



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Березниковский филиал
Кафедра автоматизации технологических процессов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Методические указания к практическим занятиям
и курсовому проектированию по дисциплине
Теория автоматического управления
для студентов направления 15.03.04
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Пермь 2015

В.Ф. Беккер

Исследование автоматических систем регулирования в среде MathCAD: Метод. указания к практическим занятиям и курсовому проектированию по «Теории автоматического управления» / Сост. В.Ф. Беккер. Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2015. – 36 с.

Рассмотрены типовые объекты управления, алгоритмы регулирования, особенности их реализации и основы параметрического синтеза автоматических систем регулирования (АСР). Для исследования изучения характеристик автоматических регуляторов, объектов регулирования и анализа АСР в целом использован пакет MathCAD. Применение средств программирования в среде MathCAD позволяет наряду с вычислительными задачами реализовать имитационные модели для изучения динамических режимов работы АСР и ее элементов.

Предназначено для студентов, изучающих теорию автоматического управления, аспирантов и специалистов, работающих в области автоматизации технологических процессов.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.Г. Шумихин

© Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет, 2015

Введение

Автоматические системы регулирования (АСР) являются одним из основных технических приложений теории управления. Практика построения систем управления технологическими объектами свидетельствует о широком использовании в промышленных АСР типовых линейных алгоритмов регулирования – пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД).

Рассмотрены математические модели объектов управления и реальных автоматических регуляторов. Приведены расчеты характеристик элементов АСР, П-, и ПИ-регуляторов и динамических свойств системы в среде MathCAD фирмы MathSoft, Inc. Примеры оформлены в виде отдельных файлов (имя файла расположено в правом верхнем углу рисунков, иллюстрирующих пример).

1. Расчет динамических характеристик объектов регулирования

Технологические объекты регулирования в общем случае относятся к классу инерционных, нелинейных, нестационарных систем. Однако в задачах автоматического регулирования они, как правило, могут быть представлены с достаточной степенью точности линейными математическими моделями. Для решения задачи параметрического синтеза требуется модель объекта по каналу «регулирующее воздействие – регулируемая (управляемая) переменная». Адекватная математическая модель объекта регулирования с самовыравниванием обычно представляется передаточной функцией вида

$$W_0(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи;

τ – запаздывание;

T_1, T_2, T_3 – постоянные времени.

Математическая модель объекта без самовыравнивания содержит интегрирующее звено и может быть представлена в общем виде передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{k}{T_1s \cdot (T_2s + 1)(T_3s + 1)} e^{-\tau s}. \quad (2)$$

Модель может иметь и более сложную структуру с полиномом в числителе передаточной функции.

Заметим, что усложнение структуры модели объекта не вызывает каких-либо трудностей при выполнении расчетов в среде MathCAD.

Передаточная функция – формализованное определение свойств линейной инерционной системы. Более наглядно свойства объектов управления определяют динамические характеристики – переходная характеристика $h(t)$ и частот-

ные характеристики (комплексная частотная характеристика $W_o(j\omega)$, амплитудно-частотная $A(\omega)$ и фазочастотная $\varphi(\omega)$ характеристики). Эти характеристики позволяют извлечь априорную информацию, необходимую для выполнения процедур параметрического синтеза.

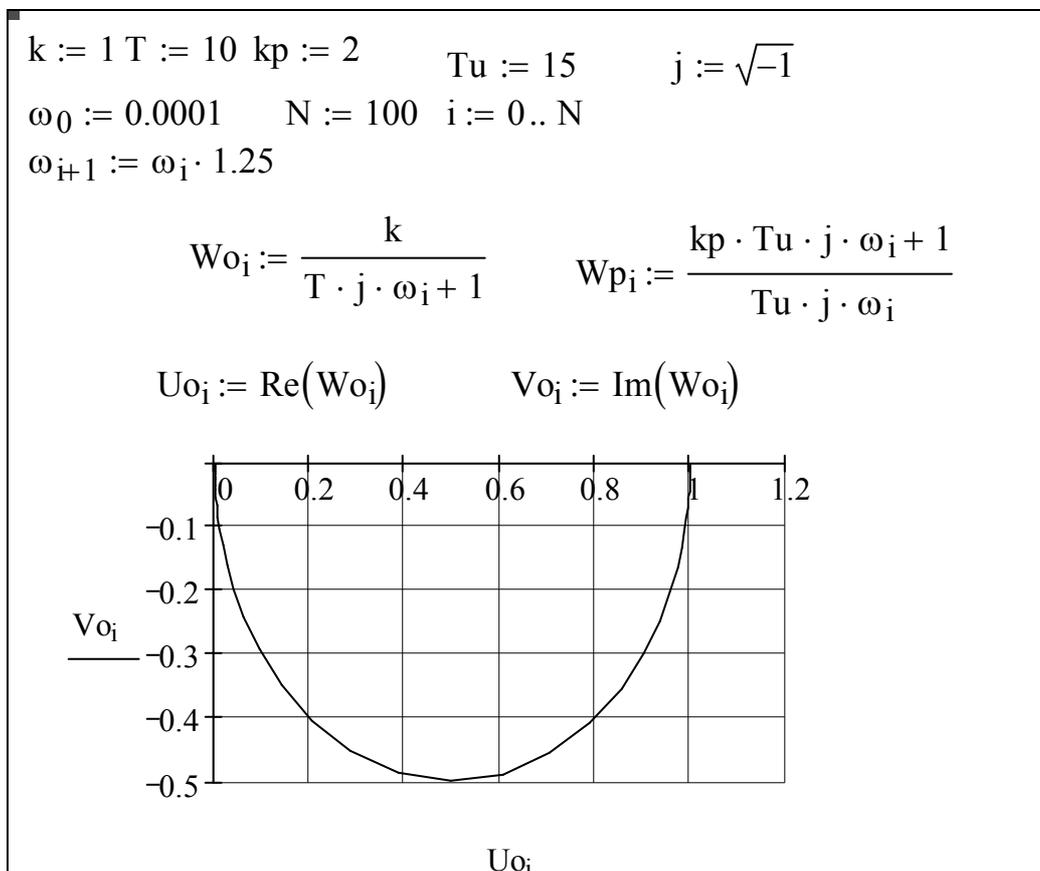


Рис. 1. Комплексная частотная характеристика объекта регулирования с самовыравниванием

На рис. 1 представлена комплексная частотная характеристика объекта регулирования с самовыравниванием.

2. Типовые линейные алгоритмы регулирования и их реализация

Промышленные автоматические системы регулирования строятся, как правило, с использованием типовых алгоритмов регулирования: пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД). Расчет основывается на заданной математической модели объекта регулирования, требованиях к запасу устойчивости системы и критерии качества АСР.

Теория автоматического управления оперирует понятиями типовых идеальных алгоритмов регулирования, которые определяются передаточными функциями:

для П-алгоритма

$$W_p(s) = \kappa_p, \quad (3)$$

для ПИ-алгоритма

$$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_i s}, \quad (4)$$

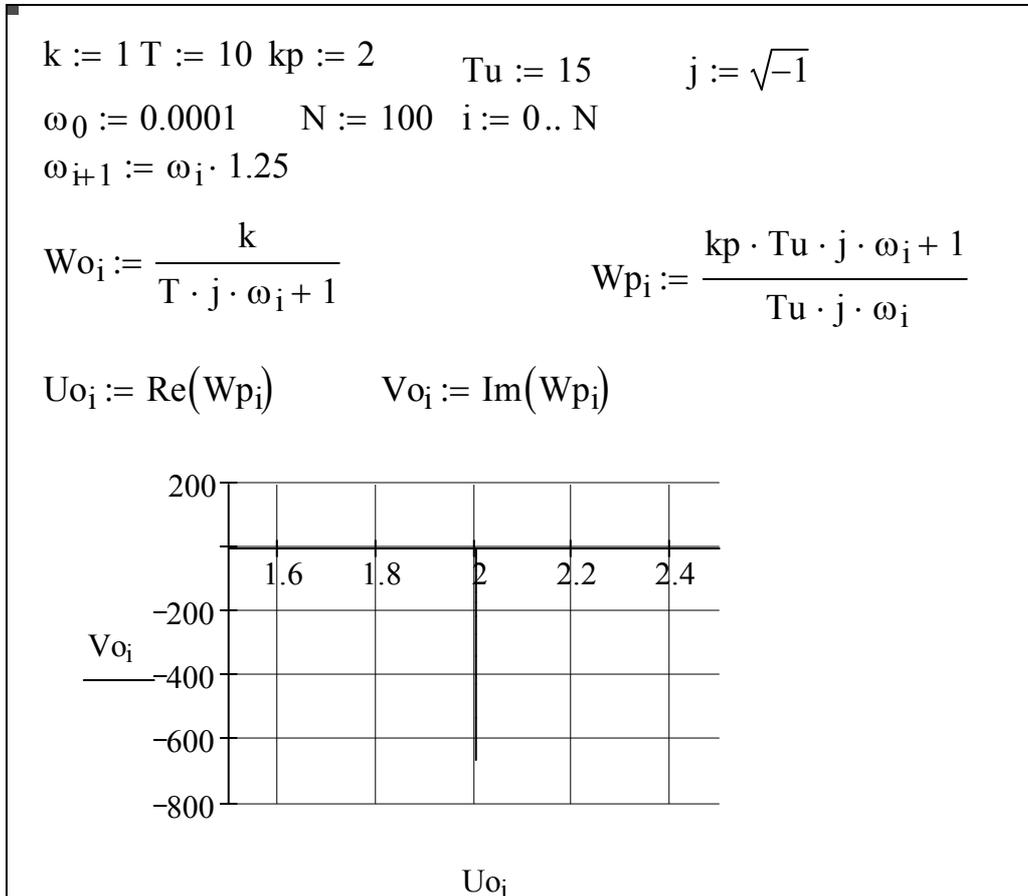


Рис. 2. Комплексная частотная характеристика, соответствующая ПИ-алгоритму регулирования

для ПИД-алгоритма

$$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s, \quad (5)$$

где k_p , T_i , T_d – коэффициент передачи, постоянная интегрирования и постоянная дифференцирования соответственно (параметры настройки регуляторов).

Комплексная частотная характеристика (КЧХ) регулятора, соответствующая алгоритму (4), имеет вид, представленный на рис. 2. При расчете КЧХ величина частоты ω_0 не должна быть равной нулю, т.к. в этом случае знаменатель $W_p(j\omega)$ будет равен нулю.

На основе типовых идеальных алгоритмов в теории управления развиты методы параметрического синтеза и анализа свойств АСР.

2.1. Расчет переходных характеристик технологических объектов регулирования в среде MathCAD. Расчет переходной характеристики объекта с использованием символьных вычислений

Переходную характеристику можно определить в аналитической форме по передаточной функции с использованием символьных вычислений, позволяющих найти функцию-оригинал по ее изображению. Для объектов с транспортным запаздыванием результат получается более компактным, если символьные преобразования провести без учета запаздывания с последующим смещением оригинала на значение τ .

$$T = 10, \quad k = 1.$$

Изображение переходной характеристики объекта

$$\frac{k}{T \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

Оригинал – результат символьного преобразования Symbolics/Transform/Inverse Laplace.

$$k \cdot \left(-\exp\left(\frac{-t}{T}\right) + 1 \right).$$

Уравнение переходной характеристики $h(t)$

$$h(t) := \Phi(t) \cdot k \cdot \left(-\exp\left(\frac{-t}{T}\right) + 1 \right).$$

График значений переходной характеристики представлен на рис. 3.

Для получения уравнения переходной характеристики следует:

- 1) ввести уравнение, определяющее изображение по Лапласу (без учета запаздывания), регулируемой величины $Y(s)$ при воздействии $x(t) = 1(t)$;
- 2) щелкнуть на переменной s (меню Symbolics, подменю Transform, команда Inverse Laplace); после выполнения символьных преобразований на рабочем листе появляется функция-оригинал – правая часть уравнения переходной характеристики;
- 3) ввести полное уравнение переходной характеристики (левая часть – обозначение переходной характеристики как функции времени, правая – результат предыдущего шага);
- 4) при начальном значении аргумента $t = 0$ задать шаг вычислений и конечное значение аргумента.

