

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»

681.5(07)
Т338

В.П. Мацин, А.Н. Горожанкин, К.М. Виноградов, А.М. Журавлев

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2015

УДК 681.51.01(075.8)
Т338

Одобрено
учебно-методической комиссией энергетического факультета.

Рецензенты:
Е.Я. Омельченко, А.С. Сарваров

Т338 Теория автоматического управления: учебное пособие / В.П. Мацин, А.Н. Горожанкин, К.М. Виноградов, А.М. Журавлев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 31 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Оно соответствует требованиям ФГОС и содержанию лабораторных и практических занятий, проводимых студентам по курсу «Теория автоматического управления». В учебном пособии большое внимание уделено построению частотных характеристик звеньев и систем. Рассмотрены вопросы устойчивости систем автоматического управления, а также их последовательная коррекция для достижения требуемых показателей качества работы.

Учебное пособие может быть полезно студентам энергетического факультета, обучающихся по родственным направлениям подготовки.

УДК 681.51.01(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2015

1.1 БОТА № 1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

1.1. Цель работы

Научиться строить логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики и по их виду определять основные показатели переходных процессов при ступенчатом входном воздействии.

1.2. Программа работы

1. По заданным параметрам своего варианта (рис. 1.1 $D_2 = D_3 = D_5 = 1$ и табл. 1.1) и с учетом их вариации (две вариации) построить аппроксимированные логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) и точные фазо-частотные характеристики (ФЧХ) соединения;

2. По виду аппроксимированных ЛАЧХ построить переходные функции (см. рис. 1.5);

3. Рассчитать, используя программу *Matlab*, ЛАЧХ, ФЧХ и переходные характеристики;

4. Оценить погрешности приближенных расчетов;

5. Выводы.

1.3. Методические указания

Частотные характеристики определяют реакцию системы автоматического управления (САУ) на синусоидальное входное воздействие. При плавном изменении круговой частоты колебаний ω на входе САУ амплитуда и фаза колебаний на выходе меняются. Отношение амплитуды колебаний на выходе к амплитуде колебаний на входе (K) от частоты определяет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а изменение сдвига по фазе (φ) между колебаниями на выходе и входе от частоты – фазочастотную характеристику (ФЧХ).

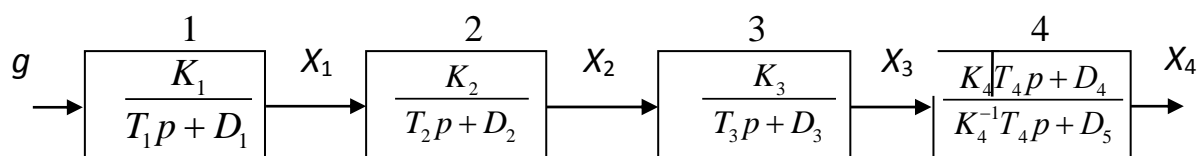


Рис. 1.1. Структурная схема системы

Таблица 1.1.

Параметры системы

Вар	K_1	T_1	D_1	K_2	T_2	K_3	T_3	K_4	T_4	D_4
1	1	3.0	1	1	1.50	1	0.8	2/4	1/2	1
2	3	3.0	1	1	1.50	1	0.8	2.0	1.00	1/0
3	1	1.5	1	2	0.80	1	0.2	2/4	0.50	1/0
4	1	1.5	1	1	0.80	1	0.4	2/4	0.5/1	1/0
5	1	3.0	1/0	1	0.8/1.5	1	0.4	4.0	1.00	0
6	1	0.8	1	1/2	0.40	1	0.2	2.0	1.00	1/0
7	1	0.8	1	1	0.40	1	0.2	0.5	1.00	1/0
8	2	1.5/0.8	1	1	0.80	1	3.0	2.0	1.00	1/0
9	2	0.4	1	1/2	1.50	1	0.8	0.5	2.00	1/0
10	1	0.8	1	2	0.40	1	0.2	4/0.5	0.50	1/0
11	3	0.1/0.4	1	1	0.05	1	0.2	4.0	0.04	1/0
12	1	0.8/0.2	1/0	1	0.40	1	0.2	1.0	0.50	0
13	2	3.0	1	1	1.50	1	0.8	4/1	2.00	1/0
14	1	1.5	1	1/3	0.40	1	0.2	2.0	0.50	1/0
15	1/2	0.8	1	1	0.20	1	0.4	0.5	1.00	1/0
16	1	1.5	1/0	1	0.80	1	0.4	2/0.5	2.00	0
17	3	2.0	1	1/2	0.05	2	0.1	1/0.5	1.00	1/0

Графики АЧХ и ФЧХ строят в прямоугольной системе координат. Причем, для удобства расчетов величины ω и K откладывают по осям в логарифмическом масштабе. Единицей измерения величины $\lg \omega$ является декада. Декада — это интервал частот, кратный 10. Для измерения величины $\lg K$ используют следующие величины:

Лог (лг) – единица измерения, характеризующая степень усиления или ослабления амплитуды сигнала в 10 раз;

Децилог (дл) – одна десятая часть лога;

Бел (Б) – одна вторая часть лога;

Децибел (дБ) – одна десятая часть Бела.

Связь между этими величинами такова:

$$1 \text{ лг} = 10 \text{ дл} = 2 \text{ Б} = 20 \text{ дБ}$$

На графике одной декаде и одному логу соответствуют 50 мм (масштабы $M_\omega = M_L = 50$ мм/дек). Величину φ откладывают в равномерном масштабе – 90 градусов соответствуют 45 мм графика [1, 2, 3]. Кроме обозначения величин, откладываемых по осям, целесообразно нанести на график координатную сетку так, как это показано на рис. 1.2. Затем строят логарифмические амплитудные частотные характеристики (ЛАЧХ) и логарифмические фазовые частотные характеристики (ЛФЧХ). В качестве примера на рис. 1.2 показаны ЛАЧХ и ФЧХ апериодического звена с единичным коэффициентом усиления. Примеры ЛАЧХ других типовых звеньев приведены на рис. 1.3.

