

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ПРОИЗВОДСТВ

Теория автоматического управления
технологическими системами.
Методические указания к практическим
занятиям

для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Брест 2022

УДК 62-52(075)

В курсе «Теория автоматического управления (ТАУ) технологическими системами» изучаются основные понятия и математический аппарат анализа линейных систем автоматического управления (САУ). Контрольные задания включают вопросы:

- а) по методам преобразования структурных схем;
- б) анализу устойчивости алгебраическими и частотными методами;
- в) построению логарифмической амплитудной (ЛАХ) и фазовой (ЛФХ) частотных характеристик;
- г) построению переходной характеристики САУ.

Все вопросы объединяются заданием на исследование характеристик САУ, заданной структурной схемой с конкретными значениями коэффициентов и постоянных времени.

Составитель: Ярошевич А. В. к. т. н., доцент

Одобрено кафедрой АТПиП « 27» октября 2022 г.
Протокол № 2

Рецензенты: Божик О. В., главный инженер ООО «Тесла Инжиниринг»
Голуб В. М., заведующий кафедрой машиноведения БрГТУ

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	4
2. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	5
3. УСТОЙЧИВОСТЬ САУ	8
4. ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ	10
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ СИСТЕМЫ.....	15
6. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКУЮ РАБОТУ	18
7. ЛИТЕРАТУРА.....	21

1 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ТАУ технологическими системами относится к числу специализированных технических дисциплин, позволяющих описывать, анализировать и проектировать современные системы управления в машиностроении. Изучение дисциплины в первую очередь преследует цель – дать знания конкретных методик и приемов анализа систем автоматического управления. Эти специальные методики ТАУ имеют существенные преимущества перед универсальными методами составления и анализа решений дифференциальных уравнений, описывающих САУ. Во-первых, эти методики значительно проще в понимании и использовании. Во-вторых, они дают возможность определять требования к звеньям САУ для обеспечения заданных технических характеристик. Наряду с достаточной строгостью определений и приемов анализа ТАУ дает практический инструмент для инженерного творчества.

Не менее важна другая, мировоззренческая сторона изучения ТАУ. Принципы отрицательной обратной связи и управление по отклонению являются основными понятиями теории управления и технической кибернетики. Управленческая деятельность специалиста с высшим образованием требует знания этих положений, которые хорошо понимаются через конкретные технические знания ТАУ.

Руководствуясь важнейшим принципом обучения – от простого к сложному, – изучение ТАУ начинается с методов анализа линейных систем, которые создают понятийную базу для изучения дискретных, нелинейных и стохастических САУ. Изложение материала по разделам контрольного задания ведется по схеме: основные положения и определения – алгоритм расчета. Недостающие звенья в определении терминов и понятий и детали расчетных схем следует искать в литературе из приведенного списка, в лекциях и примерах из практических занятий.

2 ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Звено САУ. Передаточная функция звена. Последовательное, параллельное включение звеньев, элемент сравнения, обратная связь. Управляющее воздействие, возмущение. Передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.

Методические указания

Физический или логический блок в структуре САУ называют элементарным звеном. Основной характеристикой элементарного звена в ТАУ является передаточная функция (ПФ). Передаточная функция определяется как отношение преобразования Лапласа двух временных функций: сигнала на выходе звена к сигналу на входе звена.

Пусть $y(t)$ – сигнал на выходе, $Y(p) = L\{y(t)\}$ – преобразование Лапласа выходного сигнала; $x(t)$ – сигнал на входе, $X(p) = L\{x(t)\}$ – преобразование Лапласа входного сигнала. Тогда передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (1.1)$$

При последовательном соединении звеньев передаточная функция эквивалентного звена получается умножением передаточных функций.

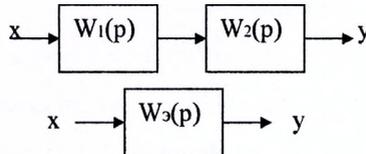


Рисунок 3.1 – Последовательное соединение звеньев

$$W_{\text{э}}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \quad (1.2)$$

При параллельном соединении звеньев ПФ получается сложением

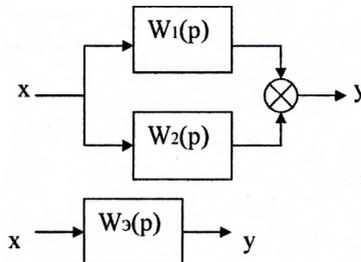
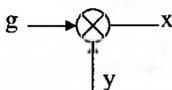


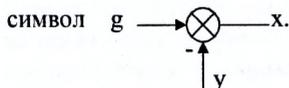
Рисунок 3.2 – Параллельные соединения звеньев

$$W_3(p) = W_1(p) + W_2(p)$$



В этом случае $x = g + y$.

