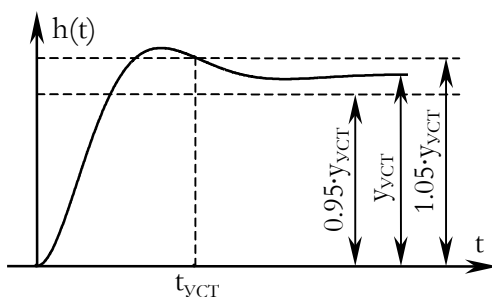


ФГОУ ВО  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ ФАПЧ И ЧАП

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторной работе № 2 по дисциплине  
«Радиоавтоматика»  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
и направления 11.03.01 «Радиотехника»



Воронеж 2019

Составитель: канд. техн. наук А.В. Володько

УДК 621.396

Исследование линейных динамических звеньев систем ФАПЧ и ЧАП: методические указания к лабораторной работе № 2 по дисциплине «Радиоавтоматика» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и направления 11.03.01 «Радиотехника» / ФГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Володько. Воронеж, 2019. 31 с.

Работа содержит практические и лабораторные задания по одному из разделов указанного курса, посвященному исследованию математических моделей функциональных узлов систем частотной и фазовой автоподстройки частоты. В методических указаниях содержатся необходимые для этого расчетно-методические материалы. Предназначено для студентов специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Лабораторная работа №2.pdf

Табл. 2. Ил. 10. Библиогр.: 2 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доцент С.М. Федоров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.С. Балашов

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2019

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В данной работе изучаются инерционные устройства следящих систем радиоавтоматики (ФАПЧ и ЧАП) и завершается разработка структурных математических схем этих систем. Описание вводимых при этом в схемы систем РА линейных динамических звеньев (ЛДЗ) осуществляется аналогично математическому описанию линейных электрических цепей, известному студентам из курсов "Основы теории цепей" и "Радиотехнические цепи и сигналы". В связи с этим изложение соответствующего материала в учебнике [1] носит конспективный характер, что требует (при необходимости) обращения или к учебнику [2], или к пособию [3].

Цель работы – освоение методики представления инерционных свойств функциональных элементов систем РА линейными динамическими звеньями; ознакомление с практическими схемами типовых корректирующих звеньев систем РА; приобретение практических навыков построения асимптотических логарифмических частотных характеристик (АЛЧХ) элементарных и сложных динамических звеньев; закрепление в памяти свойств элементарных звеньев.

Характер данной работы аналогичен работе №1. Однако в отличие от первой работы здесь уже необходимо предварительное выполнение домашних заданий и получение допуска к работе. Итак, подготовив дома теоретический материал, необходимый для понимания сути исследований, а также выполнив предварительные расчеты, без которых невозможен дальнейший анализ характеристик линейных инерционных звеньев систем РА, в лаборатории исследуют их свойства, проводя численное моделирование процессов в звеньях на персональном компьютере. Для проведения численных исследований используется разработанное на кафедре оригинальное программное обеспечение.

# 1. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

## 1. 1. Первое домашнее задание

Дополните описание частотного и фазового дискриминаторов, осуществленное в работе № 1 с помощью нелинейных дискриминационных характеристик, линейным динамическим звеном, отражающим инерционность дискриминаторов.

Статическая (или обобщенная) дискриминационная характеристика не отражает инерционности дискриминатора, проявляющейся в том, что за изменением фазы или частоты на входе дискриминатора изменение напряжения  $U_d$  на его выходе не последует мгновенно: оно будет некоторое время устанавливаться, то есть будет иметь место переходный процесс. Такого рода инерционность дискриминаторов учитывается введением в структурную математическую схему систем РА инерционного звена (апериодического звена первого порядка) с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{1}{pT_d + 1}, \quad (1.1)$$

где  $T_d$  – постоянная времени звена, (с).

Постоянная времени  $T_d$  инерционного звена в структурной схеме фазового дискриминатора, рассмотренного в предыдущей работе, определяется параметрами RC-цепочки его амплитудных детекторов:  $T_d = \tau_{RC} = RC$ . Значение постоянной времени  $T_d$ , необходимое для описания ФД, следует оценить по данным, представленным в табл. 1.1 (в соответствии с заданным номером варианта). При этом потребуются вспомнить, как связана постоянная времени интегрирующей RC-цепи и ее полоса пропускания.

Для частотного дискриминатора постоянная  $T_d$  звена, имитирующего инерционность ЧД, зависит как от постоянных времени колебательных контуров ( $\tau_k$ ), так и RC-цепочек

( $\tau_{RC}$ ) в схеме дискриминатора (см. первую лабораторную работу). Величину  $T_{\Delta}$  в математической модели частотного дискриминатора следует оценить в соответствии с формулой  $T_{\Delta} = \sqrt{\tau_k^2 + \tau_{RC}^2}$ , используя данные таблицы. При этом следует полагать, что  $\tau_{RC}$  в схеме ЧД аналогична ФД. Выясните, чем преимущественно обусловлена инерционность частотного дискриминатора (наличием резонансных контуров или RC-фильтров).

Исходные данные к домашним заданиям .Таблица 1

Номер варианта	Задание первое			Задание второе	
	$\Pi_{RC}^*$ , кГц	$Q^{**}$	$F_{\Delta}^{***}$ , кГц	$T_1$ , мс	$T_2$ , мс
1	0.5	120	1500	10	150
2	5.0	130	1500	10	100
3	1.0	140	1500	50	100
4	2.0	150	1000	50	500
5	0.5	160	1000	10	300
6	6.0	170	1000	10	500
7	0.3	180	2000	50	150
8	0.1	190	2000	50	350
9	4.0	200	2000	50	450

\*– полоса пропускания RC-цепочек в схемах дискриминаторов;  
 \*\*– добротность контуров в схеме ЧД;  
 \*\*\*– переходная частота частотного дискриминатора.

Добавьте линейное звено с передаточной функцией (1.1) в математические модели дискриминаторов систем ФАПЧ и ЧАП, сформированные в первой лабораторной работе. Изобразите их в отчете.

Обратите внимание на то, что учет инерционности УПЧ, рассмотренного в первой работе, осуществлялся в структурной математической схеме системы по иному – введением звена идеального запаздывания. Этим отражается

не только инерционность устройства, но и передается характер переходного процесса в нем.

## 1.2. Второе домашнее задание

Определите значения сопротивлений  $R$  и емкостей  $C$  в корректирующем звене (рис. 1.1) с передаточной функцией

$$K(p) = K_K \cdot (pT_1 + 1) / (pT_2 + 1). \quad (1.2)$$

Занесите полные структурные математические схемы систем ЧАП и ФАПЧ, представленные на рис. 1.2 и 1.3, в отчет.

Для выполнения задания следует записать передаточную функцию корректирующего звена в предположении, что коэффициент усиления операционного усилителя, на котором оно реализовано, равен бесконечности:

$$K(p) = -Z_2(p) / Z_1(p), \quad (1.3)$$

где  $Z_1(p)$  и  $Z_2(p)$  – эквивалентные операторные сопротивления входной цепи операционного усилителя и цепи обратной связи.