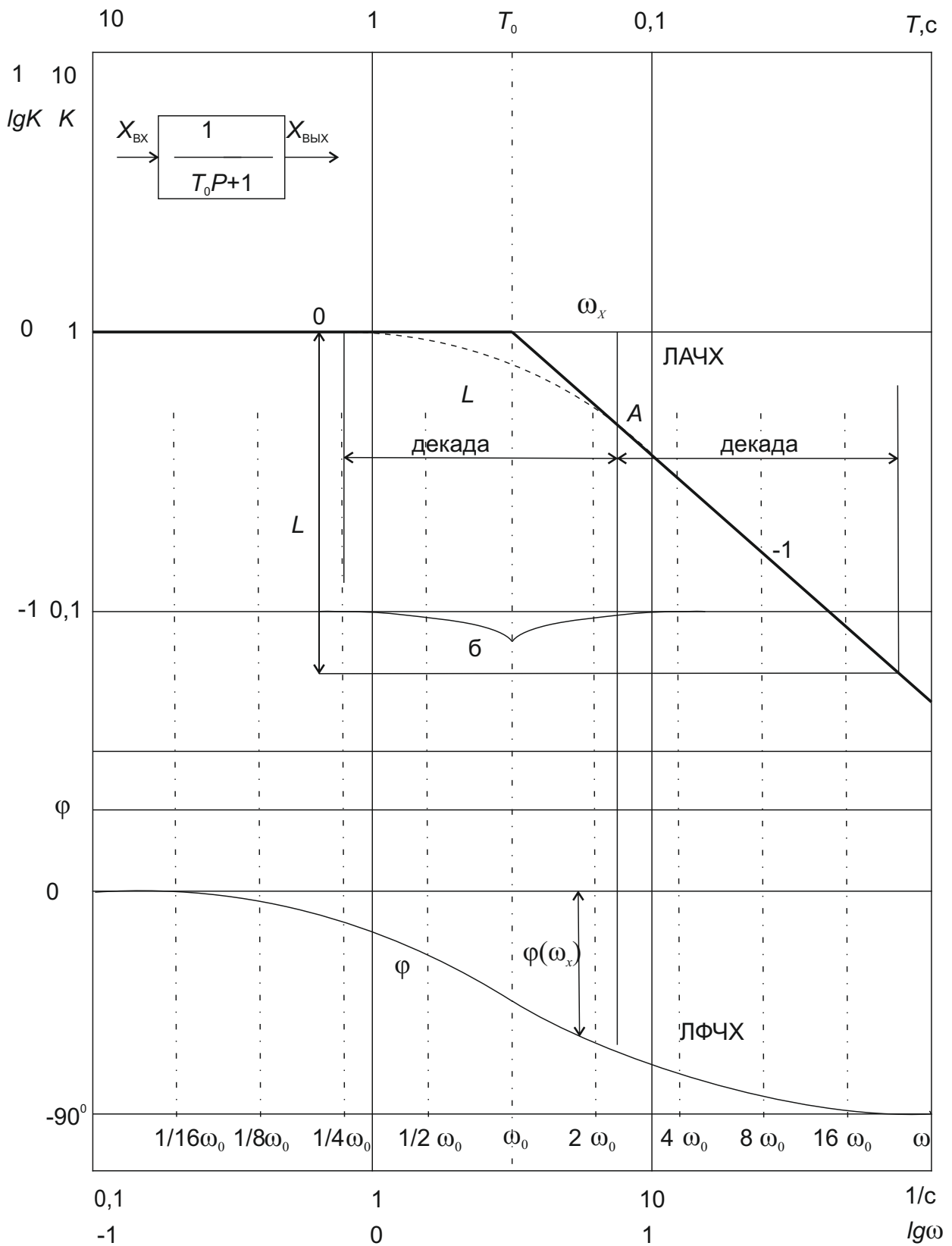


Рис. 1.2. Координатная сетка и пример построения ЛАЧХ и ФЧХ

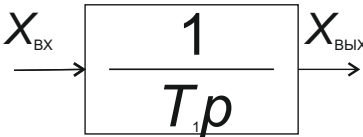
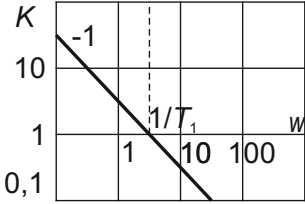
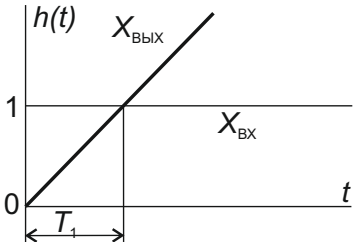
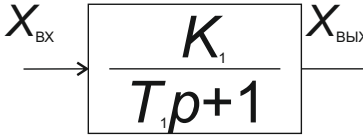
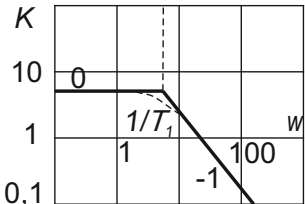
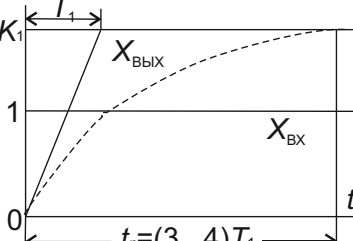
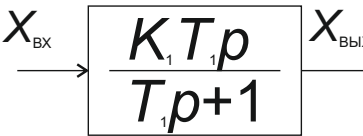
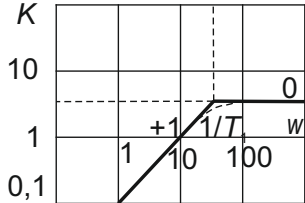
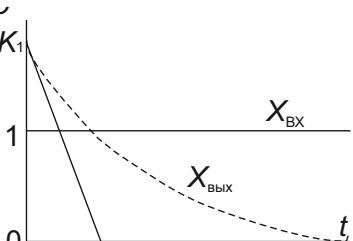
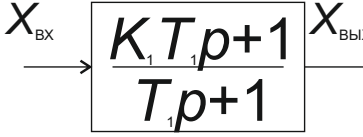
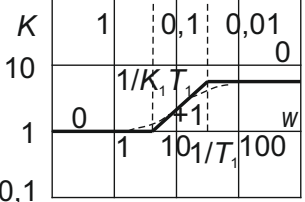
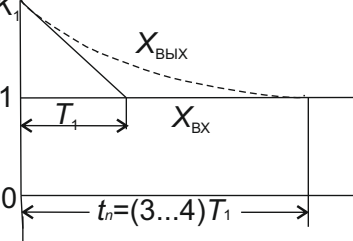
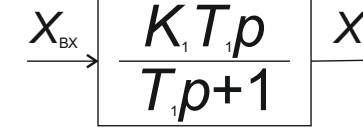
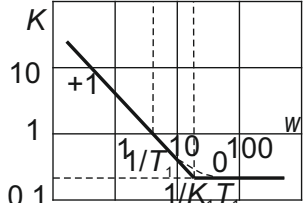
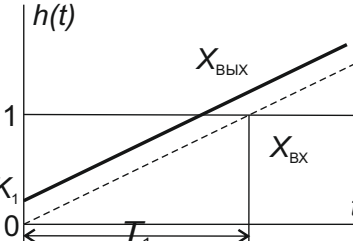
ЗВЕНО	ЛАЧХ	ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС
<p>ИДЕАЛЬНОЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ</p> 	<p>1 0,1 0,01 T</p> 	
<p>АПЕРИОДИЧЕСКОЕ</p> 	<p>1 0,1 0,01 T</p> 	
<p>РЕАЛЬНОЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЕ</p> 	<p>1 0,1 0,01 T</p> 	
<p>РЕАЛЬНОЕ ФОРСИРУЮЩЕЕ</p> 	<p>1 0,1 0,01 T</p> 	
<p>ИЗОДРОМНОЕ</p> 	<p>1 0,1 0,01 T</p> 	

Рис. 1.3. Частотные и переходные характеристики типовых звеньев

Расчетные ЛЧХ получаются из передаточных функций звена и САУ в целом путем замены в них оператора p на $j\omega$. При этом зависимость модуля вектора $K(j\omega)$ от частоты определяет АЧХ, а зависимость аргумента – ФЧХ.

Без учета поправок ЛАЧХ типовых звеньев (рис. 1.2 и рис. 1.3) представляют собой асимптоты, сопрягающиеся при частотах, равных обратным значениям постоянных времени звеньев $\omega_0 = 1/T_0$ или в логарифмическом масштабе $lg\omega_0 = -lgT_0$. Использование этой простой связи между ω_0 и T_0 позволяет вести в рассмотрение шкалу значений T . На рис. 1.3 шкала T показана в верхней части координатной сетки. При этом представляется возможным откладывать сразу величину T_0 , не вычисляя ω_0 .

Для того, чтобы отложить требуемые значения T (или ω) и K в логарифмическом масштабе можно воспользоваться табл. 1.2. Здесь для апериодического звена с постоянной времени T_0 (рис. 1.2) даны точные значения ЛАЧХ и ЛФЧХ для четырех частот слева и справа от частоты сопряжения ω_0 . В табл. 1.2 приведены также значения поправок δ (мм) которые добавляются к асимптотическим ЛАЧХ звеньев первого порядка для получения точных характеристик. По данным табл. 1.2 могут быть изготовлены шаблоны поправок δ и арктангенсоиды ϕ , использование которых существенно сокращает время для построения точных характеристик.

При последовательном соединении звеньев как ЛАЧХ, так и ФЧХ звеньев суммируются. Пример построения результирующих частотных характеристик последовательного соединенных звеньев первого порядка дан на рис. 1.4. Характеристики строят непосредственно по результирующей передаточной функции САУ в следующей последовательности:

1. На оси T откладывают численные значения постоянной времени звеньев (в данном примере T_1, T_2, T_3, T_5, T_6);

2. На оси K откладывают значение результирующего коэффициента усиления заданного соединения звеньев (в данном примере $K = 1$);

3. Изображают асимптотические ЛАЧХ соединения. При этом каждый из множителей $(Tp+1)$, находящийся в знаменателе передаточной функции, уменьшает наклон результирующей ЛАЧХ на единицу (-1 лог/дек). Каждый из аналогичных сомножителей числителя дает увеличение наклона на $+1$ лог/дек. В данном примере после излома, связанного с T_5 , асимптотическая ЛАЧХ идет вверх с наклоном $+1$ лог/дек, затем после излома, связанного с T_6 , наклон результирующей ЛАЧХ уменьшается на -1 лог/дек и становится нулевым. После излома, связанного с T_1 , наклон ЛАЧХ становится отрицательным и равным -1 лог/дек, после T_2 отрицательный наклон увеличивается до -2 лог/дек, после T_3 – до -3 лог/дек. Точная искомая ЛАЧХ L соединения получается, если учесть поправки, ординаты которых суммируют и прибавляют к асимптотической ЛАЧХ;

$M=M_L=50\text{мм/дек}$ $\omega_0=1/T_0$

Таблица 1.2

$\bar{\omega} = \omega/\omega_0$	—	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16
$lg\bar{\omega}$	лг	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0	0,3	0,6	0,9	1,2
$M \cdot lg\bar{\omega}$	мм	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
$\varphi = -arctg\bar{\omega}$	град	-3,6	-7	-14	-26,6	-45	-63,4	-76	-83	-86,4
$K(\bar{\omega}) = \sqrt{1 + \bar{\omega}^2}$	—	0,998	0,992	0,97	0,894	0,707	0,447	0,243	0,124	0,0624
$L(\bar{\omega}) = lgK(\bar{\omega})$	лг	-0,0008 5	-0,003 4	-0,001 3	-0,048	-0,15	-0,35	-0,62	-0,90 6	-1,20 5
$M_L \cdot L(\bar{\omega})$	мм	-0,04	-0,17	-0,64	-2,42	-7,5	-17,5	-30,5	-45,3	-60,2
$\delta(\bar{\omega} < 1)$	мм	-0,04	-0,17	-0,64	2,42	-7,5	—	—	—	—
$\delta(\bar{\omega} > 1)$	мм	—	—	—	—	-7,5	-2,5	-0,08	-0,3	-0,2