При таком Для обозначения элемента сравнения с вычитанием сигнала используется обозначении элемент сравнения суммирует сигналы.



В этом случае $x = g - y$.

Передаточная функция звена или системы, охваченной отрицательной обратной связью

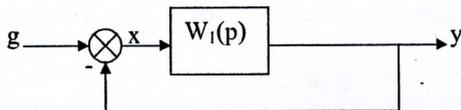
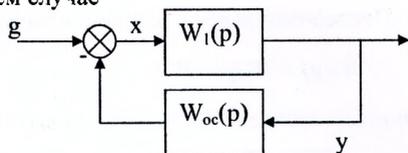


Рисунок 3.3 – Звено с единичной обратной связью

$$\text{где } W_1(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (1.4)$$

$$W_3(p) = \frac{W_1(p)}{1+W_1(p)}. \quad (1.5)$$

В более общем случае



где W_1 – ПФ прямой цепи,
 W_{oc} – ПФ обратной связи.

Рисунок 3.4 – Звено с обратной связью

Эквивалентная ПФ

$$W_3(p) = \frac{W_1(p)}{1+W_1(p)W_{oc}(p)}. \quad (1.6)$$

Обобщенная структурная схема одноконтурной САУ может быть представлена следующим образом

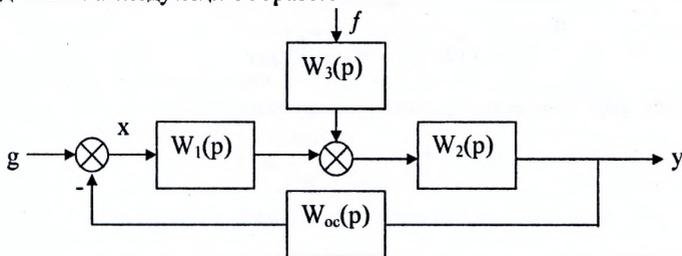


Рисунок 3.5 – Развитая структурная схема САУ

где g – управляющее воздействие;
 y – выходная величина;
 f – возмущающее воздействие;
 x – рассогласование.

Передаточная функция системы по управляющему воздействию формируется в предположении, что возмущение отсутствует, т. е. $f = 0$.

Структурная схема в этом случае имеет вид

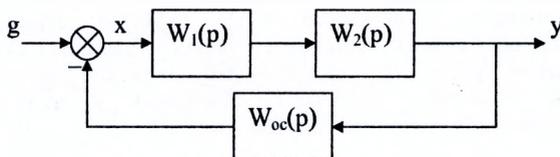


Рисунок 3.6 – Структурная схема САУ

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p) = W_1(p)W_2(p) \cdot W_{oc}(p). \quad (1.7)$$

Передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию

$$W_g(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_{oc}(p)}. \quad (1.8)$$

Передаточная функция системы по возмущающему воздействию формируется в предположении, что управляющий сигнал $g = 0$. Структурная схема в этом случае имеет вид

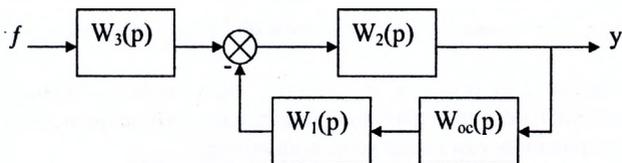


Рисунок 3.7 – Структурная схема САУ по управлению

Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию

$$W_1(p) = \frac{W_3(p)W_2(p)}{1+W_1(p) \cdot W_2(p)W_{oc}(p)}. \quad (1.9)$$

Каноническая форма записи передаточных функций

$$W(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + 1}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + 1}. \quad (1.10)$$

Все коэффициенты округляются до трех значащих цифр.

3 УСТОЙЧИВОСТЬ САУ

Понятие об устойчивости. Условие устойчивости САУ. Исследование устойчивости аналитическими методами и по частотным характеристикам.

Методические указания

САУ обладает свойствами устойчивости, если траектория выходного параметра системы по истечении некоторого периода времени после приложения воздействия отличается от заданной не более, чем на малую величину δ . Условием устойчивости САУ является отрицательность вещественных частей всех корней характеристического уравнения для

дифференциального уравнения, описывающего поведение системы. В ТАУ характеристическое уравнение получают, приравняв к нулю полином знаменателя передаточной функции замкнутой системы.

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + 1 = 0.$$

4.1 Исследование устойчивости САУ по расположению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

4.1.1 Найти корни характеристического уравнения для замкнутой системы с применением компьютерных программ.

