

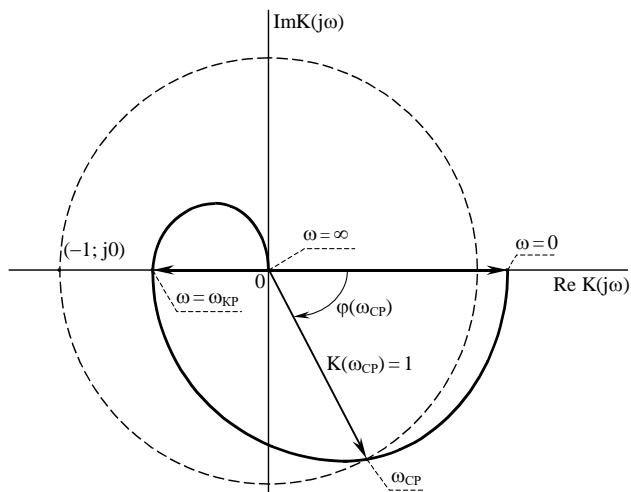
ФГОУ ВО  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе № 3 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 устойчивости систем радиоавтоматики: Методические указания к лабораторной работе №3 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. 40 с.

Работа содержит практические и лабораторные задания по разделам указанного курса, посвященным исследованию устойчивости устройств радиоавтоматики как систем с обратной связью, составлению математических моделей следящих систем и анализ их устойчивости. В методических указаниях содержатся необходимые для этого расчетно-методические материалы. Предназначено для студентов специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» дневной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Лабораторная работа №3.pdf»

Табл. 1. Ил. 15. 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

### **Цель работы:**

- закрепление теоретических знаний и приобретение практических навыков анализа устойчивости замкнутых систем радиоавтоматики по их линейным моделям с использованием критерия Найквиста;

изучение годографов элементарных динамических звеньев радиоавтоматических систем;

исследование влияния на устойчивость систем радиоавтоматики числа и параметров динамических звеньев в системе.

Работа предусматривает выполнение подготовительных и собственно лабораторных заданий. Выполнение подготовительных заданий не требует использования ЭВМ, а потому может быть произведено вне лаборатории (дисплейного класса). Лабораторные исследования осуществляются с использованием персонального компьютера типа и специализированного учебного программного обеспечения. Разработанная на кафедре учебная прикладная программа «L3.exe» обеспечивает построение годографов различных по структуре разомкнутых систем радиоавтоматики (вплоть до систем третьего порядка).

Работа состоит из двух частей. В первой части исследуются годографы элементарных линейных динамических звеньев и устойчивость простейших систем радиоавтоматики. Во второй части проводится исследование влияния на запас устойчивости систем радиоавтоматики первого порядка включения в их структурную схему дополнительных динамических звеньев. В заключение рассматривается устойчивость системы третьего порядка.

# 1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ

## 1.1 Задание первое

Составьте и занесите в отчет линеаризованные структурные математические схемы систем автоматической подстройки частоты (ЧАП и ФАП), рассмотренные на лекциях и приведенные в главе второй учебника [1]. При составлении структурных схем необходимо учесть:

- инерционность дискриминаторов;
- временную задержку сигналов в УПЧ радиоприемника;

- включить в схему корректирующее звено общего вида, согласующее на низких частотах диапазоны изменения выходного напряжения дискриминатора и управляющего напряжения перестраиваемого генератора (см. методические указания к лабораторно-практическому занятию № 2);

- управляемые генераторы следует считать безынерционными устройствами с линейными регулировочными характеристиками.

## 1.2 Задание второ.

В соответствии с полученными структурными схемами запишите выражения для передаточных функций и комплексных коэффициентов передачи разомкнутых следящих систем ЧАП и ФАП (виде произведений соответствующих функций последовательно соединенных элементарных звеньев первого порядка). Перечислите все имеющиеся в схемах элементарные линейные динамические звенья. Запишите их комплексные коэффициенты передачи в алгебраической и показательной формах.

При выполнении задания следует учесть следующие замечания.

**Замечание 1.** Как известно [1,2], элементарными линейными динамическими звеньями называются цепи, описываемые дифференциальными уравнениями первого

порядка, в передаточных функциях которых оператор дифференцирования «р» встречается не более, чем один раз. Например, линейное динамическое звено с передаточной функцией вида  $K(p) = 1/(pT + 1)$  является элементарным.