Для схемы на рис. 1.1 выражение (1.3) преобразуется к

$$K(p) = \frac{1/(1/R_2 + pC_2)}{1/(1/R_1 + pC_1)} = \frac{1/R_1 + pC_1}{1/R_2 + pC_2}. \quad (1.4)$$

Знак "минус" в выражении (1.4) опущен. Приведем передаточную функцию (1.4) к стандартному виду (1.2):

$$K(p) = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{pR_1C_1 + 1}{pR_2C_2 + 1}. \quad (1.5)$$

Сопоставив (1.5) и (1.2), можно записать:

$$K_K = R_2 / R_1, T_1 = R_1C_1, T_2 = R_2C_2. \quad (1.6)$$

Требуемое усиление корректирующего фильтра на нулевой частоте  $K_K$  можно определить из следующих соображений. Наибольшее значение напряжения на выходе дискриминатора

$U_{\Delta \max}$ , определяемое по статической дискриминационной характеристике ЧД или ФД, должно, пройдя через корректирующее звено, отклонить частоту перестраиваемого генератора (от номинального значения при  $U_{\Delta} = 0$ ) до конечного значения линейного участка регулировочной характеристики. Соответствующее этому значению управляющее напряжение  $U_{\Phi \max}$ , отнесенное к напряжению  $U_{\Delta \max}$ , даст искомое значение коэффициента усиления:  $K_K = U_{\Phi \max} / U_{\Delta \max}$ .

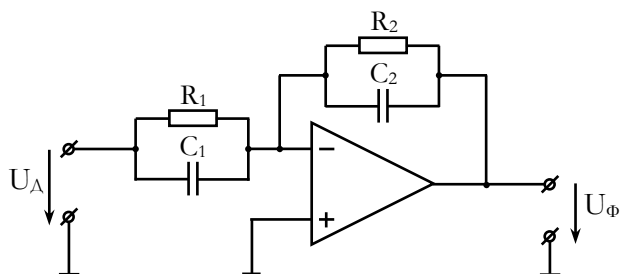


Рис. 1.1. Схема корректирующего звена на операционном усилителе

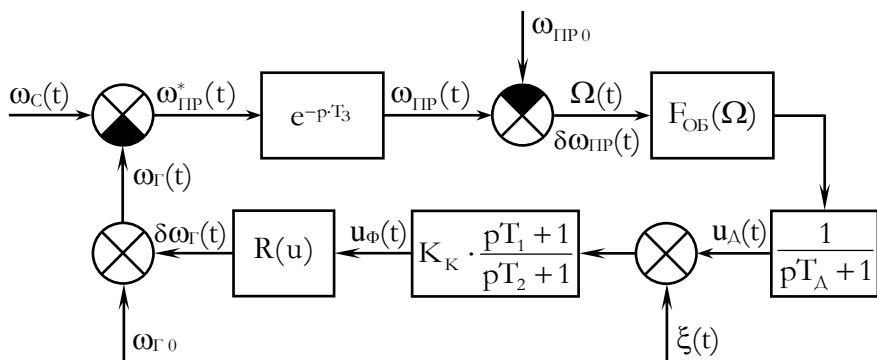


Рис. 1.2. Полная структурная математическая схема системы ЧАП

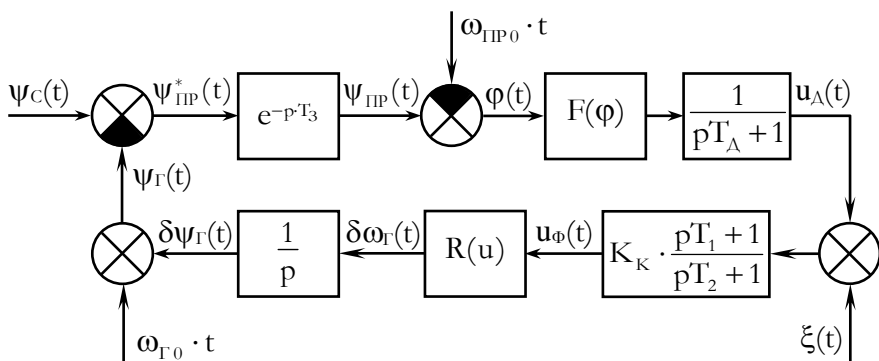


Рис. 1.3. Полная структурная математическая схема системы ФАПЧ

Для определения значений сопротивлений  $R_1, R_2$  и емкостей  $C_1, C_2$  остается решить полученные уравнения (1.6). Постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  считать заданными (см. в таблице). Так как число неизвестных в системе (1.6) превосходит число уравнений, то значение одного из компонентов можно выбрать произвольно, например, взять  $C_1 = 0.1$  мкФ, а значения остальных элементов схемы корректирующего звена следует рассчитать.

### 1. 3. Третье домашнее задание

Исследуйте возможность получения элементарных линейных динамических звеньев – безинерционного, интегрирующего, дифференцирующего, инерционного и форсирующего – из универсального корректирующего звена (рис. 1.1) путем исключения сопротивлений или (и) емкостей в его схеме.

Для выполнения задания следует использовать выражение (1.4), которое при исключении из него тех или иных сопротивлений и (или) емкостей принимает вид передаточной функции элементарного ЛДЗ. Например, при  $C_1 = 0$  и  $R_2 = \infty$  передаточная функция (1.4) преобразуется к виду



$$K(p) = \frac{1/R_1 + 0}{pC_2 + 1/\infty} = \frac{1/R_1}{pC_2} = \frac{1}{pR_1C_2} = \frac{1}{pT_{II}} = \frac{K_V}{p}, \quad (1.7)$$

соответствующему передаточной функции интегрирующего звена с постоянной времени  $T_{II} = R_1C_2$  или коэффициентом передачи (добротностью)  $K_V = 1/T_{II}$ .

Таким образом, исключая из схемы корректирующего звена активные сопротивления ( $R = \infty$ ) и (или) емкости ( $C = 0$ ), можно получить требуемые схемы элементарных динамических звеньев и выразить их параметры (постоянные времени, коэффициенты передачи) через значения элементов  $R$  и  $C$ .

Зарисуйте в отчет схемы всех затребованных линейных динамических звеньев, реализованных на операционном усилителе. Здесь же приведите передаточные функции звеньев, формулы для расчета параметров звеньев по значениям сопротивлений  $R$  и емкостей  $C$  в их схемах.

Рассчитайте параметры всех элементарных звеньев с использованием полученных выражений, полагая, что сопротивления и емкости в схеме корректирующего звена известны (см. второе домашнее задание).

#### 1. 4. Четвертое домашнее задание

Получите аналитические выражения для импульсной  $g(t)$  и переходной  $h(t)$  характеристик интегрирующего и инерционного звеньев, рассмотренных в первом и третьем заданиях.

Для выполнения задания воспользуйтесь обратным преобразованием Лапласа передаточной функции линейного звена

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} K(p) \cdot e^{pt} dp \quad (1.8)$$

и последующим интегрированием импульсной характеристики:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (1.9)$$

Последнее выражение определяет переходную характеристику линейного звена – его отклик на входное воздействие в виде единичной функции  $1(t)$ .