Система расчётов **Matlab** для получения характеристик САУ имеет пакет Control system toolbox. Пакет оперирует с LTI-моделями систем управления. Основой для задания LTI-модели в виде объекта в рабочем поле **Matlab** на экране монитора является передаточная функция системы (1.10).

Синтаксис команды, создающей LTI-объект, следующий

$$w = TF([b_0, b_1, \dots, b_m], [a_0, a_1, \dots, a_n]), \text{ где}$$

a_0, a_1, \dots, a_n – значения коэффициентов полинома знаменателя передаточной функции (1.10);

b_0, b_1, \dots, b_m – значения коэффициентов полинома числителя передаточной функции (2).

После задания LTI-объекта в рабочем поле пакета **Matlab** на экране монитора выдаётся передаточная функция в виде отношения двух полиномов для проверки правильности ввода коэффициентов.

Control system toolbox позволяет определить ряд характеристик САУ.

1) Определение нулей передаточной функции, т.е. корней полинома числителя передаточной функции

$$b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m = 0.$$

Синтаксис команды: `zero (w)`, где `w` – имя ЛТИ – объекта.

2) Определение полюсов передаточной функции, т.е. корней полинома знаменателя передаточной функции

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0.$$

Синтаксис команды: `pole (w)`, где `w` – имя ЛТИ – объекта.

4.1.2 На комплексной плоскости отметить точки, соответствующие полюсам ПФ замкнутой системы, а значит корням характеристического уравнения.

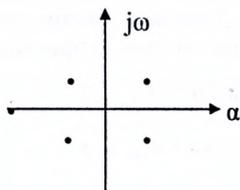


Рисунок 4.1 – Расположение корней характеристического уравнения

4.1.3 Если все точки расположены в левой полуплоскости – САУ устойчива.

4.2 Исследование устойчивости по критерию Михайлова.

4.2.1 Произвести в характеристическом полиноме замкнутой системы (знаменатель передаточной функции) замену $p \rightarrow j\omega$, и получить комплексную функцию частоты ω .

$$F(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(j\omega) + 1. \quad (2.1)$$

4.2.2 Представить функцию в виде $F(j\omega) = U(\omega) + j V(\omega)$, выделив вещественную $U(\omega)$ и мнимую $V(\omega)$ части.

4.2.3 Задавая значения ω от 0 до ∞ , вычислить $U(\omega)$ и $V(\omega)$ и поместить в таблицу. На начальном этапе вычислений частота задается следующим рядом значений $\omega = 0, 1, 10, 100, 1000, 10000, \dots$, затем при необходимости уточнения характера годографа могут использоваться промежуточные точки.

4.2.4 На комплексной плоскости построить годограф $F(j\omega)$ – кривую Михайлова – по данным таблицы $U(\omega)$ и $V(\omega)$.

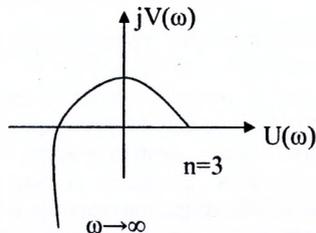


Рисунок 4.2 – Годограф Михайлова

Для построения годографа рекомендуется использовать Excel.

4.2.5 Если годограф, начинаясь на положительной вещественной полуоси, проходит последовательно n квадрантов, где n – порядок характеристического уравнения системы, САУ – устойчива.

4 ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ).

Логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФХЧ). Единицы измерения: дециБелы (дБ) и декады (дек). Правила построения Логарифмических характеристик разомкнутой системы. Условие устойчивости. Запасы устойчивости.

Методические указания

Выражение (1.7) передаточной функции разомкнутой системы в канонической форме (1.10) после подстановки $p = j\omega$ приобретает вид

$$W(j\omega) = K \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + 1}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + 1}. \quad (3.1)$$

Функция $W(j\omega)$ называется частотной передаточной функцией и является комплекснозначной функцией от действительной переменной ω , называемой частотой.

Функцию $W(j\omega)$ можно представить в виде

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $U(\omega)$ – вещественная частотная функция, её график называют вещественной частотной характеристикой.

$V(\omega)$ – мнимая частотная функция, её график – мнимая частотная характеристика.

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad (3.3)$$

– где амплитудная частотная функция, её график – амплитудная частотная характеристика.

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} + k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.4)$$

– где фазовая частотная функция, график которой – фазовая частотная характеристика.

Частотные характеристики позволяют сделать оценку устойчивости и качественных характеристик процесса регулирования. Их использованию препятствуют два обстоятельства: необходимость выполнения громоздких вычислений значений частотных функций и невозможность графических построений в линейном масштабе координатных осей.

