 20 \cdot \lg 1{,}25$) в точке $\omega = 10 \cdot \omega_{c1} = 25$ рад/с получим отрезок прямой с наклоном -20 дБ/дек. Продолжим эту наклонную прямую до пересечения с вертикальной пунктирной линией, соответствующей круговой частоте $\omega_{c3} = 50$ рад/с, в точке с ординатой $L(\omega_{c3}) = L(50) = 20 \cdot \lg 10 - 20 \cdot \lg 50 - 20 \cdot \lg(50 \cdot 2) + 20 \cdot \lg(50 \cdot 0{,}4)$ $= (-40 + 20 \cdot \lg 4)$ дБ. Соединяя ординату $L(\omega_{c1}) = (-20 \cdot \lg 1{,}25)$ дБ сплошной прямой линией с ординатой $L(\omega_{c3}) = (-40 + 20 \cdot \lg 4)$, соответствующей точке пересечения наклонной пунктирной линии с вертикальной пунктирной линией), получим на отрезке логарифмической оси частот $\omega_{c1} \le \omega \le \omega_{c3}$ очередную асимптоту ЛАЧХ с наклоном -20 дБ/дек.

Третья сопрягающая частота ω_{c3} принадлежит интегрирующему звену, поэтому после этой частоты асимптотическая ЛАЧХ на отрезке частотной оси $\omega \ge \omega_{c3}$ описывается выражением: $L(\omega) = 20 \cdot \lg K - 20 \cdot \lg\omega - 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_2) + 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_1) - 20 \cdot \lg(\omega \cdot T_3)$ и, следовательно, ее наклон вновь увеличивается на -20 дБ/дек и становится равным -40 дБ/дек. Соединяя сплошной линией ординаты ($-40 + 20 \cdot \lg 4$) в точке $\omega_{c3} = 50$ рад/с с ординатой ($-80 + 20 \cdot \lg 4$) в точке $\omega = 10 \cdot \omega_{c3} = 500$ рад/с получим асимптоту ЛАЧХ с наклоном -40 дБ/дек.

На рис. 1 показан график асимптотической ЛАЧХ, построенный в соответствии с вышеприведенным алгоритмом.