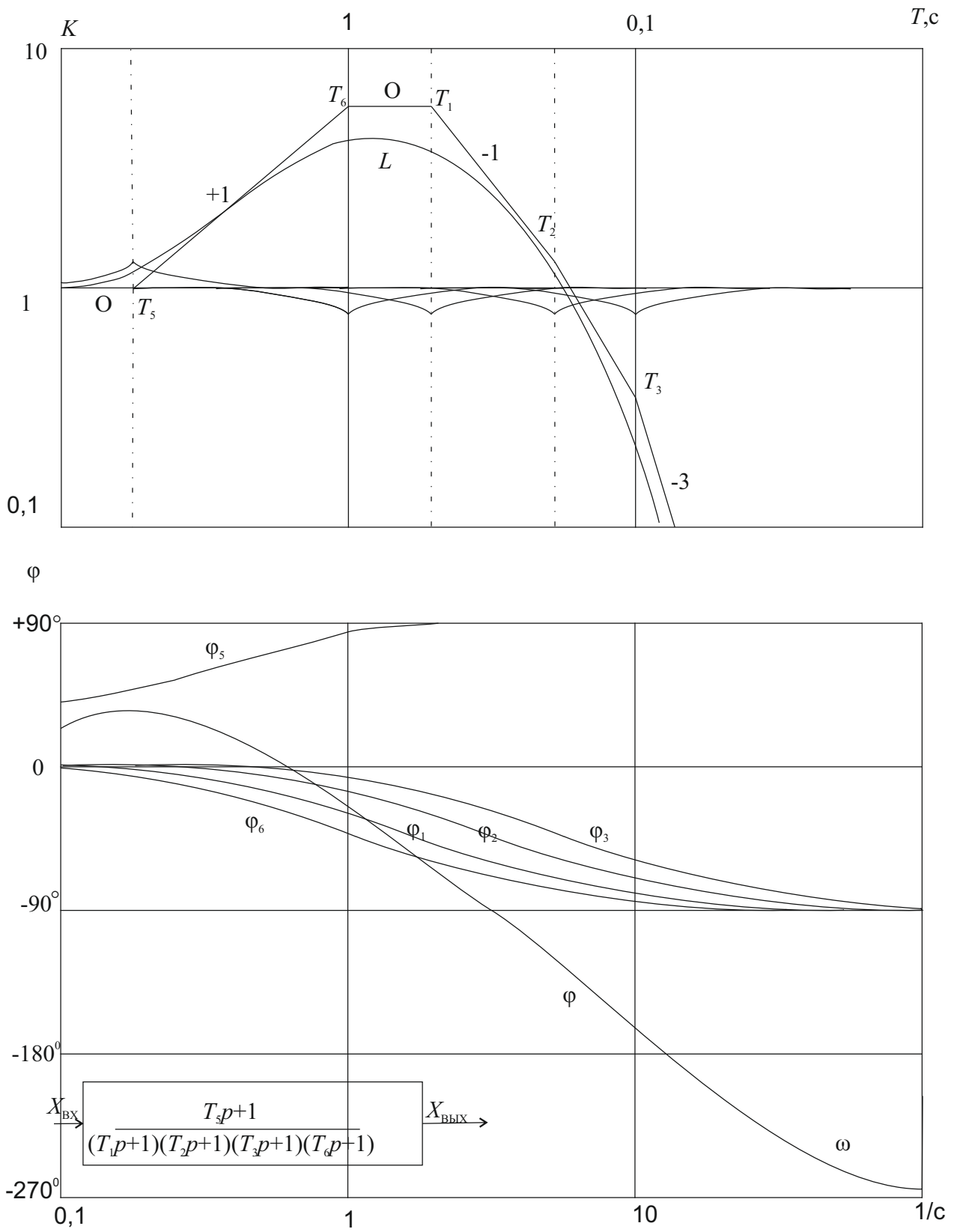


Рис. 1.4. Пример построения ЛАЧХ и ФЧХ последовательно соединенных звеньев

4. Используя шаблон арктангенсоиды (табл. 1.2), вычерчивают фазовые характеристики звеньев. Для звеньев числителя – над осью $\varphi=0$, для звеньев знаменателя – под осью $\varphi=0$. При этом середину шаблона, где $\varphi=45^\circ$ совмещают с вертикалью, проходящей через соответствующую точку излома ЛАЧХ;

5. Суммируя ординаты ЛФЧХ звеньев (в данном примере ординаты $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_6$), получают искомую ЛФЧХ φ соединения.

Видно, что результирующие характеристики соединения L и φ представляют собой плавные кривые. В таком виде они получаются и при экспериментальном их определении.

Следует отметить, что для системы минимального - фазового типа, корни полиномов числителя и знаменателя, передаточные функции которых имеют отрицательные вещественные части, между ЛАЧХ и ФЧХ существует однозначная связь. Эта связь может быть выражена упрощенным соотношением $\varphi(\omega_x) = 90 \cdot Y_{cp} = 45 \cdot \Delta L$ (град). Здесь $Y_{cp}=0,5 \Delta L$ (лог/дек) средний наклон ЛАЧХ на какой либо частоте ω_x . Для определения среднего наклона ЛАЧХ в какой-либо точке A (рис. 1.2) достаточно определить приращение ЛАЧХ ΔL на интервале, равном двум декадам и поделить его пополам. Наличие однозначной связи между ЛАЧХ и ФЧХ позволяет в большинстве практических случаев при оценке динамики минимально-фазовых САУ использовать лишь ЛАЧХ.

Так как результирующая ЛАЧХ представляет собой зависимость коэффициента передачи гармонического воздействия от частоты, то по ее виду уже можно оценить поведение системы для воздействий, изменяющихся периодически.

Для оценки реакции системы на ступенчатое входное воздействие достаточно ЛАЧХ системы аппроксимировать отрезками прямых линий с типовыми наклонам $0, \pm 1, \pm 2$ и т.д. и представлять систему в виде последовательного соединения типовых звеньев. Связь между кривыми переходными процессов и наиболее распространенными видами ЛАЧХ показаны на рис. 1.3 и рис. 1.5.

Если характеристика системы имеет единственный отрицательный наклон во всем диапазоне частот (звено 1 на рис. 1.3), то такая система представляется в виде идеального интегрирующего звена, а переходный процесс при единичном ступенчатом воздействии – прямой линией, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс составляет $1/T_1$.

Если ЛАЧХ в области высоких частот имеет единичный отрицательный наклон, а при малых частотах – нулевой наклон (звено 2 на рис. 1.3), то такая система будет представлена апериодическим звеном, а переходный процесс – экспонентой, установившееся значение которой определяется горизонтальным уровнем ЛАЧХ, а постоянная времени – изломом ЛАЧХ.

ЗВЕНО	ЛАЧХ	переходный процесс
	<p style="text-align: center;">$T_{\Sigma} = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$</p>	<p style="text-align: center;"> — Эквивалентный - - - - Реальный </p>
	<p style="text-align: center;"> $T_{\Sigma 1} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + \dots$ $T_{\Sigma 2} = T_2 + T_3 + T_4 + \dots$ </p>	
	<p style="text-align: center;"> $T_{\Sigma 1} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + \dots$ $T_{\Sigma 2} = T_2 + T_3 + T_4 + \dots$ </p>	

Рис. 1.5. Оценка переходных характеристик САУ по их ЛАЧХ

Если ЛАЧХ в области высоких частот имеет нулевой наклон, а в области низких частот – положительный единичный наклон (звено 3 на рис. 1.3), то система представляется реальным дифференцирующим звеном и ей соответствует переходный процесс, протекающий по экспоненте, начальное значение которой определяется ординатой ЛАЧХ на высоких частотах, а установившееся значение равно нулю.

Если результирующая ЛАЧХ аппроксимируется ломаной линией с увеличивающимися отрицательными наклонами (первый случай на рис. 1.5), то переходный процесс в такой системе можно представить экспонентой с постоянной времени, равной сумме постоянных времени эквивалентных апериодических звеньев $T_3 = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$, где T_1 , T_2 , T_3 и т.д. соответствуют изломам ЛАЧХ. Системе с характеристикой, имеющей «завалы» в области высоких и низких частот (второй случай на рис. 1.5), соответствует переходный процесс, являющийся суммой двух экспонент. Выходная величина возрастает по экспоненте с меньшей постоянной времени $T_{32} = T_2 + T_3 + T_4 + \dots$ и спадает по экспоненте с большей постоянной времени $T_{33} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$. Максимальное значение выходной величины приближается к уровню, определяемому значением верхнего горизонтального участка ЛАЧХ. При наличии горизонтального участка на низких частотах (третий случай на рис. 1.5) выходная величина стремится не к нулю, а к величине K_0 , определяемой низкочастотным горизонтальным участком ЛАЧХ.

Из рассмотрения рис. 1.5 легко заметить, что если ЛАЧХ во всем диапазоне частот проходит ниже уровня, определяемого ее значением при нулевой частоте (соответствующий статическому режиму), то выходная величина системы при ступенчатом сигнале на входе монотонно возрастает до установившегося значения, определяемого коэффициентом K_0 (см первый случай). При наличии максимумов в ЛАЧХ (второй и третий случаи на рис. 1.5), выходная величина $X_{\text{вых}}$ в переходном процессе может достигнуть величины, определяемой значением максимального коэффициента K_m .

В работе предусматривается построение логарифмических частотных характеристик и определение по их виду основных показателей переходного процесса при ступенчатом входном воздействии. Кроме того, частотные и переходные характеристики рассчитываются на ЭВМ. Полученные ЛАЧХ сопоставляются с соответствующими расчетными характеристиками. Диаграммы переходных процессов обрабатывают, определяют основные показатели переходных процессов и сопоставляют их с показателями процессов, найденных расчетным путем.

Для сопоставления точных и приближенных расчетов целесообразно воспользоваться частотными и временными показателями качества работы САУ. Например:

- ошибка регулирования в статике;
- величина максимума переходной характеристики;
- время достижения максимального значения;
- величина установившегося значения;

- время переходного процесса;
- число колебаний и т.д.

1.4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики;
2. Дайте определение фазо-частотной характеристики;
3. Что такое переходная характеристика;
4. Какие показатели качества переходных процессов Вы знаете?
5. Как найти результирующие частотные характеристики (ЛАЧХ и ФЧХ) при последовательном соединении звеньев?

РАБОТА № 2. ВСТРЕЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

2.1. Цель работы

Научиться оценивать устойчивость системы. Выяснить причины возникновения перерегулирования и колебаний в замкнутых системах автоматического управления и влияние запаса устойчивости на показатели качества переходных процессов при ступенчатом входном воздействии.

2.2. Программа работы

1. По заданным параметрам своего варианта (рис. 2.1.) проверить устойчивость системы, используя алгебраические и частотные критерии устойчивости. Алгебраические критерии Рауса и Гурвица. Частотные критерии Михайлова и Найквиста.

а) При применении критерия Михайлова строиться годограф Михайлова и делается вывод об устойчивости замкнутой системы. При применении критерия Найквиста строиться годограф Найквиста, по которому определяются запасы устойчивости по фазе, амплитуде и делается вывод об устойчивости системы;

б) строятся аппроксимированная ЛАЧХ и точная ФЧХ разомкнутой системы, по которой определяются запасы устойчивости по фазе и амплитуде (сравнить со значениями, полученными в пункте а) и делается вывод об устойчивости системы;

в) строится аппроксимированная ЛАЧХ замкнутой системы, определяется запас устойчивости по фазе и делается вывод об устойчивости системы.

2. Определить граничные значения заданного параметра (параметр выделен в таблице на рис. 2.1) и общего коэффициента усиления ($K_{гр} = K_1 K_2 K_3$) из условия устойчивости системы.

