



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

КУРСОВ И.В.

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Методические указания по выполнению курсовой
работы по дисциплине «Теория автоматического управления»
для студентов направления подготовки
«Наземные транспортно-технологические комплексы»**

Рубцовск 2021

Курсов И.В. Теория автоматического управления: методические указания по выполнению курсовой работы для студентов направления подготовки «Наземные транспортно-технологические комплексы» / И.В. Курсов; Рубцовский индустриальный институт.- Рубцовск: РИИ 2021. - 12 с.

Предназначены в качестве руководства при изучении студентами-заочниками дисциплины “Теория автоматического управления”. Содержат варианты заданий курсовой работы, пример выполненной работы, а также список рекомендуемой литературы.

Рассмотрены и одобрены
на заседании каф. НТС
РИИ АлтГТУ
Протокол № 8 от 30.03.21

Рецензент:

Декан ФЗФО
к.т.н., доцент Э.С. Маршалов

© Рубцовский индустриальный институт, 2021

Содержание

Введение.....	4
1. Задание к курсовой работе.....	5
2. Рекомендуемая литература	6
3. Пример выполнения курсовой работы.....	7

Введение

Дисциплина «Теория автоматического управления» знакомит студентов, обучающихся по направлению подготовки 23.03.02 "Наземные транспортно-технологические комплексы" с методами анализа и синтеза систем автоматического управления, расчета основных качественных показателей динамики автоматически управляемых средств контроля и управления, оценки их динамической погрешности.

Освоение дисциплины «Теория автоматического управления» необходимо обучающимся для восприятия последующих теоретических дисциплин и практик, связанных с устройством, проектированием и эксплуатацией автоматических систем транспортно-технологических машин и комплексов.

Курсовая работа предназначена для закрепления теоретических знаний полученных на лекциях, практических и самостоятельных занятиях.

Студенты в ходе изучения дисциплины «Теория автоматического управления» выполняют курсовую работу по вариантам задания, представленным в настоящих методических указаниях.

1. Задание к курсовой работе

Выполнить расчет системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала двигателя. Расчетная схема (рисунок 1) и данные для расчета приведены ниже.

Таблица - Исходные данные для расчета

Вариант	$m_p,$ кг	$k_{TP},$ Нс/м	$A_0,$ Нс ²	$\omega_0,$ 1/с	$\Phi_{P0},$ Н/м	$J_D,$ кг м ²	$\Phi_P,$ Нмс	$\Phi_D,$ Нмс	U_ω	U_z	$\frac{\partial M_D}{\partial z},$ Н	$\frac{\partial F_n}{\partial h},$ Н/м
1	0,55	40	0,0033	82	4*10 ⁴	0,9	1,1	0,5	2	0,95	4,4*10 ⁴	7100
2	0,6	27	0,0038	93	4,1*10 ⁴	1,1	0,87	0,6	2,3	0,9	5*10 ⁴	4100
3	0,64	38	0,006	118	3,3*10 ⁴	1,5	1,15	0,3	1,9	1	5,1*10 ⁴	5200
4	0,7	35	0,0057	109	4*10 ⁴	1,4	1	0,7	1,7	1,1	4*10 ⁴	6000
5	0,6	30	0,004	87	4,2*10 ⁴	0,9	1,1	0,98	2	1,25	5,2*10 ⁴	7500
6	0,75	45	0,007	104	4,5*10 ⁴	3	0,8	0,7	2,1	1,3	5,5*10 ⁴	5200
7	0,67	25	0,0041	65	3,2*10 ⁴	3,1	1,2	0,2	2,05	1,2	4,6*10 ⁴	3900
8	0,8	36	0,005	82	4,4*10 ⁴	3,5	0,95	1	1,8	1	6,2*10 ⁴	5500
9	0,52	28	0,0052	100	3,8*10 ⁴	2,9	1,2	0,8	2,3	1,15	4*10 ⁴	6200
10	0,62	33	0,0037	73	3*10 ⁴	3,1	0,9	0,9	2,2	1,25	5,5*10 ⁴	5600

Курсовая работа включает следующие пункты:

- 1 Определение уравнений движения звеньев САР и их линеаризация.
- 2 Определение передаточных функций звеньев САР.
- 3 Составление структурной схемы САР и вывод её передаточной функции.
- 4 Расчет устойчивости САР с использованием критериев Гурвица и Михайлова.
- 5 Построение переходного процесса. Определение прямых оценок его качества: времени регулирования, перерегулирование, частоты колебаний, времени нарастания переходного процесса, декремента затухания.

