

**Некоммерческое  
акционерное  
общество**



АЛМАТИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Кафедра электропривода  
и автоматизации  
промышленных установок

## **ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Методические указания для выполнения расчетно-графических работ  
для студентов специальности 5В071800 - Электроэнергетика

Алматы 2016

СОСТАВИТЕЛИ: Ю.А. Цыба, Д.М. Чныбаева. Теория автоматического управления. Методические указания для выполнения расчетно-графических работ для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика. - Алматы: АУЭС, 2016.- 21с.

Методические указания предназначены для выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Теория автоматического управления» и содержат расчеты, методы исследования устойчивости и качества систем автоматики в программной среде Matlab Simulink.

Ил.7, табл. 3, библи.- 8 назв.

Рецензент: старший преподаватель Б.К. Курпенов

Печатается по плану издания Некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2016 г.

©НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2016г.

## Содержание

Введение .....	4
1 Расчетно - графическая работа № 1. Изучение системы имитационного моделирования Matlab – Simulink.....	4
2 Расчетно - графическая работа № 2. Исследование зависимости показателей качества в переходном режиме от изменения параметров следящей системы.....	9
3 Расчетно - графическая работа № 3. Анализ устойчивости систем автоматики частотными методами.....	14
Список литературы.....	21

## Введение

Дисциплина «Теория автоматического управления» является курсом для подготовки бакалавров в области. Решение расчетно-графических работ помогает студентам проверить степень усвоения ими курса и вырабатывает практические навыки. По дисциплине выполняется три расчетно-графических работы по темам: «Изучение системы имитационного моделирования Matlab - Simulink», «Исследование зависимости показателей качества в переходном режиме от изменения параметров следящей системы», «Анализ устойчивости систем автоматики частотными методами». Методические указания к выполнению работ содержат три расчетно-графических работ. Вариант задания определяется по таблицам. При выполнении расчетно-графической работы студенту необходимо:

- иметь наличие формулировки каждой задачи и числовые исходные данные;
- внимательно проработать тот раздел курса по учебнику, по материалам которого построена задача;
- выразить величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ;
- все расчеты выполнять с соблюдением правил округления.

### **1 Расчетно-графическая работа № 1. Изучение системы имитационного моделирования Matlab – Simulink**

**Цель работы:** ознакомление с системой MATLAB, приобретение практических навыков исследования систем автоматики с помощью приложения MATLAB - системой имитационного моделирования Simulink.

#### **1.1 Краткие теоретические сведения**

MATLAB - это язык программирования сверхвысокого уровня, предназначенный для технических вычислений. Он включает в себя вычисления, визуализацию и программирование в легкой для использования среде, где задачи и решения представлены в общей математической форме. MATLAB является интерактивной системой, в которой основные элементы данных представлены массивами, не требующими предварительного задания размерности. Это позволяет решать множество технических задач, особенно в матричной и векторной форме, а также писать программу на традиционных скалярных языках, таких как СИ или Фортран.

Название "MATLAB" произошло от сокращения слов «matrix laboratory». Система MATLAB состоит из пяти основных частей:

Язык программирования MATLAB. Это матрично-массивный язык высокого уровня с управлением состоянием, функциями, структурами данных, входом/выходом, и объектно-ориентированным программированием.

Рабочая среда MATLAB. Это графический интерфейс, с которым работает пользователь. Включает рабочий стол MATLAB, командное окно, редактор и отладчик файлов MATLAB, справочный браузер.

Графическая система MATLAB. Содержит команды высокого уровня для двухмерного и трехмерного представления данных, обработки изображений, анимации. Также содержит набор команд низкого уровня, позволяющих пользователю построить собственный интерфейс.

Библиотека математических функций MATLAB. Содержит набор вычислительных алгоритмов, начиная с элементарных арифметических функций (сложение/вычитание, тригонометрические функции) и заканчивая сложными функциями, такими как обращение матриц и преобразования Фурье.

Интерфейс прикладных программ MATLAB. Эта библиотека позволяет писать программы на языках СИ и Фортран, взаимодействующие с MATLAB. Включает в себя устройства вызова из MATLAB (динамической связи), вызова MATLAB как вычислительного механизма, и для работы с MAT-файлами.

Simulink является программой для имитационного моделирования и анализа динамических систем, входящей в состав пакета MATLAB. Simulink позволяет производить построение модели в виде унифицированных блоков на экране компьютера и может работать с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными моделями или их сочетаниями с большим числом переменных.

## **1.2 Порядок и методика выполнения работы**

Включите компьютер. Находясь в ОС Windows, запустите MATLAB двойным щелчком левой кнопки «мыши» по соответствующей иконке на рабочем столе. В результате открывается основное окно MATLAB.

Для запуска Simulink нажмите в основном окне MATLAB на кнопку с всплывающей подписью Simulink Library Browser. В результате открывается окно библиотеки блоков Simulink.

Для построения новой модели в окне Simulink Library Browser нажмите на кнопку с всплывающей подписью New model. Программа откроет окно с «чистым листом» без имени (untitled). Для открытия существующей модели в окне библиотеки блоков или в командном окне нажмите на кнопку с всплывающей подписью Open a model, и в появившемся окне выберите требуемый файл (файлы, созданные в Simulink, имеют расширение .mdl).