Для расчета контурного интеграла от аналитической функции  $K(p) \cdot e^{pt}$  в выражении (1.8) следует использовать теорему о вычетах, в соответствии с которой для простейшего случая

$$\begin{aligned} g(t) &= \text{вычет} [K(p) \cdot e^{pt}] = \\ &= \lim_{p \rightarrow p_i} [K(p) \cdot e^{pt} \cdot (p - p_i)] \end{aligned} \quad (1.10)$$

где  $p_i$  – единственный полюс передаточной функции  $K(p)$  звена первого порядка.

Получите в соответствии с формулами (1.10) и (1.9) выражения для временных характеристик интегрирующего и инерционного звеньев. Проверьте правильность полученных вами формул для импульсных характеристик звеньев, сопоставив их с соответствующими выражениями в таблице преобразований Лапласа, которую можно найти, например, в учебнике [1].

## 1. 5. Пятое домашнее задание

Оцените числовые значения времени установления переходных процессов в инерционном и интегрирующем звеньях.

Время установления переходных процессов  $t_{уст}$  в линейном динамическом звене определяется промежутком времени, по истечении которого реакция звена  $y(t)$  принимает значение, отличающееся от установившегося  $u_{уст} = y(t \rightarrow \infty)$  не более чем на 5%. При экспериментальной оценке времени установления  $t_{уст}$  по кривой переходного процесса в качестве

последней используют переходную характеристику звена  $h(t)$ , то есть, его реакцию на единичную функцию (рис. 1.4).

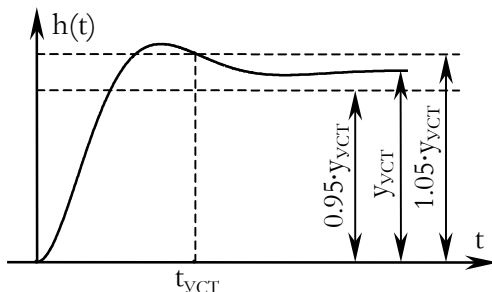


Рис. 1.4. Оценка  $t_{уст}$  по кривой переходного процесса

Более простым (инженерным) способом оценки  $t_{уст}$  является приближенный метод, не требующий расчета  $h(t)$  и опирающийся на следующие соображения. При входных воздействиях, описываемых "медленными" функциями (к которым относят и единичную функцию), и апериодическом характере переходных процессов в динамическом звене время установления переходных процессов определяется главным образом самой "медленной экспонентой" свободного процесса на выходе звена. Скорость затухания экспоненциальных временных функций, формирующих свободный процесс, прямо пропорциональна вещественным частям полюсов  $p_i$  передаточной функции  $K(p)$  звена. Если  $\sigma_{MAX}$  – максимальная из всех (отрицательных) абсцисс полюсов  $p_i$ , то время установления процессов в звене будет соответствовать времени затухания экспоненты  $\exp(\sigma_{MAX} \cdot t)$ .

Нетрудно показать, что тогда что

$$t_{уст} \approx -\frac{3}{\sigma_{MAX}}. \quad (1.11)$$

Для динамических звеньев первого порядка оценка  $t_{уст}$  в соответствии с (1.11) будет весьма точной.

Используя формулу (1.11), найдите время установления переходных процессов в инерционном и интегрирующем

звеньях с параметрами, рассчитанными вами в третьем задании.

## 1. 6. Шестое домашнее задание

Запишите дифференциальные уравнения, связывающие входное воздействие  $x(t)$  и выходную реакцию  $y(t)$  интегрирующего и инерционного звеньев.

Составьте рекуррентные формулы для моделирования указанных процессов на персональном компьютере.

Требуемые дифференциальные уравнения в операторной форме имеют вид

$$y(t) = K(p)\{x(t)\}, \quad (1.12)$$

где  $K(p)$  – передаточная функция соответствующего звена;

$p = d/dt$  – дифференциальный оператор.

Для получения рекуррентных уравнений выражение (1.12) следует записать в явной форме, а затем производную  $dy(t)/dt$  заменить отношением приращений:

$$\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t_i + \Delta t) - y(t_i)}{\Delta t} = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i)}{\Delta t} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t}, \quad (1.13)$$

где  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  – шаг дискретизации анализируемых процессов;  $y_{i+1}$ ,  $y_i$  – отсчеты выходного процесса в моменты времени  $t_{i+1}$  и  $t_i$ .

В силу инерционности рассматриваемых звеньев нулевые отсчеты их реакций  $y_0 = y(t_0) = y(t = 0)$  на "медленное" входное воздействие  $x(t)$  принять равными нулю:  $y_0 = 0$ . Значения функции  $x(t)$  в рекуррентном соотношении необходимо взять при  $t = t_i$ , то есть заменить  $x(t)$  на  $x_i$ . Полученная рекуррентная формула может быть использована для цифрового моделирования переходных процессов в звене.

В частности, для интегрирующего звена, у которого передаточная функция  $K(p) = K_V/p$ , выражение (1.12) примет вид

$$y(t) = K_V/p \cdot \{x(t)\}, \quad (1.14)$$

а с учетом  $p = d/dt$ :

$$dy(t)/dt = K_V \cdot x(t). \quad (1.15)$$

Используя приближение (1.13) и сделав замену  $x(t) \rightarrow x_i$ , получим рекуррентное уравнение для расчета выходного процесса интегрирующего звена:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta t \cdot K_V \cdot x_i. \quad (1.16)$$

Шаг дискретизации  $\Delta t$  при апериодическом характере процессов, имеющих место в анализируемых звеньях первого порядка, достаточно взять равным десятой части  $t_{уст}$ :

$$\Delta t = 0.1 \cdot t_{уст}. \quad (1.17)$$

В отчет необходимо внести найденные дифференциальные и рекуррентные разностные уравнения для расчета реакции обоих звеньев на ступенчатое воздействие вида  $x(t) = A \cdot 1(t)$ , где  $A$  – величина входного скачка. Кроме того, следует рассчитать шаг дискретизации процессов в инерционном звене, а в интегрирующем принять его равным  $(0.10 \dots 0.25) \cdot T_i$ .

Конкретные параметры звеньев следует взять из результатов выполнения третьего домашнего задания.

## 1. 7. Седьмое домашнее задание

Запишите выражения для амплитудно- и фазочастотных характеристик и постройте асимптотические логарифмические частотные характеристики (АЛЧХ) элементарных звеньев (безинерционного, интегрирующего, дифференцирующего, инерционного и форсирующего), параметры которых найдены вами в третьем задании.

Постройте АЛЧХ корректирующего звена, рассмотренного во втором задании.

При выполнении данного задания следует опираться на сведения об АЛЧХ, приведенные в учебниках [1, 2] и пособии [3]. Необходимо, прежде всего, помнить, что асимптотическая частотная характеристика представляет собой ломаную прямую, а потому ее построение на каждом участке требует знания ординат только для двух частот. В отличие от АЛЧХ точные характеристики – логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) и фазочастотная (ЛФЧХ) – находятся по точным выражениям

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20 \cdot \lg |K(j\omega)|, \\ \varphi(\omega) &= \arg\{K(j\omega)\}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $K(j\omega)$  – комплексный коэффициент передачи линейного звена.

Асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ (АЛАЧХ и АЛФЧХ) строятся следующим образом. Горизонтальная ось – ось частот вычерчивается в логарифмическом масштабе. Нулевая частота при этом соответствует точке, лежащей "в минус бесконечности". В качестве единицы измерения частоты принимается рад/с или просто  $\text{с}^{-1}$ . Ось размечают отрезками постоянной длины – декадами, соответствующими десятикратному изменению частоты (рис. 1.5). При построении АЛАЧХ по оси ординат в линейном масштабе откладываются значения логарифмического модуля комплексного коэффициента передачи звена  $L(\omega)$  (в децибелах). Ось ординат проводится через точку, определяемую частотой  $\omega = 10^m \text{с}^{-1}$ , где  $m$  – любое целое положительное или отрицательное число, обеспечивающее близость этой частоты к сопрягающим частотам  $\omega_{\text{с}1} = 1/T_1$ ,  $\omega_{\text{с}2} = 1/T_2$  и т.д. или к частоте среза  $\omega_{\text{ср}}$  амплитудно-частотной характеристики звена (рис. 1.5,а), определяемой из равенства

$$20 \cdot \lg |K(j\omega_{\text{ср}})| = 0. \quad (1.19)$$

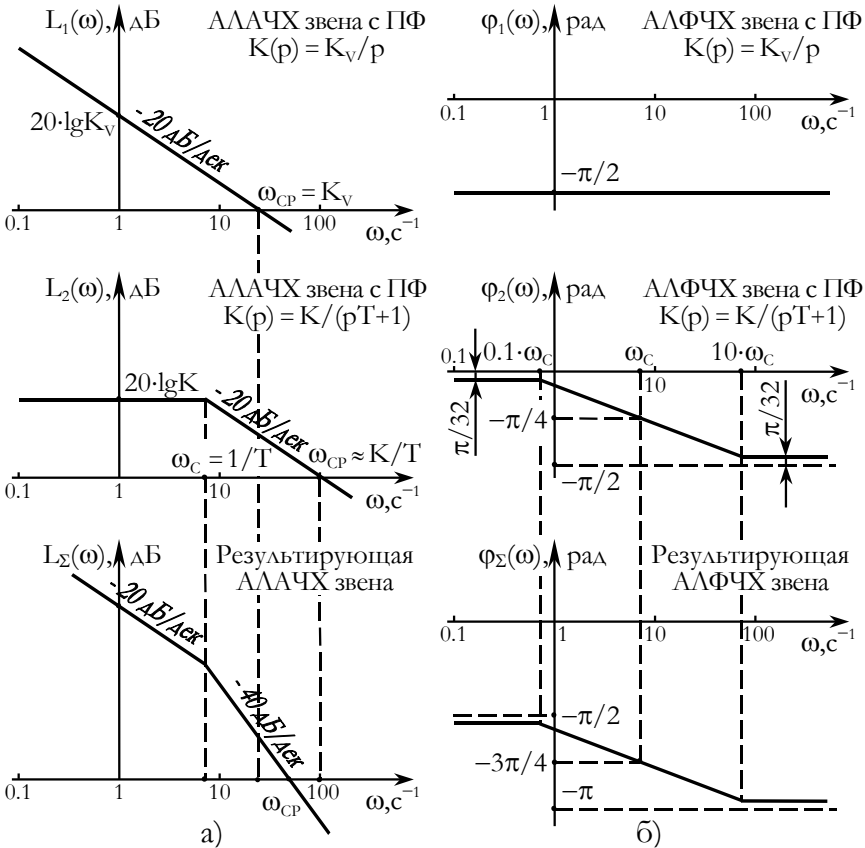


Рис. 1.5. Построение АЛАЧХ (а) и АЛФЧХ (б) сложного ЛДЗ с передаточной функцией  $K(p) = K \cdot K_V / [p \cdot (pT + 1)]$

АЛАЧХ интегрирующего звена с передаточной функцией  $K(p) = K_V/p$  описывается линейной зависимостью. Соответствующая АЛАЧХ наклонная прямая проходит через точку на оси частот с абсциссой  $\omega_{CP} = K_V$  и точку с частотой  $\omega = 1 \text{ c}^{-1}$ , имеющую ординату  $20 \cdot \lg K_V$  (рис. 1.5,а). Фактически для построения АЛАЧХ интегрирующего звена достаточно провести через точку, соответствующую частоте среза, прямую под наклоном к оси частот "минус" 20 дБ на декаду.

Следует отметить, что для интегрирующего звена ЛАЧХ и АЛАЧХ тождественно совпадают.

При построении асимптотической ЛАЧХ инерционного звена ( $K(p) = K/(pT + 1)$ ) для абсциссы, равной частоте сопряжения  $\omega_c = 1/T$ , определяется ордината –  $20 \cdot \lg K$ , дБ. Влево через найденную таким образом точку проводится горизонтальный луч, а вправо – луч с наклоном "минус" 20 дБ/дек. Наклонный луч пересечет ось абсцисс в точке, при  $K > 1$  практически соответствующей частоте среза АЧХ звена:  $\omega_{cp} \approx K/T$  (рис. 1.5,а).

Построение асимптотических ЛАЧХ дифференцирующего и форсирующего звеньев производится аналогично интегрирующему и инерционному звеньям. При этом, однако, наклонные лучи АЛАЧХ имеют наклон "плюс" 20 дБ на декаду.

При построении асимптотических логарифмических частотных характеристик любой системы последовательно соединенных элементарных линейных звеньев (т. е. сложного ЛДЗ – в том числе корректирующего звена) необходимо представить эквивалентную передаточную функцию в виде произведения передаточных функций элементарных звеньев, построить АЛЧХ этих звеньев, а затем их сложить (рис. 1.5).

АЛАЧХ корректирующего звена состоит из трех участков (асимптот), разделенных сопрягающими частотами  $\omega_{c1} = 1/T_1$  и  $\omega_{c2} = 1/T_2$ . Левая и правая крайние асимптоты горизонтальны. Они проходят на уровнях, соответствующих логарифмическому усилению звена на частотах  $\omega = 0$  и  $\omega = +\infty$ .

График логарифмической ФЧХ строится под АЛАЧХ, причем используется тот же участок оси частот. По оси ординат в линейном масштабе откладываются значения аргумента комплексного коэффициента передачи звена (набега фазы в звене). При асимптотическом построении ЛФЧХ инерционного/форсирующего звеньев для частоты сопряжения  $\omega_c$  набег фазы определяется точным значением  $\mp \pi/4$  радиан, на частотах  $\omega < 0.1 \cdot \omega_c$  – принимается неизменным и равным  $\mp \pi/32$



радиан, а на частотах  $\omega > 10 \cdot \omega_c$  – соответственно  $\mp(\pi/2 - \pi/32)$  радиан (рис. 1.5,б).