2. Рекомендуемая литература

Основная литература

- 1 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы – 2-е изд., испр. и. доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312 с.;
- 2 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы – 2-е изд., испр. и. доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 с.;
- 3 Ким Д.П., Дмитриева Н.Д. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 168 с.;
- 4 Ким Д.П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 328 с.;

Дополнительная литература

- 5 Бесекерский , В.А. Теория систем автоматического управления : [текст] / В.А. Бесекерский. –СПб.: Профессия, 2007. – 752 с.
- 6 Савин, М.М. Теория автоматического управления: Учебное пособие: [текст]/ М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 469 с.
- 7 Топчеев Ю.И. Задачник по теории автоматического регулирования: Учебное пособие для вузов: Ю.И. Топчеев, А.П. Цыпляков – М.: Машиностроение, 1977 – 592 с.
- 8 Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов.-2-е изд., перераб. И доп.-СПб.: Политехника, 2002.-302 с.: ил.
- 9 Теория автоматических систем. Учебное пособие/ Л.А. Молибошко. – Мн.: БГПА, 2001.-121 с.
- 10 Гайдук А.Р. и др. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в МАТЛАВ: Учебное пособие. – СПб.: Издательство Лань, 2011-464 с.
- 11 Никулин, Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем [Текст]: Учеб. пособие/ Е.А. Никулин. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004. - 631 с.

Методические указания студентам

- 12 Курсов И.В. Теория автоматического управления: методические указания по выполнению самостоятельной работы для студентов направления подготовки «Наземные транспортно-технологические комплексы» / И.В. Курсов; Рубцовский индустриальный институт.- Рубцовск: РИИ 2021. - 13 с. (ЭР)

Интернет-ресурсы

- 13 <http://Window.edu.ru>
- 14 <http://нэб.рф/>

3. Пример выполнения курсовой работы

1 Задание

Выполнить расчет системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала двигателя. Расчетная схема (рисунок 1) и данные для расчета приведены ниже.

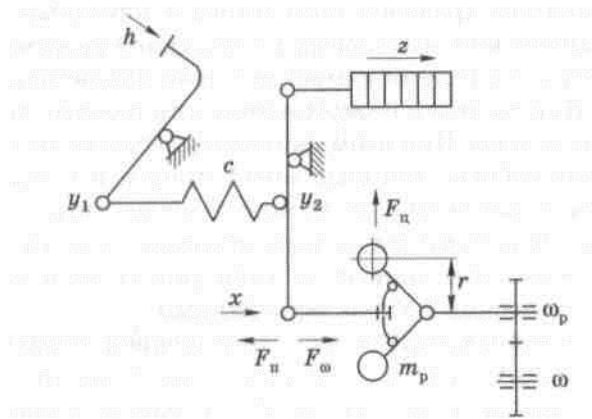


Рисунок 1 - Расчетная схема системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя: h – перемещение педали; z – перемещение рейки топливного насоса; x – перемещение муфты регулятора; ω - скорость вращения двигателя; ω_p - скорость вращения вала регулятора.

$m_p = 0,56$ кг - масса движущихся деталей регулятора, приведенная к муфте регулятора;

$k_{TP} = 38$ Нс/м – диссипативный коэффициент, учитывающий потери энергии в регуляторе;

$A_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ Н*с – инерционный коэффициент;

$\omega_0 = \omega_{p0} = 85$ (1/с) – угловая скорость в установившемся режиме;

$\Phi_{p0} = 3,9 \cdot 10^4$ - фактор статической устойчивости регулятора

$J_D = 1,6$ кг*м² - момент инерции двигателя совместно с маховиком и ведущей части сцепления;

$\Phi_D = 1$ - фактор статической устойчивости двигателя

$U_\omega = 1,95$ - передаточное отношение регулятора

$U_z = 0,95$ - передаточное отношение рычажного привода регулятора.