От указанных недостатков свободны частотные характеристики, построенные с использованием логарифмических шкал по координатным осям.

$$\text{Функция } L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| \quad (3.5)$$

называется логарифмической амплитудной частотной функцией.

График зависимости $L(\omega)$ от логарифма частоты ($\lg \omega$) называют логарифмической амплитудной частотной характеристикой (ЛАЧХ). При построении ЛАЧХ по оси абсцисс откладывают частоту в логарифмическом масштабе (декады), по оси ординат – $L(\omega)$ (дециБелы).

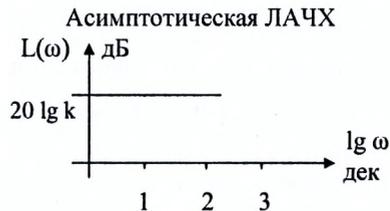
Логарифмической фазовой частотной характеристикой (ЛФЧХ) называют график зависимости фазовой частотной функции $\varphi(\omega)$ от логарифма частоты $\lg \omega$. Ось ординат при построении логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) проводят через любую точку оси абсцисс, так как при $\omega = 0 \lg \omega \rightarrow -\infty$, этому соответствует бесконечно удаленная точка оси частот.

При построении ЛЧХ используют понятия “элементарное звено” и “асимптотическая ЛАЧХ”. Передаточные функции основных элементарных звеньев и их асимптотические ЛАЧХ приведены ниже.

Усилительное звено

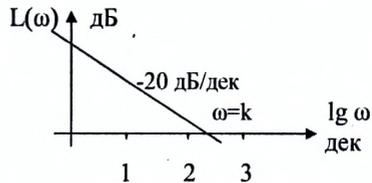
ПФ

$$W(p) = k \quad (3.6)$$



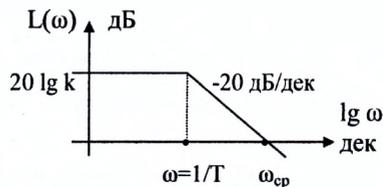
Интегрирующее звено

$$W(p) = \frac{k}{p} \quad (3.7)$$

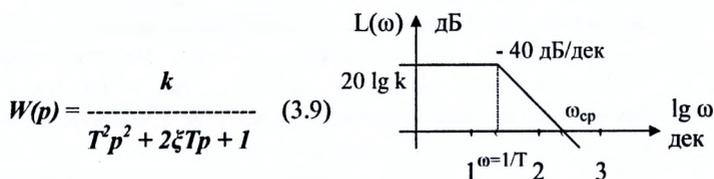


Апериодическое звено

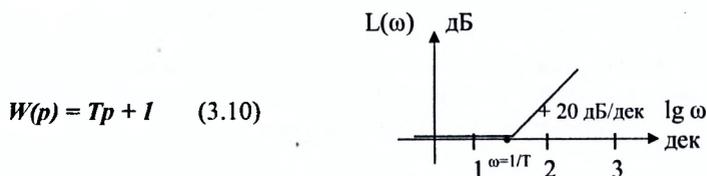
$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \quad (3.8)$$



Колебательное звено



Форсирующее звено



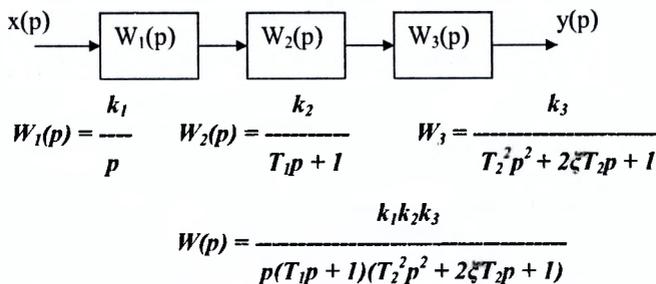
Правила построения ЛЧХ разомкнутой системы основаны на представлении передаточной функции системы произведением передаточных функций элементарных звеньев и основном свойстве логарифмов: логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей.

$$\lg W_1 \cdot W_2 = \lg W_1 + \lg W_2 \quad (3.11)$$

ЛАЧХ строится как сумма асимптотических ЛАЧХ элементарных звеньев, из которых составлена ПФ системы.

5.1 Пример построения асимптотических ЛАЧХ разомкнутой астатической системы (с интегрирующим звеном).