Напомним, что передаточная функция линейного звена  $K(p)$  представляет собой интегральное преобразование Лапласа импульсной характеристики звена  $h(t)$

$$K(p) = \int_0^{\infty} h(t) \cdot e^{-p \cdot t} dt. \quad (1)$$

Для справки ниже перечислены основные линейные динамические звенья и приведены их характеристики, используемые в данной работе.

**Замечание 2.** Переменная «р» в аналитических выражениях передаточных функций часто понимается в двух смыслах:

- как оператор дифференцирования  $p = d/dt$  в аналитических выражениях вида  $y(t) = K(p)\{x(t)\}$ , означающих воздействие оператора  $K(p)$  на сигнал  $x(t)$ ;

- как комплексная частота  $p = \sigma + j\omega$  [1/с], характеризующая скорость изменения амплитуды ( $\sigma$ ) и фазы ( $\omega$ ) некоторого экспоненциального испытательного сигнала  $x(t) = e^{p \cdot t} = e^{(\sigma + j\omega) \cdot t}$ , подаваемого на вход исследуемого звена [4].

Для записи комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  звена по его передаточной функции  $K(p)$  достаточно заменить в выражении последней переменную «р» на « $j\omega$ », то есть принять  $\sigma = 0$ ,  $p = j\omega$ . Такой заменой мы предопределяем, что, используя  $K(j\omega)$  как характеристику звена, не будем рассматривать задач о прохождении через это звено сигналов с переменной амплитудой, а ограничимся рассмотрением прохождения через него только строго гармонических сигналов (косинусоид), форма которых характеризуется одним параметром – скоростью нарастания  $\omega$  мгновенной фазы  $\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$ . Символ « $j$ » в выражении комплексной частоты

(скорости изменения) сигнала  $p = \sigma + j\omega$  можно понимать как символ, препятствующий неправомерному сложению двух скоростей, относящихся к различным «частям» сигнала: к огибающей сигнала ( $\sigma$ ) и к «внутреннему его заполнению» ( $\omega$ ).

**Замечание 3.** Комплексный коэффициент передачи звена или в целом линейной радиоавтоматической системы можно представить в алгебраической форме:

$$K(j\omega) = \operatorname{Re} K(j\omega) + j \operatorname{Im} K(j\omega), \quad (2)$$

где  $\operatorname{Re}K(j\omega)$  и  $\operatorname{Im}K(j\omega)$  – действительная и мнимая части комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega)$ . С другой стороны, его можно записать в экспоненциальной форме:

$$K(j\omega) = |K(j\omega)| \cdot \exp(j \arg K(j\omega)) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3)$$

где  $K(\omega)$  – модуль комплексного коэффициента передачи или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) звена, а  $\varphi(\omega) = \arg K(j\omega)$  – аргумент  $K(j\omega)$  или фазо-частотная характеристика (ФЧХ) звена.

При нахождении модуля дробно-рациональных функций комплексного переменного, какими чаще всего являются комплексные коэффициенты передачи  $K(j\omega)$  звеньев и систем радиоавтоматики, следует использовать известные свойства комплексных чисел: модуль дроби равен модулю ее числителя, деленному на модуль знаменателя; модуль произведения равен произведению модулей сомножителей. Например, модуль комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega) = K/(j\omega T + 1)$  целесообразно искать как

$$K(\omega) = |K(j\omega)| = \frac{|K|}{|j\omega T + 1|} = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}, \quad (4)$$

не переходя к прямой алгебраической записи вида

$$K(j\omega) = \operatorname{Re}K(j\omega) + j \operatorname{Im}K(j\omega).$$

**Замечание 4.** Аргумент комплексного коэффициента передачи дробно-рациональных функций удобно определять как разность аргумента числителя и знаменателя этой функции  $K(j\omega)$ . Однако следует помнить, что аргументом

комплексного числа  $c = a + jb$  является число  $\arg(c) = \arctg(b/a) = \text{Arctg}(b/a) + \pi \cdot n$ , неоднозначно определяемое даже на интервале  $[0; 2\pi]$ , для которого возможны несколько значений целого числа  $n$ , а именно  $n = 0$  или  $\pm 1$ . В частности, комплексные числа  $c = a + jb$  и  $d = -a - jb$  имеют одно и то же главное значение арктангенса, равное  $\text{Arctg}(b/a)$ . Однако их аргументы (фазовые углы) различны, так как соответствующие им точки лежат на комплексной плоскости в разных квадрантах: у числа  $c$  в первом, а у  $d$  – в третьем, как показано на рис. 1. Поэтому фазу первого числа следует принять равной  $\varphi_c = \text{Arctg}(b/a)$ , а фазу второго –  $\varphi_d = \text{Arctg}(b/a) + \pi$ .