2 Вывод уравнений движения и их линеаризация

2.1 Уравнение регулятора

В соответствии с расчетной схемой

$$m_p x'' = F_\omega - F_n - k_{TP} x',$$

где $m_p = 0,56$ кг - масса движущихся деталей регулятора, приведенная к муфте регулятора;

$k_{TP} = 38$ Нс/м – диссипативный коэффициент, учитывающий потери энергии в регуляторе;

$F_n = f_n(h, x)$ - восстанавливающая сила, приведенная к муфте. Она зависит от деформации пружины и её жесткости:

В линеаризованном виде:

$$\Delta F_n = \left(\frac{\partial F_n}{\partial h} \right)_0 \Delta h + \left(\frac{\partial F_n}{\partial x} \right)_0 \Delta x$$

В этой формуле индекс «0» соответствует равновесному положению системы.

$F_\omega = f_\omega(\omega_p, x)$ - поддерживающая сила, определяемая центробежной силой.

$$F_\omega = A\omega_p^2,$$

где A - инерционный коэффициент.

В линеаризованном виде:

$$\Delta F_\omega = \omega_{p0}^2 \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_0 \Delta x + 2A_0\omega_{p0}\Delta\omega_p$$

После подстановки приращений ΔF_n и ΔF_ω в исходное уравнение регулятора и преобразований получаем линеаризованное уравнение

$$T_p^2 \Delta x'' + T_b \Delta x' + \Delta x = k_\omega \Delta \omega_p - k_h \Delta h,$$

$$\text{где } T_p^2 = \frac{m_p}{\Phi_p} = \frac{0,56}{1,18} = 0,47 \text{ (с}^2\text{);}$$

$$T_b = \frac{k_{TP}}{\Phi_p} = \frac{38}{1,18} = 32,2 \text{ (с)}$$

k_ω - коэффициент передачи регулятора по скорости;

$$k_\omega = \frac{2A_0\omega_{p0}}{\Phi_{p0}},$$

где $A_0 = 3,9 * 10^{-3}$ Н*с – инерционный коэффициент;

$\omega_0 = \omega_{p0} = 85$ (1/с) – угловая скорость в установившемся режиме;

k_h - коэффициент передачи регулятора по перемещению

$$k_h = \frac{\partial F_n / \partial h}{\Phi_{p0}} = \frac{3,9 * 10^3}{3,9 * 10^4} = 0,1$$

$$\Phi_{p0} = \left(\frac{\partial F_n}{\partial x} \right)_0 - \omega_{p0}^2 \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_0 = 3,9 * 10^4 \text{ - фактор статической устойчивости}$$

регулятора.

После подстановки значений коэффициентов получим

$$0,47 \Delta x'' + 32,2 \Delta x' + \Delta x = 0,17 * 10^{-4} \Delta \omega_p - 0,1 \Delta h \quad (1)$$

Уравнение регулятора, выраженное через передаточные функции

$$\Delta x = W_1 \Delta \omega_p - W_2 \Delta h, \quad (2)$$

где W_1 - передаточная функция по входному воздействию $\Delta \omega_p$

$$W_1 = \frac{k_\omega}{T_p^2 p^2 + T_b p + 1} = \frac{0,17 * 10^{-4}}{0,47 p^2 + 32,2 p + 1} \quad (3)$$

W_2 - передаточная функция по входному воздействию Δh

$$W_2 = \frac{k_h}{T_p^2 p^2 + T_b p + 1} = \frac{0,1}{0,47 p^2 + 32,2 p + 1} \quad (4)$$

2.2 Уравнение двигателя

$$J_D \omega = M_D(\omega, z) - M_C(\omega),$$

где $J_D = 1,6 \text{ кг*м}^2$ - момент инерции двигателя совместно с маховиком и ведущей части сцепления;

$M_D(\omega, z)$ - момент вращения двигателя. В линеаризованном виде:

$$M_D(\omega, z) = \left(\frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right) \Delta \omega + \left(\frac{\partial M_D}{\partial z} \right)_0 \Delta z$$

$M_C(\omega)$ - момент сопротивления движения автомобиля, приведенный к коленчатому валу.