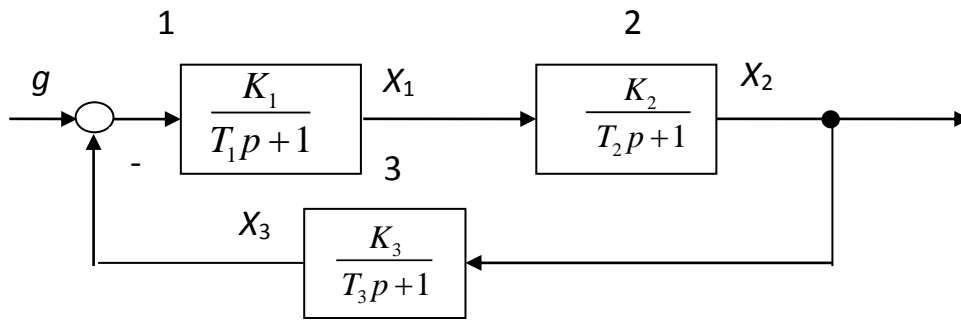
3. Определить из условия устойчивости системы область допустимых значений параметров (первый параметр выделен на рис. 2.1, а второй – задается преподавателем).

4. Построить ЛАЧХ, ФЧХ для разомкнутой системы и переходную характеристику для замкнутой системы с граничным $K_{гр}$ значением общего коэффициента усиления. Определить частоту среза и частоту незатухающих колебаний.

5. Провести анализ влияния запаса устойчивости по фазе на показатели качества переходных процессов. Изменение запаса устойчивости осуществляется за счет вариации коэффициентов усиления звеньев системы.

6. Построить статическую характеристику $x_2 = f(g)$.

7. Выводы.



Вар	K_1	T_1	K_2	T_2	K_3	T_3
1	3	0.4	1	0.10	1	0.1
2	3	0.1	1	0.05	1	1.5
3	1	0.8	3	0.20	1	0.2
4	1	0.2	3	0.10	1	0.8
5	2	1.5	2	0.20	1	0.4
6	2	0.1	2	0.05	1	0.8
7	3	0.8	1	0.10	2	0.1
8	3	0.1	1	0.40	2	3.0
9	1	0.1	3	0.80	2	0.1
10	1	0.4	3	0.20	2	3.0
11	2	3.0	2	0.20	2	0.2
12	2	0.1	2	0.05	2	1.5
13	3	1.5	1	0.40	2	0.2
14	2	0.4	2	0.80	1	3.0
15	1	3.0	2	0.80	2	0.8
16	1	0.8	1	0.40	3	3.0

Рис. 2.1. Структурная схема и параметры системы к работе 2

2.3. Методические указания

При встречно-параллельном соединении звеньев искомые ЛАЧХ и ФЧХ получаются путем вычитания поправочных ординат из характеристик звена с меньшим модулем. На рис. 2.2 приведен пример построения точных ЛЧХ встречно-параллельно соединенных звеньев. При частотах, меньших частоты среза системы ω_c (частоты пересечения характеристик L_1 и $L_{2обр}$), поправки вычитаются из характеристик звена обратной связи $L_{2обр}$ и $\varphi_{2обр}$. При частотах больших частоты среза системы ω_c поправки вычитаются из характеристик звена находящегося в прямом канале L_1 и φ_1 .

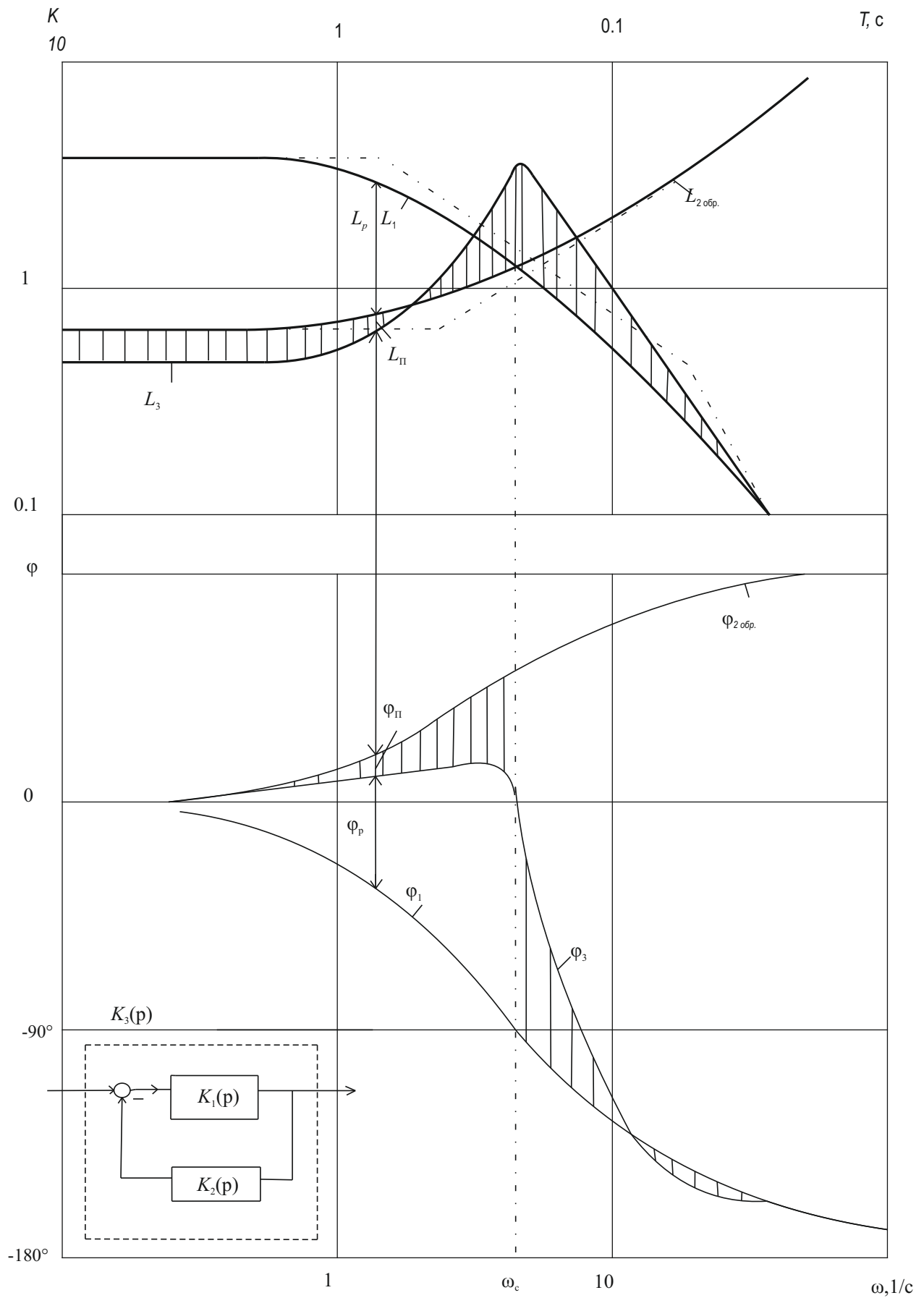


Рис. 2.2. Пример построения ЛАЧХ встречно-параллельно соединенных звеньев

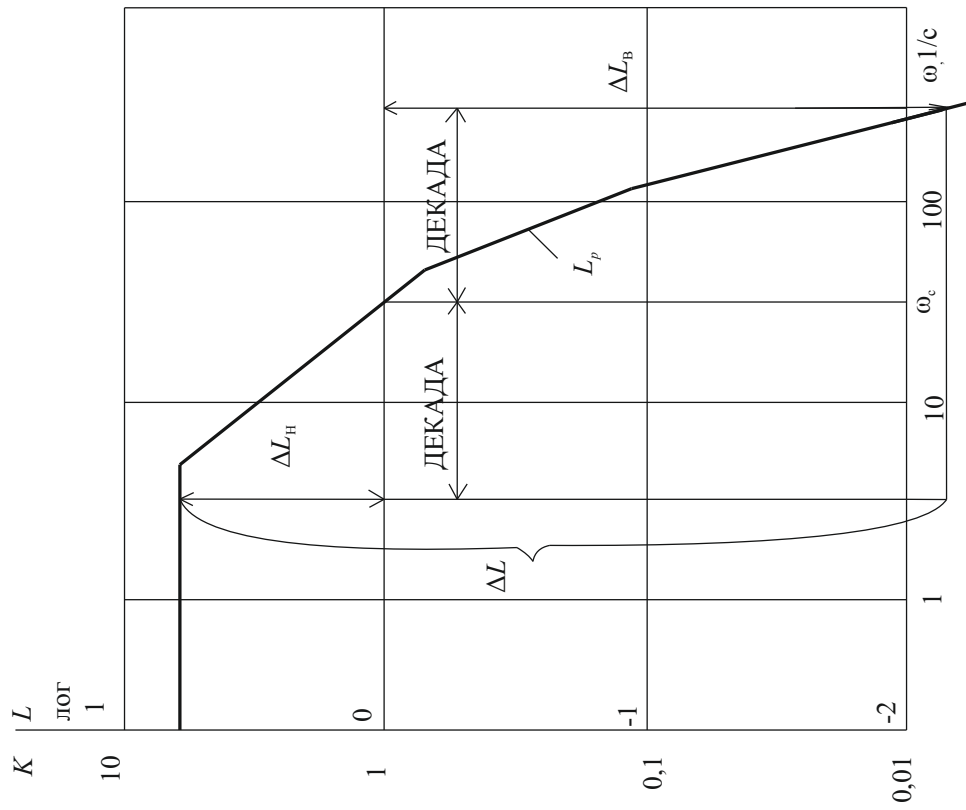
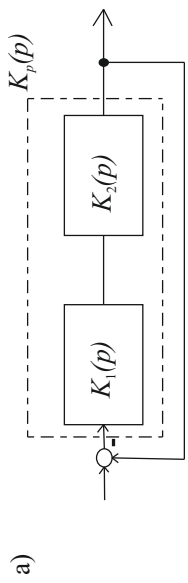
Аналогично строятся точные ЛАЧХ и ФЧХ при согласно-параллельном соединении звеньев. В этом случае поправки прибавляются к вышележащим характеристикам звеньев.

Если разность между фазовыми характеристиками соединяемых звеньев лежит в пределах $0^0 < \varphi < 150^0$, то значения поправок находят в пределах -0.3 лог и в практических расчетах с помощью аппроксимированных ЛАЧХ ими можно пренебречь, а результирующую ЛАЧХ проводить

- 1) для согласно-параллельного соединения – по верхним участкам характеристик слагаемых звеньев;
- 2) для встречно-параллельного соединения – по нижним участкам этих характеристик.