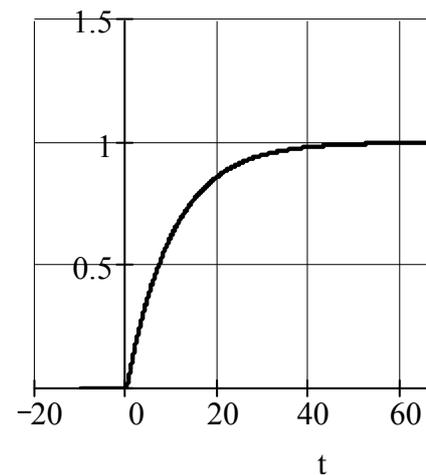


Рис.3. Расчет переходной характеристики объекта с самовыравниванием

$$T_u = 12$$

$$k_p = 2$$

Изображение переходной характеристики регулятора

$$\frac{k_p \cdot T_u \cdot s + 1}{T_u \cdot s} \cdot \frac{1}{s}$$

Оригинал – результат символьного преобразования
Symbolics/Transform/Inverse Laplace.

$$\frac{1}{T_u} \cdot (t + k_p \cdot T_u).$$

Уравнение переходной характеристики

$$h(t) := \Phi(t) \cdot \left[\frac{1}{T_u} \cdot (t + k_p \cdot T_u) \right].$$

График значений переходной характеристики

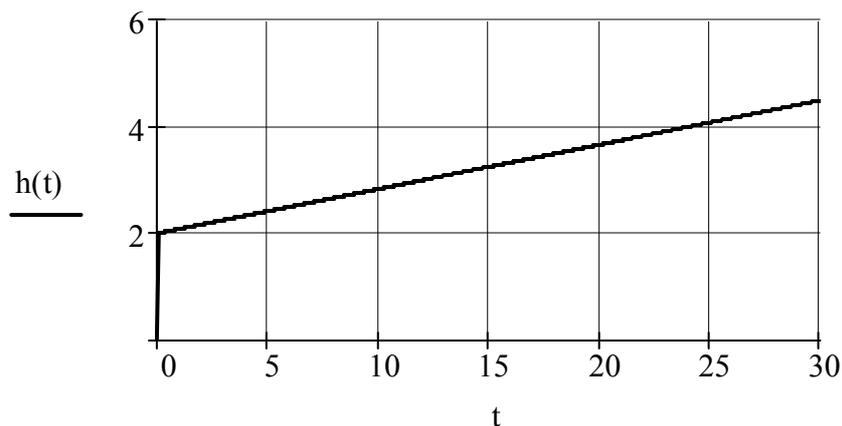


Рис.4. Расчет переходной характеристики объекта без самовыравнивания

Вывод на рабочий лист графика $h(t)$ осуществляется обычным образом [5, 6]. По виду графика производится при необходимости корректировка конечного значения аргумента t . Это значение должно быть таким, чтобы график позволял судить о достижении установившегося движения (завершении переходного процесса).

MathCAD-программы определения переходной характеристики объекта регулирования и ПИ-регулятора, использующие символьные вычисления Inverse Laplace, представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

2.2. Расчет переходной характеристики объекта с использованием обратного преобразования Фурье

Построение переходной характеристики можно произвести на основе формулы обратного преобразования Фурье [1]

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где $X(j\omega)$ – Фурье-изображение оригинала $x(t)$.

Вычисление переходной характеристики производится по формуле

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Re}[W_o(j\omega)]}{\omega} \sin(\omega t) d\omega, \quad (7)$$

где $\operatorname{Re}[W(j\omega)]$ – вещественная частотная характеристика объекта регулирования. В качестве верхнего предела интегрирования в расчете берется значение частоты ω_c , при котором модуль $\operatorname{Re}[W(j\omega)]$ уменьшается до некоторого малого значения (например, $0,05k$) и не превосходит это значение при дальнейшем возрастании ω .

Для получения уравнения переходной характеристики следует:

- 1) ввести уравнение комплексной частотной характеристики объекта регулирования (аргумент – круговая частота ω);
- 2) вывести график вещественной частотной характеристики $\operatorname{Re}[W(j\omega)]$ и оценить конечное значение частоты ω_c ;
- 3) ввести уравнение (7) переходной характеристики $h(t)$;
- 4) при начальном значении аргумента $t = 0$ задать шаг вычислений и конечное значение аргумента t , вывести график $h(t)$.

MathCAD-программа вычисления переходной характеристики объекта регулирования представлена на рис. 5.

Построение ВЧХ объекта

Начальные коэффициенты: $k := 1, \quad T_1 := 10, \quad T_2 := 5.$

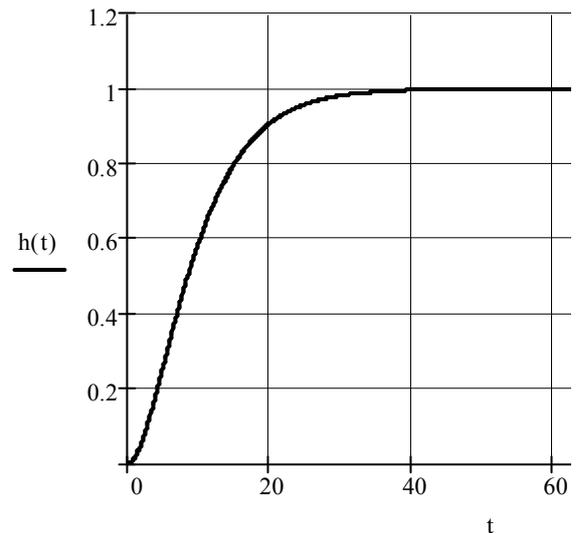
Подобранные коэффициенты: $T_u := 10, \quad k_p := 3.$

Задание начальных условий $j := \sqrt{-1}.$

$$W_o(\omega) := \frac{k}{(T_2 \cdot \omega \cdot j)^2 + T_1 \cdot \omega \cdot j + 1}, \quad h(t) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^5 (W_o(\omega)) \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega.$$

При выполнении программы файла отключается автоматическое вычисление. При построении графика используется «жирное равно» на панели инструментов или F9.

Рис. 5. Результаты вычисления переходной характеристики объекта второго порядка по вещественной частотной характеристике



2.3. Расчет частотных характеристик объектов регулирования

Частотные характеристики дают полезную информацию о свойствах объекта и являются основой для исследования устойчивости и проверки АСР на заданный запас устойчивости, расчета переходных процессов частотными методами.

В расчете АСР на заданный запас устойчивости при его оценке значением корневого показателя колебательности m используются расширенные частотные характеристики (РКЧХ).

РКЧХ-характеристика определяется следующим образом:

$$W(m, \omega) = W(s) \text{ при } s = (-m\omega + j\omega); \bar{j} = \sqrt{-1}. \quad (8)$$

На рабочем листе MathCAD используется условное обозначение РКЧХ – $W(m, \omega)$. В качестве «заготовки», можно ввести для регулятора правую часть $W_p(s)$ в наиболее общем виде (3), (4), (5), определяя конкретную структуру $W_p(m, \omega)$ значениями параметров.

В анализе динамических свойств объекта регулирования используются обычные ($m = 0$) и расширенные частотные характеристики:

- комплексная частотная характеристика – $W_o(m, j\omega)$,
- амплитудно-частотная характеристика – $|W_o(m, j\omega)|$,
- фазочастотная характеристика – аргумент $\varphi_o(W_o(m, j\omega))$,
- вещественная частотная характеристика – $\text{Re}(W_o(m, j\omega))$,
- мнимая частотная характеристика – $\text{Im}(W_o(m, j\omega))$.

Все эти характеристики являются функциями от комплексного аргумента, и действия с ними легко осуществляются в среде MathCAD. Графики комплексных частотных характеристик в основном используются для анализа свойств системы на качественном уровне. Для количественных оценок свойств системы необходимо нанести на годограф КЧХ ряд опорных точек и указать соответствующие этим точкам частоты. Принципиально MathCAD позволяет это сделать, однако для установления связи между расположением вектора

КЧХ и частотой более удобны амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, вещественная и мнимая частотные характеристики или табличная форма.

Перед построением графиков необходимо оценить диапазон определения частотной характеристики (начальное и конечное значения частоты) и шаг расчета. Для получения «гладких» кривых следует выбирать малое значение шага по частоте. Диапазон определения зависит от решаемой задачи. В диапазоне определения характеристики должно быть около 100 точек. Табличные значения вычисляются в представляющем интерес частотном диапазоне с увеличенным шагом.

Расчет и построение графиков частотных характеристик для объекта с самовывравниванием в общем виде (1) проиллюстрированы на рис. 6 и 7.

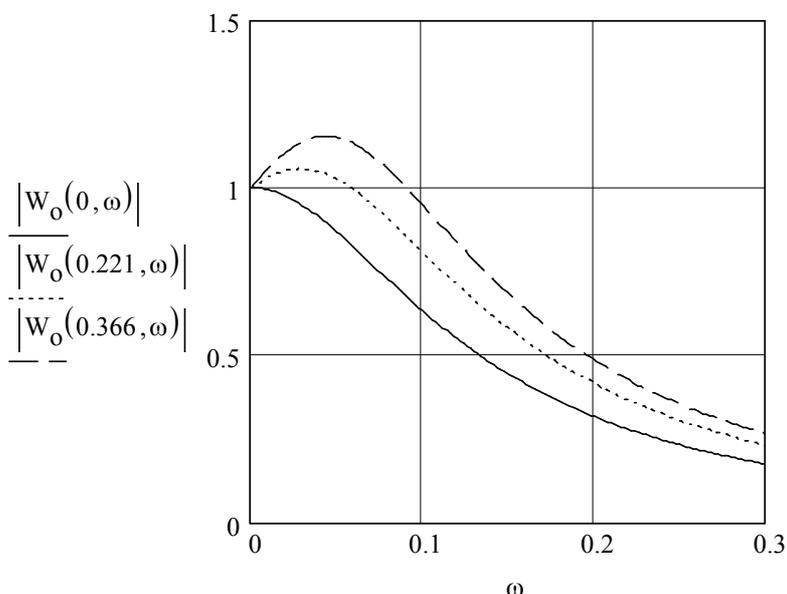


Рис. 6. Обычная и расширенные амплитудно-частотные характеристики

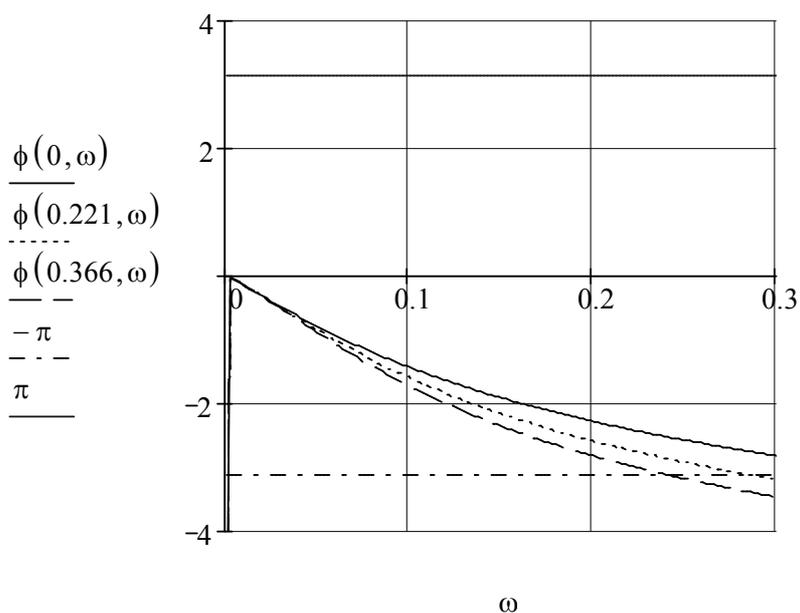


Рис. 7. Обычная и расширенные фазочастотные характеристики

$$i := i \quad k := i \quad \tau := 2$$

$$T_1 := 10 \quad T_2 := 5 \quad T_3 := 0$$

$$W_o(m, \omega) := \frac{k \cdot \exp[-\tau\omega(-m + i)]}{[T_1\omega(-m + i) + 1] \cdot [T_2\omega(-m + i) + 1] \cdot [T_3\omega(-m + i) + 1]}$$

$$\omega := 0, 0.002.. 0.3$$

Для работы с РФЧХ в диапазоне изменения φ от 0 до -2π создана вспомогательная функция $\varphi(m, \omega)$:

$$\varphi(m, \omega) := \arg(W_o(m, \omega)) + \begin{cases} -2\pi & \text{if } \arg(W_o(m, \omega)) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

На рис. 8 и 9 представлены обычная и расширенные вещественные и мнимые частотные характеристики исследуемого объекта.