В линеаризованном виде:

$$M_C(\omega) = \left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega$$

После подстановки M_D и M_C в исходное уравнение двигателя получим линеаризованное уравнение в виде:

$$T_D \Delta \omega + \Delta \omega = k_D \Delta z,$$

(5)

где T_D - постоянная времени двигателя;

$k_D = \frac{1}{\Phi_D} \left(\frac{\partial M_D}{\partial z} \right)_0 = 5,5 * 10^4$ - коэффициент передачи двигателя по перемещению рейки топливного насоса;

$$\Phi_D = \left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0 = 1 - \text{фактор статической устойчивости двигателя.}$$

$$T_D = \frac{J_D}{\Phi_D} = \frac{1,6}{1} = 1,6 \text{ (кг*м}^2/\text{с)}$$

После подстановки значений коэффициентов получим

$$1,6 \Delta \omega + \Delta \omega = 5,5 * 10^4 \Delta z \quad (6)$$

Уравнение двигателя, выраженное через передаточную функцию

$$\Delta \omega = W_3 \Delta z, \quad (7)$$

где W_3 - передаточная функция по входному воздействию Δh

$$W_3 = \frac{k_D}{T_D p + 1} = \frac{5,5 * 10^4}{1,6 p + 1} \quad (8)$$

2.3 Уравнение обратной связи

Связь скорости вращения регулятора с коленчатым валом:

$$\Delta\omega_p = U_\omega \Delta\omega, \quad (9)$$

где $U_\omega = 1,95$ - передаточное отношение регулятора.

$$\Delta\omega_p = 1,95\Delta\omega \quad (10)$$

Уравнение связи скорости вращения регулятора с коленчатым валом, выраженное через передаточную функцию:

$$\Delta\omega_p = W_4 \Delta\omega, \quad (11)$$

где W_4 - передаточная функция по входному воздействию $\Delta\omega$

$$W_4 = U_\omega = 1,95 \quad (12)$$

Связь между перемещением рейки топливного насоса и муфты регулятора

$$\Delta z = -U_z \Delta x, \quad (13)$$

где $U_z = 0,95$ - передаточное отношение рычажного привода регулятора.

Знак «-» указывает на то, что рейка и муфта перемещаются в противоположных направлениях.

$$\Delta z = -0,95\Delta x \quad (14)$$

Уравнение связи между перемещением рейки топливного насоса и муфты регулятора, выраженное через передаточную функцию:

$$\Delta z = -W_5 \Delta x, \quad (15)$$

где W_5 - передаточная функция по входному воздействию Δx

$$W_5 = U_z = 0,95 \quad (16)$$

3 Составление структурной схемы САР и её преобразование

Структурную схему САР составим, используя уравнения её звеньев, выраженные через передаточные функции.

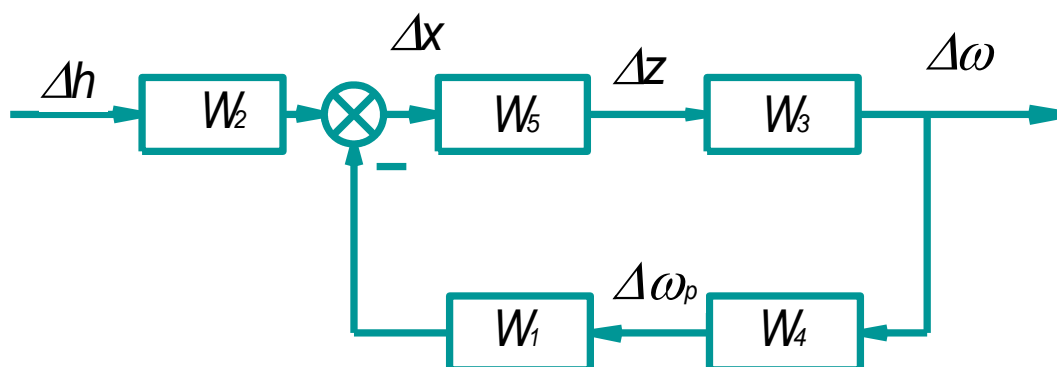


Рисунок 2 - Структурная схема САР

Передаточную функцию САР получим с помощью её структурной схемы, применив следующее правило: передаточная функция одноконтурной системы с отрицательной обратной связью равна передаточной функции прямой цепи, деленной на единицу плюс передаточную функцию разомкнутой цепи.

$$W = \frac{W_2 W_3 W_5}{1 + W_1 W_3 W_4 W_5}$$

$$W = \frac{\frac{0,1}{(0,47p^2 + 32,2p + 1)} * \frac{5,5 * 10^4}{(1,6p + 1)} * 0,95}{1 + \frac{0,17 * 10^{-4}}{(0,47p^2 + 32,2p + 1)} * \frac{5,5 * 10^4}{(1,6p + 1)} * 1,95 * 0,95} =$$

$$= \frac{1000}{0,14p^3 + 10p^2 + 6,5p + 0,52}$$

Передаточную функцию САР можно получить другим способом, решив уравнения (1), (6), (10), (14) относительно входного Δh и выходного $\Delta \omega$ воздействий системы. А затем представив уравнение движения системы в виде передаточной функции.