Для приближенного определения фазы при частоте среза системы ω_c , когда амплитуда колебаний на выходе разомкнутой САУ равна амплитуде колебаний на входе и коэффициент передачи системы $K_p = K_1 \cdot K_2 = 1$, может быть использовано правило среднего наклона, изложенного ранее. Для этого достаточно определить разности ординат ΔL_B и ΔL_H , отстоящих на расстоянии по одной декаде от частоты среза соответственно в сторону высоких и низких частот (рис. 2.3). Фаза при частоте среза определяется так: $\varphi(\omega_c) = 45 \cdot (\Delta L_B + \Delta L_H)$ (град). Если сумма контрольных ординат $\Delta L = \Delta L_B + \Delta L_H$ находится в интервале 2-3 лог, то можно поправкой пренебречь, т.к. она меньше 0.15 лог. Это дает возможность при синтезе САУ обходиться построением только одних аппроксимированных ЛАЧХ без определения поправок.

Всплеск результирующей ЛАЧХ замкнутой САУ, изучаемой в данной работе (рис 2.2), зависит от двух основных причин. Одной из причин является то, что фаза разомкнутой системы φ_p при частоте среза может быть близка к 180^0 . В этом случае, как отмечалось выше, появляются значительные поправки. Результирующая ЛАЧХ САУ приобретает вид ЛАЧХ колебательного звена, а переходный процесс выходной величины представляет собой колебания, затухающие тем медленнее, чем меньше запас устойчивости системы по фазе $\Delta\varphi = 180^0 - \varphi_p(\omega_c)$. Если $\varphi_p(\omega_c)$ окажется при каком-то сочетании параметров больше 180^0 , то колебания будут расходящимися. Такая система является неустойчивой и, следовательно, неработоспособной. Очевидно, что меньшему запасу устойчивости соответствует большая амплитуда колебаний и большее время переходного процесса.



б)

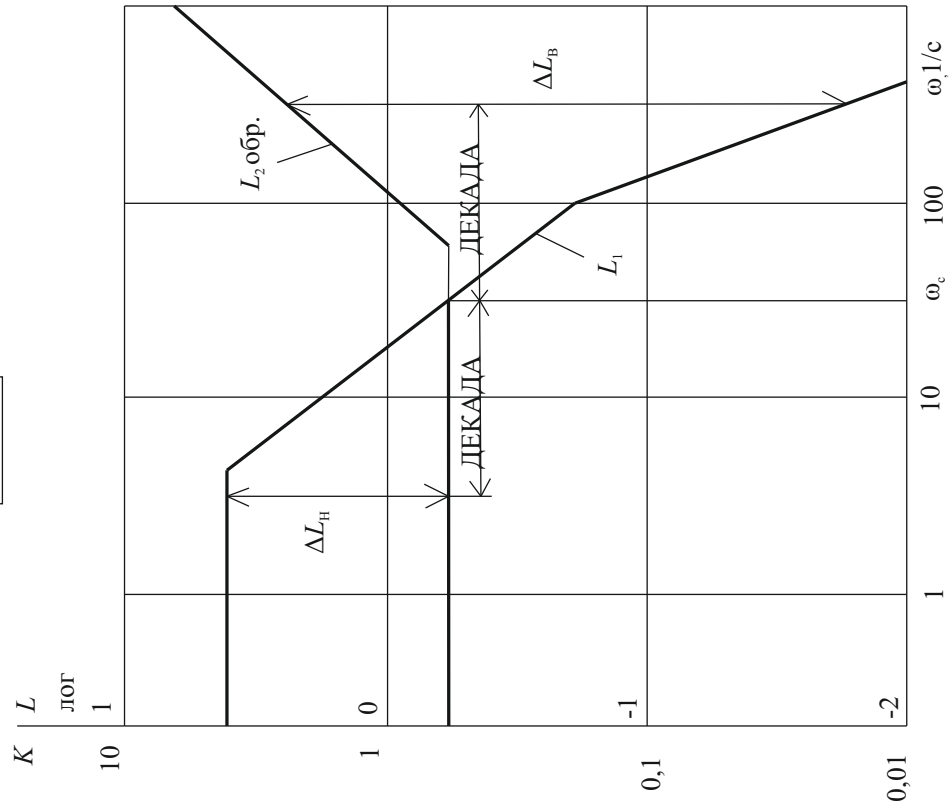
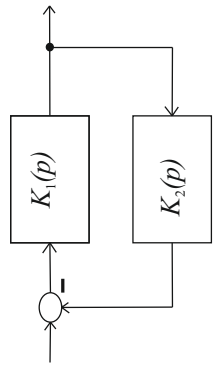


Рис. 2.3. Примеры приближенного определения фазы на частоте среза по ЛАЧХ САУ, представленных структурными схемами а) и б)

Другой причиной всплеска результирующей ЛАЧХ может явиться значительная инерционность канала обратной связи. В этом случае пересечение ЛАЧХ прямого и обратного каналов будет происходить при частоте, превышающей частоту излома ЛАЧХ канала обратной связи, определяющую его инерционность. И хотя в этом случае запас устойчивости системы может быть достаточным и поправки по амплитуде малы, тем не менее переходный процесс будет протекать со значительным перерегулированием, тем большим, чем больше инерционность обратной связи. Результирующая ЛАЧХ системы в этом случае напоминает ЛАЧХ, изображенную на рис 1.5, третий случай. Величина перерегулирования определяется по формуле

$$\delta = [X_{\text{ВЫХМАКС}} - X_{\text{ВЫХ}}(\infty)] \cdot 100 / X_{\text{ВЫХ}}(\infty).$$

Здесь $X_{\text{ВЫХМАКС}}$ – максимальное отклонение выходной величины. В расчетах оно может быть принято равным максимуму ЛАЧХ K_M , $X_{\text{ВЫХ}}(\infty)$ – установившееся значение выходной величины, определяемой ординатой ЛАЧХ на нулевых частотах ЛАЧХ K_0 .

В выводах по работе необходимо сопоставить между собой методы, которые применялись для оценки устойчивости системы. При анализе влияния запаса устойчивости системы показатели качества переходных процессов могут быть взяты из первой лабораторной работы. Результаты анализа предоставить в виде таблиц и графиков.

2.4. Контрольные вопросы

1. В чем причины перерегулирования и колебаний в замкнутых системах автоматического регулирования?
2. Что такое запас по фазе?
3. Какие методы проверки устойчивости систем Вы знаете?
4. Что такое статическая характеристика?
5. Что такое частота среза?

РАБОТА № 3. СИСТЕМА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ КОРРЕКТИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

3.1. Цель работы

Научиться выбирать параметры последовательных корректирующих устройств.

3.2. Программа работы

1. По заданным параметрам неизменяемой части САУ (звенья 1, 2, 3 на рис. 3.1) для своего варианта определить параметры корректирующих устройств исходя из условий:

а) устойчивости системы (обеспечить запас устойчивости по фазе в пределах 40...60 градусов);

б) минимального времени регулирования при отработке ступенчатого задающего воздействия $g(t)$;

в) наибольшего ослабления возмущающего воздействия $f(t)$.

В качестве последовательных корректирующих устройств в каждом варианте применить следующие типовые звенья:

– пропорциональное;

– интегрирующее;

– изодромное;

– реальное-форсирующее ($k>1$, $k<1$).

2. Рассчитать и построить точные переходные характеристики относительно задающего $g(t)$ и возмущающего $f(t)$ воздействий для всех перечисленных корректирующих устройств с предварительно выбранными параметрами.

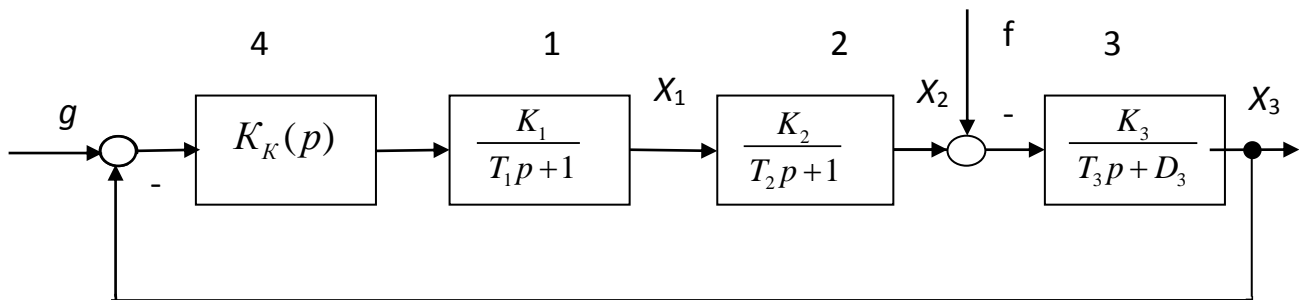
3. Дать сравнительную оценку эффективности различных корректирующих устройств последовательного типа.

Для сравнительной оценки необходимо выбрать параметры корректирующих устройств таким образом, чтобы получить приблизительно одинаковые запасы устойчивости по фазе.

4. Построить статические характеристики.

3.3. Методические указания

Эффективным средством обеспечения устойчивости и необходимого качества процессов регулирования является коррекция САУ, осуществляемая путем включения в контуры регулирования дополнительных элементов с легко изменяемыми параметрами [1, 2, 3]. Такие элементы называют корректирующими устройствами. Корректирующие устройства последовательного типа включают последовательно с элементами неизменяемой части САУ.