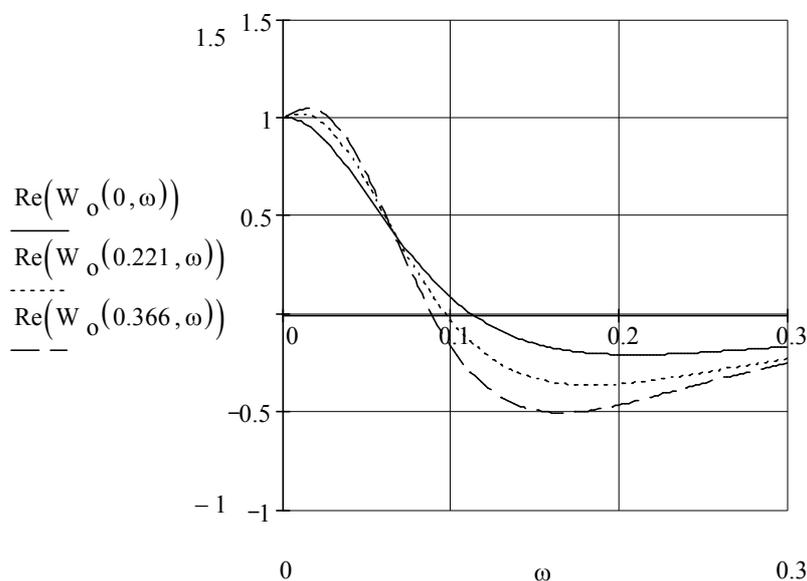


Рис. 8. Обычная и расширенные вещественные частотные характеристики

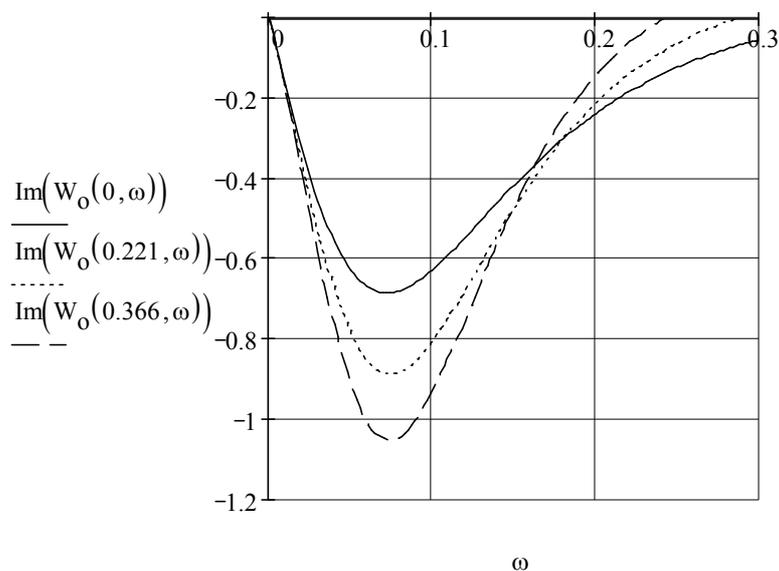


Рис. 9. Обычная и расширенные мнимые частотные характеристики

На рис. 10 и 11 приведены КЧХ и РКЧХ ($m = 0,366$) исследуемого объекта в полярных и декартовых координатах

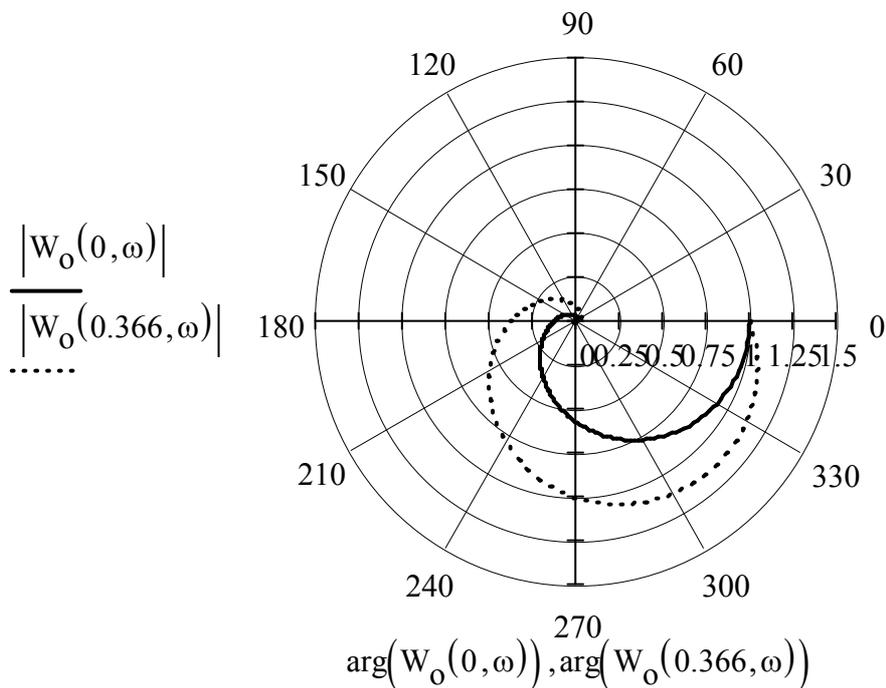


Рис. 10. Представление КЧХ и РКЧХ ($m = 0,366$) в полярных координатах

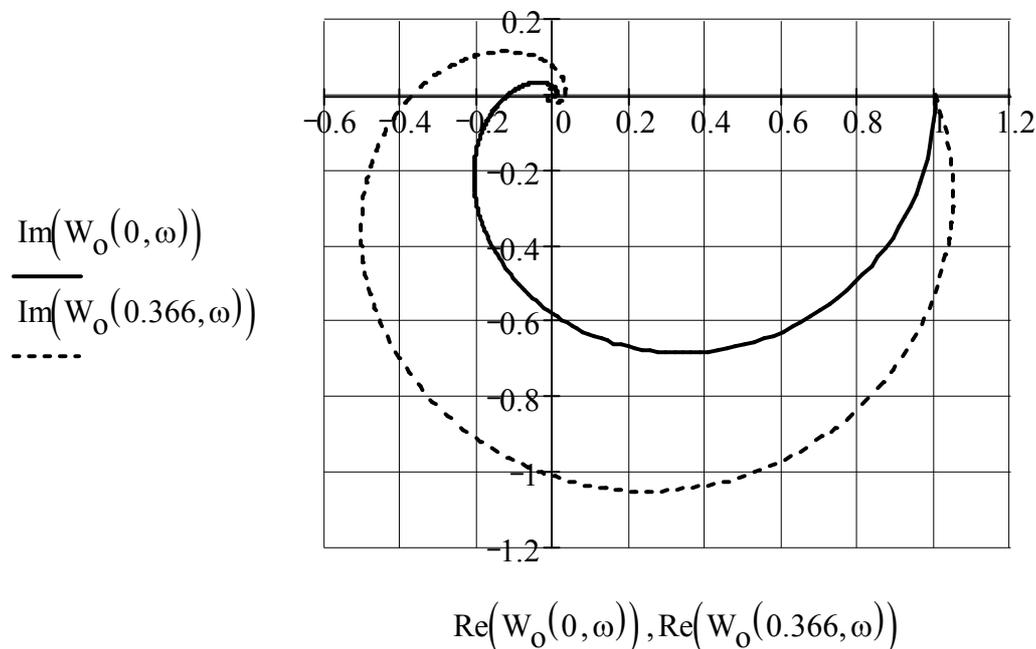


Рис. 11. Представление КЧХ и РКЧХ ($m = 0,366$) в декартовых координатах

$$i := i \quad k := 1 \quad T1 := 20 \quad \tau := 2 \quad m := 0.221$$

Расширенные КЧХ объекта регулирования, П-регулятора и разомкнутой системы приведены на рис. 12 и 13, 14, 15.

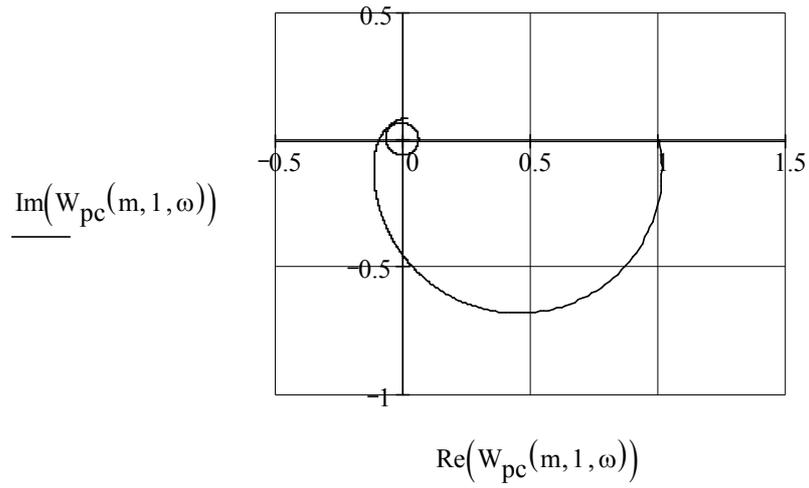


Рис. 12. Расширенная КЧХ разомкнутой системы при $k = 1$

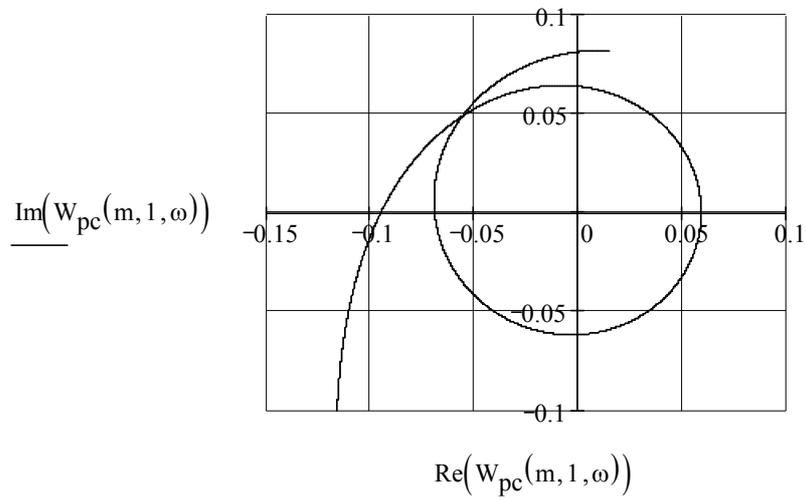


Рис. 13. Фрагмент расширенной КЧХ разомкнутой системы при $k = 1$, представленной на рис. 12

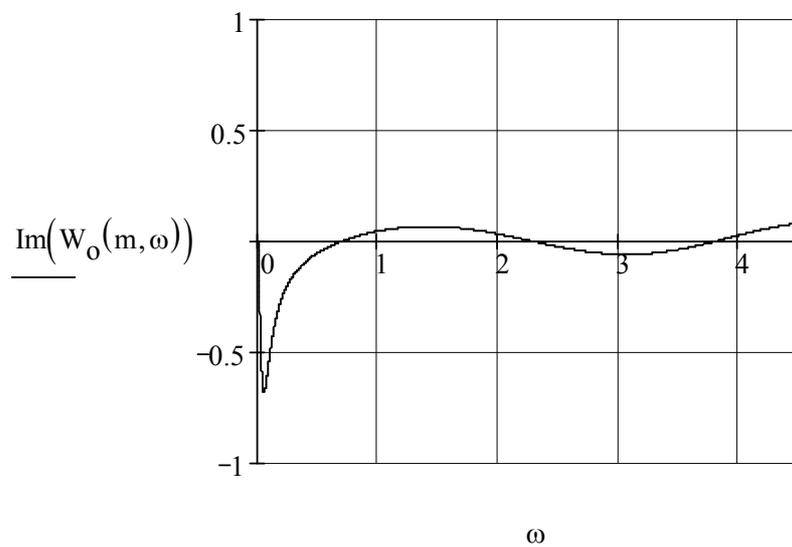


Рис. 14. Расширенная мнимая ЧХ разомкнутой системы при $k_p = 1$

$$W_O(m, \omega) := k \cdot \frac{\exp[-\tau\omega(-m+i)]}{T_1\omega(-m+i)+1} \quad W_p(m, k_p, \omega) := k_p$$