4 Расчет устойчивости САР

Исследуем устойчивость системы с помощью критерия Гурвица.

Характеристическое уравнение системы

$$D(p) = 0,14p^3 + 10p^2 + 6,5p + 0,52$$

Из коэффициентов характеристического уравнения составляют и вычисляют определители Гурвица.

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 10 & 0,52 & 0 \\ 0,14 & 6,5 & 0 \\ 0 & 10 & 0,52 \end{vmatrix} = 10 * 6,5 * 0,52 - 0,52 * 0,14 * 0,52 = 33,76$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 10 & 0,52 \\ 0,14 & 6,5 \end{vmatrix} = 10 * 6,5 - 0,14 * 0,52 = 64,93$$

$$\Delta_1 = 10$$

Согласно критерию Гурвица САР устойчива, т.к. все определители Гурвица положительные, при положительном $a_0 = 0,14$.

Исследуем устойчивость системы с помощью критерия Михайлова.

Преобразуем характеристическое уравнение системы в комплексное, заменив p на комплексную переменную $j\omega$

$$D(j\omega) = 0,14(j\omega)^3 + 10(j\omega)^2 + 6,5(j\omega) + 0,52 = X(\omega) + jY(\omega),$$

где $X(\omega) = 0,52 - 10\omega^2$ - вещественная функция Михайлова;

$Y(\omega) = 6,5\omega - 0,14\omega^3$ - мнимая функция Михайлова.

Изменяя значение частоты ω от нуля до ∞ строим на комплексной плоскости кривую Михайлова как график функции $Y(\omega) = f(X(\omega))$.