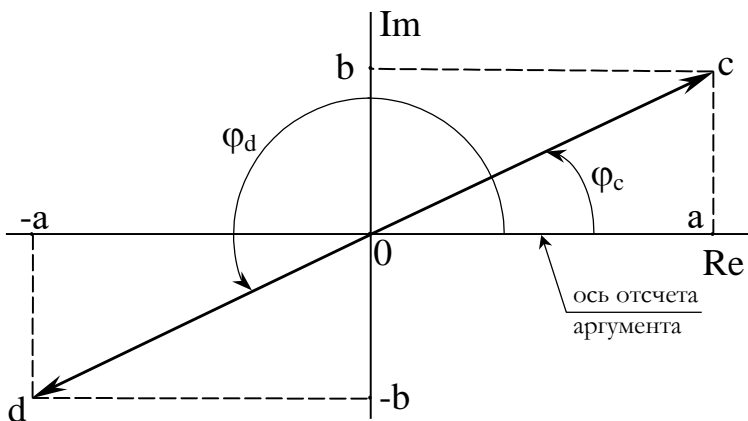


Рис. 1. Определение аргумента комплексных чисел

При его определении используйте алгебраическую форму записи  $K(j\omega)$ , уточняя по ней, в каком квадранте на комплексной плоскости отображается комплексное значение  $K(j\omega)$ . Для уяснения отмеченной трудности в определении ФЧХ звеньев обратите особое внимание на ФЧХ рассматриваемого ниже консервативного звена с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{K_0}{pT - 1}. \quad (5)$$

Ознакомившись с приведенными замечаниями, выполните второе задание. При этом рекомендуется использовать приведенную ниже классификацию простейших линейных динамических звеньев.

**Пропорциональное (безынерционное) звено.**

Передаточная функция звена  $K(p) = K_0$ , где  $K_0$  – коэффициент усиления. Комплексный коэффициент передачи  $K(j\omega) = K_0$ . Усиление звена на всех частотах постоянно и равно  $K_0$ , а набег фазы отсутствует:  $\varphi(\omega) = 0$ . Коэффициент  $K_0$ , в общем случае, может быть безразмерной величиной (коэффициентом пропорциональности, усиления или ослабления), а также иметь размерность соответствующего преобразования сигнала, например, он может иметь смысл крутизны дискриминационной характеристики  $S_d$  или регулировочной характеристики перестраиваемого генератора  $S_p$ . В этих случаях его размерность будет определяться соответственно В/кГц и кГц/В.

**Инерционное звено.**

Передаточная функция инерционного звена

$$K(p) = \frac{K_0}{pT + 1}, \quad (6)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления сигнала на нулевой частоте;  $T$  – постоянная времени звена. Комплексный коэффициент передачи звена

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{j\omega T + 1} = \frac{K_0}{\omega^2 T^2 + 1} - j \frac{\omega T \cdot K_0}{\omega^2 T^2 + 1}. \quad (7)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи инерционного звена равен



$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}, \quad (8)$$

а набег фазы в звене на частоте  $\omega$  (ФЧХ) –

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T). \quad (9)$$

Из выражения (7) и рис. 2 видно, что в качестве аргумента комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  инерционного звена следует взять главное значение арктангенса отношения  $\text{Im}K(j\omega)/\text{Re}K(j\omega)$ .

Для того, чтобы подчеркнуть важность этого уточнения (см. замечание 4), сравним характеристики инерционного звена с характеристиками звена с передаточной функцией (5). Его комплексный коэффициент передачи описывается формулой:

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{j\omega T - 1} = -\frac{K_0}{\omega^2 T^2 + 1} - j \frac{\omega T \cdot K_0}{\omega^2 T^2 + 1}. \quad (10)$$

Это звено имеет ту же АЧХ (8), что и инерционное звено. Главное же значение аргумента его комплексного коэффициента передачи определяется как

$$\varphi(\omega) = -\arctg(-\omega T) = \arctg(\omega T). \quad (11)$$

Может показаться, что рассматриваемое звено имеет ФЧХ, отличающуюся от ФЧХ инерционного звена только знаком. Однако это не так, в чем легко убедиться, обратив внимание на алгебраическую форму записи его комплексного коэффициента передачи (10). Из этого выражения следует, что все значения  $K(j\omega)$  при любых положительных частотах  $\omega$  отображаются в третьем квадранте комплексной плоскости, и фазовый набег при изменении частоты  $\omega$  от нуля до бесконечности меняется от  $-\pi$  до  $-\pi/2$ , как показано на рис. 3. Отсюда следует, что ФЧХ этого звена  $\varphi(\omega) = -\pi + \arctg(\omega T)$ .

