Лабораторная работа № 7

Коррекция замкнутой системы автоматического управления

Цель занятия

Занятие посвящено коррекции замкнутой системы автоматического управления (САУ) методом асимптотических ЛАЧХ.

Коррекция проводится с использованием средств программы схемотехнического анализа *Micro-Cap*.

Задачи лабораторной работы

1. Получить переходную характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования.
2. Получить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) и логарифмическую фазо-частотную характеристику (ЛФЧХ) разомкнутой системы автоматического регулирования .
3. Определить, устойчивая или неустойчивая система автоматического регулирования получится при замыкании обратной связи в заданной разомкнутой системе.
4. Скорректировать систему введением последовательного инерционного звена первого порядка.
5. Получить переходную характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования скорректированной системы и сделать вывод о ее быстродействии.
6. Скорректировать систему методом асимптотических ЛАЧХ и последовательным включением корректирующих звеньев с целью получения максимального быстродействия.
7. Получить переходную характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования скорректированной системы и сделать вывод о ее быстродействии. Сравнить с результатами коррекции п. 5.

Рабочее задание

1. Определение характеристик разомкнутой системы

1.1. Собрать схему исследования разомкнутой системы автоматического регулирования (рис. 7.1). Система состоит из звена-вычитателя X1, регулятора и объекта. Регулятор и объект – это усилители с равной верхней частотой среза. Их суммарный коэффициент усиления равен 1000 (для X1 GAIN=10, для X2 GAIN=100).

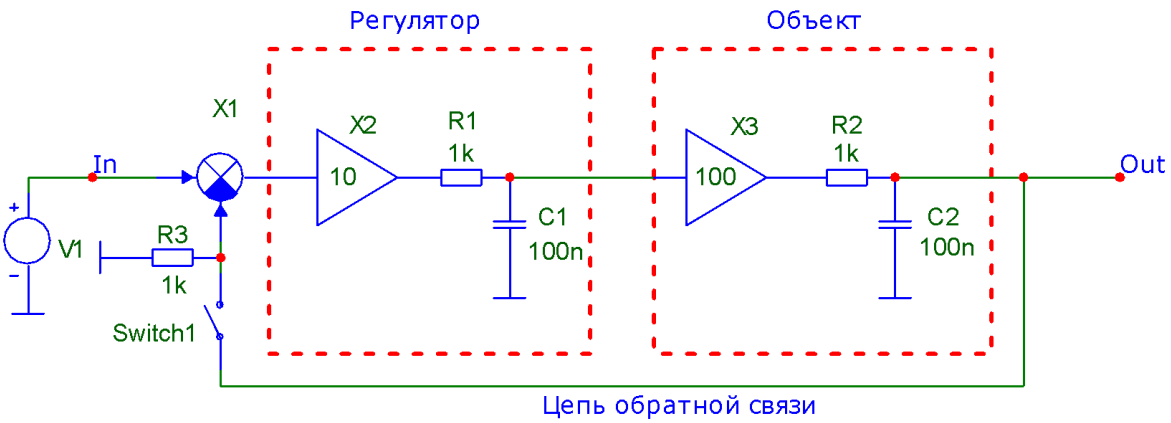
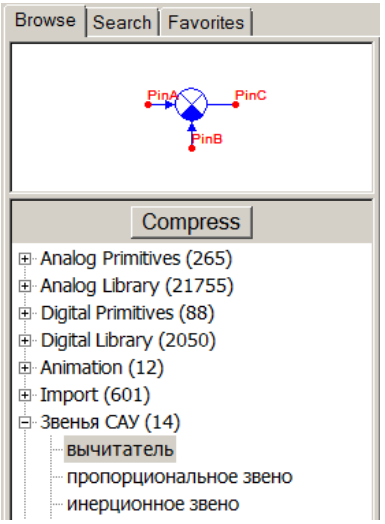
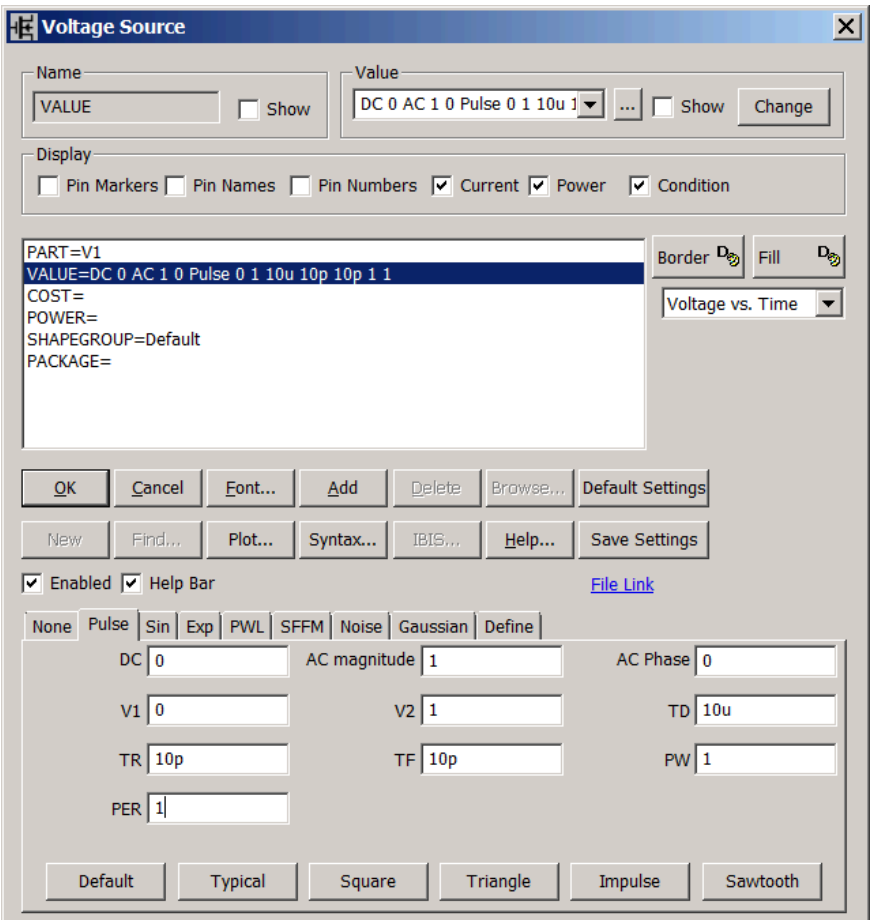