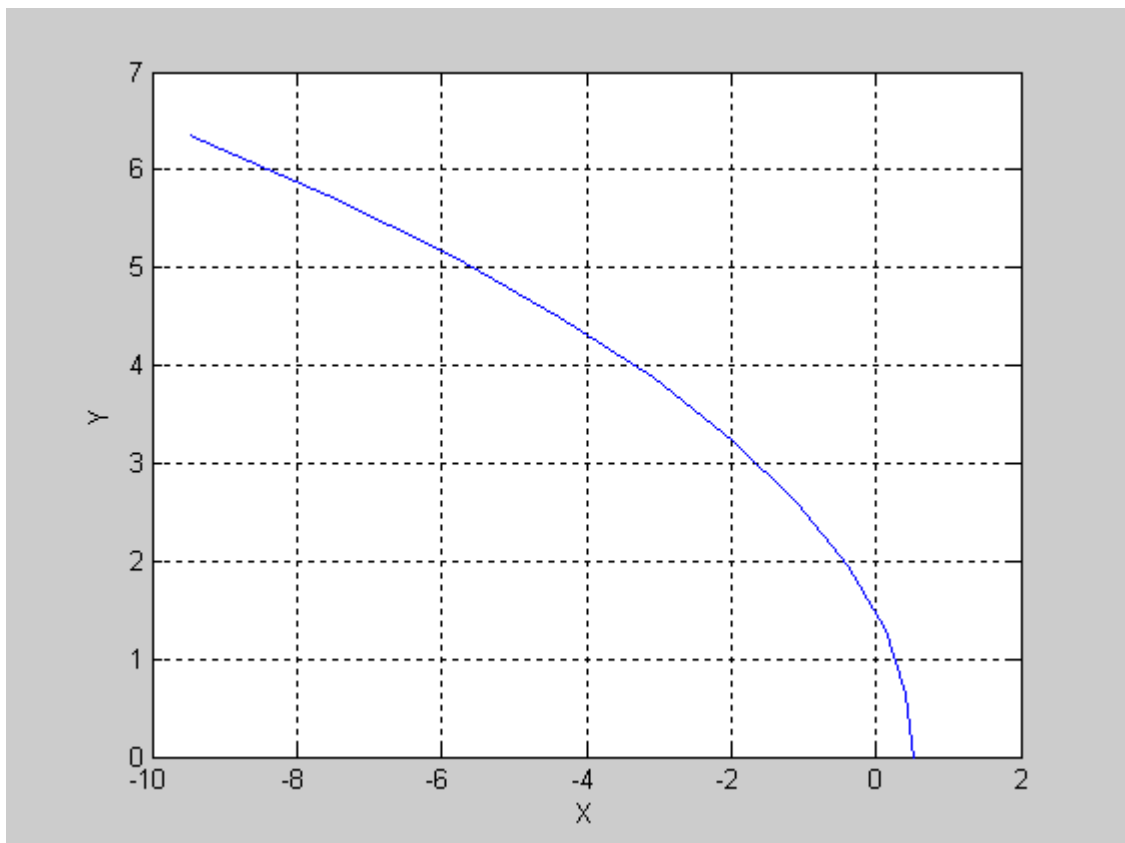


Рисунок 3 - Кривая Михайлова при изменении частоты ω от 0 до 1 Гц

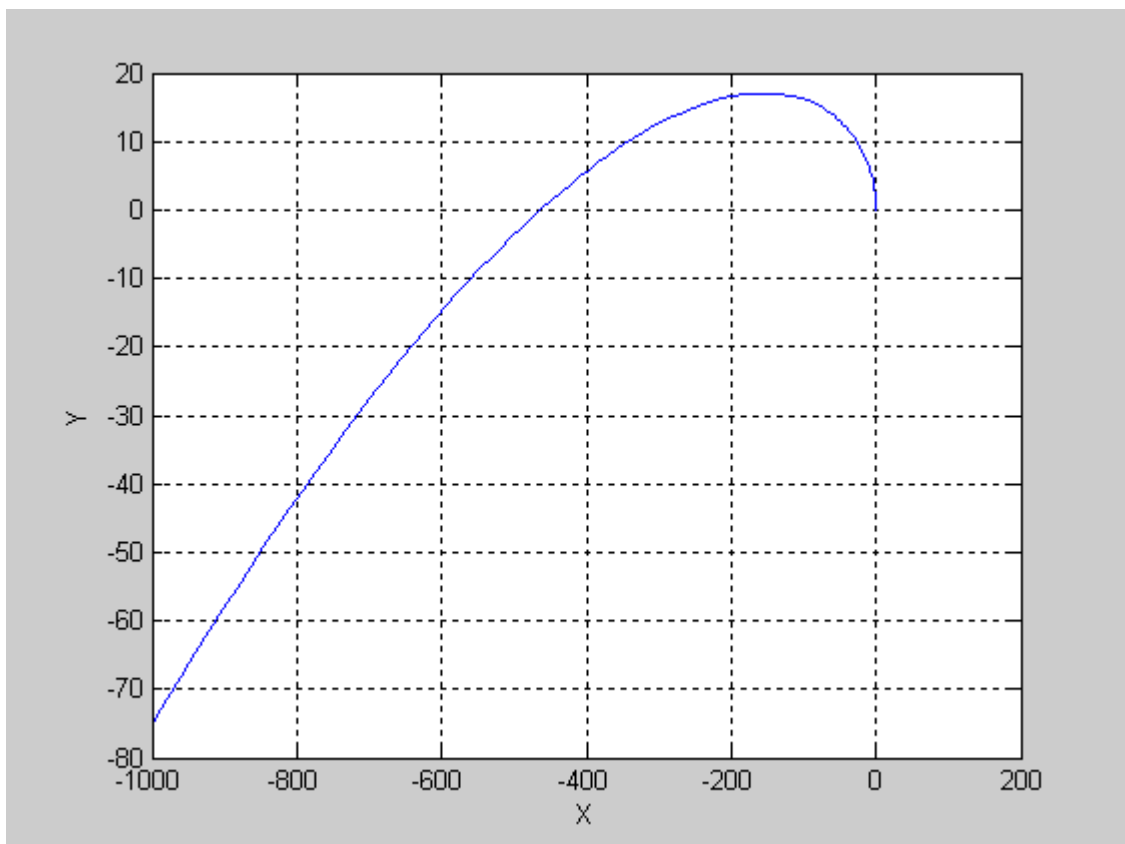


Рисунок 4 - Кривая Михайлова при изменении частоты ω от 0 до 10 Гц

Согласно критерию Михайлова САР устойчива, т.к. кривая Михайлова при изменении ω от нуля до ∞ , начинаясь на вещественной положительной полуоси, обходит против часовой стрелки последовательно три квадранта координатной плоскости.