5.1.1 Выделяются звенья ПФ разомкнутой системы



5.1.2 Определяются значения сопрягающих частот

$$\omega_1 = 1/T_1 \quad , \quad \omega_2 = 1/T_2$$

5.1.3 Строится прямоугольная система координат с осями $L(\omega)$ в децибелах и частоты ω в логарифмическом масштабе в декадах

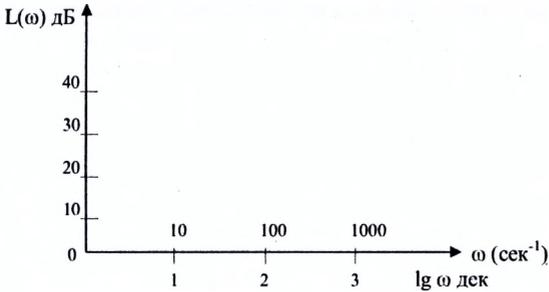


Рисунок 5.1 – Логарифмическая система координат

5.1.4 Через точку $\omega_k = k_1 k_2 k_3$ на оси частот провести прямую с наклоном -20 дБ/дек до первой (меньшей) частоты сопряжения.

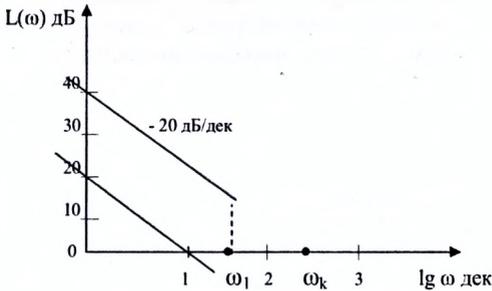


Рисунок 5.2 – Первая сопрягающая частота

5.1.5 Если наименьшая частота сопряжения соответствует аperiodическому звену, то в точке ЛАЧХ, соответствующей ω_1 , наклон характеристики изменяется на -20 дБ/дек. Провести асимптоту от ω_1 до ω_2 под наклоном -40 дБ/дек.

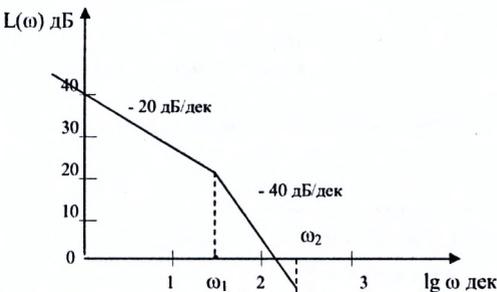


Рисунок 5.3 – Вторая сопрягающая частота

5.1.6 Если наименьшая частота сопряжения соответствует колебательному звену, то в точке ЛАЧХ, соответствующей ω_2 , наклон характеристики изменяется на -40 дБ/дек. Провести асимптоту от ω_1 до ω_2 под наклоном -60 дБ/дек.

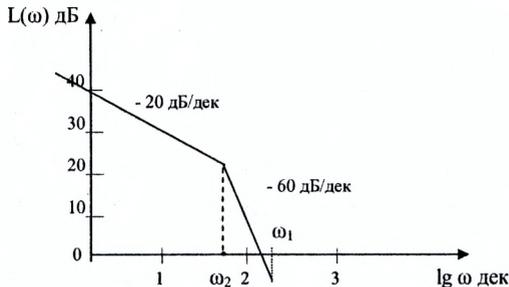


Рисунок 5.4 – Вторая сопрягающая частота

5.1.7 В точке соответствующей второй частоте, изменение наклона характеристики определяется типом элементарного звена, которому соответствует эта частота. Для колебательного звена наклон меняется на -40 дБ/дек, для апериодического на -20 дБ/дек.

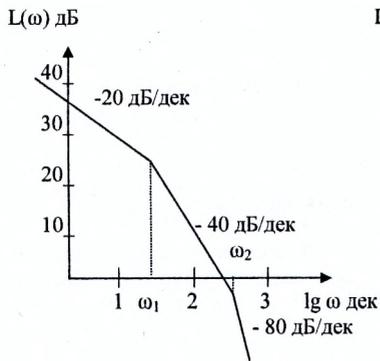


Рисунок 5.5 – ЛАЧХ с апериодическим звеном

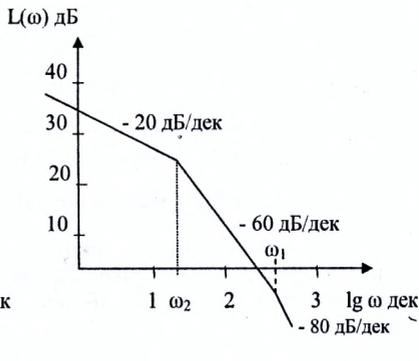


Рисунок 5.6 – ЛАЧХ с колебательным звеном

Построенная характеристика является асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы.

Построение логарифмических частотных характеристик $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ (диаграмма Бode) производится с пакетом Matlab.

Синтаксис команды: `bode(w)`, где `w` – имя ЛТИ-объекта для разомкнутой системы.