Рисунок 7.1 – Схема для исследования разомкнутой нескорректированной САУ

Вычитатель X1 – из раздела «*Звенья САУ*», усилители X2 и X3 – из раздела «*Функциональные блоки*». Ключ *Switch1 – Animated SPST Switch* из раздела «*Animation*».

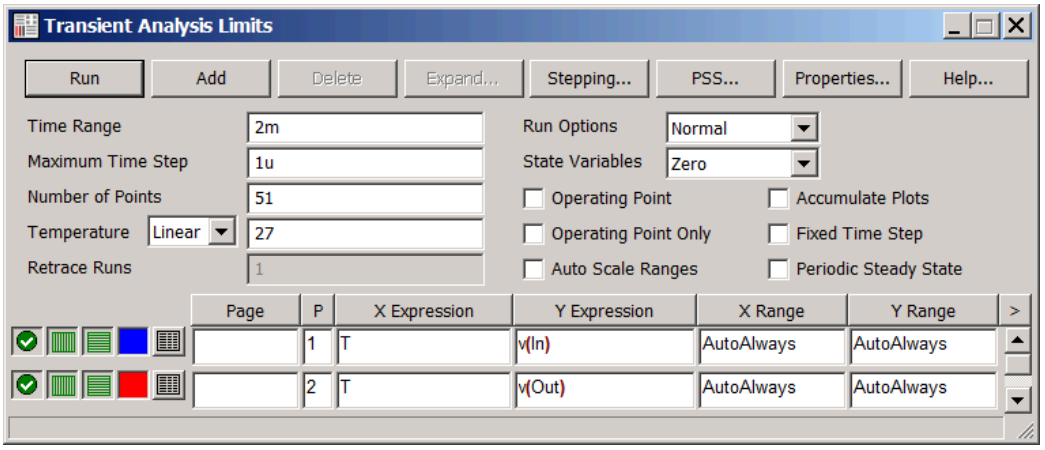


Источник V1 – Voltage Source из раздела *Analog Primitives>Waveform Sources*. Он формирует импульс напряжения амплитудой V2=1 В. Время задержки TD=10u (10 мкс), время нарастания TR=10p (10 пс), время спада TF=10p (10 пс), длительность импульса PW=1 (1 с), период PER=1 (1 с).



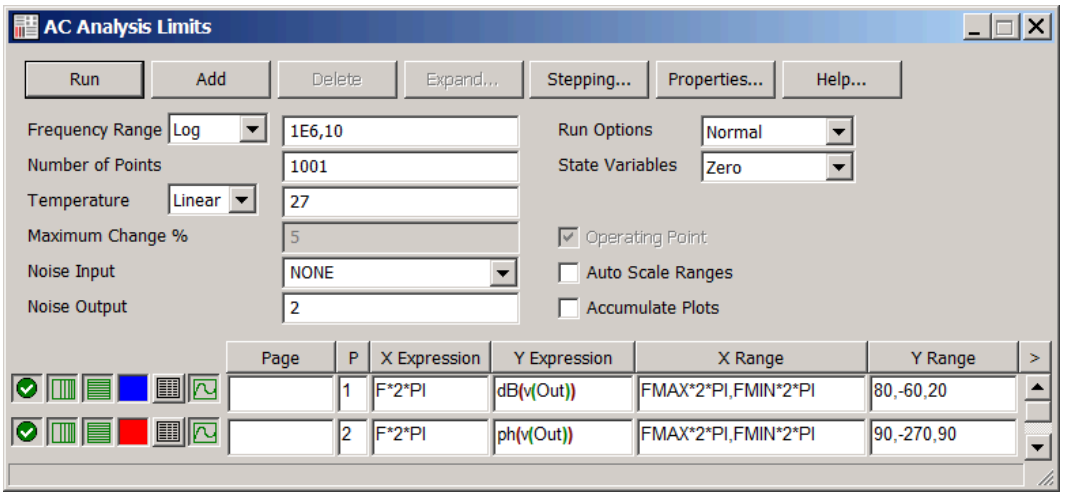
В режиме ввода текста указать на схеме входную точку *In* и выходную точку *Out*.