Создайте структурную схему, приведенную на рисунке 1.2 и задайте указанные преподавателем значения ее параметров.

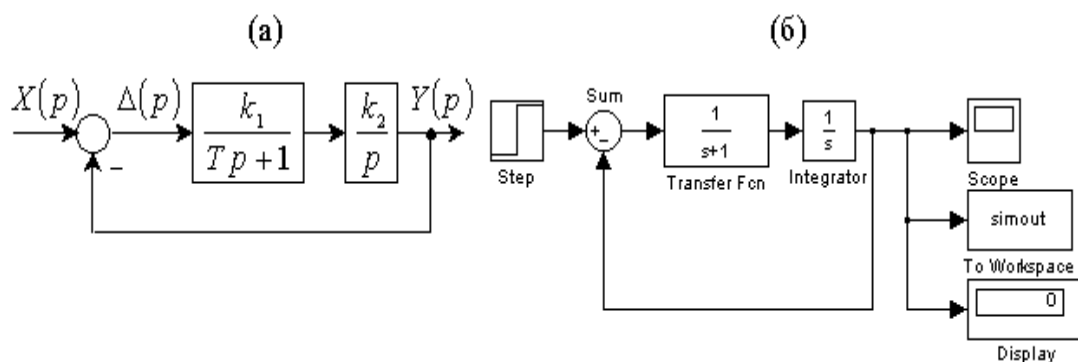


Рисунок 1.2 - Структурная схема (а) и модель в Simulink (б) исследуемой системы

Набор структурной схемы осуществляется путем выбора требуемых блоков в окне Simulink Library Browser и перетаскивания их при помощи мыши в окно, где осуществляется построение модели. Для удобства пользования все блоки разделены на группы. В данной работе использованы блоки группы Simulink с подгруппами Continuous (непрерывные звенья), Math Operations (математические блоки), Sinks (приемники данных), Sources (источники сигналов). Имена блоков указаны на рисунке 1.2,б.

Редактирование параметров блока осуществляется двойным щелчком левой кнопки мыши по требуемому блоку. При этом открывается окно параметров блока, вид которого зависит от вида блока.

Для соединения блоков достаточно указать курсором мыши на выход блока-источника сигнала и затем при нажатой кнопке мыши протянуть соединение на вход блока-приемника сигнала. Соединение блоков можно также осуществлять выделением левой кнопкой мыши требуемых блоков при нажатой клавише Ctrl. Для создания отвода необходимо указать правой кнопкой мыши на место отвода соединения и при нажатой кнопке протянуть отвод на вход требуемого блока.

Для вывода результатов моделирования к выходам требуемых блоков необходимо присоединить блоки-приемники сигналов.

Удаление ненужных блоков и соединений происходит путем выделения соответствующего объекта и нажатия клавиши Delete клавиатуры. Дополнительную информацию по построению моделей, а также по работе с MATLAB в целом можно найти в меню Help Desk.

Сохраните созданную модель.

Задайте параметры для процесса численного интегрирования модели. Для этого в меню окна модели откройте Simulation - Parameters. В появившемся окне выставляются указанные преподавателем время начала и окончания расчета, точность расчета и метод.

Рассчитайте полученную модель. Запуск расчета (интегрирования) модели в меню Simulation кнопкой Start. Процесс расчета модели отображается прогрессивной шкалой в нижней части окна. При необходимости вернитесь на предыдущий этап и поменяйте время окончания

расчета так, чтобы обеспечить стабилизацию выходной переменной (окончание переходного процесса).

По окончании расчета получите требуемые результаты с помощью блоков-приемников данных. Просмотр и печать графиков переходных процессов осуществляется с помощью блока Scope. Просмотр численных значений переменной в ходе моделирования осуществляется блоком Display. Для редактирования полученных графиков или сохранения их в формате графического файла, необходима установка выходных блоков To Workspace. В параметрах этих блоков указывается имя выводимой переменной Variable name и формат данных Save format (Array). Далее в командном окне MATLAB или редакторе М-файлов, вызываемого командой меню New M-file, записывается команда построения графиков. В простейшем случае она имеет вид:

$$\text{plot}(x,y),$$

где  $x, y$  - имена выводимых переменных.

При построении нескольких графиков в одних осях команда примет вид:

$$\text{plot}(x,y,x,z,..)$$

где  $x$  - имя общей (независимой) переменной;

$y, z$  - зависимые переменные.

Примечание: команды, набранные в командной строке, выполняются после нажатия клавиши Enter. Для выполнения команд, набранных в редакторе М-файлов, необходимо сохранить и запустить их на выполнение командой Save and Run меню Debug или клавишей F5.

Вывод нескольких переменных в один блок-приемник данных, осуществляется с помощью блока объединения сигналов в общую шину Mux.

Переменная времени в MATLAB обозначена как tout. После сохранения (редактор генерирует файл с расширением .m) и запуска программы (команда Run меню Tools редактора), последняя строит график в окне Figure, который может быть обработан имеющимися в меню окна инструментами. Сохранение графика происходит либо как файла с расширением .fig (команда Save меню File окна графика), в этом случае он будет доступен только из MATLAB, либо как графического файла с расширениями .bmp, .jpg и прочими по выбору (команда Export меню File окна графика). В последнем случае график может быть вставлен в документ отчета по работе, написанного, например, в редакторе Word.