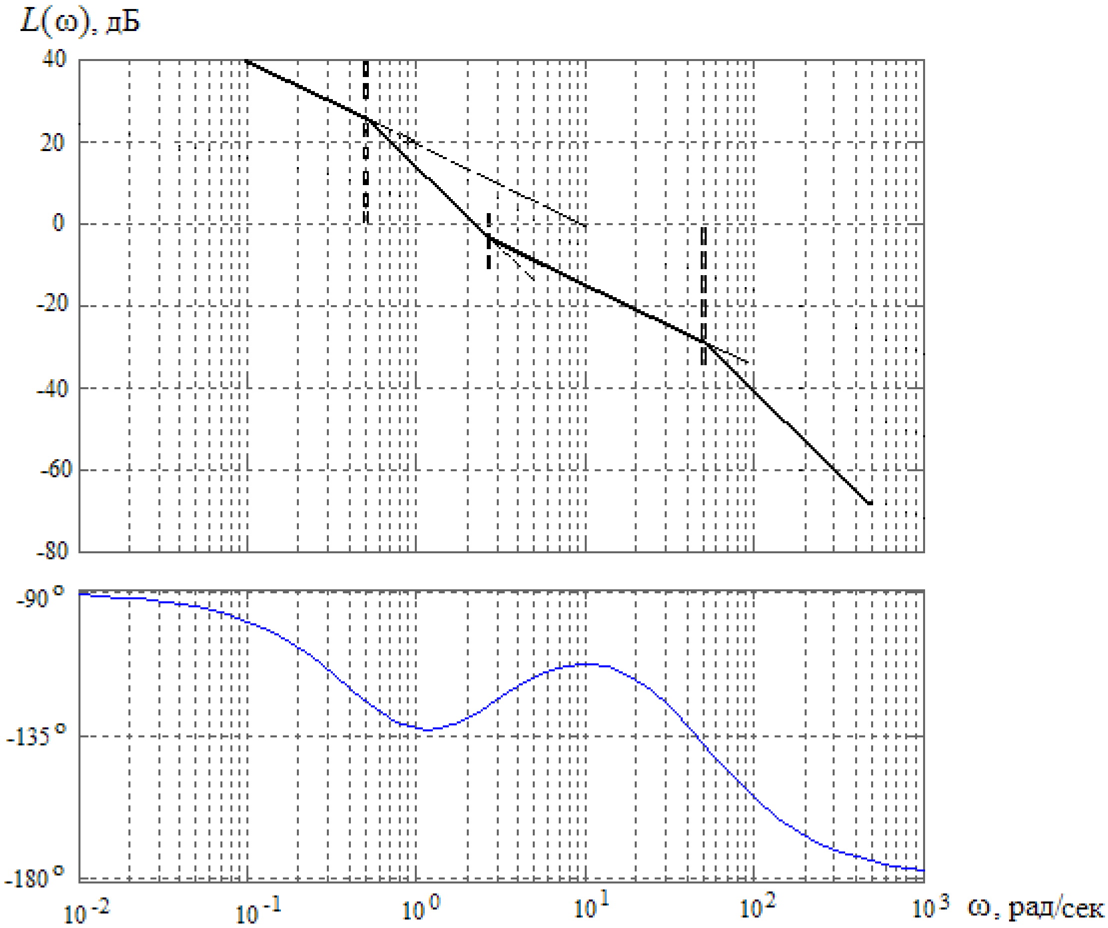

Рис. 1 Логарифмические асимптотическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

Для построения логарифмической ФЧХ воспользуемся выражением

$$\varphi(\omega) = [-\,90^{\circ} + \mathrm{arctg}(\omega\cdot T_1) - \mathrm{arctg}(\omega\cdot T_2) - \mathrm{arctg}(\omega\cdot T_3)].$$

Задаваясь численными значениями круговой частоты от 0,1 до 100 рад/с (при $\omega_{c2} < 1$) или от 1 до 1000 рад/с (при $\omega_{c2} \geq 1$), заполнить соответствующий столбец табл. 4 значениями частотной функции $\varphi(\omega)$ и выполнить ее построение так, как показано применительно к нашему примеру на рис. 1.

Для построения годографа АФЧХ необходимо также заполнить соответствующие столбцы табл. 4, для чего необходимо произвести расчет модуля $H(\omega)$ частотной передаточной функции $W(j\omega)$ и его проекций на мнимую ($M(\omega) = H(\omega)\cdot\sin[\varphi(\omega)]$) и действительную ($N(\omega) = H(\omega)\cdot\cos[\varphi(\omega)]$),

$$H(\omega) = \frac{K\cdot\sqrt{1+(\omega\cdot T_1)^2}}{\sqrt{1+(\omega\cdot T_2)^2}\cdot\sqrt{1+(\omega\cdot T_3)^2}\cdot\omega}$$

а также использовать данные выполненного ранее расчета фазочастотной характеристики.

Таблица 4

ω, рад/с	H(ω)	N(ω)	M(ω)	φ(ω), град
0,1	98,04	-16,40	-96,66	-99,63
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
1	4,816	-3,270	-4,05	-132,77
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
10	0,285	-0,109	-0,263	-112,48
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
100	0.0089	-0,008	-0,0052	-154,57

Так как значение модуля H(ω) АФЧХ обратно пропорционально круговой частоте, то для построения годографа следует брать более высокие частоты с наиболее близкими относительно малыми значениями модуля. Так, например, в нашем примере это частоты в диапазоне от 1 до 10 рад/с.

Откладываем на отрицательной действительной полуоси комплексной плоскости значения проекции N(ω) модуля H(ω), а на отрицательной полуоси - значения проекции M(ω) этого модуля, выбрав предварительно наиболее удобный масштаб. Затем через отложенные точки проводим вертикальные или горизонтальные линии параллельно противоположным координатным осям. Соединив точки пересечения этих линий с началом координат, получим векторы АФЧХ, соответствующие частотам, при которых вычислялись проекции их модуля на координатные оси. Соединив точки пересечения этих линий между собой и с началом координат, получим фрагмент годографа АФЧХ, представляющего собой кривую, которую описывает конец вектора W(jω) при изменении частоты в выбранном диапазоне частот.