## **1.8 Вопросы для самопроверки качества усвоения материала заданий и получения допуска к работе**

1. Что такое линейное динамическое звено? Какие ЛДЗ называют элементарными, какие – сложными? Назовите все известные вам элементарные ЛДЗ. Запишите передаточную функцию элементарного звена (любого – по требованию преподавателя) и постройте его АЛАЧХ; поясните по ней свойства звена.

2. Почему в структурных математических схемах реальных систем РА появляются линейные динамические звенья? Каким образом учитывается при построении моделей систем ФАПЧ и ЧАП инерционность их дискриминаторов? Всегда ли следует учитывать эту инерционность?

3. Как получить по передаточной функции ЛДЗ его комплексный коэффициент передачи, АЧХ и ФЧХ, АЛАЧХ и ЛФЧХ, импульсную и переходную характеристики? Поясните это на примере элементарного звена (любого – по требованию преподавателя).

4. Изобразите принципиальную электрическую схему элементарного звена (любого – по требованию преподавателя) при его реализации на операционном усилителе. Поясните, из каких соображений определяются номинальные значения радиокомпонентов такой цепи?

5. Что такое время установления переходных процессов в линейном звене? Что оно характеризует? Как его найти? Поясните методику инженерной оценки времени установления процессов на примере сложного ЛДЗ с передаточной функцией:

$$\text{а) } \frac{10}{(0.01p+1)(0.1p+1)}; \quad \text{б) } 50 \cdot \frac{0.01p+1}{p^2+15p+50}; \quad \text{в) } \frac{250}{p^2+30p+250}.$$

Объясните, почему для звена первого порядка формула (1.11) является абсолютно точной, а для рассмотренного вами – приближенной.

6. Поясните на примере инерционного звена, как получить разностное рекуррентное уравнение для расчета реакции  $y(t)$  звена на линейно нарастающее воздействие  $x(t) = A \cdot t \cdot 1(t)$ . Является ли моделирование процесса  $y(t)$  точным его воспроизведением? Ответ прокомментируйте на конкретных примерах.

7. В каких единицах выражаются коэффициенты передачи  $K$  и  $K_v$  инерционного и интегрирующего звеньев? Сопоставьте АЛАЧХ интегрирующего звена с  $K(p) = 1/pT_i$  и инерционного с  $K(p) = K/(pT + 1)$ . Что означает на практике их совпадение при  $\omega \gg \omega_c$ ? Какой следует выбрать постоянную времени  $T$  инерционного звена, чтобы оно как можно больше походило на интегрирующее? Поясните ответ с помощью АЛАЧХ.

8. Что такое частота среза АЧХ линейного динамического звена? Как рассчитать ее аналитически? Как, используя АЛАЧХ звена, приближенно оценить ее значение? Поясните это на примере звена с передаточной функцией:

$$\text{а) } \frac{10}{p(0.1p+1)}; \quad \text{б) } \frac{100}{(0.01p+1)^2}; \quad \text{в) } \frac{10}{(0.1p+1)(0.05p+1)}.$$

9. Оцените частотную полосу пропускания сложного ЛДЗ (по уровню единичного усиления), если передаточная функция звена описывается следующим выражением:

$$\text{а) } \frac{10p}{(p+1)(0.01p+1)}; \quad \text{б) } \frac{0.01 \cdot (10p+1)}{(0.01p+1)(0.1p+1)}; \quad \text{в) } \frac{10 \cdot (p+1)}{p(0.1p+1)}.$$

Оценку проведите по АЛАЧХ звена.

10. Постройте АЛАЧХ сложного линейного динамического звена с передаточной функцией:

$$a) \frac{p+10}{p^2+p};$$

$$б) \frac{0.1p+10}{p^2+11p+10};$$

$$в) \frac{100p}{p^2+20p+100}.$$

11. Постройте АЛФЧХ сложного линейного динамического звена с передаточной функцией:

$$a) \frac{p+10}{p+1};$$

$$б) \frac{10}{p^2+p};$$

$$в) \frac{p}{0.1p^2+1.1p+1}.$$

## 2. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ И МЕТОДИКЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Управление параметрами исследуемых звеньев систем радиоавтоматики

Исследование инерционных свойств линейных звеньев систем РА в рамках данной лабораторной работы осуществляется с использованием специального программного обеспечения: учебной прикладной программы "L2.exe".

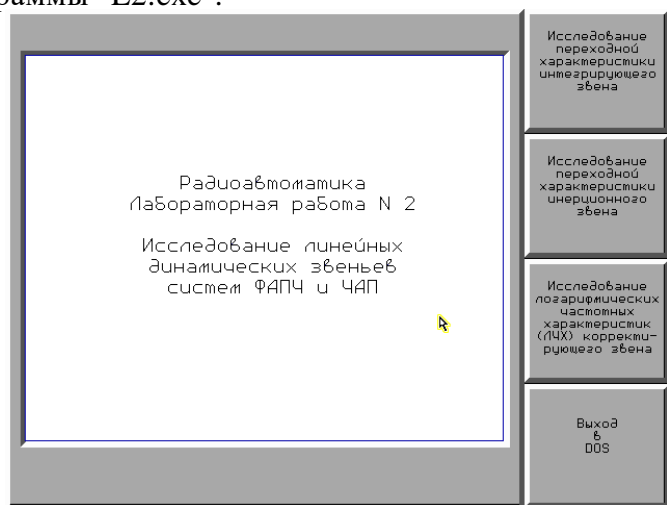


Рис. 2.1. Окно программы "L2.exe" после ее запуска

После запуска программы "L2.exe" на экране видеомонитора появится интерактивное окно приложения (рис. 2.1). Основную площадь окна приложения занимает рабочее поле, предназначенное для отображения переходных характеристик, а также ЛЧХ исследуемых радиоавтоматических звеньев. Непосредственно после запуска программы поле содержит только порядковый номер и название выполняемой работы. Справа от рабочего поля вертикально размещается главное меню программы, оформленное в виде палитры виртуальных кнопок, позволяющих произвести выбор необходимого раздела лабораторного исследования из трех доступных оператору. После нажатия кнопки, соответствующей выбранной позиции главного меню, появляется меню раздела. Именно с его помощью осуществляется управление параметрами исследуемых звеньев. Рассмотрим подробнее меню каждого раздела и соответствующие возможности программы.

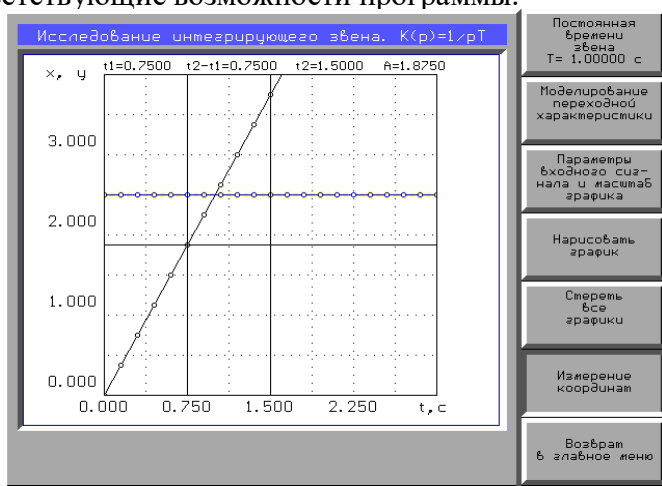


Рис. 2.2. Окно программы в режиме исследования переходной характеристики интегрирующего звена

На рис. 2.2 показан вид окна учебной программы при выборе первой позиции главного меню – исследования интегрирующего звена системы радиоавтоматики.