Для построения логарифмических частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛЧХ и АФЧХ) по полиному передаточной функции необходимо в командном окне или в М-файле ввести соответственно команды

$$\text{bode}(\text{tf}(\text{nym},\text{den})); \text{ или } \text{nyquist}(\text{tf}(\text{nym},\text{den}))$$

где num и den - коэффициенты полинома соответственно числителя и знаменателя передаточной функции системы, записываемые через пробел. В случае наличия двух и более коэффициентов в полиноме, последние записываются в квадратных скобках через пробел. Например, для построения ЛЧХ колебательного звена с передаточной функции

$$W(p) = \frac{5}{0,01p^2 + 0,2p + 1},$$

необходимо набрать следующую команду:

bode(tf(5,[0.01 0.2 1])).

Для построения частотных характеристик по модели, в Simulink с помощью блоков In и Out необходимо указать соответственно вход и выход исследуемой системы. Далее в командном окне MATLAB или в М-файле с помощью команд linmod, bode и nyquist производится соответственно линеаризация исследуемой модели и построение её ЛЧХ или АФЧХ. Синтаксис команд:

[A,B,C,D]=linmod('имя файла модели')  
bode(A,B,C,D) или nyquist(A,B,C,D),

где A, B, C, D - матрицы пространства состояний системы, полученные при выполнении команды linmod;

grid - команда нанесения на график координатной сетки.

После окончания работы выйдите из MATLAB, закрыв все окна.

Параметры для выполнения работы в соответствии с заданным вариантом приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1- Варианты заданий

№ варианты	К	T1	T2	№	К	T1	T2	№	К	T1	T2
1	0,1	0,01	5	11	1	1	0,6	21	1	9	3,5
2	0,2	0,02	0,1	12	10	2	0,7	22	2	3	1
3	0,3	0,03	4	13	9	3	0,8	23	3	1	3
4	0,4	0,04	0,2	14	8	4	0,9	24	4	2	4
5	0,5	0,05	3	15	7	5	0,65	25	5	3	0,8
6	0,6	0,06	0,3	16	6	6	0,55	26	6	1	10
7	0,7	0,07	2	17	5	7	0,4	27	7	2	5
8	0,8	0,08	0,4	18	4	8	0,45	28	8	10	1
9	0,9	0,09	1	19	3	9	0,5	29	9	2	0,5
10	1	0,1	0,5	20	2	10	0,3	30	10	0,4	0,8



### 1.3 Содержание отчета по работе

1.3.1 Цель работы.

1.3.2 Схема исследованной системы с числовыми значениями параметров.

1.3.3 Экспериментально полученные графики переходного процесса, ЛЧХ, АФЧХ.

1.3.4 Анализ и выводы по работе.

1.3.5 Ответы на контрольные вопросы.

### 1.4 Контрольные вопросы

1.4.1 Что из себя представляет система MATLAB и какова область его применения?

1.4.2 С какими видами моделей может работать Simulink?

1.4.3 Каким образом осуществляется построение структурной схемы в Simulink?

1.4.4 Как в Simulink осуществляется ввод и редактирование параметров блоков?

1.4.5 Как в MATLAB осуществляется построение ЛЧХ и АФЧХ системы?

1.4.6 Как осуществляется печать графиков переходных процессов?

## 2 Расчетно-графическая работа № 2. Исследование зависимости показателей качества в переходном режиме от изменения параметров следящей системы

**Цель работы:** практическое освоение методики исследования переходных режимов функционирования систем автоматике на структурных моделях и приобретение соответствующих знаний о влиянии параметров исследуемой системы на основные показатели качества управления.

### 2.1 Краткие теоретические сведения

Исследование систем автоматике заданной структуры в переходном режиме соответствующем реакции на одно из типовых воздействий, проводится с целью оценки показателей качества процессов управления и определения зависимости этих показателей от вариации параметров.

К типовым воздействиям при исследовании систем автоматике относятся следующие функции:

- ступенчатая  $x(t) = x_0 1(t)$ ,

- линейная  $x(t) = vt$ ;

- квадратичная  $x(t) = \varepsilon t^2$ ;
- гармоническая  $x(t) = A \sin(\omega t)$ .

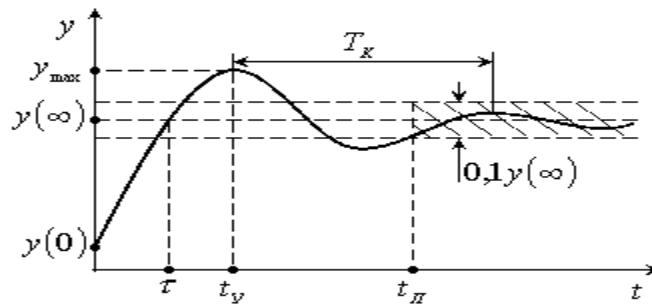


Рисунок 2.1 - Определение показателей качества по переходной функции

Обычно качество процессов управления оценивается по реакции системы на ступенчатое воздействие, т.е. по переходной функции, которая в общем случае имеет вид, показанный на рисунке 2.1. При этом качество управления в переходном режиме характеризуется следующими показателями:

- 1) Начальное значение  $y(0)$ , определяемое выражением

$$y(0) = \lim_{t \rightarrow 0} y(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} (pY(p))$$

- Установившееся значение  $y(\infty)$ , определяемое выражением

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{p \rightarrow 0} (pY(p))$$

- Перерегулирование  $\sigma$ , определяемое выражением

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%$$

где  $y_{\max}$  - максимальное значение регулируемой величины.