1.2. В режиме анализа *Transient* получить переходную характеристику (переходную функцию) разомкнутой САУ (реакцию на единичный скачок). Время расчета 2 мс. Максимальный шаг расчета 1 мкс. На одном графике вывести напряжение в узле *In*, на втором – напряжение в узлах *Out*. Перенести графики в отчет.



1.3. В режиме анализа *AC* получить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ, как функции от круговой частоты $\omega=2\pi f$. Частотный диапазон 10 Гц–1 МГц, число точек 1001, шаг по оси частот логарифмический.

Масштаб для по оси *Y* для ЛАЧХ от -60 до 80 дБ, шаг сетки 20 дБ. Масштаб для по оси Y для ЛФЧХ от 270° до +90°, шаг сетки 90°. Перенести графики в отчет.



1.4. Определить запас по фазе и запас по амплитуде. Сделать вывод об устойчивости или неустойчивости замкнутой системы, построенной на основе такой разомкнутой системы. По величине запаса фазы определить тип переходной характеристики замкнутой системы, полученной на основе анализируемой разомкнутой системы (колебательная, апериодическая, близкая к апериодической с небольшим перерегулированием).

2. Определение временных характеристик замкнутой нескорректированной системы

2.1. В схеме рис. 7.1 замкнуть ключ *Switch1*. Получится замкнутая система автоматического управления, поддерживающая на выходе напряжение, равное входному сигналу в узле *In*.

2.2. В режиме анализа *Transient* получить переходную характеристику (переходную функцию) разомкнутой САУ (реакцию на единичный скачок). Время расчета 2 мс. Максимальный шаг расчета 1 мкс. На одном графике вывести напряжение в узле *In*, на втором – напряжение в узле *Out*. Перенести графики в отчет.

2.3. Определить величину перерегулирования и время выхода на режим (время установления переходного процесса). Полученные результаты внести в отчет.

3. Коррекция системы при помощи инерционного звена

3.1. Коррекция при помощи инерционного звена является простейшим типом коррекции замкнутой системы. Для того, чтобы замкнутая система была устойчивая и не было колебаний при выходе на режим,

необходимо, чтобы частотная характеристика разомкнутой системы пересекала уровень 0 дБ с наклоном 20 дб/дек (рис. 7.2, красный график).

Инерционное звено обеспечивает спад 20 дб/дек начиная с частоты сопряжения ω_2. Частота сопряжения ω_2 определяется постоянной времени звена: $\omega_2=1/T$ или $f_2=1/(2\pi T)$.

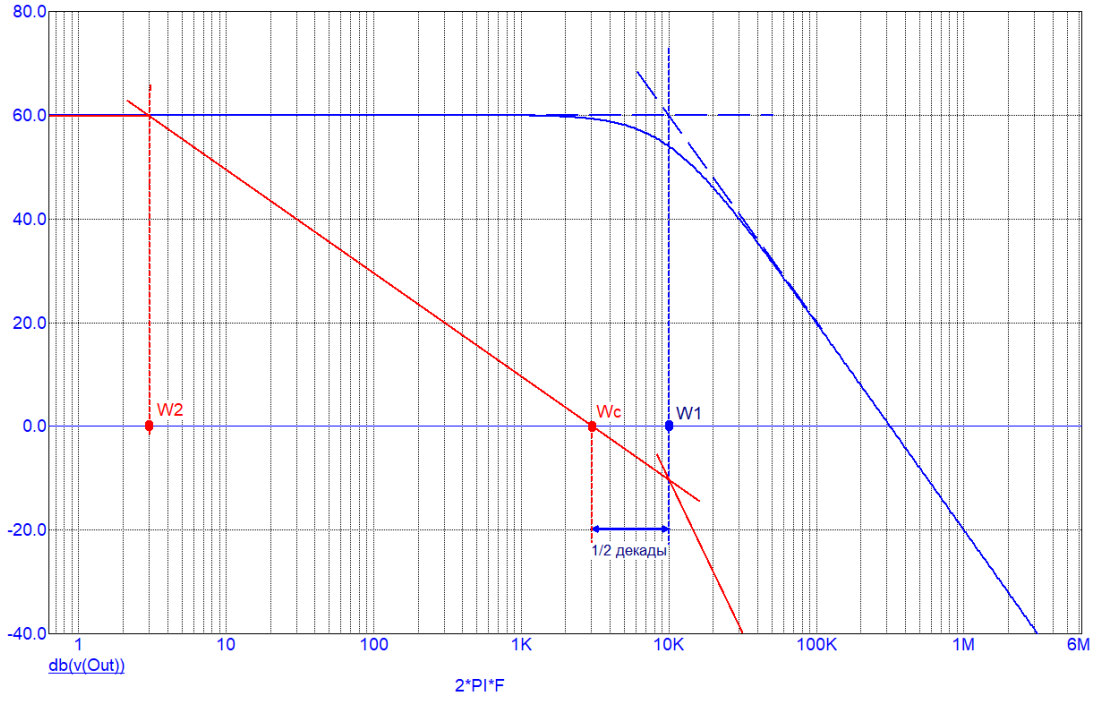


Рисунок 7.2 – Частотные характеристики нескорректированной (синяя) и скорректированной (красная) САУ

Для обеспечения хороших показателей качества регулирования ЛАЧХ разомкнутой системы должна пересекать ось 0 дБ с наклоном -20 дБ/дек и протяженность этого участка должна быть не менее 1/2 декады в каждую сторону от частоты среза ω_C. ½ декады — это изменение частоты в $10^{0,5}\approx3,16$ раз. Этот участок заканчивается на частоте сопряжения исходной системы ω_1. Т.е. при таком способе коррекции частота среза скорректированной системы ω_C на ½ декады ниже частоты сопряжения ω_1 (см. рис. 7.2).