Пример логарифмических амплитудной и фазовой частотных характеристик представлен на рисунок 5.7 ЛФЧХ построена сложением характеристик

элементарных звеньев: $f1$ – интегрирующего (-90°); $f2$ – аperiodического; $f3$ – форсирующего; $f4$ – колебательного. Частота среза системы, при которой значение АФХ становится меньше единицы, совпадает с ω_c . Результирующая ЛФЧХ $f\theta$ пересекает уровень -180° правее частоты среза и асимптотически устремляется к -270° .

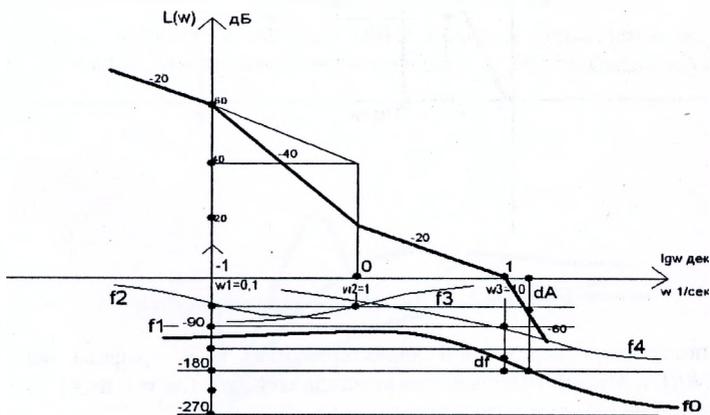


Рисунок 5.7 – ЛЧХ САУ

При рассмотрении характера поведения АФХ устойчивых систем следует отметить, что модуль АФХ становится меньше единицы только при значениях угла (фазы) меньших по значению, чем $-\pi$ (-180°). Исходя из этого, можно сформулировать критерий устойчивости на основе рассмотрения логарифмических частотных характеристик. Для устойчивости системы в замкнутом состоянии необходимо и достаточно, чтобы фазовая частотная характеристика пересекала уровень -180° правее частоты среза ЛАЧХ.

Анализ устойчивости по ЛАЧХ позволяет определить запас устойчивости по фазе df и запас устойчивости по амплитуде (по коэффициенту усиления) dA (см. рисунок 5.7).

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ СИСТЕМЫ

Методические указания

Основными показателями качества регулирования являются быстродействие, колебательность и перерегулирование, характеризующие точность и плавность протекания процесса.

Наиболее распространены прямые оценки качества, полученные по кривой переходного процесса $h(t)$, т. е. при воздействии единичной ступенчатой функции.

$$I(t) = 1 \text{ при } t \geq 0, \\ 0 \text{ при } t < 0.$$

Общий вид переходной характеристики представлен на рисунок 6.1.

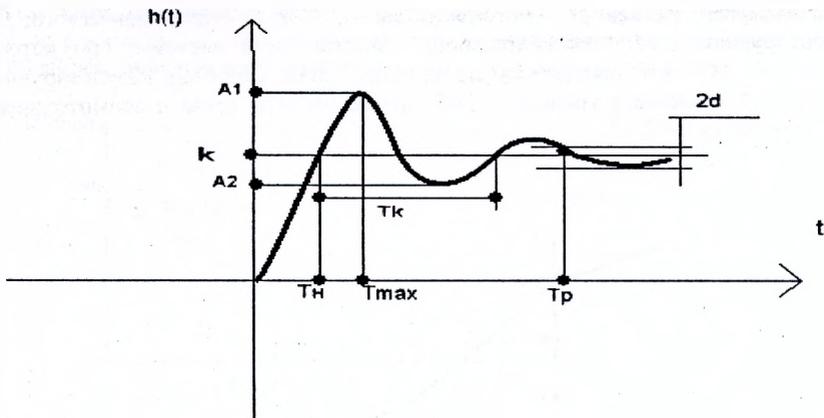


Рисунок 6.1 – Переходная характеристика

Для построения переходной характеристики, т. е. графика переходной функции $h(t)$, в **Matlab** используется команда **step (w)**, где **w** – имя LTI-объекта передаточной функции замкнутой системы.

К прямым оценкам качества относят следующие характеристики:

1. Время регулирования t_p – минимальное время, по истечении которого регулируемая величина будет оставаться близкой к установившемуся значению k с заданной точностью d .

$$|h(t) - k| \leq d.$$

Значение d задаётся в процентах или долях от установившегося значения k (обычно $d = 0,05 k$).

2. Перерегулирование σ – максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения выходной величины, выраженное в относительных долях или процентах.

$$\sigma = (A_1 - k) / k.$$

Допустимое перерегулирование в каждом конкретном случае будет подсказано опытом эксплуатации системы, обычно $\sigma = (10...30) \%$, иногда достигает 70% , иногда недопустимо совсем.