Время первого согласования  $\tau$ , исчисляемое от начала процесса до момента, когда регулируемая величина впервые становится равной установившемуся значению.

Время установления  $t_y$ , определяемое как время достижения переходной функции первого максимума.

Время переходного процесса  $t_{\text{п}}$ , отсчитываемое с момента приложения

к системе воздействия до момента, после которого в интервале  $(t_{II}; +\infty)$  выполняется условие

$$|y(t) - y(\infty)| \leq 0,05y(\infty)$$

Частота колебаний  $f_k$ , определяемая выражением

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} = \frac{1}{T_k},$$

где  $T_k$  - «период» колебаний.

Колебательность системы  $N_k$ , определяемая числом максимумов или минимумов в течение переходного процесса, т.е.

$$N_k \approx t_{II} / T_k.$$

Основными показателями качества в рассматриваемом режиме функционирования систем автоматики являются перерегулирование  $\sigma$  и время переходного процесса  $t_{II}$ .

Определение отмеченных показателей качества предполагает анализ переходной функции исследуемой системы, методы получения которой делятся на следующие основные группы:

- аналитические, графические и графоаналитические методы решения дифференциальных уравнений систем автоматики, из которых наибольшее распространение получил операторный метод на основе преобразования Лапласа;

- частотные методы, наиболее известным из которых является метод использования вещественных частотных характеристик;

- метод математического моделирования.

Рассматриваемый в данной работе, метод математического моделирования, реализуемый средствами цифровой вычислительной техники, при наличии развитого программного обеспечения значительно снижает трудоемкость и повышает эффективность проводимых исследований.

## 2.2 Порядок и методика выполнения работы

Перед началом работы следует получить у преподавателя номер варианта параметров исследуемой системы:

- 1) Получение переходной функции при заданных значениях параметров исследуемой системы

- а) создайте структуру исследуемой системы, на вход которой подается единичное ступенчатое воздействие. Задайте требуемые значения параметров;

- б) проведите имитационное моделирование, подобрав время решения, исходя из получения на экране переходной функции исследуемой системы. Напечатайте график и определите по нему показатели качества процесса

управления;

в) получите и напечатайте график изменения указанных преподавателем промежуточных величин моделируемой системы.

2) Получение зависимости основных показателей качества от изменения добротности исследуемой системы:

а) изменяя коэффициент передачи прямой цепи  $k_c$  и оставляя неизменными прочие параметры системы, установите такое его значение, при котором визуально наблюдается заметное изменение переходной функции.

По полученной переходной функции определите основные показатели качества, т.е. перерегулирование  $\sigma$  и время переходного процесса  $t_n$ . Время  $t_n$  удобно определять, пользуясь выводом результатов моделирования в таблицу;

б) проанализируйте качественно влияние изменения параметра  $k_c$  на указанные преподавателем промежуточные величины моделируемой системы;

в) подобным образом получите три - пять переходных функций, отличающихся друг от друга и дающих представление основных показателей качества и промежуточных величин от изменяемого параметра  $k_c$  системы;

г) постройте зависимость перерегулирования и времени переходного процесса от изменяемого параметра;

д) установите номинальное значение изменяемого параметра, обеспечивающее исходный вид переходной функции.

Получение зависимости основных показателей качества от изменения коэффициента передачи цепи положительной прямой связи. Выполните п.2, изменяя коэффициент передачи демпфирующего трансформатора  $k_{дт}$  аналогично изменению коэффициента передачи  $k_c$ .

Получение зависимости основных показателей качества от изменения коэффициента передачи  $k_{ос}$  цепи гибкой обратной связи.

Выполните п.2, изменяя коэффициент передачи  $k_{ос}$  аналогично изменению коэффициента передачи прямой цепи  $k_c$ .

В данной работе исследуются переходные режимы работы следящей системы копировально-фрезерного станка, структурная схема которой приведена на рисунке 2.2.