В рассматриваемой САУ коэффициент усиления 60 дБ. Поскольку наклон ЛАЧХ составляет 20 дБ/дек, то коэффициент усиления от 60 дБ до 0 дБ спадет за три декады. Т.е. частота среза ω_2 на три декады меньше ω_C.

Т.е. по частоте сопряжения ω_1 нескорректированной системы можно определить частоту сопряжения ω_2 корректирующего звена, а следовательно, его постоянную времени.

3.2. Определить постоянную времени инерционного звена, необходимого для коррекции заданной САУ. Включить в состав САУ (в

регулятор) последовательное инерционное корректирующее звено X4 (схема рис. 7.3). Это звено взять из раздела «Звенья САУ». Задать для инерционного звена вычисленную постоянную времени TAU.

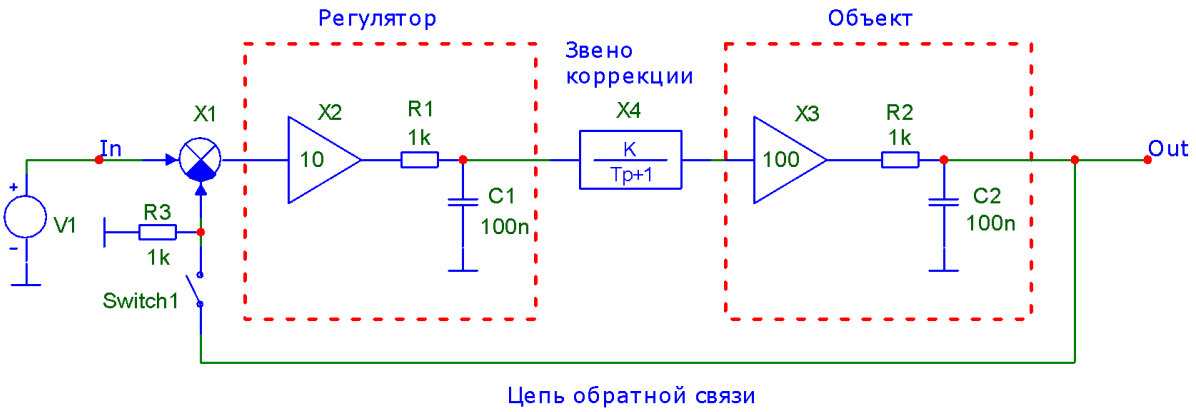


Рисунок 7.3 – САУ, скорректированная инерционным звеном

3.3. Разомкнуть ключ *Switch1*. В режиме анализа *AC* получить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ. Частотный диапазон 0.1 Гц–1 МГц, число точек 1001, шаг по оси частот логарифмический. Масштаб для по оси *Y* для ЛАЧХ от -60 до 80 дБ, шаг сетки 20 дБ. Масштаб по оси Y для ЛФЧХ от -270° до 90°, шаг сетки 90°. Перенести графики в отчет.

3.4. Замкнуть ключ *Switch1*. В режиме анализа *Transient* получить переходную характеристику (переходную функцию) замкнутой САУ (реакцию на единичный скачок). Время расчета (Time Range) 4 мс. Максимальный шаг расчета 1 мкс. На одном графике вывести напряжение в узле *In*, на втором – напряжение в узле *Out*. Перенести графики в отчет.

3.5. Определить величину перерегулирования и время выхода на режим (время установления переходного процесса). Полученные результаты внести в отчет.

4. Оптимальная коррекция САУ методом асимптотических ЛАЧХ

Недостатком коррекции при помощи инерционного звена является очень сильное уменьшение быстродействия скорректированной системы (время выхода на установившейся режим значительно увеличивается). Для повышения быстродействия можно сформировать АЧХ системы, которая будет иметь наклон -20 дБ/дек лишь вблизи уровня 0 дБ, а на меньших частотах наклон будет -40 дБ (рис. 7.4).

Синий график – ЛАЧХ исходной (нескорректированной) САУ, красный график – ЛАЧХ скорректированной системы (желаемая ЛАЧХ), зеленый – ЛАЧХ звеньев коррекции.