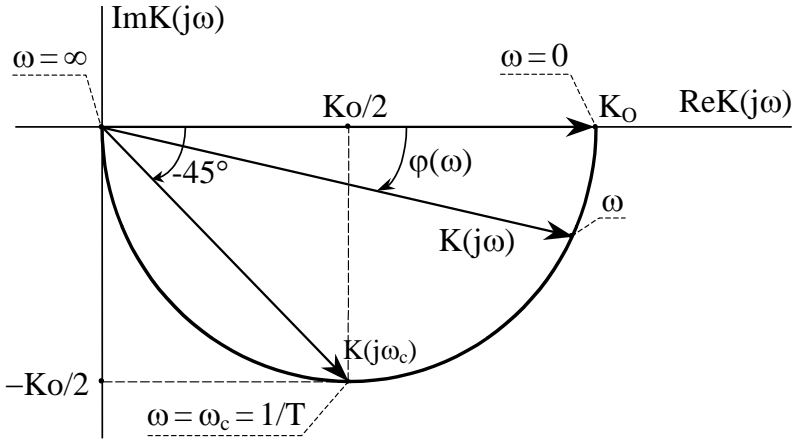


Рис. 2. Годограф инерционного звена

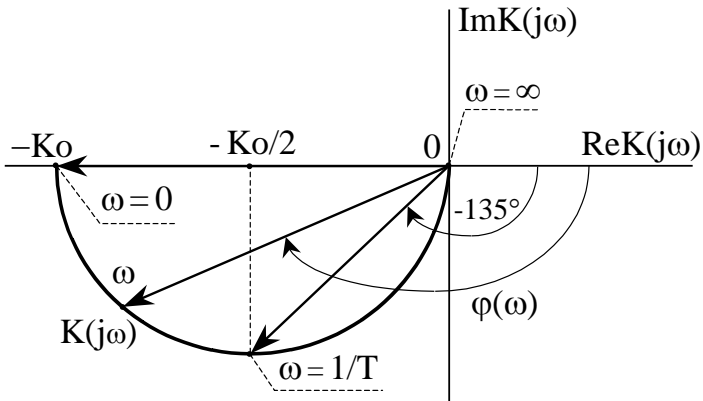


Рис. 3. Годограф консервативного звена

**Замечание 5.** Из рассмотренного примера видно, что если задана только АЧХ некоторого неизвестного звена, то однозначно определить ФЧХ этого звена, а значит и его комплексный коэффициент передачи, невозможно. В частности, АЧХ вида

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}} \quad (12)$$

имеет и инерционное звено с ФЧХ  $\varphi(\omega) = -\arctg(\omega \cdot T)$ , и звено с фазо-частотной характеристикой  $\varphi(\omega) = -\pi + \arctg(\omega \cdot T)$ . Очевидно, что АЧХ того же вида (12) имеет и звено с комплексным коэффициентом передачи вида  $K(j\omega) = K/(1 - j\omega T)$ .

Однозначно определить ФЧХ по заданной АЧХ можно только для так называемых минимально-фазовых звеньев, передаточные функции которых не имеют нулей в правой полуплоскости комплексной плоскости переменной «р» [4]. Однако для того, чтобы установить тип звена необходимо знать его передаточную функцию, а не только АЧХ.

**Форсирующее звено.** Передаточная функция такого звена описывается как

$$K(p) = K_0 \cdot (pT + 1), \quad (13)$$

где  $T$  – постоянная времени. Комплексный коэффициент передачи звена

$$K(j\omega) = K_0 \cdot (j\omega T + 1). \quad (14)$$

Усиление форсирующего звена  $K(\omega) = K_0 \cdot \sqrt{\omega^2 T^2 + 1}$ , а набег фазы в звене

$$\varphi(\omega) = \arctg(\omega T). \quad (15)$$

Нетрудно убедиться, что такую же ФЧХ имеет звено с комплексным коэффициентом передачи вида  $K(j\omega) = K/(1 - j\omega T)$ . (Сравните также выражение для ФЧХ (15) с выражением (9))

**Дифференцирующее звено** Передаточная функция этого звена равна

$$K(p) = pT, \quad (16)$$

где  $T$  – постоянная дифференцирования. Комплексный коэффициент передачи –  $K(j\omega) = j\omega T$ . Усиление сигнала в звене определяется как  $K(\omega) = \omega T$ , а набег фазы –  $\varphi(\omega) = +\pi/2$  в сторону опережения входного сигнала выходным.