$$W_{pc}(m, k_p, \omega) := W_O(m, \omega) \cdot k_p$$

$$\omega := 0, 0.001.. 4.7$$

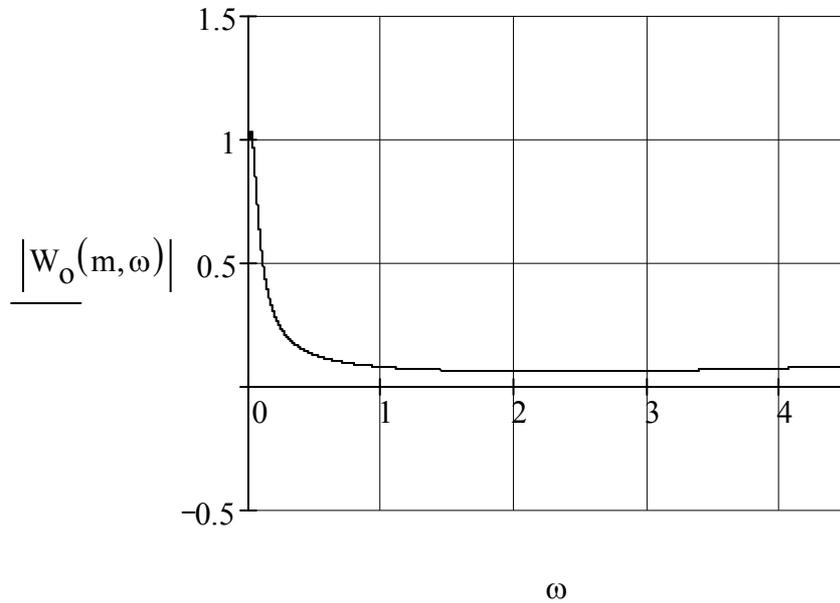


Рис. 15. Модуль РКЧХ разомкнутой системы при $k_p = 1$

$$\omega := 0.5 \quad \omega_{\min} := \text{root} \left(\frac{d}{d\omega} |W_O(m, \omega)|, \omega \right) \quad \omega_{\min} = 2,238$$

$$|W_O(m, \omega_{\min})| = 0.059$$

Определение частоты ω_π , величины k_p регулятора и проверка условия (11)

$$\omega := 0.5 \quad \omega_\pi := \text{root} (\text{Im}(W_O(m, \omega)), \omega) \quad \omega_\pi = 0.71$$

$$k_p := \left(|W_O(m, \omega_\pi)| \right)^{-1} \quad k_p = 10.494$$

$$\text{Re}(W_{pc}(m, k_p, \omega_\pi)) = -1 \quad \text{Im}(W_{pc}(m, k_p, \omega_\pi)) = -1.066 \times 10^{-3}$$

3. Оценка запаса устойчивости линейных систем

Практическое требование к АСР, диктуемое свойствами реальных объектов регулирования, заключается в том, что автоматическая система регулирования должна обладать определенным запасом устойчивости.

Построение расширенной КЧХ объекта 3-го порядка, без запаздывания

$$j \equiv \sqrt{-1} \quad \omega := 0, 0.007.. 8$$

$$T1 \equiv 1.9 \quad T2 \equiv 0.8 \quad T3 \equiv 0.4 \quad k := 1$$

$$W(m, \omega) := \frac{k}{[(T3) \cdot (-m + j) \cdot \omega]^3 + [(T2) \cdot (-m + j)\omega]^2 + T1 \cdot (-m + j)\omega + 1}$$

$$U(m, \omega) := \operatorname{Re}(W(m, \omega))$$

$$V(m, \omega) := \operatorname{Im}(W(m, \omega))$$

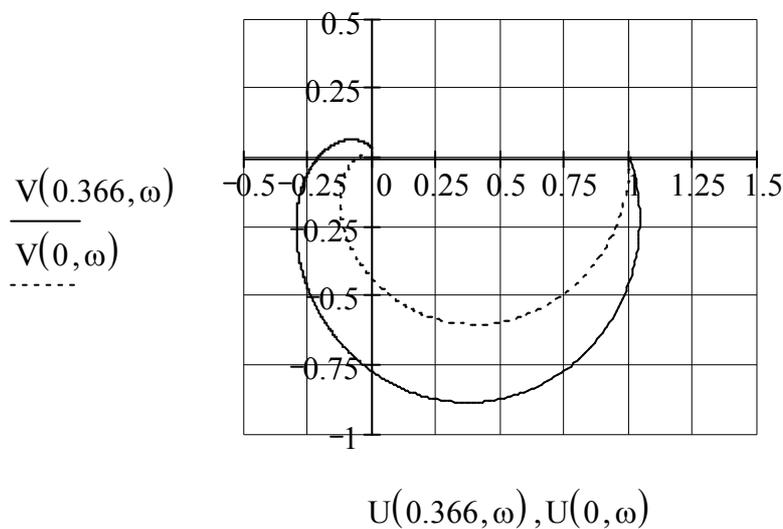


Рис. 16. РКЧХ объекта третьего порядка без запаздывания

Запас устойчивости гарантирует работоспособность системы в некоторых пределах отклонения ее параметров и изменении ее характеристик со временем (нестационарность объекта) или при изменении режима работы (нелинейность объекта). Требование запаса устойчивости вводит ограничение на область расположения корней характеристического уравнения замкнутой системы в плоскости корней или КЧХ разомкнутой системы в плоскости КЧХ. В первом случае в качестве меры запаса устойчивости используют корневой m , во втором – частотный показатель колебательности M [1].

Обычно в расчетах в качестве граничных принимают значения корневого показателя колебательности $m = 0,221$ ($M = 2,38$) и $m = 0,366$ ($M = 1,55$). На рис. 16 приведена РКЧХ объекта третьего порядка без запаздывания. В одноконтурных АСР с П-, И- и ПИ-алгоритмами регулирования при настройках по линейному или квадратичному интегральным критериям оправдывается гипотеза доминирующей пары комплексно-сопряженных корней, ближайшей к мнимой оси пары корней, вносящей наибольший вклад в формирование переходного процесса. Если среди корней характеристического уравнения имеется

доминирующая пара, то значению m отвечает определенная степень затухания переходного процесса φ , характеризующая интенсивность затухания колебаний в реакции системы на ступенчатое воздействие.

$$\varphi = 1 - \frac{A_3}{A_1}, \quad (9)$$

где A_1, A_3 – первое и второе положительные максимальные отклонения в переходном процессе.

Для доминирующей компоненты соответствие между φ и m определяется формулой

$$\varphi = 1 - e^{-2\pi m}, \quad (10)$$

а при выполнении указанных выше условий имеет также место примерное соответствие значений m и φ для всего переходного процесса:

$$m = 0,221 \text{ отвечает } \varphi = 0,75;$$

$$m = 0,366 \text{ отвечает } \varphi = 0,9.$$

Расчет системы на заданный запас устойчивости при его оценке значением корневого показателя колебательности производится по РКЧХ объекта регулирования.

Расположению пары комплексно-сопряженных корней на лучах, проведенных под углом $\beta = \arctg(m)$ к мнимой оси в левой полуплоскости плоскости корней характеристического уравнения замкнутой системы, отвечает условие

$$W_{pc}(-m\omega + j\omega) = W_o(-m\omega + j\omega)W_p(-m\omega + j\omega) = -1, \quad (11)$$

где $W_{pc}(-m\omega + j\omega)$, $W_o(-m\omega + j\omega)$, $W_p(-m\omega + j\omega)$ – РКЧХ разомкнутой системы, объекта регулирования и регулятора.

Выполнение условия (11) обеспечивается при определенных значениях параметров настройки регулятора. Если объект регулирования не обладает транспортным запаздыванием τ и используются типовые алгоритмы или их варианты, то при ω , стремящемся к бесконечности, РКЧХ стремится к нулю:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} W_{pc}(-m\omega + j\omega) = 0.$$

В этом случае модуль РКЧХ разомкнутой системы монотонно уменьшается, и критерий запаса устойчивости можно сформулировать следующим образом: если

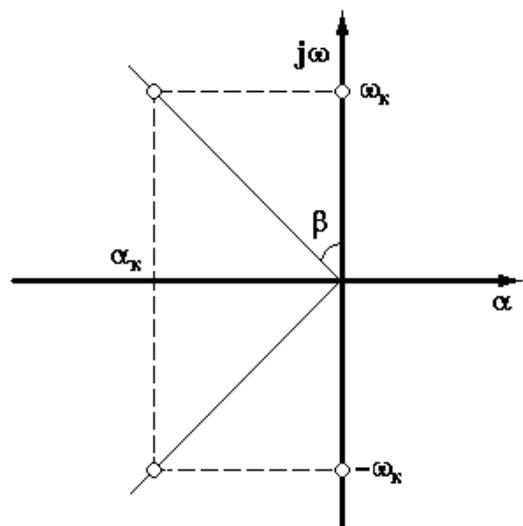


Рис. 17. Оценка запаса устойчивости по расположению корней характеристического уравнения замкнутой системы

РКЧХ устойчивой или нейтральной разомкнутой системы $W_{pc}(-m\omega + j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ проходит через точку с координатами $(-1; j0)$, не охватывая ее на более низких частотах, то комплексно-сопряженная пара корней будет расположена на лучах, проведенных под углом $\beta = \arctg(m)$ к мнимой оси в левой полуплоскости плоскости корней характеристического уравнения замкнутой системы, и все остальные корни характеристического уравнения замкнутой системы будут расположены левее этих лучей (см. рис. 17).

Для таких систем достаточное условие удовлетворения критерию заданного запаса устойчивости

$$|W_{pc}(-m + j\omega_\pi)| = 1, \quad (12)$$

где ω_π – частота, при которой $\arg(W_{pc}(-m + j\omega_\pi)) = -\pi$.

Если объект регулирования обладает транспортным запаздыванием τ , то в $W_{pc}(m, j\omega)$ появляется множитель $\exp(\tau m\omega)$ и при ω , стремящемся к бесконечности, годограф РКЧХ разомкнутой системы стремится к бесконечности:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} W_{pc}(-m\omega + j\omega) = \infty.$$

В этом случае модуль РКЧХ разомкнутой системы сначала монотонно уменьшается по мере возрастания частоты ω , достигает некоторого минимального значения и при дальнейшем возрастании частоты стремится к бесконечности. При изменении частоты ω от 0 до ∞ РКЧХ разомкнутой системы при наличии в объекте регулирования запаздывания, пройдя через точку $(-1; j0)$, может охватить эту точку бесконечное число раз.

Очевидно, что для систем с запаздыванием критерий запаса устойчивости в приведенной выше формулировке не пригоден. Однако практика расчетов подтверждает, что условие (12) является достаточным и для расчета систем с запаздыванием на заданный запас устойчивости. Из расчетов следует, что заданное значение корневого показателя колебательности обеспечивается только при значении k_p , найденном по условию (12). Если условие (11) выполняется для точки ω_1 ($\omega_1 > \omega_\pi$), то РКЧХ разомкнутой системы будет охватывать точку с координатами $(-1; j0)$ на более низкой частоте ω_π . Условие критерия при этом не выполняются, и АСР оказывается неустойчивой. Если же потребовать, чтобы условие (11) выполнялось на более высоких, чем ω_π частотах ω_2, ω_3 , при которых

$$|W_o(m, j\omega)| > |W_o(m, j\omega_\pi)|, \quad (13)$$

то в расчете будут получены значения коэффициента передачи регулятора, меньшие граничного, обеспечивающего заданное значение m . При этих значениях система имеет запас устойчивости, больший заданного. Достаточность критерия (12) для систем с запаздыванием подтверждается также результатами

вычисления корней характеристического уравнения замкнутой системы для каждого из рассмотренных случаев и следует из анализа D -разбиения в плоскости комплексного параметра k_p [2].

Подобным образом подтверждается достаточность критерия (12) и для АСР с ПИ-алгоритмом.