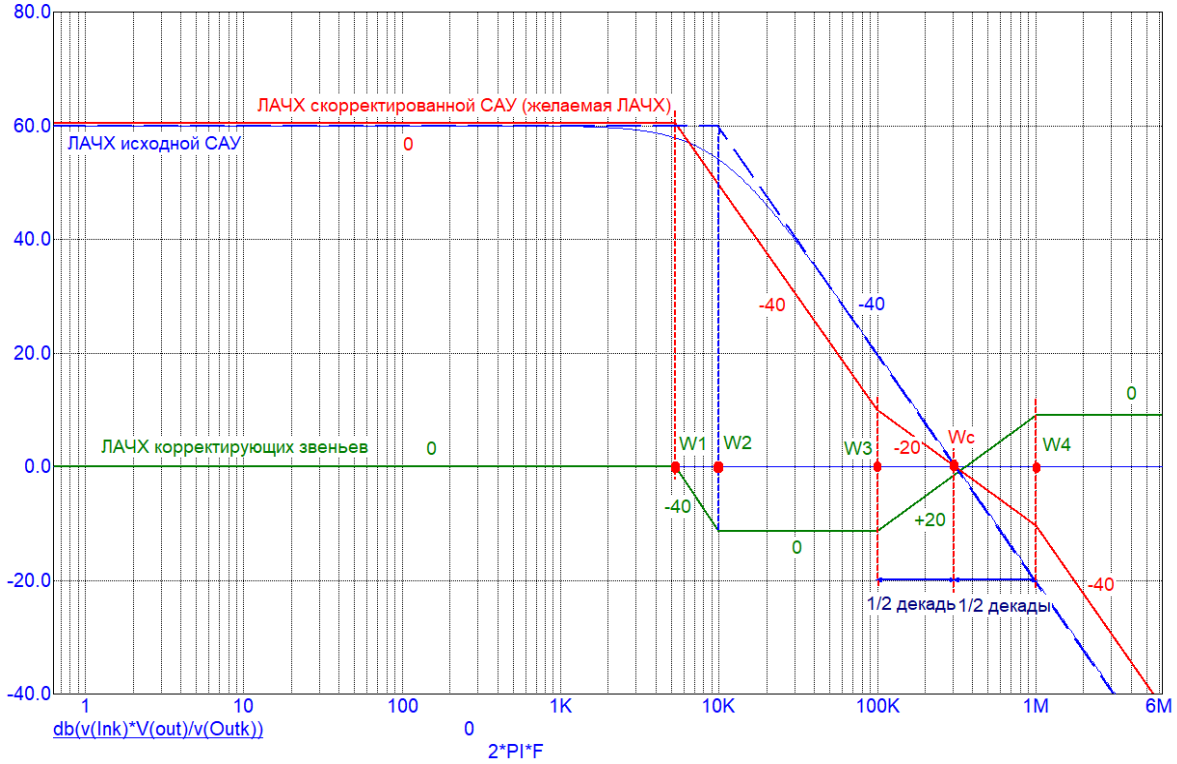


Рисунок 7.4 – ЛАЧХ исходной САУ, оптимально скорректированной САУ и звеньев коррекции

4.1. По ЛАЧХ корректирующих звеньев определить тип этих звеньев и по частотам сопряжения рассчитать постоянные времени этих звеньев.

4.2. Построить схему скорректированной САУ (рис. 7.5).

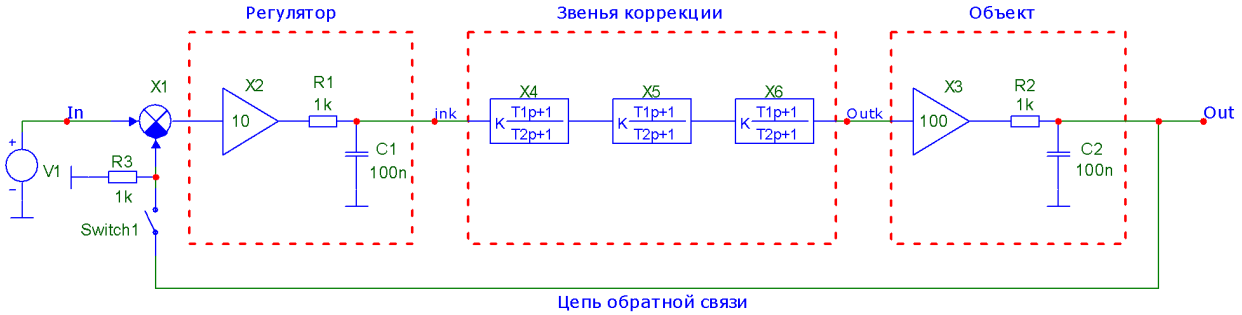


Рисунок 7.5 – Скорректированная САУ

4.3. В режиме анализа *AC* получить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ в зависимости от круговой частоты $\omega=2\pi f$. Частотный диапазон 10Гц–1 МГц, число точек 1001, шаг по оси частот логарифмический. Масштаб для по оси *Y* для ЛАЧХ от -60 до 80 дБ, шаг сетки 20 дБ. Масштаб для по оси Y для ЛФЧХ от -270° до 90°, шаг сетки 90°. Перенести графики в отчет.

4.4. Сравнить полученную ЛАЧХ с желаемой асимптотической скорректированной ЛАЧХ. При несовпадении внести коррективы в постоянные времени звеньев и повторить п. 4.3.

4.5. Определить запас по фазе и запас по амплитуде. Сделать вывод об устойчивости или неустойчивости замкнутой системы, построенной на основе такой разомкнутой системы. По величине запаса фазы определить тип переходной характеристики замкнутой системы, полученной на основе анализируемой разомкнутой системы (колебательная, апериодическая, близкая к апериодической с небольшим перерегулированием).