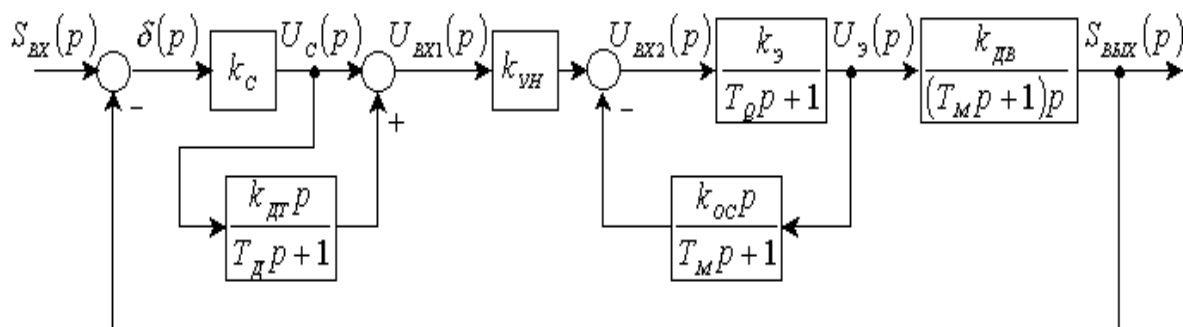


Рисунок 2.2 - Структурная схема исследуемой системы

Исходные данные для моделирования указанной системы в соответствии с заданным вариантом приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1-Варианты заданий

№ варианты	Параметры								
	$K_c$ , В/мм	$K_{дг}$ , С	$K_{ун}$	$K_3$	$K_{дв}$ , ммс/В	$K_{ос}$ , С	$T_{д}$ , С	$T_{я}$ , С	$T_{м}$ , С
1	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,134
2	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0152	0,0616	0,134
3	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,1232	0,134
4	10	0,104	3,15	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,134
5	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0308	0,134
6	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0606	0,0616	0,134
7	10	0,104	12,6	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,134
8	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,067
9	10	0,104	9,45	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,134
10	10	0,104	6,3	35,6	0,053	0,027	0,0303	0,0616	0,268

## 2.4 Содержание отчета по работе

2.4.1 Цель работы.

2.4.2 Схема исследованной системы с числовыми значениями параметров и экспериментально полученные графики.

2.4.3 Анализ и выводы по работе.

2.4.4 Ответы на контрольные вопросы.

## 2.5 Контрольные вопросы

2.5.1 Какие воздействия являются типовыми при исследовании системы автоматике?

2.5.2 По реакции на какое воздействие оценивается качество процессов управления?

2.5.3 Какими показателями характеризуется качество процессов управления в переходных режимах работы системы автоматики?

2.5.4 Какие показатели качества являются основными?

2.5.5 Какими методами можно получить переходную функцию исследуемой системы для анализа качества процессов управления?

2.5.6 Как зависит вид переходной функции исследуемой системы от изменения её добротности?

2.5.7 Как зависят основные показатели качества исследуемой системы от коэффициента передачи цепи положительной прямой связи?

2.5.8 Как зависят основные показатели качества исследуемой системы от коэффициента передачи цепи гибкой обратной связи?

2.5.9 Как зависит вид указанных преподавателем промежуточных величин моделируемой системы от изменения добротности и коэффициентов передачи положительной и отрицательной обратной связи?

2.5.10 Изменение какого из исследуемых параметров системы оказывается наиболее сильно на её устойчивости?

### 3 Расчетно-графическая работа № 3. Анализ устойчивости систем автоматики частотными методами

**Цель работы:** изучение и приобретение практических навыков применения критерия Найквиста и метода ЛЧХ для анализа устойчивости системы автоматики.

#### 3.1 Краткие теоретические сведения

Процессы управления в линейных разомкнутых системы автоматики описываются уравнениями вида:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x \quad (3.1)$$

Общее решение однородного уравнения

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = 0$$

имеет вид  $y_i(t) = c_i e^{p_i t}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , где  $p_i$  являются корнями характеристического уравнения

$$A_p(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = a_n (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n) \quad (3.2)$$

и определяют устойчивость системы, т.е. способность возвращаться в установившееся состояние после прекращения действия, которое вывело её из этого состояния.

Система является устойчивой, если все корни располагаются в левой полуплоскости комплексной переменной, т.е. являются отрицательными или имеют отрицательные вещественные части. Для определения устойчивости используются различные критерии, позволяющие определять знаки корней без их вычисления.

Наибольшее применение нашли частотные критерии устойчивости, а среди них критерий Найквиста и метод ЛЧХ, основанные на принципе аргумента. При переходе в частотную область анализа заменой  $p = j\omega$ , изменение аргумента каждого сомножителя  $(j\omega - p_i)$  в уравнении (3.2) при  $-\infty \leq \omega \leq +\infty$  определяется в среднем следующим выражением:

$$\Delta \arg(j\omega - p_i) = \pm \pi,$$

где знак «+» соответствует корню  $p_i$  левой, а «-» - правой полуплоскости (рисунке 3.1).