3.1. Построение годографа Михайлова

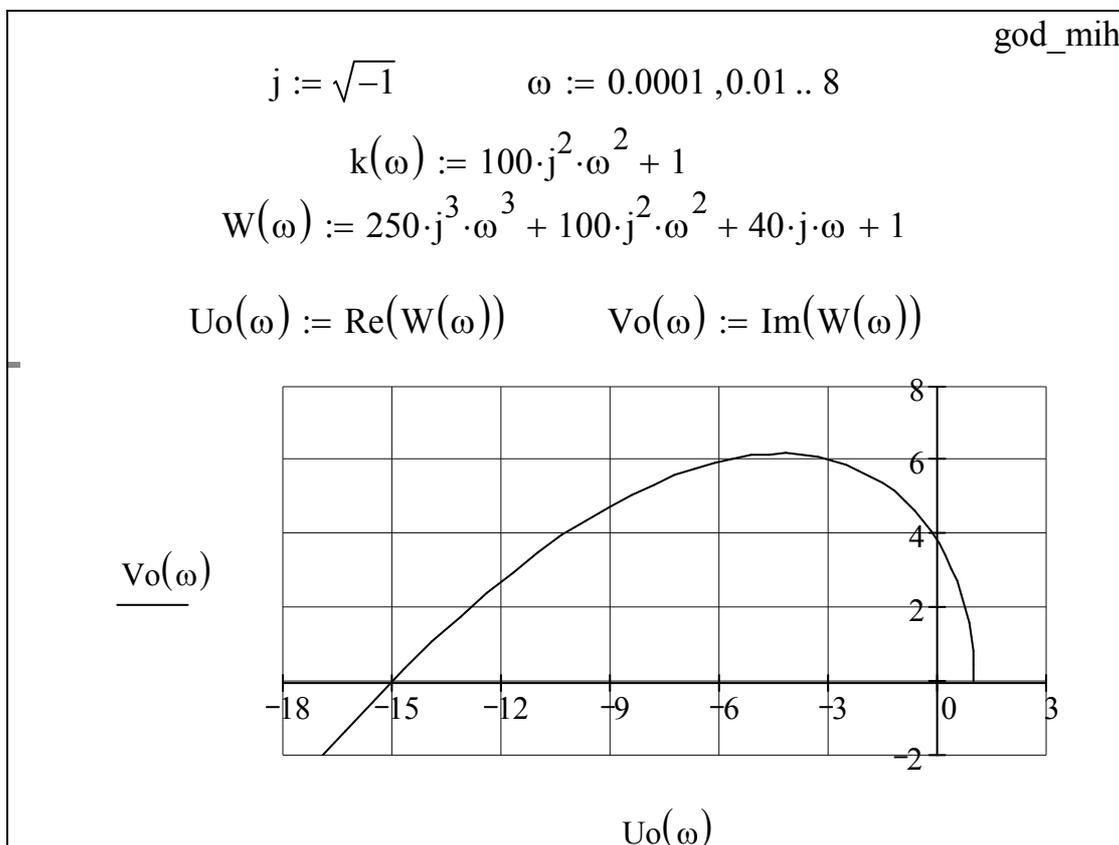


Рис.18. Построение годографа Михайлова

3.2. Определение запаса устойчивости системы

Запас устойчивости по модулю

На рис. 19 видно, что годограф разомкнутой системы не пересекает отрицательную вещественную полуось, т.к. заканчивается при $\omega \rightarrow \infty$ в начале координат. Расстояние от точки пересечения годографа разомкнутой системы с отрицательной вещественной полуосью до точки $(1, 0j)$, определяющее запас устойчивости по модулю, равно 1.

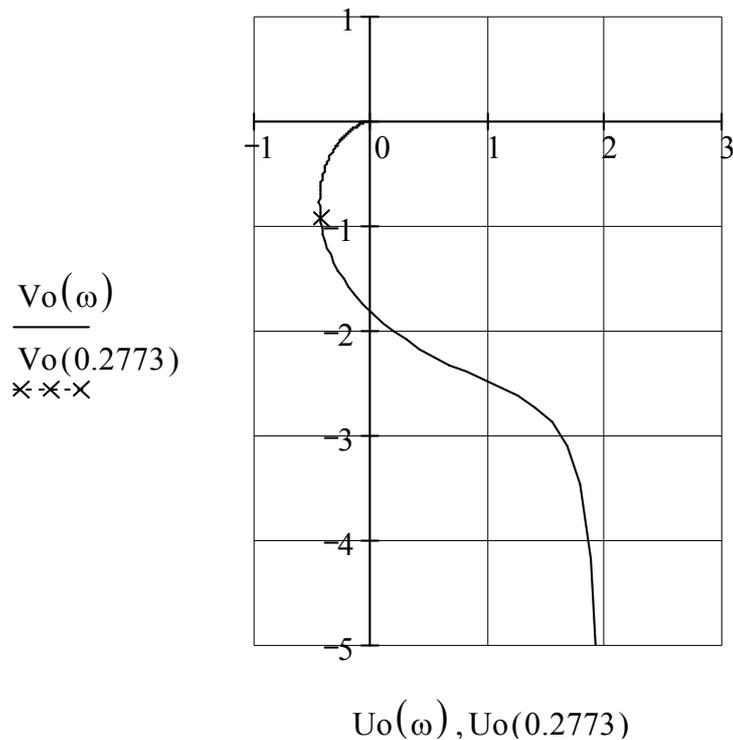


Рис. 19. Определение запаса устойчивости по годографу КЧХ разомкнутой системы

Запас устойчивости по фазе

$$k := 1 \quad T_1 := 10 \quad T_2 := 5 \quad T_u := 10 \quad k_p := 3$$

$$j := \sqrt{-1} \quad \omega := 0.001, 0.01 \dots 3$$

$$W_o(\omega) := \frac{k}{(T_2 \cdot j \cdot \omega)^2 + T_1 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad W_p(\omega) := \frac{k_p \cdot T_u \cdot j \cdot \omega + 1}{T_u \cdot j \cdot \omega}$$

$$W(\omega) := W_o(\omega) \cdot W_p(\omega) \quad U_o(\omega) := \operatorname{Re}(W(\omega))$$

$$V_o(\omega) := \operatorname{Im}(W(\omega))$$

Найдем запас устойчивости по фазе (рис. 20).

Для этого определяем частоту, при которой значение АЧХ равно 1,

$$A(\omega) := \sqrt{(U_o(\omega))^2 + (V_o(\omega))^2}$$

$$\phi(\omega) := \operatorname{atan}\left(\frac{V_o(\omega)}{U_o(\omega)}\right) + \begin{cases} 0 & \text{if } U_o(\omega) \geq 0 \\ -\pi & \text{otherwise} \end{cases}$$

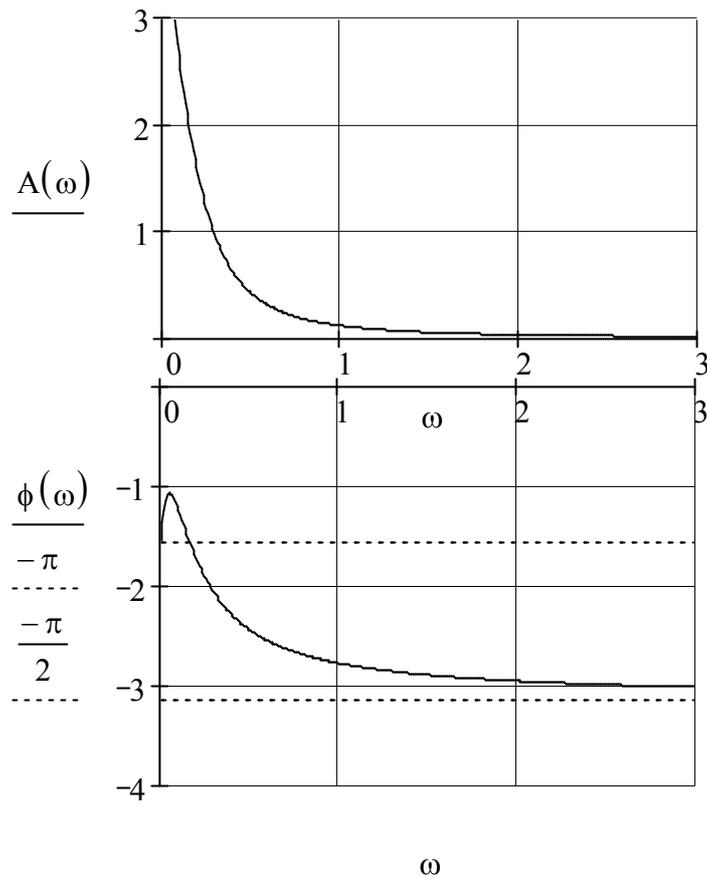


Рис. 20. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики системы, исследуемой на запас устойчивости

1-й способ

$$\omega := 0.2773$$

Given

$$A(\omega) = 1$$

$$K := \text{MinErr}(A(\omega), \omega)$$

$$K = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.284 \end{pmatrix}$$

2-й способ

$$\omega := 0.2773$$

Given

$$A(\omega) = 1$$

$$\text{Find}(\omega) = 0.284$$

$$A(0.284) = 1.001$$

Найдем значение ФЧХ при данной частоте

$$\phi(0.284) = 2.031.$$

Переведем найденное значение фазы из радиан в градусы, используя операции MathCAD с размерными величинами.

$$\frac{180 \cdot \text{deg}}{\pi} \cdot (-2.031 \cdot \text{rad}) = -116.368 \text{ deg}$$

$$180 \cdot \text{deg} - 116.368 \cdot \text{deg} = 63.632 \text{ deg}$$

4. Методика расчета линейных систем на заданный запас устойчивости

4.1. Общие условия методики расчета

На основании условия (11) получаются уравнения для определения значений параметров настройки регулятора, при которых обеспечивается заданное распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы и, следовательно, заданный запас устойчивости АСР.

Для того чтобы система обладала заданным запасом устойчивости, необходимо (но недостаточно) выполнить условие

$$W_o(m, j\omega)W_p(m, j\omega) + 1 = 0. \quad (14)$$

Представим РКЧХ объекта регулирования в виде

$$W_o(m, j\omega) = \operatorname{Re}(W_o(m, j\omega)) + j\operatorname{Im}(W_o(m, j\omega)),$$

где $\operatorname{Re}(W_o(m, j\omega))$, $\operatorname{Im}(W_o(m, j\omega))$ вещественная и мнимая расширенные частотные характеристики.

Далее, представляя $W_p(m, j\omega)$ соответствующим алгоритму полным уравнением, запишем условие (11) в полиномиальной форме

$$D(m, j\omega) = 0. \quad (15)$$

Полином (15) позволяет получить систему из двух уравнений

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(D(m, j\omega)) = 0, \\ \operatorname{Im}(D(m, j\omega)) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решение системы (16) относительно параметров настройки дает уравнения, определяющие значение параметра (И-, П-алгоритм) или множества параметров (ПИ-алгоритм), удовлетворяющих критерию заданного запаса устойчивости.

4.2. Расчет на заданный запас устойчивости АСР с П-алгоритмом

РКЧХ идеального П-регулятора определяется уравнением

$$W_p(m, j\omega) = k_p.$$

Полином (15) записывается в виде:

$$D(m, j\omega) = \operatorname{Re}(W_o(m, j\omega))k_p + j\operatorname{Im}(W_o(m, j\omega))k_p + 1 = 0.$$

Для определения значений k_p , удовлетворяющих (11), используется система из двух уравнений

$$\operatorname{Re}(W_o(m, j\omega))k_p + 1 = 0; \quad \operatorname{Im}(W_o(m, j\omega))k_p = 0,$$

из которой следует

$$k_p = -1/\operatorname{Re}(W_o(m, j\omega)) \text{ при } \operatorname{Im}(W_o(m, j\omega)) = 0.$$

Если объект регулирования не обладает запаздыванием, то условия критерия выполняются при

$$\operatorname{Im}(W_o(m, j\omega_\pi)) = 0 \text{ и } k_p = -1/\operatorname{Re}(W_o(m, j\omega_\pi)), \quad (17)$$

где ω_π – значение частоты ω , при которой фазовый сдвиг РКЧХ объекта регулирования равен π .

Значение частот ω_π находится решением уравнения

$$\varphi_o(m, \omega) = -\pi, \quad (18)$$

где $\varphi_o(m, \omega)$ – расширенная фазочастотная характеристика (РФЧХ) объекта регулирования.

Условия (17) обеспечивают заданное распределение корней характеристического уравнения и в случае объекта регулирования с запаздыванием, но РКЧХ разомкнутой системы, проходя через точку с координатами $(-1, j0)$ при $k_p = -1/\operatorname{Re}(W_o(m, j\omega_\pi))$, будет охватывать эту точку на более высоких частотах, чем значение ω_π .

4.3. Расчет на заданный запас устойчивости АСР с ПИ-алгоритмом

Представим расширенные КЧХ объекта регулирования и идеального ПИ-регулятора в виде

$$\begin{aligned} W_o(m, j\omega) &= \operatorname{Re}(W_o(m, \omega)) + j\operatorname{Im}(W_o(m, \omega)), \\ W_p(m, j\omega) &= k_p + k_{\text{и}}/\omega(-m + j), \end{aligned}$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент при интегральной составляющей ($k_{\text{и}} = k_p / T_{\text{и}}$).

Последовательность вывода формул расчета линий заданного запаса устойчивости в плоскости параметров настройки ПИ-регулятора в среде MathCAD представлена в приложении 1.