Вар	K_1	T_1	K_2	T_2	K_3	T_3	D_3
1	3	0.2	1	0.01	5	0.8	1
2	4	0.2	4	0.05	2	0.8	0
3	3	0.4	1	0.01	5	1.5	1
4	2	0.1	2	0.04	4	0.4	1
5	3	0.1	1	0.01	5	0.4	1
6	2	0.1	4	0.01	5	1.5	1
7	1	0.4	4	0.01	4	0.2	1
8	1	0.8	4	0.02	3	1.5	0
9	1	0.4	4	0.01	4	0.1	1
10	3	0.1	3	0.05	1	0.4	0
11	4	0.8	1	0.05	4	0.1	1
12	5	0.2	1	0.04	3	3.0	0
13	5	0.4	1	0.05	3	0.2	1
14	4	0.1	3	0.05	2	0.4	0
15	1	0.2	5	0.05	3	0.4	1
16	1	0.2	3	0.05	4	0.4	0

Рис. 3.1. Структурная схема и параметры системы к работе 3

При расчете коррекции с помощью аппроксимированных ЛАЧХ задача сводится к проверке зоны влияния заданного корректирующего устройства на динамику системы. В качестве таких устройств могут применяться типовые динамически звенья (рис. 1.3). В результате введения последовательного корректирующего устройства ЛАЧХ разомкнутой нескорректированной системы деформируются так, чтобы как можно больше приблизить ее к желаемому виду, в результате чего, с одной стороны, обеспечивается необходимый запас устойчивости САУ, а с другой, – достигается минимальное время регулирования и в наибольшей степени происходит ослабление влияния возмущений на регулируемую величину.

Минимально допустимым в линейных САУ считается запас по фазе равный 30...40 градусов [1, 2, 3]. Для его обеспечения средний наклон ЛАЧХ скорректированной системы в районе частоты среза должен быть не более полутора кратного (-1.5 лог/дек), а сумма контрольных ординат

$\Delta L = \Delta L_B + \Delta L_H$, взятых на расстоянии по одной декаде влево и вправо от частоты среза, не должна превышать 3 лога (рис. 2.3).

Выбор зоны влияния и параметров корректирующего устройства удобно производить на основе структурных схем, когда корректирующее устройство с передаточной функцией $K_K(p)$ помещено в прямой канал, а вся неизменяемая часть одноконтурной САУ с передаточной функцией $K_{HK}(p)$ – в обратный канал.

На рис. 3.2 и рис. 3.3 приведены примеры выбора параметров последовательной коррекции, в качестве которой используется реально форсирующее звено. Причем на рис. 3.2 рассмотрен опережающий ($K > 1$), а на рис. 3.3 – запаздывающий ($K < 1$) вид коррекции. При опережающей коррекции обеспечивается уменьшение контрольных ординат ΔL_B при частотах, больших частоты среза нескорректированной системы. Восходящий участок ЛАЧХ корректирующего звена L_K следует располагать в непосредственной близости к этой частоте. Он должен охватывать интервал частот, примерно равный одной декаде. В противном случае уменьшение ординат ΔL_B будет незначительным.

Если введением корректирующего устройства достигается уменьшением ординат ΔL_H в области частот, меньших частоты среза, коррекция называется запаздывающей. При запаздывающей коррекции (рис. 3.3) нисходящий участок располагают левее частоты среза нескорректированной системы на расстоянии, не меньше одной декады. Интервал часто, охватываемый им, выбирают примерно равным одной декаде, чтобы обеспечить необходимое уменьшение ординат ΔL_H .

Необходимая степень ослабления влияния возмущения на регулируемую величину проверяется путем построения аппроксимированной ЛАЧХ системы, в качестве входа которой рассматривают возмущение, а в качестве выхода – отклонение регулируемой величины (ошибку регулирования). Максимум такой ЛАЧХ должен быть ниже уровня, определяющего допустимую величину ошибки. Уменьшение ошибки регулирования может быть достигнуто как за счет увеличения частоты среза скорректированной системы, так и за счет увеличения ординат ЛАЧХ при частотах, меньших частоты среза.

С выбранным местоположением ЛАЧХ корректирующего устройства $L_K(p)$ непосредственно связан вид результирующей ЛАЧХ САУ: возмущение – ошибка (рис. 3.2б и рис. 3.3б). Передаточная функция системы, связывающая возмущение f и ошибку δ может быть записана так:

$$K_{\delta\text{ЗАМ}}(p) = \frac{K_{f\delta, \text{ПАЗ}}(p)}{1 + K_{\text{СК}}(p)} = K_{f\delta, \text{ПАЗ}}(p) \cdot K_{\text{Э}}(p)$$