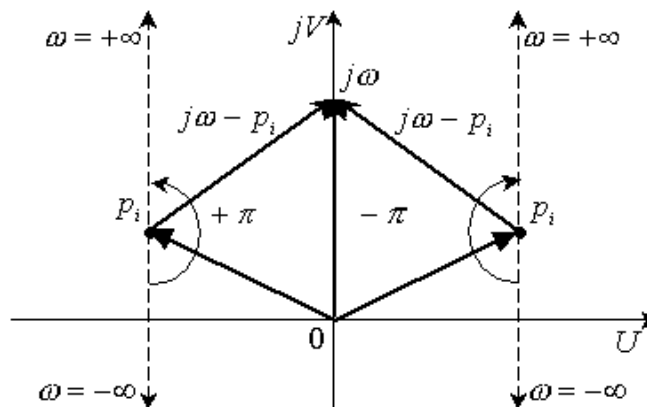


Рисунок 3.1 - Изменение аргумента  $(j\omega - p_i)$  для корней левой и правой полуплоскости

Если характеристическое уравнение имеет  $m$  корней в правой и  $(n - m)$  в левой полуплоскости, то

$$\Delta \arg A_p(j\omega) = (n - m)\pi - m\pi = (n - 2m)\pi \text{ при } -\infty \leq \omega \leq +\infty.$$

Для устойчивой разомкнутой системы  $m = 0$  и принцип аргумента с учетом симметрии  $A_p(j\omega)$  определяется выражением

$$\Delta \arg A_p(j\omega) = \pi n \text{ при } -\infty \leq \omega \leq +\infty.$$

Анализ устойчивости замкнутых систем автоматики основывается на применении принципа аргумента к выражению

$$\varphi(p) = 1 + W(p) = \frac{A_p(p) + B_p(p)}{A_p(p)} = \frac{A(p)}{A_p(p)}, \quad (3.3)$$

где  $W(p)$  - передаточная функция разомкнутой системы;  
 $A(p)$  - характеристический полином замкнутой системы.

Согласно данному принципу изменение аргумента определяется выражением

$$\Delta \arg \varphi(j\omega) = \Delta \arg A(j\omega) - \Delta \arg A_p(j\omega) \quad \text{при } -\infty \leq \omega \leq +\infty.$$

При наличии  $m$  корней в характеристическом уравнении замкнутой системы, расположенных в правой полуплоскости комплексной переменной, и при условии устойчивости разомкнутой системы справедливо равенство

$$\Delta \arg \varphi(j\omega) = -\pi(n - m) + \pi n = \pi m \quad \text{при } -\infty \leq \omega \leq +\infty.$$

Отсюда очевидно, что для систем, устойчивых в разомкнутом и замкнутом состояниях, выполняется условие критерия Найквиста

$$\Delta \arg \varphi(j\omega) = 0 \quad \text{при } -\infty \leq \omega \leq +\infty.$$

Графическая интерпретация этого условия для статической системы показана на рисунке 3.2,а.

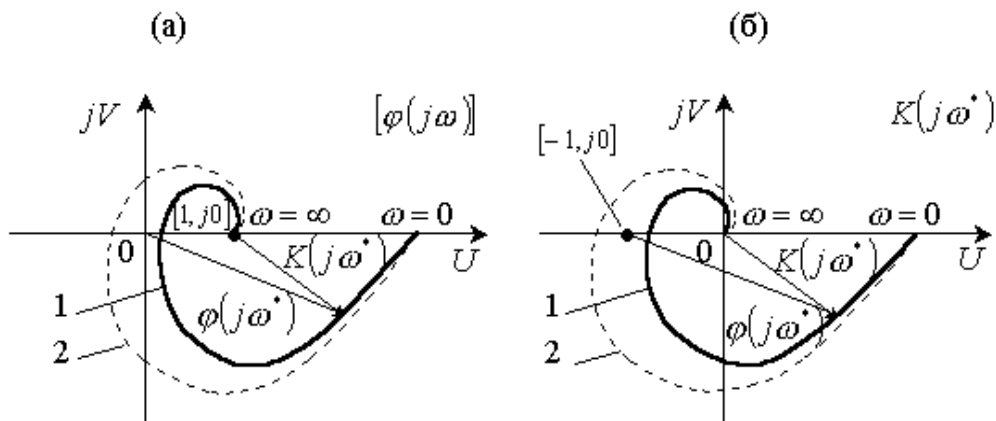
Переход к АФХ системы автоматики, т.е. к её комплексному коэффициенту передачи, полученному из (3.3) по выражению

$$K(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega} = \varphi(j\omega) - 1,$$

дает возможность сформулировать критерий Найквиста следующим образом.

Системы автоматики, устойчивая в разомкнутом состоянии, устойчива в замкнутом состоянии в том и только в том случае, если АФХ разомкнутой системы, построенная при  $-\infty \leq \omega \leq +\infty$ , не охватывает критическую точку с координатами  $[-1, j0]$  (рисунок 3.2,б).





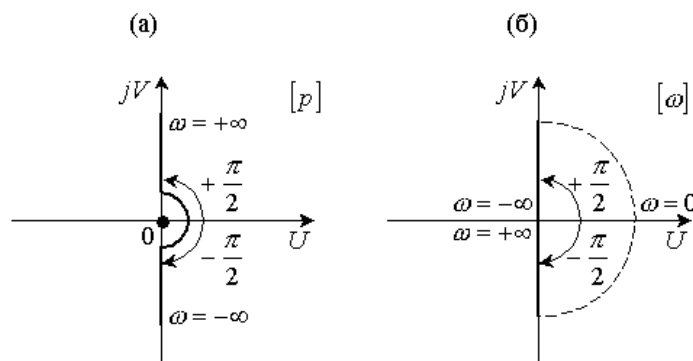
а - в плоскости  $[\varphi(j\omega)]$ ; б - в плоскости  $[K(j\omega)]$ ; 1 - устойчивая систем автоматики; 2 - неустойчивая системы автоматики.