Расчет значений параметров, при которых выполняются условия критерия запаса устойчивости, производится по действительной и мнимой расширенным ЧХ объекта регулирования. Линия $m = \text{const}$ обычно определяется в области положительных значений k_p , $k_p/T_{\text{и}}$, границам которой соответствуют значения частоты. Эти значения определяются по расширенной фазочастотной характеристике объекта регулирования решением уравнений

$$\varphi_o(m, \omega_1) + 0,5\pi - \operatorname{arctg}(m) = 0, \quad (19)$$

$$\varphi_o(m, \omega_\pi) + \pi = 0. \quad (20)$$

Значению ω_1 отвечает значение $k_p = 0$ и отличное от нуля значение $k_{\text{и}} = k_p/T_{\text{и}}$ (ПИ-алгоритм вырождается в И-алгоритм); при частоте ω_π коэффициент при интегральной составляющей становится равным нулю $k_{\text{и}} = 0$ и

значение k_p определяет настройку идеального П-регулятора. Начало диапазона можно также определить значением $\omega = 0$. Тогда точками $k_p(m, 0)$ и $k_p(m, \omega_\pi)$ будет определена область значений k_p , при которых система обладает запасом устойчивости, не ниже заданного.

Пример расчета линии $m = \text{const}$ приведен ниже. Оптимальные настройки выбираются на линии $m = \text{const}$. Минимуму линейного интегрального критерия качества в системе с ПИ-алгоритмом отвечает точка на вершине линии $m = \text{const}$.

Расчет линий $m = \text{const}$ можно проводить также по расширенным амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам объекта регулирования. Используя очевидные соотношения между вещественной и мнимой ЧХ и АЧХ и ФЧХ объекта регулирования,

$$\text{Re}(W_o(m, \omega)) = A_o(m, \omega) \cdot \cos(\varphi_o(m, \omega)),$$

$$\text{Im}(W_o(m, \omega)) = A_o(m, \omega) \cdot \sin(\varphi_o(m, \omega)).$$

Получим следующую систему уравнений, определяющих линию заданного запаса устойчивости в плоскости параметров настройки ПИ-регулятора:

$$k_p = [m \sin(\varphi_o(m, \omega)) - \cos(\varphi_o(m, \omega))] / A_o(m, \omega),$$

$$k_{\text{и}} = k_p \cdot T_{\text{и}} = \omega(1 + m^2) \sin(\varphi_o(m, \omega)) / A_o(m, \omega).$$

Расчет границы устойчивости в плоскости параметров настройки ПИ-регулятора производится по приведенным выше формулам при $m = 0$.

5. Анализ результатов параметрического синтеза АСР.

Оценка свойств АСР по частотным характеристикам

Частотные характеристики АСР позволяют получить существенную информацию о свойствах синтезированной системы. Для анализа свойств АСР в зависимости от цели используются частотные характеристики замкнутой системы по каналам управляющего и возмущающего воздействий. Основную информацию о свойствах системы содержит амплитудно-частотная характеристика АСР (модуль КЧХ).

По модулю КЧХ замкнутой системы по каналу управляющего воздействия определяются значения:

- частотного показателя колебательности, который равен относительному

максимуму модуля КЧХ $M = \frac{A_{\text{max}}}{|W_{\text{зу}}(j0)|}$ (мера запаса устойчивости АСР),

- резонансной частоты $\omega_{\text{рез}}$ и частоты «среза» $\omega_{\text{с}}$.

Резонансная частота соответствует максимуму модуля КЧХ замкнутой системы, частота «среза» – это значение частоты, при котором модуль КЧХ дос-

тигает некоторого малого заданного значения Δ и остается меньше Δ при дальнейшем возрастании ω .

По резонансной частоте производится оценка длительности переходного процесса. При обычно принимаемых значениях показателей запаса устойчивости свойства АСР достаточно полно характеризуются участком переходного процесса на интервале времени от 0 до $(2,5 \dots 3) T_{рез}$. Таким образом, конец временного интервала в расчете переходного процесса в замкнутой АСР при оптимальных настройках можно оценить по соотношению

$$t_c = \frac{(5 \dots 6)\pi}{\omega_{рез}}. \quad (21)$$

Значение частоты среза ω_c используется в расчете переходного процесса по вещественной частотной характеристике замкнутой системы. Кроме этого, графики модуля КЧХ замкнутой системы позволяют произвести качественную оценку фильтрующих свойств АСР.

Для количественных оценок на годограф КЧХ необходимо нанести ряд опорных точек и указать соответствующие этим точкам частоты, однако более просто сопроводить график таблицей значений в представляющем интерес диапазоне частоты ω .

Анализ расположения годографов КЧХ разомкнутой системы позволяет также оценить запас устойчивости АСР по модулю и по фазе [1]. В построении графиков частотных характеристик используются стандартные процедуры MathCAD.

6. Расчет переходных характеристик АСР

Расчет переходных характеристик является завершающим этапом параметрического синтеза. Под переходной характеристикой понимается реакция системы на единичное ступенчатое воздействие, определяемое уравнениями

$$x(t) = 1(t) = 1, \text{ при } t > 0; \quad x(t) = 0, \text{ при } t < 0. \quad (22)$$

Переходные характеристики позволяют оценить как запас устойчивости, так и качество синтезированной АСР. Оценка запаса устойчивости производится по степени затухания переходного процесса φ (см. раздел 3). Ступенчатое воздействие лишь одна из возможных форм действующих на систему возмущений, но возмущение этой формы является наиболее опасным. Реакция на ступенчатое возмущение характеризуется наибольшей динамической ошибкой в сравнении с реакцией на любое другое однократное воздействие. По переходной характеристике определяется один из важнейших прямых показателей качества – динамическая ошибка.

Наиболее просто расчет переходных характеристик в среде MathCAD производится по соотношению

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}[W_o(j\omega)]}{\omega} \sin(\omega t) d\omega, \quad (23)$$

где $W(j\omega)$ – КЧХ замкнутой системы по каналу «возмущающее воздействие – управляемая переменная».

Соотношение (23) следует из формулы обратного преобразования Фурье, если входное воздействие – единичная ступенчатая функция [1].

Для расчета переходной характеристики по формуле (23) должны быть заданы верхний предел интегрирования $\omega = \omega_c$, начало $t = 0$, конец диапазона $t = t_c$ определения $h(t)$ и шаг вычислений Δt . Оценка значений ω_c и t_c производится по амплитудно-частотным характеристикам замкнутой системы (см. раздел 5).

Шаг вычислений выбирается таким, чтобы $h(t)$ была представлена «гладкой» кривой (для этого требуется на интервале определения $h(t)$ около 100 точек). Увеличение числа рассчитываемых точек и диапазона определения $h(t)$ увеличивает время расчета и не дает дополнительной информации. Пример расчета переходных характеристик АСР по формуле (19) представлен на рис 5, 26 и 27.

7. Расчет АСР с ПИ-регулятором

1. Исходные данные и частотные свойства объекта управления

Значения параметров РКЧХ объекта регулирования:

$$k := 1 \quad \tau := 5 \quad m := 0.366 \quad i := i$$

$$T_1 := 15 \quad T_2 := 20 \quad T_3 := 30$$

Расширенные частотные характеристики объекта:

расширенная комплексная частотная характеристика

$$W_o(m, \omega) := k \cdot \frac{e^{\left[-\tau \cdot \omega \cdot (-m + 1i)\right]}}{\left[T_1 \cdot \omega \cdot (-m + 1i) + 1\right] \cdot \left[T_2 \cdot \omega \cdot (-m + 1i) + 1\right] \cdot \left[T_3 \cdot \omega \cdot (-m + 1i) + 1\right]}$$

$$R(m, \omega) := \operatorname{Re}(W_o(m, \omega))$$

вещественная и мнимая РЧХ

$$I(m, \omega) := \operatorname{Im}(W_o(m, \omega))$$

$$A(m, \omega) := \sqrt{R(m, \omega)^2 + I(m, \omega)^2}$$

амплитудно-частотная характеристика

$$c(\omega) := \operatorname{if}(R(m, \omega) \geq 0, 0, -\pi)$$

$$\phi(m, \omega) := \operatorname{atan}\left(\frac{I(m, \omega)}{R(m, \omega)}\right) + c(\omega)$$

фазочастотная характеристика

$$\omega := 0, 0.001 .. 0.094$$

Оценка частотного диапазона для последующих расчетов производится по графику расширенной фазочастотной характеристики (см. рис. 21).

ω

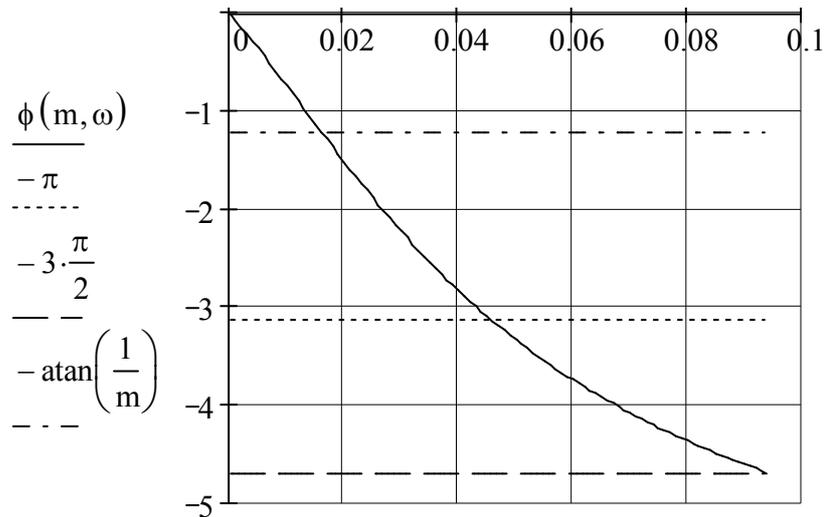


Рис. 21. Расчет расширенной фазочастотной характеристики исследуемого объекта

Конечное значение частоты для расчета АСР с ПИ-регуляторами определяется решением уравнения:

$$\omega_{\pi} := \text{root} \left(\text{atan} \left(\frac{I(m, \omega)}{R(m, \omega)} \right) + c(\omega) + \pi, \omega, 0.04, 0.06 \right)$$

АСР с И-регуляторами

$$\omega_1 := \text{root} \left[\left(\frac{I(m, \omega)}{R(m, \omega)} \right) + \text{atan} \left(\frac{1}{m} \right), \omega, 0.01, 0.02 \right]$$

$$\omega_1 = 0.012 \qquad \omega_{\pi} = 0.046$$

2. Оптимальная настройка П-регулятора

Оптимальным является максимальное, удовлетворяющее запасу устойчивости значение коэффициента передачи.

$$k_p := \frac{1}{A(m, \omega_{\pi})} \qquad k_p = 1.548 \qquad \text{для идеального П-алгоритма}$$

3. Расчет линии $m = \text{const}$ для АСР с ПИ-регулятором (рис. 22,23)

Передаточная функция идеального ПИ-регулятора

$$W_p(s) = k_p + \frac{k_p}{T_i \cdot s}$$

$$k_p(m, \omega) := \frac{-R(m, \omega) - m \cdot I(m, \omega)}{(R(m, \omega)^2 + I(m, \omega)^2)}$$

$$k_i(m, \omega) := -\omega \cdot (1 + m^2) \cdot \frac{I(m, \omega)}{(R(m, \omega)^2 + I(m, \omega)^2)}$$

$$k_{i0}(m, \omega) := \begin{cases} 0 & \text{if } k_i(m, \omega) < 0 \\ (k_i(m, \omega)) & \text{otherwise} \end{cases} \qquad \omega := 0, 0.0004 \dots 0.2$$

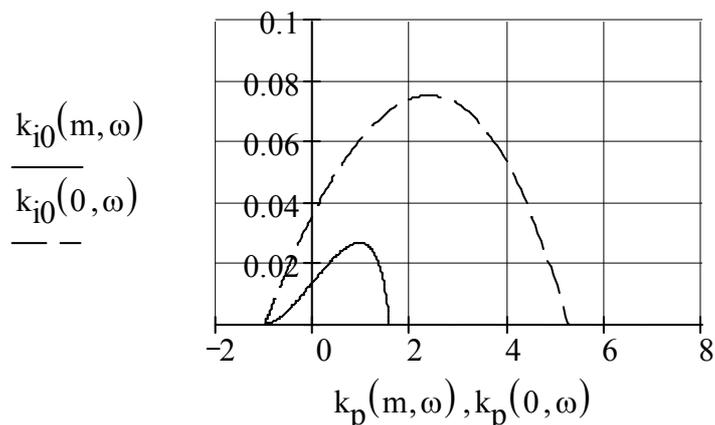


Рис. 22. Расчет линии $m = \text{const}$ для ПИ-алгоритма (линия $m = 0$ – граница устойчивости системы)