Значение постоянной времени  $T$  и интегрирующего звена устанавливается (изменяется) с помощью верхней кнопки меню. Вторая кнопка позволяет включать либо режим аналитического расчета переходной характеристики (по точной формуле), либо режим моделирования – численного расчета по рекуррентному разностному выражению, полученному из дифференциального уравнения звена методом Эйлера. Поскольку исследования свойств линейных звеньев основаны, прежде всего, на анализе их переходных характеристик, то программа позволяет с помощью меню раздела нарисовать (четвертая кнопка) или стереть (пятая кнопка) соответствующие графики.

Надписи, необходимые для распознавания позиций меню, сделаны прямо на кнопках. Поэтому в дальнейшем, если это не оговорено особо, пояснения о том, какую кнопку надо нажать для ввода нужного параметра или осуществления каких-либо действий, не даются!

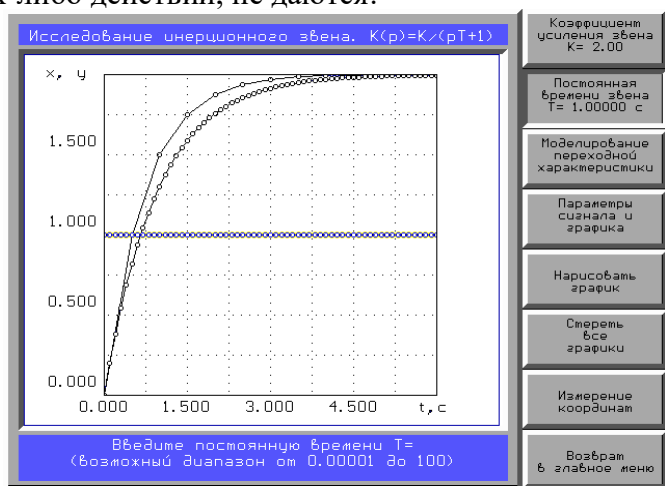


Рис. 2.3. Окно программы в режиме исследования переходной характеристики инерционного звена

Внешний вид окна программы в режиме исследования инерционного звена системы РА приведен на рис. 2.3. Отличительной особенностью меню в данном режиме

является наличие кнопки ввода коэффициента усиления звена на нулевой частоте.

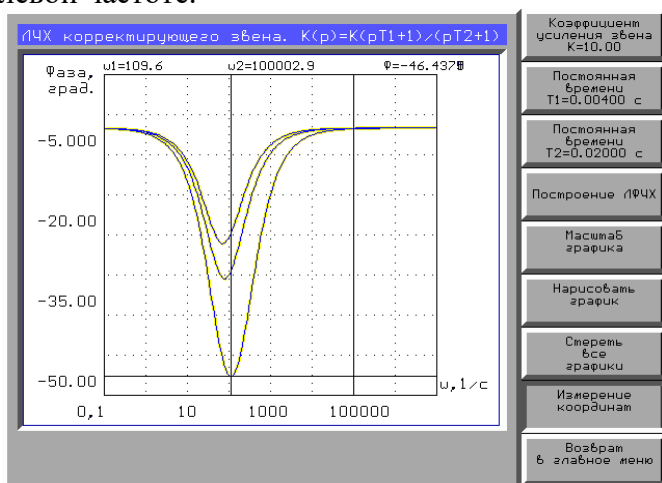


Рис. 2.4. Окно программы в режиме исследования ЛЧХ корректирующего звена

Окно программы в режиме исследования логарифмических частотных характеристик корректирующего звена показано на рис. 2.4. Первые три кнопки меню данного раздела предназначены для ввода параметров корректирующего звена (коэффициента усиления на нулевой частоте, постоянных времени). С помощью четвертой кнопки производится переключение режимов "Построение ЛАЧХ"/"Построение ЛФЧХ". Пятая кнопка активизирует дополнительное меню, единственным назначением которого является изменение масштаба оси ординат частотных характеристик.

## 2.2. Изменение параметров входного сигнала и графиков переходных характеристик звеньев

Масштаб графика построенной программой переходной характеристики при желании может быть изменен. Для этого следует нажать кнопку "Параметры входного сигнала и графика", после чего на экране взамен меню раздела появится

дополнительное меню (рис. 2.5). Активизируя третью (четвертую) кнопку дополнительного меню, можно установить требуемое максимальное значение по оси абсцисс (ординат) графика, то есть изменить масштаб отображаемого в поле программы графической зависимости.

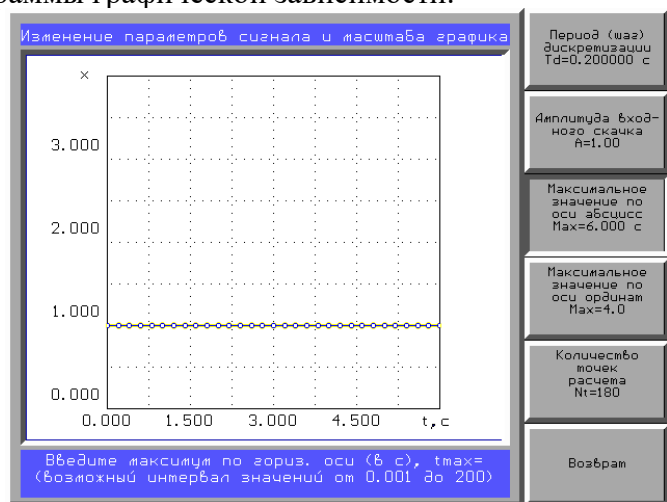


Рис. 2.5. Изменение параметров входного сигнала и графика переходной характеристики в программе

Помимо вариации масштаба графика дополнительное меню позволяет изменять качество отображаемых кривых переходного процесса путем установки корректных значений количества расчетных точек (пятая кнопка на рис. 2.5) и шага дискретизации (первая кнопка). Так как программа не производит автоматического обновления поля для графиков, то после изменения параметров графика следует "старую" картинку стереть и анализируемую кривую построить заново.

Учтите, что в режиме моделирования переходных характеристик инерционного звена значение шага (периода) дискретизации, устанавливаемое в дополнительном меню, не просто влияет на внешний вид переходных характеристик; оно существенным образом определяет точность их численного расчета, осуществляемого в процессе моделирования. Поэтому значение шага моделирования в упомянутом режиме должно

быть выбрано корректно – в соответствии с рекомендациями п.п. 1.6.

Сигнал, воздействующий на входе звена в режиме исследования его переходной характеристики, представляет собой ступенчатое воздействие вида  $A \cdot 1(t)$ . Единственным параметром входного сигнала является значение амплитуды  $A$  его скачка, которое можно изменить второй кнопкой меню на рис. 2.5. Возможные интервалы значений варьируемых параметров звеньев, входных сигналов и графических зависимостей, как правило, всегда индицируются внизу рабочего поля (при установке новых значений – рис. 2.3, 2.5).