Рисунок 3.2 - Критерий устойчивости Найквиста

Следует отметить, что при  $\omega=0$  АФХ астатических систем претерпевает разрыв. При этом  $|K(j\omega)| \rightarrow \infty$ , а фаза меняется на  $\nu\pi$ , где  $\nu$  - порядок астатизма, за счет того, что нулевой корень  $p=0$  относят к левой полуплоскости (рисунок 3.3,а), т.е. производят замену  $p = \rho e^{j\varphi}$ , где  $\rho \rightarrow 0$ , а  $\varphi$  меняется от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ . Следовательно, для интегратора справедливо

выражение  $K(j\omega) = \frac{K}{\rho} e^{-j\varphi}$ , объясняющее вид его АФХ, приведенный на рисунке 3.3,б.

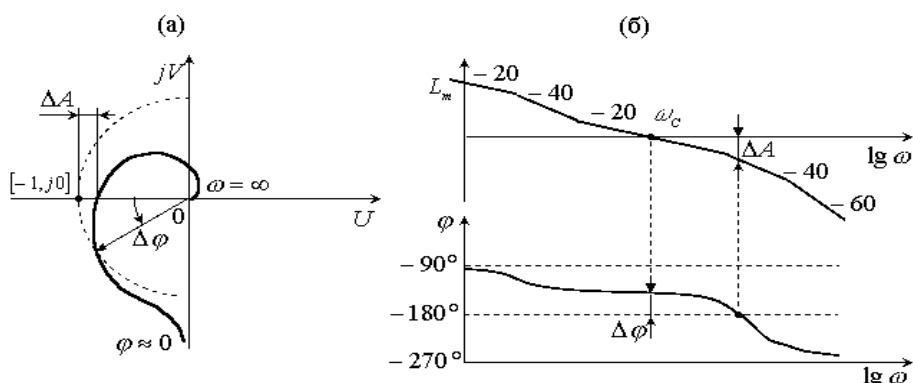
Критерий Найквиста, интерпретированный в область ЛЧХ, получил название метода ЛЧХ. Согласно этому методу системы автоматики, устойчивая в разомкнутом состоянии в том и только в том случае, когда на частоте среза разомкнутой системы, т.е. частоте, при которой  $|K(j\omega)|=1$ ,  $20\lg|K(j\omega)|=0$ , фазовый сдвиг  $\varphi(\omega_c)$  не превосходит значения  $-\pi$ .



а - в плоскости  $[p]$ ; б - в плоскости  $[\omega]$ .

Рисунок 3.3 - АФХ интегратора

Применение метода ЛЧХ к анализу устойчивости астатической системы первого порядка показано на рисунке 3.4. На этом же рисунке показано определение запасов устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$  и по модулю  $\Delta A$ .



а - устойчивая астатическая система первого порядка; б - метод ЛЧХ.  
Рисунке 3.4 - Интерпретация критерия Найквиста в области ЛЧХ

### 3.2 Порядок и методика выполнения работы

Перед началом работы следует получить у преподавателя номер варианта параметров исследуемых системы автоматики:

- 1) Анализ устойчивости статической системы
  - а) определение устойчивости методом ЛЧХ

Создайте структуру замкнутой системы с единичной обратной связью, на вход которой подается единичное ступенчатое воздействие, а передаточная функция прямой цепи соответствует заданной передаточной функции разомкнутой системы. Задайте требуемые значения параметров.

Получите ЛЧХ исследуемой системы, подобрав диапазон изменения частоты таким образом, чтобы в него входили все сопрягающие частоты.

На полученной ЛАХ постройте асимптотическую ЛАХ, определите частоту среза и фазовый сдвиг на этой частоте.

Сделайте вывод об устойчивости исследуемой системы. Для устойчивой системы определите запасы устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$  и модулю  $\Delta A$ .

- б) определение устойчивости по критерию Найквиста

Получите качественный вид АФХ, исследуемой системы при изменении частоты от верхней границы выбранного диапазона частот до минимально необходимого значения.

Путем изменения нижней границы частоты найдите критическую точку на мнимой оси и напечатайте АФХ исследуемой системы вблизи этой точки.

По полученной АФХ определите фазовый сдвиг на частоте среза.

Сделайте вывод об устойчивости исследуемой системы. Для устойчивой системы определите запасы устойчивости по фазе и по модулю. Сравните

результаты с п. 1,а.

в) проверка устойчивости методом моделирования

Проведите имитационное моделирование. Получите график переходной функции, подобрав экспериментально время моделирования, исходя из возможности вывода об устойчивости исследуемой системы. Напечатайте график.

Анализ устойчивости астатической системы первого порядка.

Выполните операции п. 1.

Анализ устойчивости астатической системы второго порядка.

Выполните операции п. 1.

В данной работе применяются критерий Найквиста и метод ЛЧХ для анализа устойчивости статических и астатических систем первого и второго порядка.

Передаточные функции исследуемых систем в общем виде определяются следующим образом:

$$W(p) = \frac{k(1+T_1 p)^{v-1}}{p^v (1+T_1 p)^{s-v} \prod_{i=2}^n (1+T_i p)}$$

Исходные данные для моделирования указанных систем в соответствии с заданным вариантом приведены в таблице. 3.1.