Другой способ построения годографа АФЧХ основан на использовании полярных координат, для чего на комплексной плоскости через начало ее координат проводят ряд линий под углами, взятыми из табл. 4 для соответствующих частот, и на этих линиях откладывают в произвольно выбранном масштабе значения модуля H(ω) АФЧХ. Соединяя затем концы векторов между собой и с началом координат, получим искомый фрагмент годографа АФЧХ.

Фрагмент годографа АФЧХ, построенного на основании данных табл. 4, показан на рис. 2.

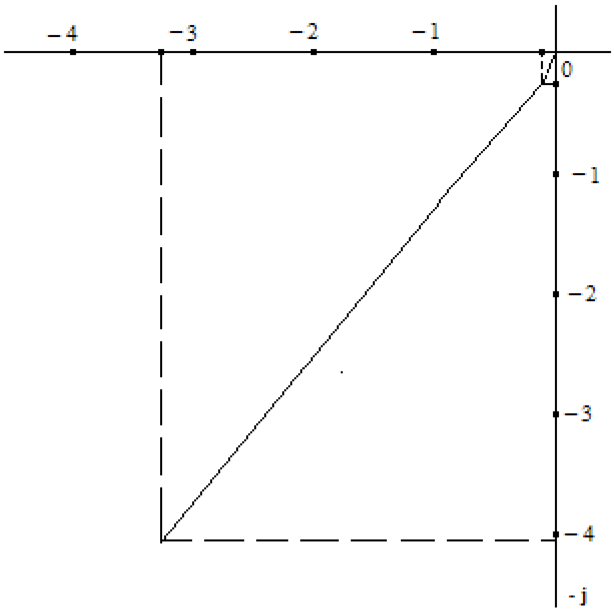

Рис. 2 Фрагмент годографа АФЧХ

Для построения ЛАЧХ, ЛФЧХ и годографа АФЧХ можно воспользоваться программой МАТЛАБ. Пример фрагмента годографа АФЧХ, построенного с применением этой программы, показан на рис. 3 для области частот 1 – 15 рад/с.

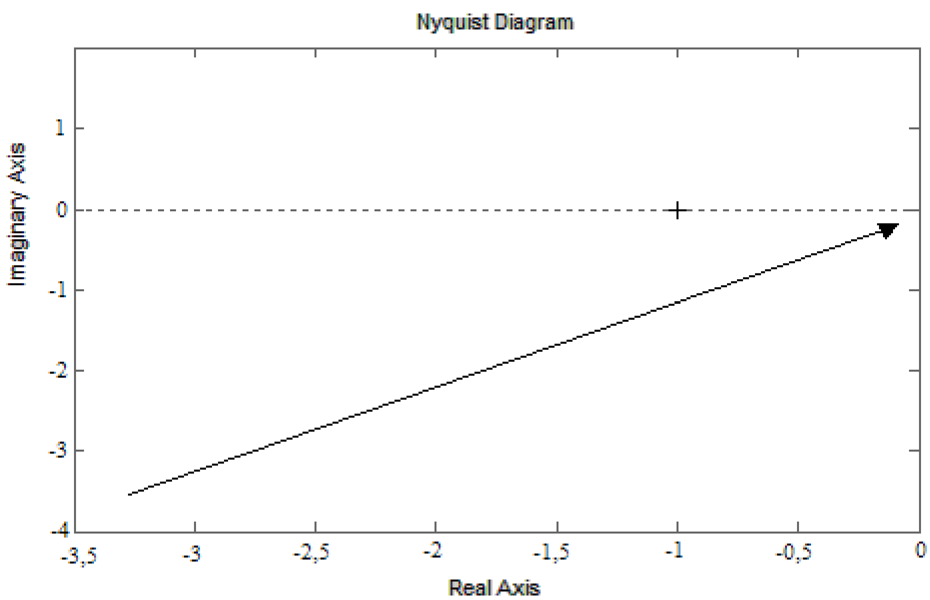

Рис. 3 Фрагмент годографа АФЧХ, построенного с использованием программы МАТЛАБ