### **2.3. Измерение координат точек графических зависимостей**

В процессе выполнения работы необходимо производить измерения координат отдельных точек переходных и частотных характеристик исследуемых динамических звеньев систем РА. В программе для этой цели имеется специальный режим измерения координат графиков. Его включение осуществляется лишь после появления на экране видеомонитора соответствующей графической зависимости путем нажатия кнопки «Измерение координат» меню раздела.

При нажатии кнопки «Измерение координат» на поле графика появляются две вертикальные и одна горизонтальная визирные линии, а над рабочим полем – информационная строка результатов измерений (см. рис. 2.2, 2.4). Положение обеих вертикальных визирных линий на оси абсцисс может изменяться. При этом их координаты указываются в начале информационной строки результатов измерений. Перемещение левой вертикальной визирной линии влево и вправо с мелким шагом осуществляется повторным нажатием клавиш "q" и "w" соответственно. При одновременном удержании одной из этих клавиш и клавиши "SHIFT" шаг перемещения линии будет увеличенным (в восемь раз по



отношению к изначальному). Аналогичным образом можно перемещать и правую вертикальную визирную линию (с помощью клавиш "e" и "r"). Положение горизонтальной визирной линии изменяется с помощью клавиш "↑" и "↓", при этом в информационную строку выводится значение, соответствующее ординате горизонтальной линии.

Таким образом, совмещая точку пересечения визирных линий с точками графических зависимостей, можно осуществлять необходимые измерения их декартовых координат. Отмену операции измерения координат можно осуществить нажатием клавиши "ESC" или "ENTER".

### **3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

#### **3.1. Исследование переходных процессов в интегрирующем звене системы радиоавтоматики**

##### **3.1.1. Расчет переходного процесса в интегрирующем звене**

Используя учебную прикладную программу "L2.exe" проведите точный расчет переходного процесса в интегрирующем звене при условии воздействия на его входе ступенчатого напряжения с разной величиной амплитуды скачка. Изначальное значение амплитуды  $A$  следует взять равным  $1.5 \cdot N_{\text{б}}$ , где  $N_{\text{б}}$  – номер варианта. Далее амплитуду скачка целесообразно уменьшить, например, до значения  $N_{\text{б}}$ , а затем увеличить – до  $2 \cdot N_{\text{б}}$ . Постоянную времени интегрирующего звена следует взять равной значению, рассчитанному в третьем домашнем задании. Значение шага дискретизации процессов в звене необходимо установить в соответствии с п. 1. 6.

В отчет по работе занесите необходимое число графических зависимостей. Прокомментируйте вид переходных характеристик интегрирующего звена. Сделайте вывод о влиянии амплитуды скачка на параметры переходной характеристики звена.

Выясните, каким образом влияет на переходную характеристику звена значение его постоянной времени. Для этого рассчитайте характеристику при увеличенном/уменьшенном вдвое значении  $T_{и}$ . Прокомментируйте полученные результаты.

### **3.1.2. Моделирование переходного процесса в интегрирующем звене**

Проведите точный расчет переходного процесса в интегрирующем звене. Не "стирая" расчетных кривых, осуществите моделирование переходной характеристики звена. Сопоставьте результаты моделирования и точного расчета переходной характеристики для одних и тех же исходных данных, в том числе и значении шага дискретизации. Сделайте соответствующие выводы.

Изменяя значение шага дискретизации процессов в меньшую и большую сторону по сравнению с изначально установленным, выявите степень его влияния на результаты моделирования. Обоснуйте теоретически выводы, полученные экспериментально.

## **3.2. Исследование переходных процессов в инерционном звене системы радиоавтоматики**

### **3.2.1. Расчет переходного процесса в инерционном звене**

Проведите точный расчет переходного процесса в инерционном звене при условии воздействия на его входе ступенчатого напряжения с разной величиной амплитуды скачка:  $A = 1.5 \cdot N_{\circ}$ ;  $N_{\circ}$ ;  $2 \cdot N_{\circ}$  ( $N_{\circ}$  – номер варианта). Параметры инерционного звена следует взять из третьего домашнего задания. Значение шага дискретизации процессов в звене установить точно в соответствии с п. 1.6. Необходимое число графических зависимостей занесите в отчет по работе. Для каждой кривой переходного процесса следует экспериментально измерить время установления процессов в звене.

Прокомментируйте вид переходных характеристик интегрирующего звена. Сделайте вывод о влиянии амплитуды скачка на параметры переходной характеристики звена: установившееся значение выходного напряжения, длительность переходных процессов.

Выясните, каким образом влияет на переходную характеристику звена значение его постоянной времени. Для этого рассчитайте характеристику и оцените время установления процессов при увеличенном/уменьшенном вдвое значении  $T$ . Прокомментируйте в отчете полученные результаты. Сделайте однозначные выводы.

Выясните, каким образом влияет на переходную характеристику звена значение его коэффициента усиления на нулевой частоте. Для этого рассчитайте характеристику и оцените ее установившееся значение, а также время установления процессов при увеличенном/уменьшенном вдвое значении  $K$ . Прокомментируйте в отчете полученные результаты. Сделайте однозначные выводы.

Окончательные выводы должны содержать экспериментально подтвержденную информацию, позволяющую, как минимум, дать ответы на следующие вопросы:

- 1) Влияет ли на длительность переходного процесса величина входного воздействия  $A$ ?
- 2) Как изменится время установления процессов в звене при увеличении постоянной времени  $T$  в два раза?
- 3) Что произойдет со значением  $t_{уст}$  при уменьшении коэффициента усиления звена  $K$  в два раза?

### **3.2.2. Моделирование переходного процесса в инерционном звене**

Проведите точный расчет переходного процесса в инерционном звене. Не уничтожая результатов расчетов, отображаемых на экране, осуществите моделирование переходной характеристики инерционного звена. Сопоставьте результаты моделирования и точного расчета переходной

характеристики для одних и тех же исходных данных, в том числе и значении шага дискретизации. Сделайте соответствующие выводы.

Изменяя значение шага дискретизации процессов в звене в меньшую и большую сторону по сравнению с изначально установленным, выявите степень его влияния на точность моделирования переходной характеристики.

Уменьшите постоянную времени звена вдвое, смоделируйте переходной процесс без изменения шага дискретизации, а затем с последующей коррекцией его значения. Сделайте выводы о необходимости коррекции шага дискретизации переходных процессов в инерционных звеньях при изменении параметров, влияющих на длительность процессов.

### **3.3. Исследование логарифмических частотных характеристик корректирующего звена системы радиоавтоматики**

#### **3.3.1. Точность асимптотических логарифмических частотных характеристик**

Исследуйте точность асимптотических логарифмических частотных характеристик корректирующего звена, рассчитанных в седьмом домашнем задании. Рассчитайте для этого точные ЛАЧХ и ЛФЧХ корректирующего звена с параметрами из таблицы. Сопоставьте расчетные характеристики с асимптотическими. Определите (измерьте) максимальные отклонения точных ЛАЧХ (ЛФЧХ) от асимптотических ЛАЧХ (ЛФЧХ), построенных при выполнении седьмого домашнего задания.