Таблица 3.1 - Варианты заданий

№ варианты	v = 0						
	s	n	k	τ, C	T <sub>1,C</sub>	T <sub>2,C</sub>	T <sub>3,C</sub>
1	3	2	1800	0.08	0.900	0.0300	-
2	3	2	100	0.25	0.800	0.0200	-
3	3	2	180	0.08	0.900	0.0300	-
4	2	3	800	0.315	0.635	0.0400	0.020
5	3	3	16000	0.08	0.900	0.0160	0.008
6	2	2	10	0.315	0.635	0.0160	-
7	3	3	2500	0.08	0.900	0.0160	0.008
8	3	3	3	0.08	0.900	0.0160	0.008
9	1	2	10	-	0.635	0.0125	-
10	3	3	160	0.08	0.900	0.0160	0.008
№ варианты	v = 1						
	s	n	k	τ, C	T <sub>1,C</sub>	T <sub>2,C</sub>	T <sub>3,C</sub>
1	3	2	180	0.080	0.900	0.0300	-
2	3	3	16000	0.080	0.900	0.0160	0.008
3	3	2	3150	0.080	0.900	0.0300	-
4	3	3	3000	0.080	0.900	0.0160	0.008
5	3	2	180	0.250	0.800	0.0200	-

6	3	3	90	0.080	0.900	0.0160	0.008
7	2	3	400	0.315	0.635	0.0400	0.020
8	1	2	180	-	-	0.0125	-
9	3	3	1	0.080	0.900	0.0160	0.008
10	2	2	30	0.315	0.635	0.0160	-
№ варианты	$\nu = 2$						
	$s$	$n$	$k$	$\tau, C$	$T_{1,C}$	$T_{2,C}$	$T_{3,C}$
1	2	3	525	0.315	-	0.0400	0.020
2	3	2	250	0.250	0.8	0.0200	-
3	2	2	50	0.315	-	0.0160	-
4	3	2	400	0.250	0.8	0.0125	-
5	1	2	1600	-	-	0.0160	-
6	3	3	21000	0.080	0.9	0.0160	0.008
7	3	3	5000	0.080	0.9	0.0160	0.008
8	3	3	100	0.080	0.9	0.0160	0.008
9	3	2	1	0.250	0.8	0.0200	-
10	3	3	30	0.080	0.9	0.0160	0.008

### 3.4 Содержание отчета по работе

3.4.1 Цель работы.

3.4.2 Структурные динамические схемы исследованных систем, их передаточные функции с числовыми значениями параметров и экспериментально полученные графики АФХ, ЛЧХ и переходных функций.

3.4.3 Анализы и выводы по работе.

3.4.4 Ответы на контрольные вопросы.

### 3.5 Контрольные вопросы

3.5.1 На каком принципе основан частотный критерий устойчивости Найквиста?

3.5.2 Как формулируется критерий устойчивости Найквиста?

3.5.3 Чему равны координаты критической точки?

3.5.4 В чем особенность построения АФХ для астатических систем?

3.5.5 Чему равен фазовый сдвиг вблизи нулевой частоты для статических и астатических систем?

3.5.6 К чему стремится АФХ статических и астатических систем при бесконечно большом увеличении частоты  $\omega$ ?

3.5.7 Как определяются запасы по фазе и модулю с помощью АФХ исследуемой системы?

3.5.8 Как определяются запасы по фазе и модулю с помощью ЛЧХ исследуемой системы?

- 3.5.9 В чем заключается связь между АФХ и ЛЧХ системы автоматики?
- 3.5.10 В чем физический смысл запасов устойчивости по модулю и фазе?

## Список литературы

- 1 Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. - СПб.: Изд-во "Профессия", 2003. - 752 с.
- 2 Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. - М.: Высшая школа. - Часть I. - 1986.
- 3 Малафеев С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления. - М.: «Академия», 2010.
- 4 Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. - СПб.: «Лань», 2010.
- 5 Теория автоматического управления / под ред. В.Б.Яковлева. - М., 2009.
- 6 Советов Б.Я. Теоретические основы автоматизированного управления. Советов Б.Я. - М., 2006.
- 7 Сагитов П.И., Иманбекова Т.Д. «Теория автоматического управления». Конспект лекций. - Алматы: АУЭС, 2014 – 70 с.
- 8 Цыба Ю.А., Тойгожинова Ж.Ж., Жаркымбекова М.Б. Теория автоматического управления. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности «Электроэнергетика». - Алматы: АУЭС, 2014 -35с.

Юрий Александрович Цыба  
Данна Максуткановна Чныбаева

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания для выполнения расчетно-графических работ для  
студентов специальности 5В071800 - Электроэнергетика

Редактор Л.Т. Сластихина  
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Тираж 20 экз.  
Объем 1,3 уч. - изд. л.

Формат 60x84 1/16  
Бумага типографская № 1  
Заказ \_\_\_\_\_ Цена 655 тг.

Копировально – множительное бюро  
некоммерческого акционерного общества  
„Алматинский университет энергетики и связи”  
050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126