3. Частота колебаний $\omega = 2\pi / T_k$, где T_k – период колебаний для переходных характеристик, имеющих колебательный характер.

4. Число колебаний n , которое имеет переходная характеристика за время регулирования. При проектировании систем чаще всего допускают $n = 1...2$, а иногда и до $3...4$, но в некоторых системах колебания недопустимы.

5. Время достижения первого максимума T_{max} .

6. Время нарастания переходного процесса T_n – абсцисса первой точки пересечения кривой переходного процесса $h(t)$ с уровнем установившегося значения k .

7. Декремент затухания χ , равный отношению модулей двух смежных перегибов.

$$\chi = |A_1 - k| / |A_2 - k|.$$

Переходные процессы в системах при единичном ступенчатом воздействии делятся на три вида: монотонные, апериодические, колебательные (рисунок 6.2).

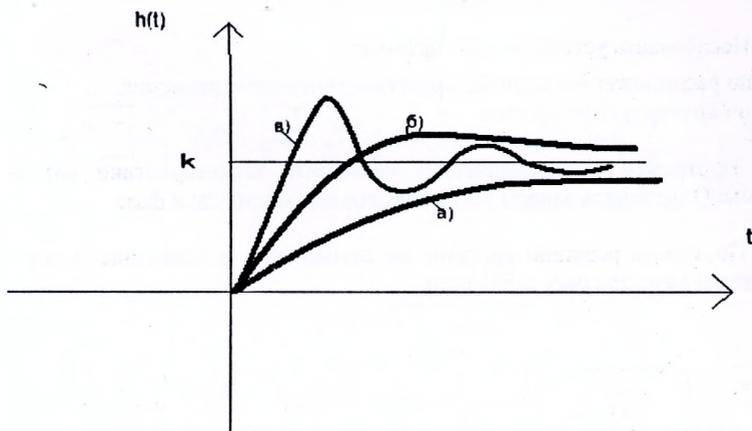


Рисунок 6.2 – Виды переходных характеристик

У монотонных процессов (кривая *а*) на рис.6.2) первая производная выходной величины $h(t)$ не меняет знак, у апериодических (кривая *б*) – знак производной меняется не более одного раза, а у колебательных (кривая *в*) – первая производная меняет свой знак периодически.

6 ЗАДАНИЕ

на расчетно-графическую контрольную работу по курсу
«Теория автоматического управления».

1 Содержание работы

1.1 Записать передаточные функции:

- а) разомкнутой системы $W(p)$;
- б) замкнутой системы $W_g(p)$;
- в) замкнутой системы по возмущению $W_f(p)$.

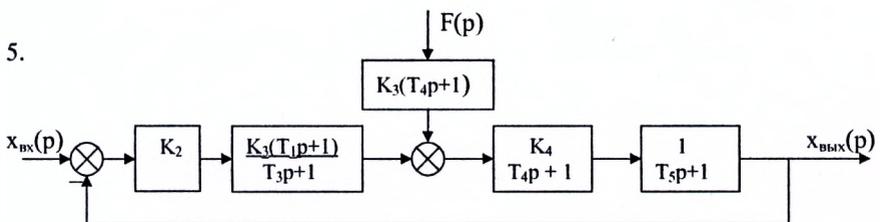
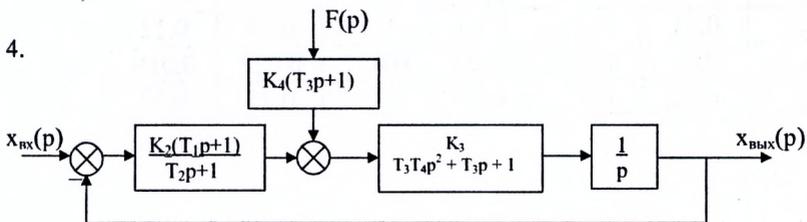
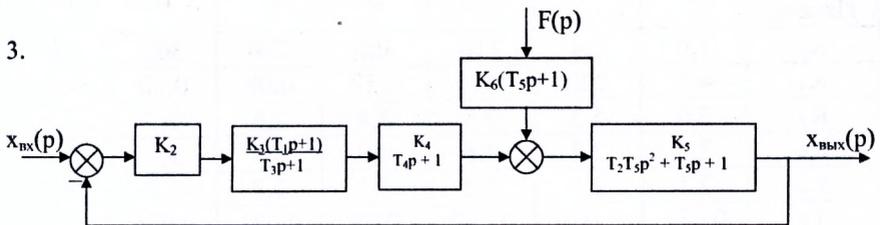
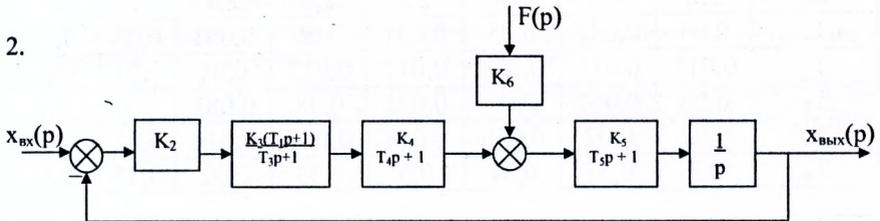
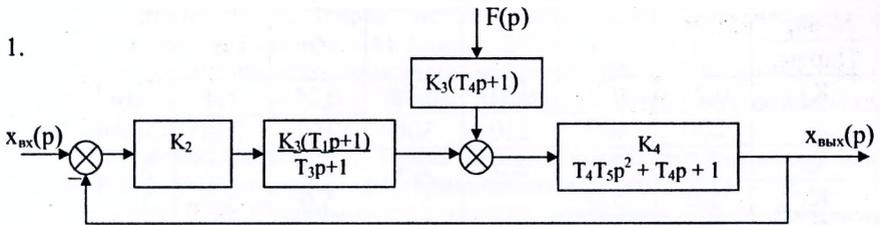
1.2 Исследовать устойчивость системы:

- а) по расположению корней характеристического уравнения;
- б) по критерию Михайлова.

1.3 Построить логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы. Определить запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

1.4 Построить реакцию системы на ступенчатое воздействие и определить показатели качества регулирования.

2 Варианты задания структурных схем



3 Варианты значений параметров

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8
Парам.								
K ₂	0,21	0,2	0,21	0,15	0,21	1,4	1,6	1,4
K ₃	200	400	210	300	250	250	300	210
K ₄	2,5	2,4	2,5	2,4	2,5	5,3	5,3	5,0
K ₅	5,0	5,0	5,2	5,2	5,0	2,3	2,2	2,1
K ₆	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1
T ₁	0,04	0,041	0,05	0,051	0,06	0,061	0,08	0,08
T ₂	0,011	0,011	0,011	0,012	0,013	0,01	0,01	0,011
T ₃	0,06	0,061	0,07	0,071	0,08	0,081	0,1	0,1
T ₄	0,02	0,02	0,019	0,018	0,017	0,016	0,02	0,02
T ₅	0,3	0,31	0,31	0,3	0,33	0,32	0,33	0,31

№ вар.	9	0	A	B	C	D	E
Парам.							
K ₂	1,6	1,4	210	400	200	300	250
K ₃	400	200	0,15	0,12	0,08	0,12	0,08
K ₄	5,0	5,3	2,5	2,4	2,6	2,7	2,8
K ₅	2,3	2,2	4,8	4,9	5,9	5,1	5,2
K ₆	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
T ₁	0,085	0,086	0,087	0,08	0,081	0,086	0,087
T ₂	0,012	0,013	0,01	0,01	0,01	0,011	0,012
T ₃	0,11	0,12	0,13	0,1	0,11	0,12	0,13
T ₄	0,02	0,02	0,021	0,021	0,021	0,019	0,018
T ₅	0,32	0,31	0,29	0,27	0,25	0,22	0,21

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1972.
2. Теория автоматического управления / под редакцией А. А. Воронова. – М. : Высшая школа, 1977 – Ч.1 : Теория линейных систем автоматического управления. – 303 с.
3. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования: под редакцией В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1967 – Кн.1. – 770 с.
4. Васильев, Д. В. Системы автоматического управления. / Д. В. Васильев, В. Г. Чунч. – М. : Высшая школа, 1967.
5. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / под редакцией В. А. Бесекерского – М. : Наука, 1969.
6. Ярошевич, А. В. Теория автоматического управления технологическими системами. Конспект лекций / А. В. Ярошевич – Брест : УО “БрГТУ”, 2012. – 78 с.

Учебное издание

Составитель:

Ярошевич Анатолий Васильевич

**Теория автоматического управления
технологическими системами.
Методические указания и контрольные
задания**

для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения».

Ответственный за выпуск: Ярошевич А. В.

Редактор: Митлошук М. А.

Корректор: Дударук С. А.

Компьютерная верстка: Мисюта А. В.

Подписано к печати 27.02.2023 г. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага «Performer»
Гарнитура «Times New Roman». Усл. п.л. 1,395. Уч. изд. л.1,5. Заказ № 154.

Тираж 18 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.