4.6. Замкнуть ключ *Switch1*. В режиме анализа *Transient* получить переходную характеристику (переходную функцию) замкнутой САУ (реакцию на единичный скачок). Время расчета *Time Range* = 100u (100 мкс). Максимальный шаг расчета *Maximum Time Step* = 10n (10 нс). На одном графике вывести напряжение в узле *In*, на втором – напряжение в узле *Out*. Перенести графики в отчет.

4.7. Определить величину перерегулирования и время выхода на режим (время установления переходного процесса). Полученные результаты внести в отчет.

4.8. Сравнить полученные результаты с результатами п. 3.5. Сделать вывод о быстродействии полученной скорректированной системы автоматического регулирования.

Контрольные вопросы

1. Записать общий вид передаточной характеристики инерционного звена первого порядка в операторной форме.
2. Привести пример схемотехнической реализации инерционного звена первого порядка на пассивных компонентах.
3. Нарисуйте переходную характеристику инерционного звена.
4. Записать общий вид передаточной характеристики интегро-дифференцирующего звена в операторной форме.
5. В каком случае интегро-дифференцирующее звено в определённом диапазоне частот обладает интегрирующими свойствами? Как определяются граничные круговые частоты этого диапазона?
6. Нарисуйте асимптотическую ЛАЧХ интегро-дифференцирующего звена с интегрирующими свойствами.
7. Приведите примеры схемотехнической реализации интегро-дифференцирующего звена с интегрирующими свойствами.

8. В каком случае интегро-дифференцирующее звено в определённом диапазоне частот обладает дифференцирующими свойствами? Как определяются граничные круговые частоты этого диапазона?
9. Нарисуйте асимптотическую ЛАЧХ интегро-дифференцирующего звена с дифференцирующими свойствами.
10. Приведите примеры схемотехнической реализации интегро-дифференцирующего звена с дифференцирующими свойствами.
11. Что представляет собой допустимая статическая ошибка?
12. Какие САУ называются астатическими?
13. Из каких соображений выбирается ход желаемой ЛАЧХ в диапазоне нижних частот?
14. Какие показатели качества замкнутой САУ определяет ход её ЛАЧХ для разомкнутого состояния в диапазоне нижних частот?
15. Какие показатели качества замкнутой САУ определяет ход её ЛАЧХ для разомкнутого состояния в диапазоне средних частот?
16. Как выбирается частота среза желаемой ЛАЧХ разомкнутой САУ?
17. Как обычно выбирается наклон и протяженность среднечастотного участка желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы в окрестности частоты среза?
18. Что определяет вид желаемой ЛАЧХ разомкнутой САУ в диапазоне верхних частот (много выше частоты среза)?

Теоретическое введение. Обеспечение устойчивости в линейных САУ

Частотный метод синтеза корректирующих устройств

В инженерной практике синтез корректирующих устройств чаще всего осуществляется с помощью логарифмических частотных характеристик в следующем порядке:

1) по виду передаточной функции исходной системы $W_н(p)$ строится ЛАЧХ исходной разомкнутой нескорректированной САУ $L_н(\omega)$;

2) с учетом всей совокупности требований, предъявляемых к качеству процесса регулирования САУ, строится ***желаемая логарифмическая амплитудная частотная характеристика*** $L_ж(\omega)$ разомкнутой системы;

3) на основании сравнения ЛАЧХ нескорректированной системы с $L_{ж}(\omega)$ определяется ЛАЧХ корректирующего звена $L_{кз}(\omega)$. Так как у минимально-фазовых систем ЛАЧХ однозначно определяет весь характер переходного процесса, то для осуществления синтеза достаточно рассмотрения одних ЛАЧХ;

4) по виду $L_{кз}(\omega)$ определяются передаточная функция корректирующего звена, ее параметры и техническая реализация;

5) производится проверочный расчет переходного процесса с учетом реальной структуры и места включения корректирующего звена, оценка запасов устойчивости и показателей качества скорректированной САУ.

Если скорректированная САУ удовлетворяет заданным показателям качества, то синтез на этом заканчивается. В противном случае уточняется структура и параметры корректирующего звена; далее снова производится проверочный расчет.

Построение желаемой ЛАЧХ удобно первоначально осуществлять раздельно в низкочастотном (I), среднечастотном (II) и высокочастотном (III) диапазонах.

Построение ЛАЧХ в диапазоне нижних частот

На низкочастотном участке, где вид $L_{ж}(\omega)$ определяется в основном требованиями к точности регулирования, а следовательно, величиной коэффициента усиления системы, порядком ее астатизма, значением коэффициента ошибки и т.д.

Если в системе, отрабатывающей ступенчатый входной сигнал $x_{вх}(t)=a \cdot 1(t)$, допустимая статическая ошибка не должна превышать значения x_{max}, то величина коэффициента усиления разомкнутой скорректированной системы $k_{ск}$:

$$k_{ск} \geq \frac{a}{x_{\max}} - 1 .$$

При этом на участке нижних частот желаемая ЛАХ проводится параллельно оси абсцисс с ординатой $20 \cdot lg(k_{ск})$. В случае, когда статическая ошибка недопустима ($x_{max} = 0$), то скорректированная система должна быть *астатической*.