Необходимое число графиков следует занести в отчет и прокомментировать. Выводы по результатам исследования обязательны.

### 3.3.2. Шестое лабораторное задание. ЛЧХ звена при разных значениях соотношения $T_1/T_2$

Исследуйте влияние отношения постоянных времени  $q = T_1/T_2$  на ЛАЧХ и ЛФЧХ корректирующего звена.

Для грубой оценки влияния отношения  $q$  на частотные характеристики достаточно поменять местами значения  $T_1$  и  $T_2$  в выражении (1.2) и, воспользовавшись программой, построить новые ЛЧХ. Сопоставив их с соответствующими кривыми, полученными в пятом задании, можно сделать выводы о влиянии отношения постоянных времени  $q$ .

Дальнейшие исследования следует провести, увеличив (уменьшив) исходное значение  $q$  в несколько раз, например, на порядок. Выводы и комментарии по результатам исследования обязательны.

### 3.4. Определение частот среза систем радиоавтоматики

Постройте асимптотические логарифмические амплитудно-частотные характеристики разомкнутых линейных систем ФАП и ЧАП. Определите по построенным АЛАЧХ приближенно частоты среза  $\omega_{ср}$  их амплитудно-частотных характеристик.

Для выполнения задания следует воспользоваться указаниями по построению АЛАЧХ, приведенными выше, и применить их к передаточной функции последовательно соединенных звеньев систем:

для ФАП

$$K_p(p) = \frac{S_\Delta}{pT_\Delta + 1} \cdot \frac{K_K \cdot (pT_1 + 1)}{pT_2 + 1} \cdot \frac{S_p}{p}, \quad (3.1)$$

для ЧАП

$$K_p(p) = \frac{S_\Delta}{pT_\Delta + 1} \cdot \frac{K_K \cdot (pT_1 + 1)}{pT_2 + 1} \cdot S_p. \quad (3.2)$$

Обратите внимание на то, что одноименные параметры в этих выражениях ( $S_\Delta$ ,  $K_K$ ,  $S_p$ ) имеют различный смысл,

разную размерность. Числовые значения таких параметров, как  $S_{\Delta}$  и  $S_p$ , следует позаимствовать из предыдущей работы.

Найденные значения частот среза систем ФАП и ЧАП следует занести в таблицу результатов работы.

### **3.5. Результаты исследования линейных звеньев систем радиоавтоматики**

В таблицу занесите значения требуемых параметров и характеристик линейных звеньев систем радиоавтоматики, выявленных в результате проведенных Вами теоретических и экспериментальных исследований.

### **3.6 Контрольные вопросы**

1. Влияет ли коэффициент усиления линейного звена на полосу пропускания, определяемую частотой среза его АЧХ?

2. Какова максимальная величина отклонений асимптотических ЛАЧХ корректирующего звена от действительных? При каких отношениях  $q = T_1/T_2$  они больше/меньше?

3. При каких значениях отношения  $q = T_1/T_2$  имеют место положительные сдвиги (опережения) по фазе выходного сигнала корректирующего звена?

4. Как влияет уровень  $A$  скачка входного воздействия на время установления переходных процессов в инерционном звене?

5. Какие колебания (быстрые или медленные) одинаково воспроизводятся на выходах звеньев, обладающих передаточными функциями  $10/p$  и  $10/(p+1)$ ?

6. К каким последствиям может привести выбор шага моделирования процессов в динамическом звене слишком большим или слишком малым?

Итоговые результаты исследований линейных звеньев систем радиоавтоматики

Таблица 2

Наименование параметра или характеристики	Обозначение	Значение
1. Постоянная времени частотного дискриминатора	$T_{\Delta}$	
2. Постоянная времени фазового дискриминатора	$T_{\Delta}$	
3. Коэффициент усиления на нулевой частоте корректирующего звена системы ЧАП	$K_K$	
4. Коэффициент усиления на нулевой частоте корректирующего звена системы ФАП	$K_K$	
5. Электрические параметры корректирующего звена системы ЧАП	$R_1$ $C_1$ $R_2$ $C_2$	
6. Постоянная времени инерционного звена	$T$	
7. Постоянная времени интегрирующего звена	$T_{И}$	
8. Время установления процессов в инерционном звене	$t_{уст}$	
9. Время установления процессов в интегрирующем звене	$t_{уст}$	
10. Наибольший набег фазы в корректирующем звене при $q = T_1/T_2$ при $q = T_2/T_1$	$\Phi_{MAX}$	
11. Частота среза системы ФАП	$\omega_{CP}$	
12. Частота среза системы ЧАП	$\omega_{CP}$	

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / Соколов А.И., Юрченко Ю.С., - М.: Academia, 2010. -272 с.
2. Перов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / Перов А.И., Замолодчиков В.Н., Чиликин В.М., - М.: Радиотехника, 2014. - 320 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	1
1. Домашние задания и методические указания по их выполнению	2
1. 1. Первое домашнее задание	2
1.2. Второе домашнее задание	4
1. 3. Третье домашнее задание	6
1. 4. Четвертое домашнее задание	7
1. 5. Пятое домашнее задание	8
1. 6. Шестое домашнее задание	10
1. 7. Седьмое домашнее задание	11
1.8 Вопросы для самопроверки качества усвоения материала заданий и получения допуска к работе	15
2. Указания по технике и методике лабораторных исследований	17
2.1. Управление параметрами исследуемых звеньев систем радиоавтоматики	17
2.2. Изменение параметров входного сигнала и графиков переходных характеристик звеньев	20
2.3. Измерение координат точек графических зависимостей	22
3. Лабораторные задания и указания по их выполнению	23
3.1. Исследование переходных процессов в интегрирующем звене системы радиоавтоматики	23
3.1.1. Расчет переходного процесса в интегрирующем звене	23



3.1.2. Моделирование переходного процесса в интегрирующем звене	24
3.2. Исследование переходных процессов в инерционном звене системы радиоавтоматики	24
3.2.1. Расчет переходного процесса в инерционном звене	24
3.2.2. Моделирование переходного процесса в инерционном звене	25
3.3. Исследование логарифмических частотных характеристик корректирующего звена системы радиоавтоматики	26
3.3.1. Точность асимптотических логарифмических частотных характеристик	26
3.3.2. Шестое лабораторное задание. ЛЧХ звена при разных значениях соотношения $T_1/T_2$	27
3.4. Определение частот среза систем радиоавтоматики	27
3.5. Результаты исследования линейных звеньев систем радиоавтоматики	28
3.6 Контрольные вопросы	28
Библиографический список	30

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ ФАПЧ И ЧАП

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторной работе № 2 по дисциплине  
«Радиоавтоматика» для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы» и направления  
11.03.01 «Радиотехника»

Составитель: Володько Александр Владиславович.

Компьютерный набор А.В. Володько.

Подписано к изданию 15.06.2019  
Уч. Изд.л. 1,9

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14.