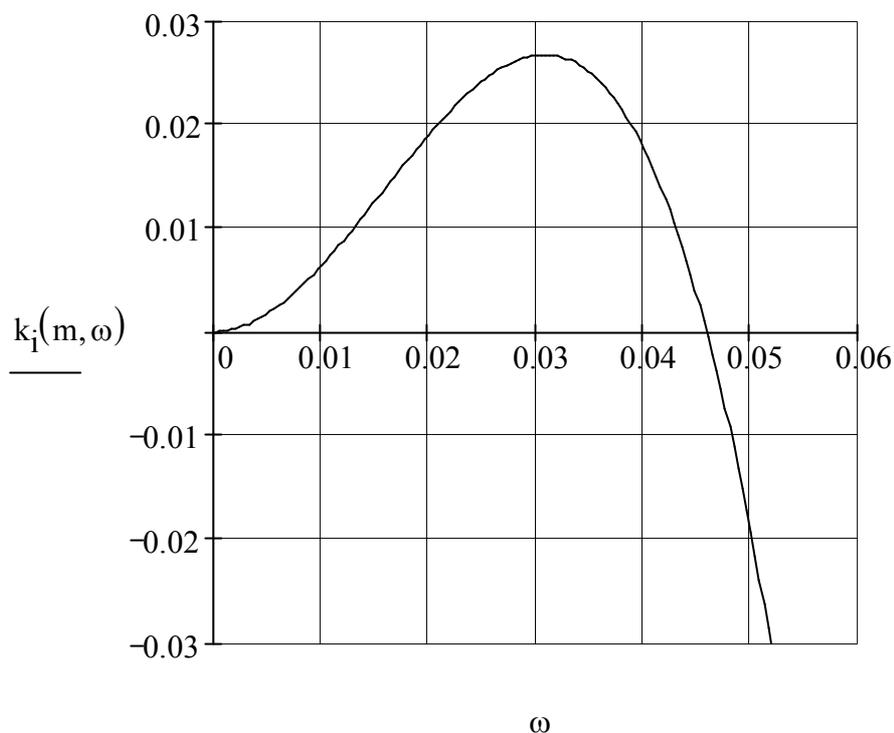


Рис. 23. Зависимость коэффициента k_i от частоты ω

4. Определение оптимальных настроек ПИ-регулятора

Минимуму линейного интегрального критерия отвечают настройки, соответствующие максимуму на линии $m = \text{const}$. Этой точке отвечают частота и настройки идеального ПИ-регулятора:

$$\omega_{\text{rez}} := \text{root}\left(\frac{d}{d\omega} k_i(m, \omega), \omega, 0.02, 0.04\right) \quad \omega_{\text{rez}} = 0.031$$

$$T_{\omega} := \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{\text{rez}}} \quad T_{\omega} = 204.399$$

$$k_i(m, \omega_{\text{rez}}) = 0.027 \quad k_p(m, \omega_{\text{rez}}) = 0.937$$

$$T_i := \frac{k_p(m, \omega_{rez})}{k_i(m, \omega_{rez})} \quad T_i = 35.051$$

5. Расчет амплитудно-частотных характеристик замкнутой системы АСР по каналу управляющего воздействия

Результаты расчета позволяют оценить по значению частотного показателя колебательности M запас устойчивости АСР.

Комплексные частотные характеристики регулятора и замкнутой АСР:

5.1. По каналу управляющего воздействия (рис. 24)

$$W_p(\omega, k_p, T_i) := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot T_i} \right)$$

$$W(\omega, k_p, T_i) := \frac{W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)}{1 + W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)} \quad \omega := 0, 0.0005 \dots 0.4$$

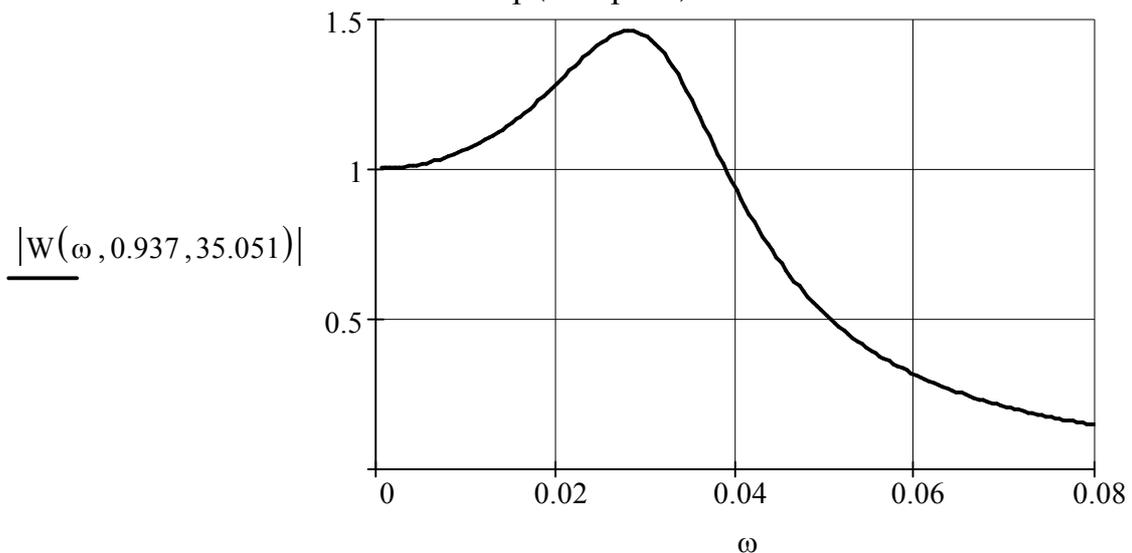


Рис. 24. АЧХ замкнутой системы по каналу управления

5.2. По каналу внешнего возмущения (рис. 25)

$$W(\omega, k_p, T_i) := \frac{W_o(0, \omega)}{1 + W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)}$$

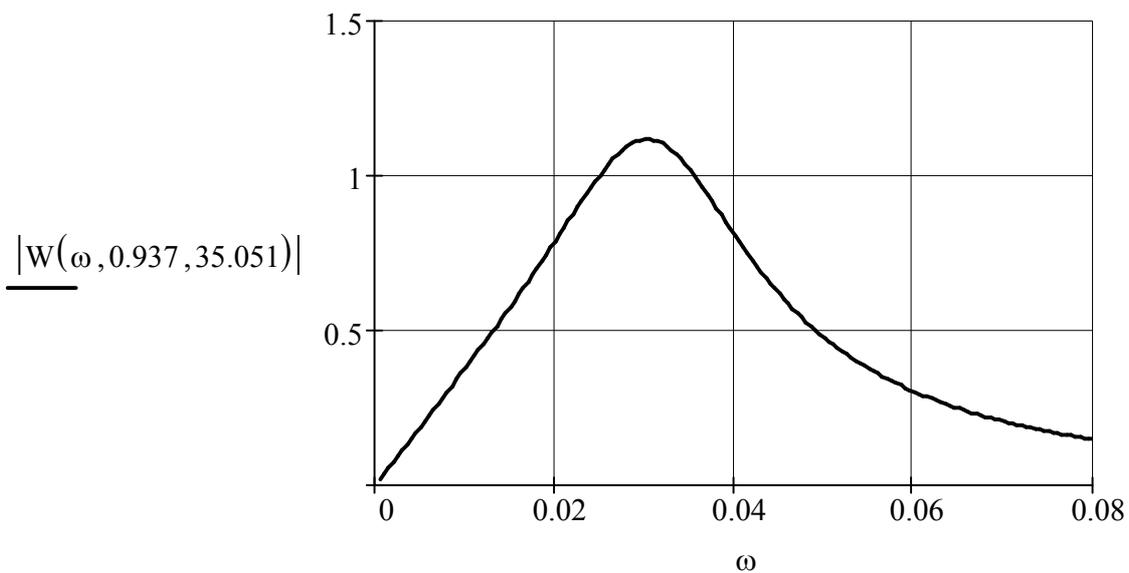


Рис. 25. АЧХ замкнутой системы по каналу внешнего возмущения

6. Расчет и анализ переходных процессов (рис. 26, 27)

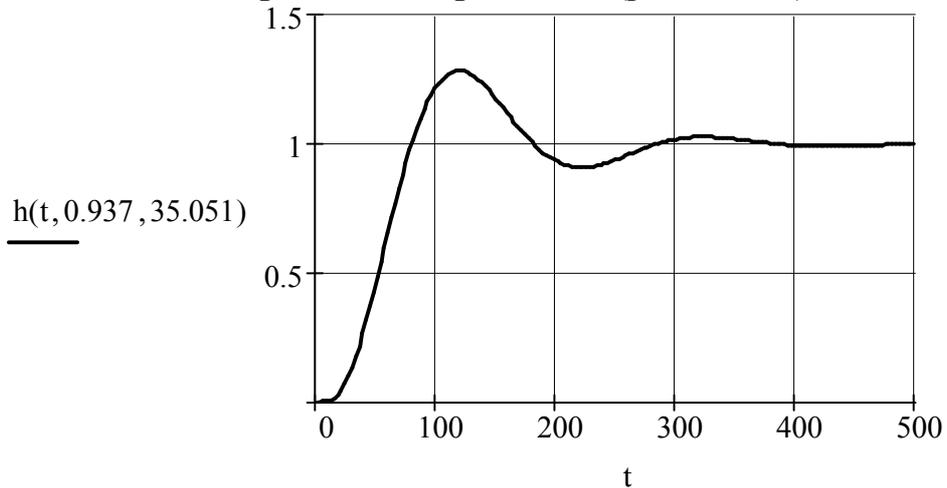


Рис. 26. Переходный процесс по каналу управления

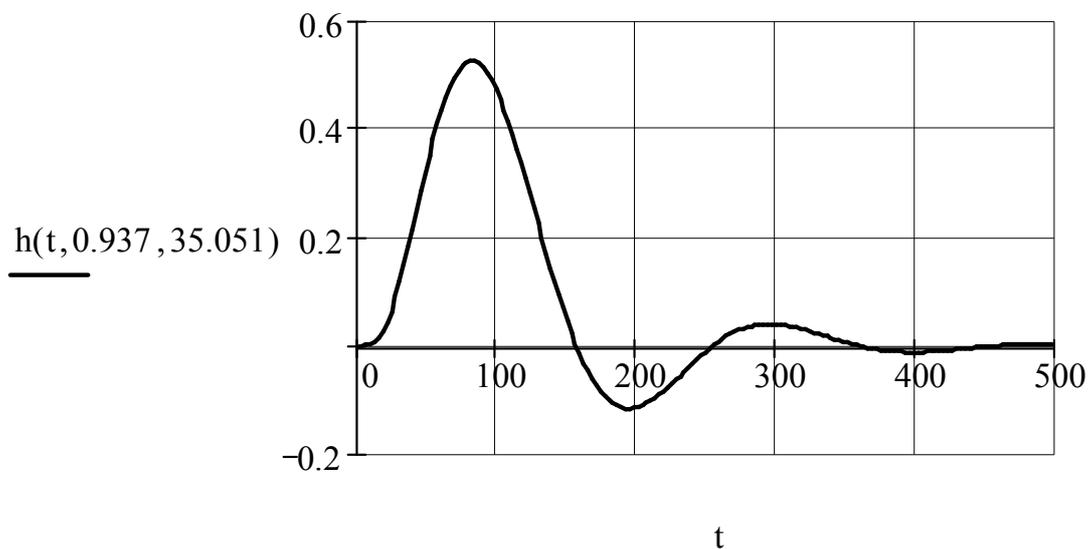


Рис. 27. Переходный процесс по каналу внешнего возмущения

$$\omega_e := 0.5 \quad t := 0, 3 \dots 500$$

$$W(\omega, k_p, T_i) := \frac{W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)}{1 + W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)}$$

$$h(t, k_p, T_i) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\omega_e} \frac{\operatorname{Re}(W(\omega, k_p, T_i))}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega$$

$$t := 0, 3 \dots 500$$

$$W(\omega, k_p, T_i) := \frac{W_o(0, \omega)}{1 + W_o(0, \omega) \cdot W_p(\omega, k_p, T_i)}$$

$$h(t, k_p, T_i) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\omega_e} \frac{\operatorname{Re}(W(\omega, k_p, T_i))}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega$$

8. Некоторые сведения о пакете MathCAD

MathCAD является интегрированной системой программирования, ориентированной на проведение математических, инженерно-технических, статистических и экономических расчетов. Отличительной особенностью MathCAD является способ описания и вывода результатов математических операций. По сей день, интегрированные системы для математических расчетов класса MathCAD остаются единственными, в которых все операции выполняются в привычных математических формулах и символах.