Построение ЛАЧХ в диапазоне средних частот

На среднечастотном участке желаемая ЛАЧХ в наибольшей степени зависит от требования к динамическим показателям качества регулирования, например, показателю колебательности, времени регулирования и перерегулированию. На этом участке находится частота среза $L_{ж}(\omega)$ и определяется запас устойчивости по фазе.

Если качество регулирования системы оценивается по величине перерегулирования и времени регулирования, то, задавшись максимально допустимыми значениями указанных показателей σ и t_p, следует воспользоваться номограммой (рис. 7.6). По заданной величине перерегулирования (например, $\sigma = 20\ \%$, см. рис. 7.6), определяется величина t_p:

$$t_p = \frac{2{,}8\pi}{\omega_c},$$

где ω_c – частота среза желаемой ЛАЧХ.

Поскольку допустимое значение t_p задано, то можно вычислить необходимую частоту среза:

$$\omega_c = \frac{2{,}8\pi}{t_p}.$$

Вид желаемой ЛАЧХ в среднечастотном диапазоне должен гарантировать необходимый запас устойчивости системы по фазе, что в максимальной степени обеспечивается, когда $L_{ж}(\omega)$ в районе частоты среза имеет достаточно протяженный участок с наклоном –20 дБ/дек.

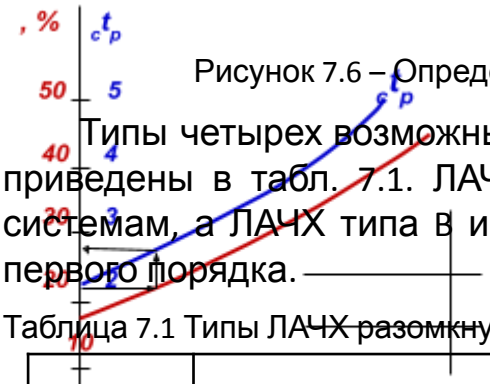


Рисунок 7.6 – Определение частоты среза желаемой ЛАЧХ

Типы четырех возможных ЛАЧХ, удовлетворяющих этому условию, приведены в табл. 7.1. ЛАЧХ типа A и C соответствуют статическим системам, а ЛАЧХ типа B и D — астатическим системам с астатизмом первого порядка.

Таблица 7.1 Типы ЛАЧХ разомкнутых скорректированных систем

Тип ЛАЧХ	Наклоны асимптот, дБ/дек			
	Низкочастотный участок	Сопряженный участок	Среднечастотный участок	Высокочастотный участок
A	0	–40	–20	–40
B	–20	–40	–20	–40
C	0	–40	–20	–60
D	–20	–40	–20	–60

Типовые ЛАЧХ. Для ЛАЧХ (рис. 7.7) примем следующие обозначения:

$h = \dfrac{\omega_3}{\omega_2}$ — протяженность среднечастотного участка $L_{ж}(\omega)$;

Рисунок 7.7 – К определению протяженности участков желаемой ЛАЧХ

$h_1 = \dfrac{\omega_2}{\omega_1}$ — протяженность участка желаемой ЛАЧХ, по

которому сопрягаются низкочастотный и среднечастотный участки $L_{ж}(\omega)$.

Имеется несколько рекомендаций по выбору частот ω_2 и ω_3. Например, выбирают $\omega_3=(2\ldots4)\omega_c$ и $\omega_2=\omega^2_c/\omega_3$.

Наиболее простой является рекомендация, согласно которой интервалы частот ($\omega_c - \omega_2$) и ($\omega_3 - \omega_c$) принимают равными 0,5…0,9 декады. Еще один подход к выбору протяженности среднечастотного участка накладывает ограничение на абсолютную величину $L(\omega_2)$ и $L(\omega_3)$, которые должны быть не ниже значений, определенных по специальной номограмме (обычно эти значения находятся в пределах от 12 до 16 дБ).

Если качество регулирования системы оценивается по величине показателя колебательности *M*, то для определения протяженности участков h и h_1 можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 7.2.

Таблица 7.2 Зависимость колебательности от значений h и h_1

M	h	h_1			
		ЛАЧХ типа A	ЛАЧХ типа B	ЛАЧХ типа C	ЛАЧХ типа D
1,1	21,00	5,5	2,05	5,5	1,9
1,3	7,70	8,9	3,85	8,9	2,8
1,5	7,00	12,75	4,8	12,5	3,6
2,0	3,00	28,0	10,0	26,6	6,1
2,.5	2,33	42,0	14,1	40,0	7,2

Выбор граничных частот среднечастотного участка согласно приведенным рекомендациям дает несколько различные результаты. При окончательном их выборе следует исходить из того, что чем шире интервал частот (ω_2; ω_3), тем лучше будет переходный процесс. Однако практическая реализация желаемой ЛАЧХ при этом усложняется и, кроме того, излишняя протяженность среднечастотного участка снижает динамичность системы.

Построение ЛАЧХ в диапазоне верхних частот

Вид желаемой ЛАЧХ в высокочастотном диапазоне определяет, например, такой показатель, как помехоустойчивость системы, но на качество регулирования поведение $L_{ж}(\omega)$ в этой частотной области вид ЛАЧХ влияет в незначительной степени. Поэтому на участке высоких частот с целью упрощения корректирующего звена допустимо совпадение наклонов асимптот желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ исходной нескорректированной системы.