5 Построение переходной характеристики и определение показателей качества

Для построения переходной характеристики используем приложение ХСОС системы SCILAB.

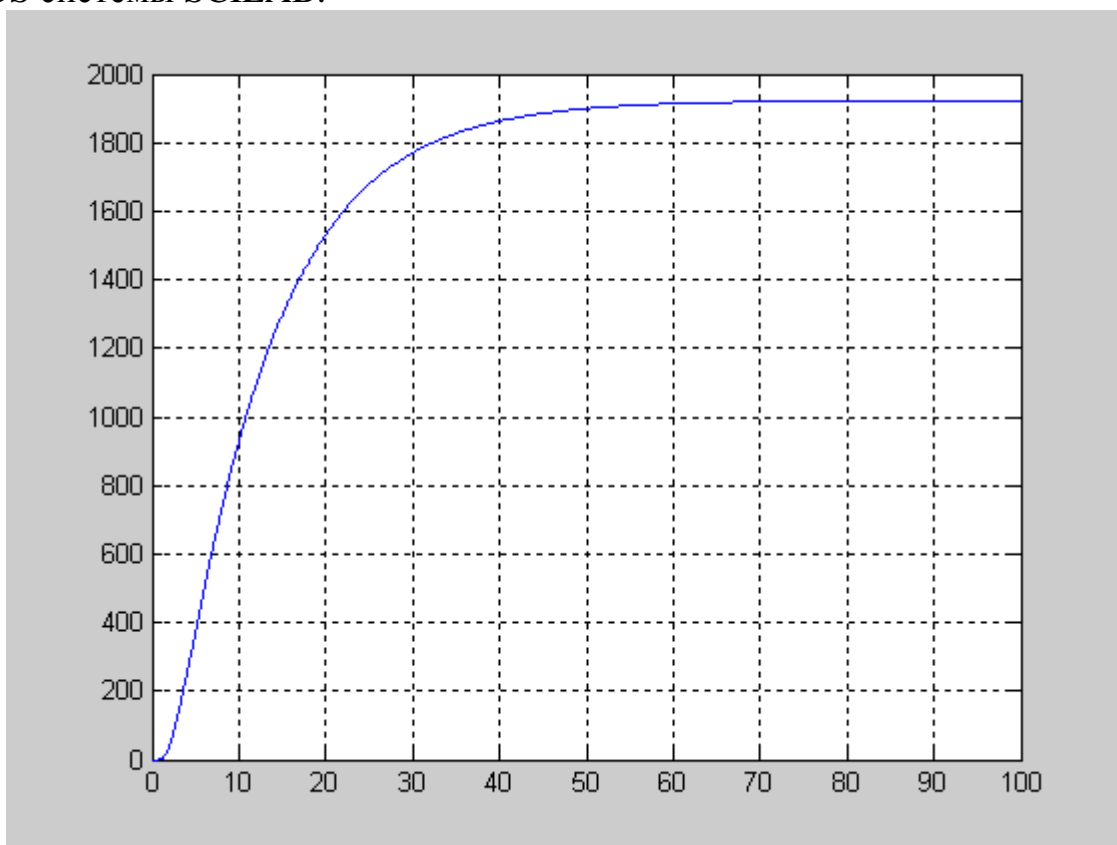


Рисунок 5 - Переходная характеристика САР

Переходной процесс - монотонный. Поэтому из всех показателей переходного процесса определяем только один - время регулирования с заданной точностью 5%, $t \approx 60$ с.

Курсов Иван Витальевич

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Методические указания по выполнению курсовой
работы по дисциплине «Теория автоматического управления»
для студентов направления подготовки
«Наземные транспортно-технологические комплексы»

Подписано к печати 04.04.2021. Формат 60X84 1/16.
Усл. печ. л. 0,81. Тираж 10 экз. Зак. 211773. Рег. № 21.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.