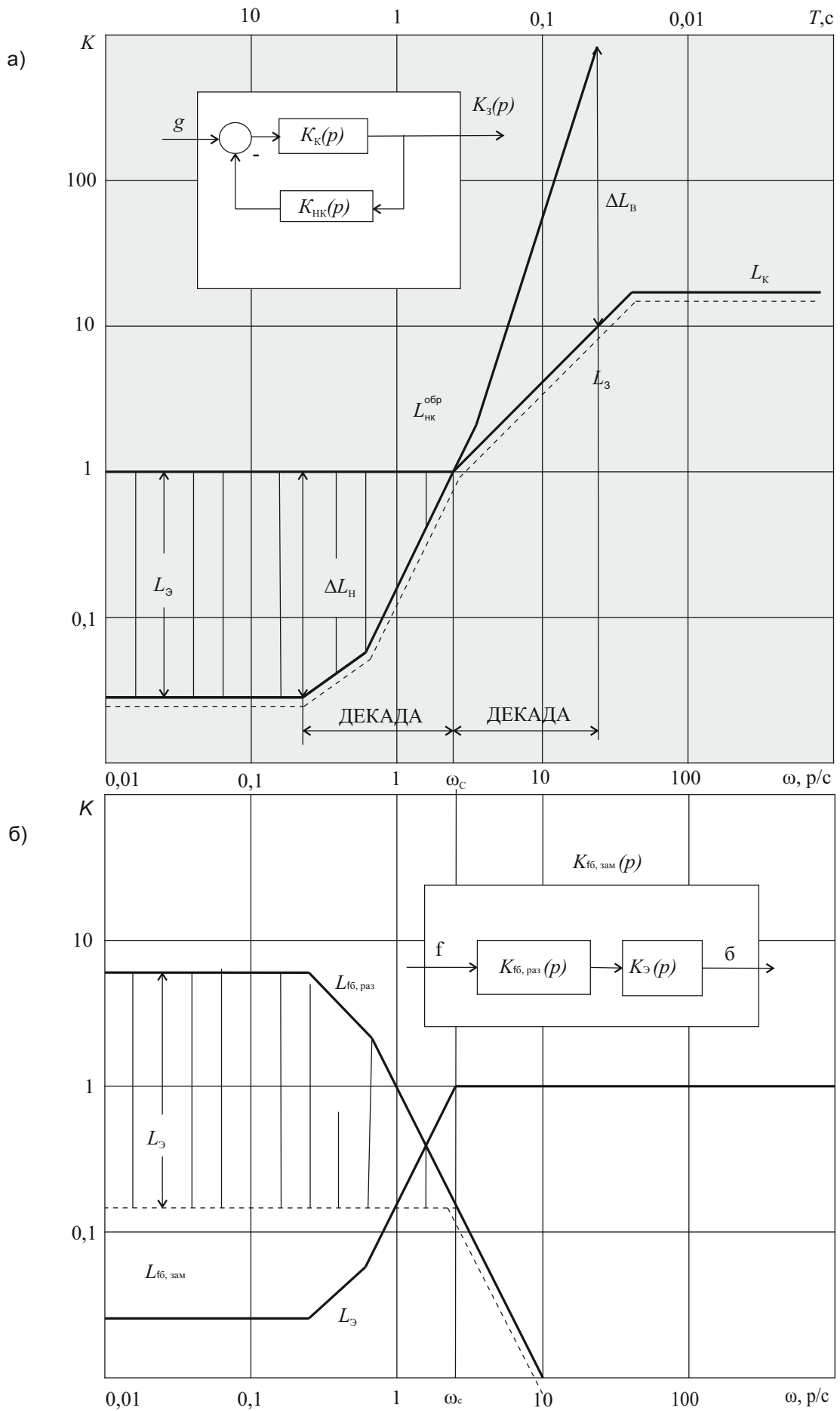


Рис. 3.2. Пример выбора параметров последовательной коррекции

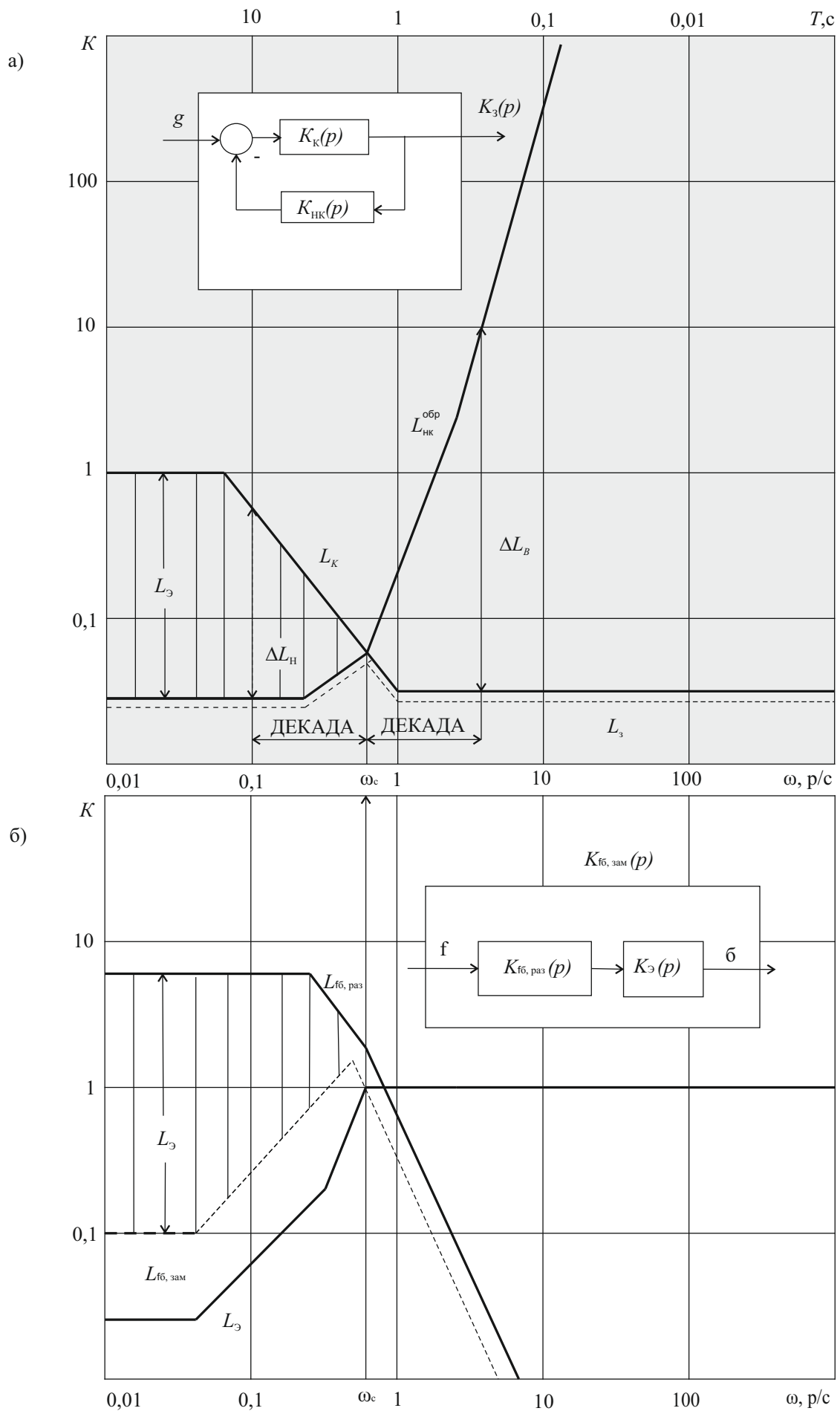


Рис. 3.3. Пример выбора параметров последовательной коррекции

Здесь $K_{f\delta,PA3}(p)$ – передаточная функция, связывающая f и δ в разомкнутой системе, при отсутствии обратной связи, $K_{СК}(p)$ – передаточная функция разомкнутой скорректированной системы, равная произведению передаточных функций всех элементов контура, $K_{\Delta}(p) = 1/(1+K_{СК}(p))$ – передаточная функция, связывающая задающее воздействие g и ошибку δ . По отношению к любому из внешних воздействий звено с передаточной функцией $K_{\Delta}(p)$ выполняет роль эквивалентного фильтра, ослабляющего влияние возмущения в диапазоне частот от 0 до ω_c .

Переходя к логарифмическому масштабу, можно записать

$$L_{f\delta,ЗАМ} = L_{f\delta,РАЗ} + L_{\Delta},$$

где $L_{f\delta,ЗАМ} = \lg K_{f\delta,ЗАМ}(\omega)$, $L_{f\delta,РАЗ} = \lg K_{f\delta,РАЗ}(\omega)$, $L_{\Delta} = \lg K_{\Delta}(\omega)$.

Таким образом, для получения ЛАЧХ достаточно к характеристике добавить ординаты эквивалентного фильтра L_{Δ} . На рис. 3.2б и рис. 3.3б они обозначены штриховкой. Ординаты L_{Δ} легко могут быть найдены из расчетных графиков, изображенных на рис. 3.2а, рис. 3.3а. Действительно, для рассматриваемых на этих рисунках структурных схем имеем

$$K_{ЗАМ}(p) = \frac{K_K(p)}{1+K_{НК}(p) \cdot K_K(p)} = \frac{K_K(p)}{1+K_{СК}(p)} = K_K(p) \cdot K_{\Delta}.$$

Или, переходя к логарифмическому масштабу, получаем $L_{ЗАМ} = L_K + L_{\Delta}$. Отсюда $L_{\Delta} = L_{ЗАМ} - L_K$, где $L_{ЗАМ} = \lg K_{ЗАМ}(\omega)$, $L_K = \lg K_K(\omega)$. Очевидно, что чем больше ординаты L_{Δ} , тем ниже будут проходить характеристики и, следовательно, тем в большей степени будет ослаблено нежелательное влияние возмущений.

3.4. Контрольные вопросы

1. С какой целью осуществляется последовательная коррекция системы?
2. Назовите типы последовательных корректирующих устройств. В чем преимущества и недостатки каждого из них?
3. Как выбрать параметры последовательного корректирующего устройства? Чем руководствоваться?
4. Какова статическая ошибка системы при использовании корректирующего устройства интегрального типа?

РАБОТА № 4. СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *MATLABSIMULINK*

Среда визуального проектирования *MatlabSimulink* описана во многих учебниках и учебных пособиях, например, в [4].

Наиболее важным для работы с линейными системами автоматического управления является умение строить в рассматриваемой среде переходные и частотные характеристики. Для этого нужно воспользоваться инструментом линеаризации системы. Алгоритм построения характеристик следующий (на примере версии *Matlab 7.14*):

1. Набирается структура в новой *Simulink* - модели. Для этого запускается *Matlab*. Затем создается новая модель (*New* → *Simulinkmodel*). В библиотеке элементов (*SimulinkLibrary*) выбираются элементы из раздела *Simulink*. Пример набора модели по первому варианту (первая вариация) первой работы дан на рис. 4.1.

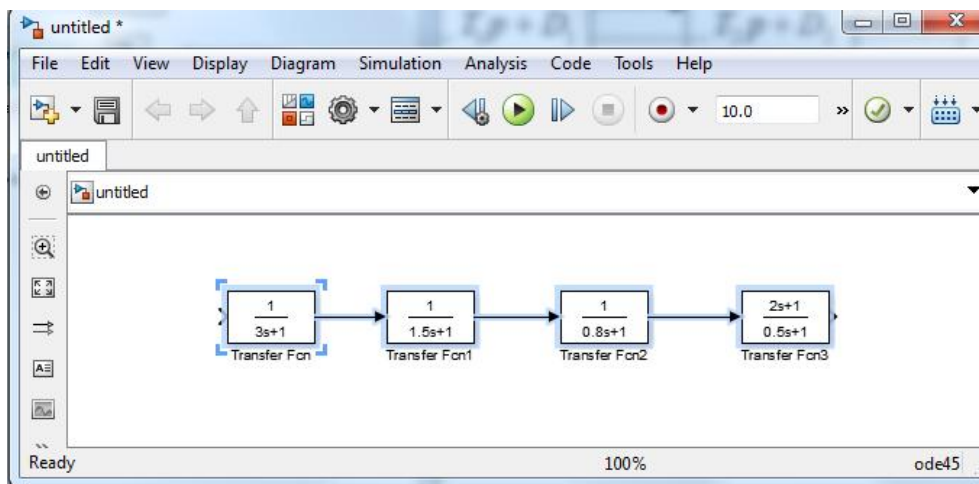


Рис. 4.1. Пример набора системы в *MatlabSimulink*

2. Устанавливаются входные и выходные порты из раздела *SimulinkCommonlyUsedBlocks* (рис. 4.2);

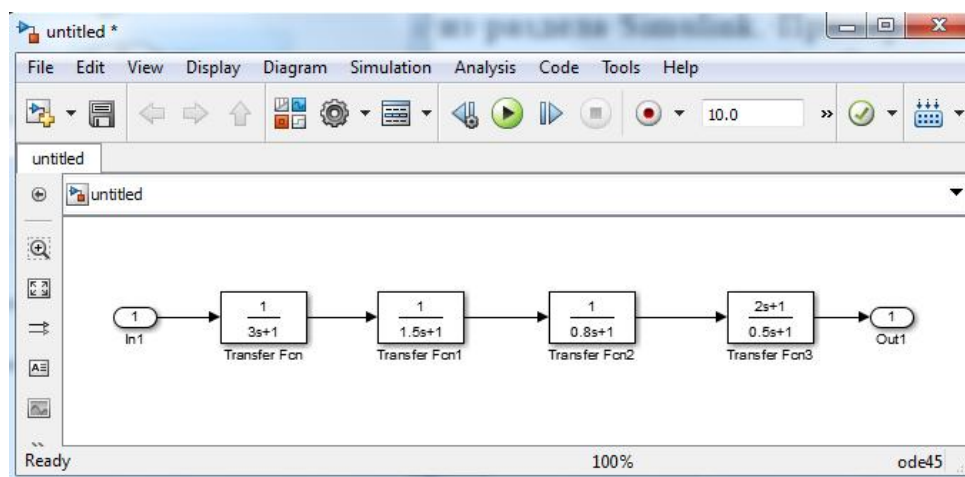


Рис. 4.2. Пример установки входных и выходных портов

3. Затем полученная структура объединяется в subsystemу, т.е.

выделяются все элементы. По щелчку правой кнопкой мыши по любому элементу системы в контекстном меню выбирается пункт создания подсистемы (рис. 4.3);

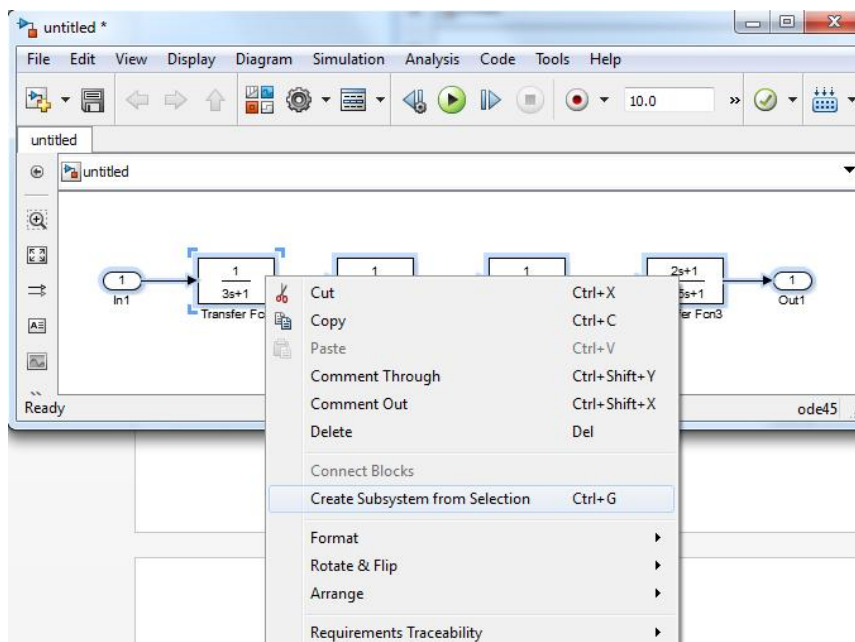


Рис. 4.3. Пример создания подсистемы

4. Щелчком правой кнопкой мыши по подсистеме выбирается пункт линейного анализа в контекстном меню (*LinearAnalysis*→*LinearizeBloc*), появляется окно (рис. 4.4);