Завершив построение желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы, необходимо определить соответствующую ей фазо-частотную

характеристику $\phi_{ж}(\omega)$, и проверить наличие необходимого запаса устойчивости системы по амплитуде ΔL и по фазе $\Delta\phi$. В случае, когда при коррекции системы указано требуемое значение показателя колебательности M, необходимо построить запретную зону для $\phi_{ж}(\omega)$ (рис. 7.8).

Границы запретной зоны, называются ***μ-кривыми*** (см. рис. 7.8). Запретная зона строится в частотном диапазоне, в котором

$$20\lg\left(\frac{M}{M-1}\right) < L_{ж}(\omega) < 20\lg\left(\frac{M}{M+1}\right).$$

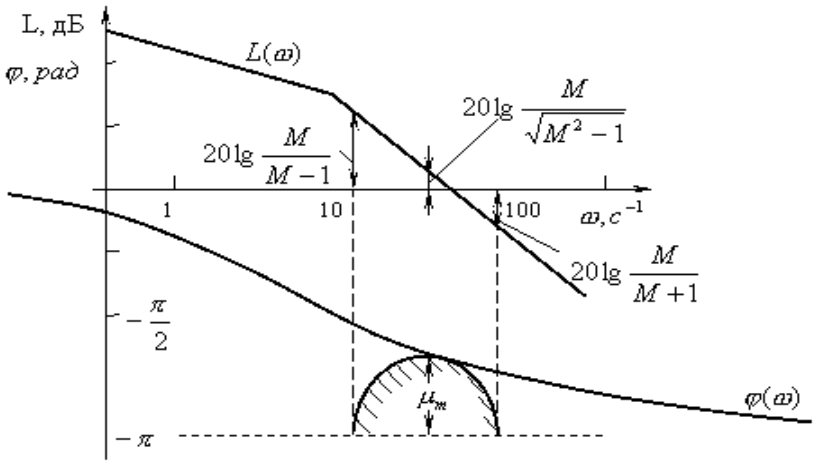


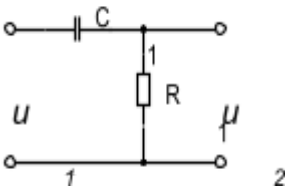
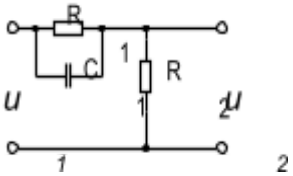
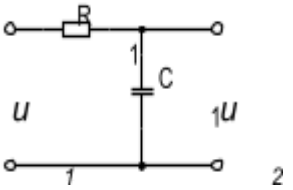
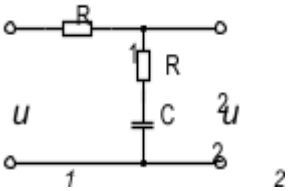
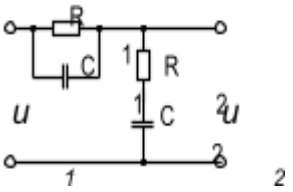
Рис. 7.5. Запретная зона для $\varphi_{ж}(\omega)$

Рисунок 7.8 – Запретная зона для $\phi_{ж}(\omega)$

Максимальное значение запаса по фазе $\mu_{\max} = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right)$ соответствует частоте, при которой $L_{ж}(\omega) = 20\lg\left(\frac{M}{\sqrt{M^2+1}}\right)$. Величина запретной зоны возрастает при уменьшении M. Если фазо-частотная характеристика $\varphi_{ж}(\omega)$ заходит в запретную зону, то фактическая величина показателя колебательности M превышает максимально допустимое значение.

Пассивные корректирующие звенья

Таблица 7.3 Пассивные корректирующие четырехполюсники

Тип звена	Электрическая схема	Передаточная функция	Параметры
Реальное дифференцирующее звено		$\frac{Tp}{1+Tp}$	$T = R_1C_1$
Интегро-дифференцирующее звено (с дифференцирующими свойствами)		$k\frac{1+T_1p}{1+T_2p}$	$T_1 = R_1C_1$ $T_2 = \frac{R_1R_2C_1}{R_1+R_2} = \frac{R_2T_1}{R_1+R_2}$ $k = \frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{T_2}{T_1}$
Апериодическое звено первого порядка		$\frac{1}{1+Tp}$	$T = R_1C_1$
Интегро-дифференцирующее звено (с интегрирующими свойствами)		$k\frac{1+T_2p}{1+T_1p}$	$T_1 = (R_1+R_2)C_2$ $T_2 = R_2C_2$ $k = \frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{T_2}{T_1}$
Комбинированное интегро-дифференцирующее звено		$\frac{(1+T_1p)(1+T_2p)}{(1+T_3p)(1+T_4p)}$	$T_1 = R_1C_1$; $T_2 = R_2C_2$ $a = \frac{R_1+R_2}{R_2}$; $T_{3,4} = \frac{T_1+aT_2}{2}\left(1 \pm \sqrt{1-\frac{4T_1T_2}{(T_1+aT_2)^2}}\right)$