Эта особенность, а также широкие возможности пакета делают его популярным как среди студентов, так и среди инженеров и научных работников.

MathCAD является незаменимым помощником при выполнении курсовых и дипломных работ, в частности, технического характера.

С учетом специфики направления обучения MathCAD рассматривается как инструмент для выполнения расчетов и для решения иных технических задач.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов». Они также могут оказаться полезными в качестве базового пособия по изучению пакета MathCAD студентами других направлений.

Многие элементы интерфейса MathCAD являются типичными для программ, работающих под операционной системой Windows (полосы прокрутки, кнопки управления окном и т.д.). После загрузки системы на дисплее появляется экран MathCAD. В верхней части экрана – титульная строка с названием рабочего документа (слева) и кнопками управления окном (справа).

Вторая строка – главное меню (ГМ) (позиции «файл», «редактирование» и т.д.). Работа с документом успешно осуществляется и без прямого обращения к

ГМ, поскольку многие операции из него дублируются горячими клавишами (комбинации клавиш, осуществляющие ту или иную операцию – копировать, вставить и т.д.) и кнопками быстрого управления из панелей управления (ПУ), расположенных сразу под ГМ. Это, как правило, панель инструментов (дублирует наиболее распространенные команды и операции из ГМ) и панель форматирования (управление шрифтами).

Для ввода математических знаков в версиях MathCAD, начиная с 7.0, используются наборные панели (НП) (см. рис.28). Кнопки вывода наборных панелей располагаются в пятой сверху строке экрана. Как общая панель с математическими знаками, так и каждая наборная панель могут перемещаться в любое место экрана при помощи мыши. Основную часть экрана занимает поле ввода (окно редактирования) (ОР) – это область непосредственного ввода документа ОР представляет собой белый лист с границей области листа и границей области печати (сплошная и пунктирная линии в правой части ОР соответственно). В случае если ни один из документов не открыт, ОР недоступно для работы и имеет серый окрас.

MathCAD работает с определенными типами объектов – математическим, текстовым, графическим и импортированным из другого приложения.

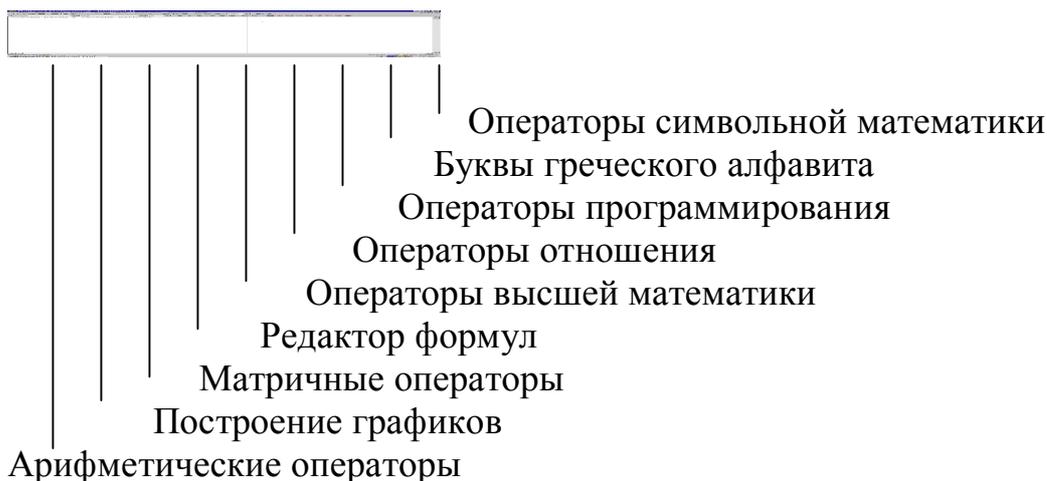


Рис. 28. Кнопки вызова наборных панелей

Каждый из перечисленных объектов располагается на экране в специальные области – регионы. Текстовые комментарии вводятся в текстовые регионы (ТР) – прямоугольная область с тремя квадратными метками по краям области. Установка ТР – позиция ГМ Insert, команда – Text Region ["]. Ввод информации с пробелом автоматически воспринимается как текст. Тип шрифта текстовых областей устанавливается по умолчанию согласно вложенному стилю, который выбирается при создании нового документа. Наиболее используемым является формат Normal. Однако формат стиля можно изменять по желанию пользователя командой ГМ, поскольку многие операции из него дублируются горячими

клавишами (опция Style Format – ГМ), установка параметров шрифта является глобальной (для всего документа).

Локально (для одного текстового региона или части текста) шрифт изменяется при помощи выделения необходимого фрагмента и функций панели форматирования, либо через ГМ (Format, Text). При вводе букв русского алфавита необходимо установить русифицированный шрифт (....Сур).

Математические объекты (имя функции, переменные и константы) вводятся в математический регион, который определяется автоматически по мере написания арифметических выражений и выглядит в виде прямоугольной рамки.

Глобальная переменная от локальной отличается тем, что локальную переменную можно переписывать в ходе документа, значение же глобальной переменной распространяется на весь документ, в том числе и до присваивания данной переменной.

9. Рекомендации по курсовому проектированию. Общие положения

Курсовой проект по дисциплине «Теория автоматического управления» является самостоятельной работой студентов.

В данном проекте студентам предоставляется возможность обобщить свои теоретические знания основ теории автоматического управления, приобретённые в лекционных курсах и при знакомстве со специальной литературой, с приёмами и навыками работы с математическими пакетами MathCAD и MATLAB, полученными при выполнении лабораторного практикума. Курсовой проект должен показать освоение студентами конкретных подходов к исследованию динамики систем автоматического регулирования, управлению различными объектами химической технологии и, кроме того, является хорошей подготовкой к выполнению отдельных разделов дипломного проекта.

Цель курсового проекта – дать и закрепить необходимые навыки по применению методов теории управления для исследования динамики конкретного процесса в замкнутой системе автоматического регулятор – объект управления.

Кафедра может изменять объём и содержание курсового проекта в случае, если проект выполняется по заказу промышленных предприятий или является частью исследовательской работы, проводимой на кафедре.

10. Тематика курсового проектирования

Задание на курсовой проект выдаётся кафедрой в индивидуальном порядке в период изучения курса «Теория автоматического управления».

За- да- ние №	Вид передаточной функции объекта управления	Коэффициенты переда- точной функции объекта управления					Вид переда- точной функции ре- гулятора
		k	T_1	T_2	T_3	τ	
1.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	1	5	10	25	1	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
2.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	2	10	20	50	2	$W_{\delta}(s) = p$
3.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	3	15	30	75	3	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
4.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	1	20	40	100	4	$W_{\delta}(s) = p$
5.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	2	5	50	125	1	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
6.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	3	10	10	25	2	$W_{\delta}(s) = p$
7.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	1	15	20	50	3	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
8.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	2	5	30	75	4	$W_{\delta}(s) = p$
9.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	3	10	40	100	1	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
10.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	1	15	50	125	1	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
11.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	2	5	10	25	2	$W_{\delta}(s) = p$
12.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	3	10	20	50	3	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
13.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	1	15	30	75	4	$W_{\delta}(s) = p$
14.	$W_i(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + k)(T_3 + T)} e^{-\tau s}$	2	5	40	100	1	$W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\epsilon} s}$
15.	$W_i(s) = \frac{k}{T_1 s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	3	10	50	125	2	$W_{\delta}(s) = p$

Конкретно объём курсового проекта и его содержание определяются заданием на курсовое проектирование. Курсовой проект оформляется в виде пояснительной записки на 20...25 листах печатного текста. Пояснительная запис-

ка должна быть напечатана чётко и лаконично на одной стороне листа формата А4. Объем графическая часть проекта – 2 листа формата А1

11. Содержание пояснительной записки и графической части

Пояснительная записка объемом 20-25 страниц должна содержать тему проекта: «Исследование динамики системы управления».

Студенту выдается индивидуальное задание по теме, включающее: структуру управления, заданную передаточную функцию объекта управления, закон регулирования регулятора.

Требуется подобрать настроечные параметры регулятора, провести анализ динамических свойств системы по следующим пунктам:

1. Аналитический расчет функции отклика системы на скачкообразное изменение входного сигнала.

1.1. Определение корней характеристического уравнения.

1.1.1. Переход к оригиналу по формуле разложения Хевисайда.

1.2. Построение КЧХ разомкнутой системы.

1.3. Построение КЧХ замкнутой системы.

1.4. Построение ВЧХ замкнутой системы.

1.5. Построение переходного процесса методом трапецеидальных характеристик.

1.6. Анализ устойчивости исследуемой системы (построением годографа Михайлова, методом корневого годографа или одним из других методов).

1.7. Определение запаса устойчивости. Определение диапазона изменения параметров регулятора для устойчивой работы системы.

1.8. Исследовать управляемость, наблюдаемость и динамику системы методом пространства переменных.

1.9. Исследование СУ набором структурной схемы.

1.9.1. Набор структурной схемы исследуемой системы.

1.9.2. Снятие и регистрация кривых отклика.

2. Графическая часть объемом 2 листа формата А1 должна содержать:

2.1. Исходные данные к расчету СУ.

2.2. Последовательное отражение промежуточных результатов графоаналитического расчета (пункты 1. - 1.9.2.).

2.3. Схему набора структурной схемы.

2.4. Переходный процесс в разомкнутой системе.

2.5. Переходный процесс в замкнутой системе:

2.5.1. Переходный процесс по заданию.

2.5.2. Переходный процесс по внешнему возмущению.

2.5.3. Сравнительный анализ результатов расчета переходных процессов различными методами. Дополнительное задание.

Критериями оценки качества являются: точность получения кривых отклика (например, по положению максимума в точке π/ω_p), последовательность изложения материала, аккуратность выполнения графических материалов.

Список литературы

1. Панько М.А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде Mathcad. М.: Издательство МЭИ, 2004, 112 с
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов//В.Я. Ротач. – 3-е изд., стереот. – М.: изд-во МЭИ, 2005. – 400 с.
3. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 2001. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 544 с.
4. Дьяконов В.П. MathCAD: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2009. – 832 с.
5. Дьяконов В.П. Mathcad 8-12 для всех. М.: Солон-Пресс, 2005. – 632 с.
6. Охорзин В.А. Прикладная математика в системе МATHCAD Учебное пособие. 3-е изд. СПб.: Лань, 2009, 352с.
7. Охорзин. Компьютерное моделирование в системе Mathcad. М.: Финансы и статистика, 2006, 144 с.
8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления, М.: 2002, 832 с.
9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теории систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. Изд-во «Профессия», 2004.- 752 с.

Оглавление

Введение	3
1. Расчет динамических характеристик объектов регулирования	3
2. Типовые линейные алгоритмы регулирования и их реализация	4
2.1. Расчет переходных характеристик технологических объектов регулирования в среде MathCAD. Расчет переходной характеристики объекта с использованием символьных вычислений	6
2.2. Расчет переходной характеристики объекта с использованием обратного преобразования Фурье	8
2.3. Расчет частотных характеристик объектов регулирования	9
3. Оценка запаса устойчивости линейных систем	14
3.1. Построение годографа Михайлова	18
3.2. Определение запаса устойчивости системы	18
4. Методика расчета линейных систем на заданный запас устойчивости	21
4.1. Общие условия методики расчета	21
4.2. Расчет на заданный запас устойчивости АСР с П-алгоритмом ..	21
4.3. Расчет на заданный запас устойчивости АСР с ПИ-алгоритмом ..	22
5. Анализ результатов параметрического синтеза АСР. Оценка свойств АСР по частотным характеристикам	23
6. Расчет переходных характеристик АСР	24
7. Расчет АСР с ПИ-регулятором	25
8. Некоторые сведения о пакете MathCAD	30
9. Рекомендации по курсовому проектированию. Общие положения	32
10. Тематика курсового проектирования	33
11. Содержание пояснительной записки и графической части	34
Список литературы	35

Беккер Вячеслав Филиппович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Методические указания к практическим занятиям
и курсовому проектированию по дисциплине
Теория автоматического управления
для студентов направления 15.03.04
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Корректор Н.В. Шиляева

Лицензия ЛР № 020370 от 29.01.97

Сдано в печать 21.08.15
Формат 60x84/16. Объем 2,25 п.л.
Тираж 100. Заказ 16/2015.

Редакционно-издательский отдел
Пермского национального исследовательского политехнического университета

Отпечатано в ООО «Пресс-А» г. Березники