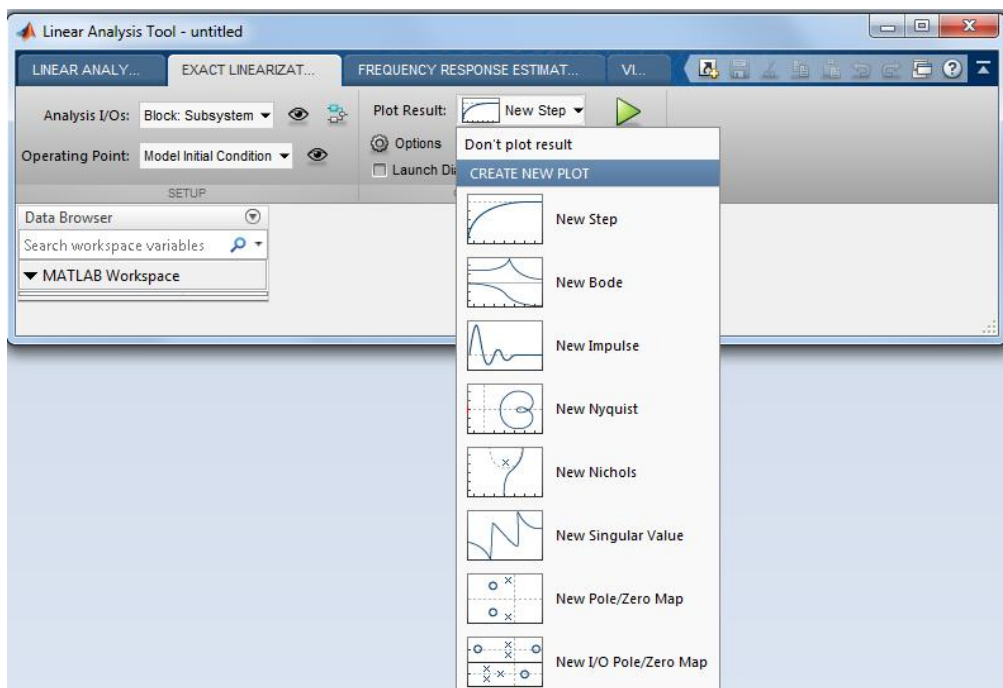


Рис. 4.4. Окно линейного анализа *MatlabSimulink*

5. Для построения переходной характеристики нужно выбрать пункт «*NewStep*» и нажать зеленую стрелку (рис. 4.5). Щелкнув правой кнопкой мыши по полю графика в контекстном меню можно сделать настройки

вида графика (установить сетку – *Grid*, а также произвести другие настройки в меню *Properties*);

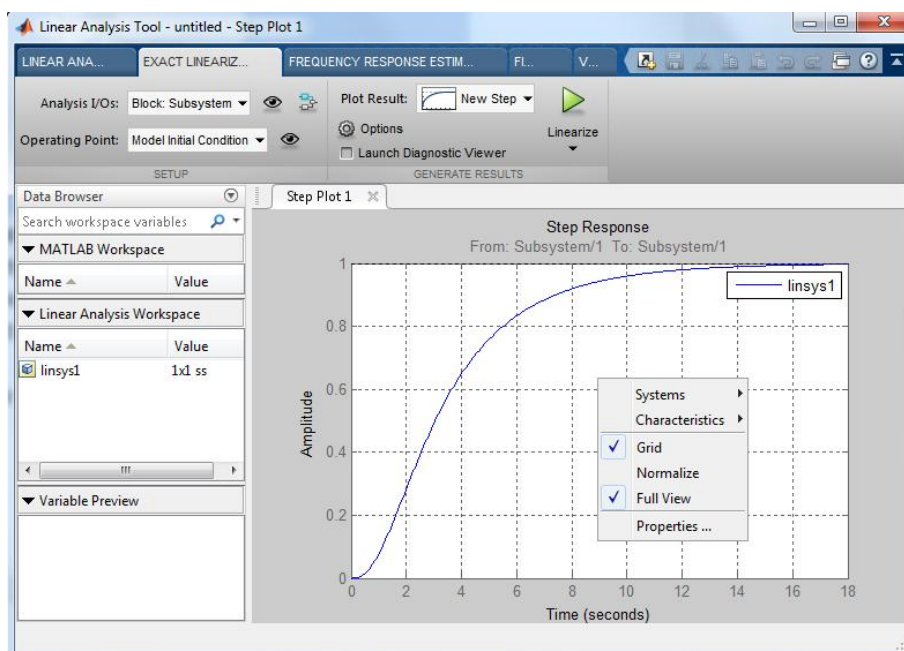


Рис. 4.5. Пример построения переходной характеристики системы

6. Для построения частотных характеристик нужно выбрать пункт «newbode». Здесь также можно нанести сетку на график по аналогии с пунктом 5 (рис. 4.6);

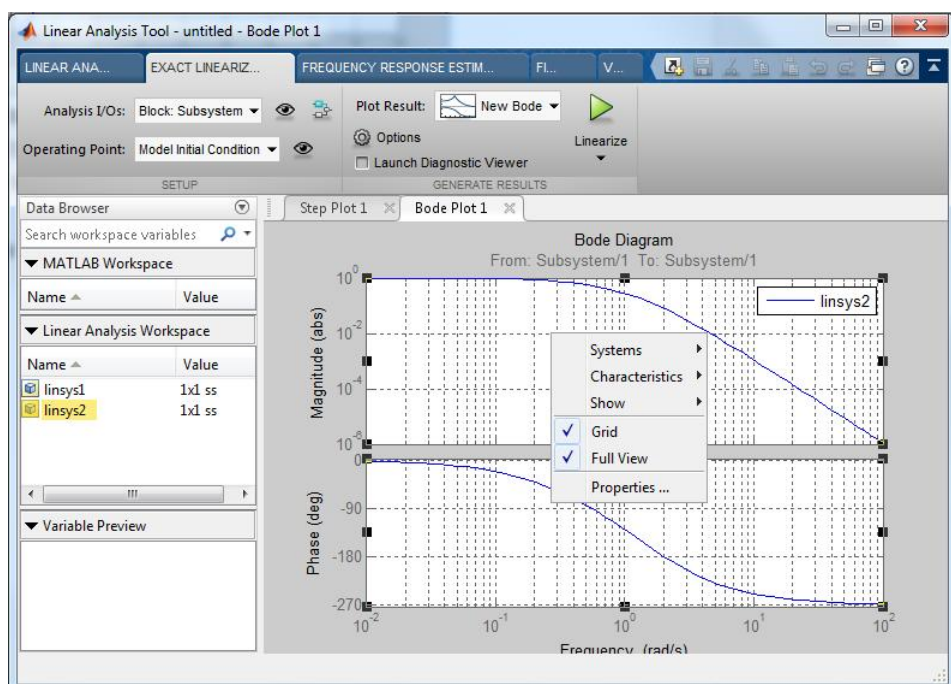


Рис. 4.6. Пример построения частотных характеристик системы

7. Обратить внимание на масштаб амплитудо-частотной характеристики. Для этого, после щелчка правой кнопкой мыши по полю графика выбрать пункт *Properties*. В появившемся окне во вкладке *Units* выбрать настройки, показанные на рис. 4.7.

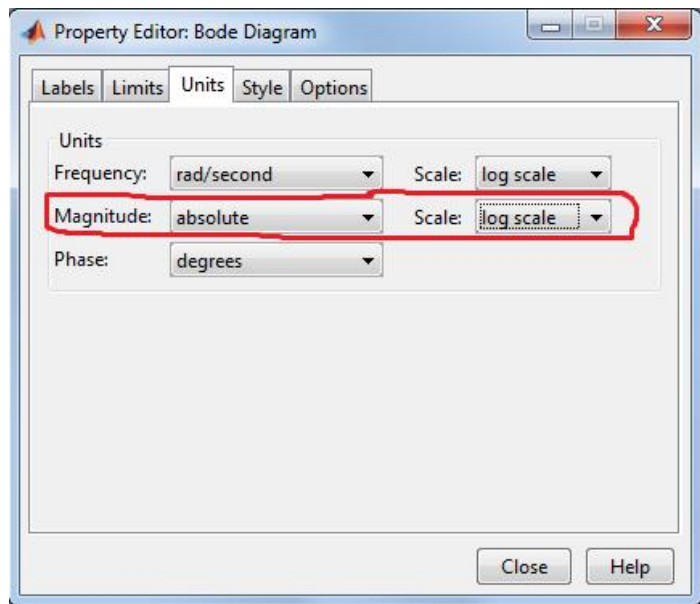


Рис. 4.7. Настройки графика частотных характеристик системы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усынин, Ю.С. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 176 с.
2. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по направлению подготовки "Систем. анализ и упр." / Е.И. Юревич СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 540 с.
3. Ким, Д.П. Теория автоматического управления Т. 1: Линейные системы: учеб. пособие для вузов по направлению "Автоматизация и упр." / Д.П. Ким. М.: Физматлит, 2003. – 287 с.
4. Брылина, О.Г. Многозонные разворачивающие преобразователи для систем управления электроприводами: учебное пособие к лабораторным работам / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 120 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Работа № 1. Последовательное соединение звеньев.....	3
Работа № 2. Встречно-параллельное соединение звеньев.....	14
Работа № 3. Система с последовательным корректирующим устройством.....	20
Работа № 4. Система визуального моделирования <i>MatlabSimulink</i>	26
Библиографический список.....	30

Мацин Валерий Павлович,
Горожанкин Алексей Николаевич,
Виноградов Константин Михайлович,
Журавлев Артем Михайлович

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 08.06.2015. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,86. Тираж 100 экз. Заказ 252.

Отпечатано в типографии «Тета»
г. Челябинск, ул. Яблочкина, 23.