### **Звено идеального запаздывания (задержки).**

Передаточная функция звена

$$K(p) = e^{-p \cdot T_3}, \quad (17)$$

где  $T_3$  – время задержки сигнала. Комплексный коэффициент передачи звена  $K(j\omega) = e^{-j\omega T_3}$ , а усиление звена на любых частотах  $K(\omega) = 1$ . Набег фазы в звене  $\varphi(\omega) = -\omega T_3$ .

### **Интегрирующее звено.**

Передаточная функция интегрирующего звена

$$K(p) = K_V/p = 1/(pT_{II}), \quad (18)$$

где  $K_V$  [1/с] – добротность интегрирующего звена, а  $T_{II} = 1/K_V$  – постоянная интегрирования. Комплексный коэффициент передачи звена  $K(j\omega) = K_V/j\omega$ . Усиление гармонического сигнала в звене на частоте  $\omega$  равно  $K(\omega) = K_V/\omega$ , а набег фазы –  $\varphi(\omega) = -\pi/2$  для сигналов любой частоты  $\omega$ .

### **1.3. Задание третье**

По положению полюсов передаточных функций элементарных динамических звеньев сделайте заключение об их собственной устойчивости.

Определите, какие из описанных выше звеньев являются устойчивыми, какие – нейтральными, а какие – неустойчивыми. Зафиксируйте это в отчете по лабораторной работе.

## **2. УКАЗАНИЯ ПО МЕТОДИКЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### ***Управление параметрами исследуемых систем радиоавтоматики.***

Учебная прикладная программа «L3.exe» позволяет строить и анализировать годографы разомкнутой линейной системы третьего порядка с передаточной функцией вида

$$K(p) = \frac{K_0 \cdot (pT_1 + 1) \cdot \exp(-pT_3)}{p \cdot (pT_2 + 1) \cdot (pT_D + 1)}. \quad (19)$$

Для функционирования учебной программы «L3.exe» необходимо следующее аппаратное и программное обеспечение:

- аппаратура – персональный компьютер фирмы IBM; видеомонитор; координатное устройство ввода типа «мышь»;
- программное обеспечение – Windows XP и выше.

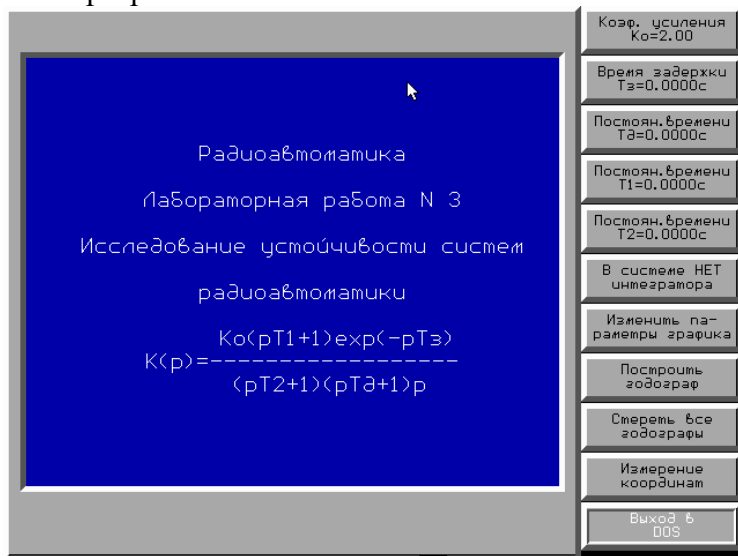


Рис. 4. Окно программы «L3.exe»

После запуска программы на экране видеомонитора появится окно приложения (см. рис. 4). Основную площадь окна занимает рабочее поле программы, предназначенное для визуализации годографов Найквиста исследуемых систем радиоавтоматики. Непосредственно после запуска поле содержит лишь информацию о номере и названии выполняемой лабораторной работы. В правой части окна вертикально размещается главное меню программы, оформленное в виде палитры виртуальных кнопок. С помощью пяти верхних кнопок меню Вы сможете установить (изменить) значение соответствующего параметра звена исследуемой системы. Шестая кнопка позволяет ввести в

схему следящей системы один интегратор. Надписи, необходимые для распознавания позиций меню, сделаны прямо на кнопках (рис. 4). Поэтому в дальнейшем, если это не оговорено особо, пояснения о том, какую кнопку надо нажать для ввода нужного параметра, не даются.

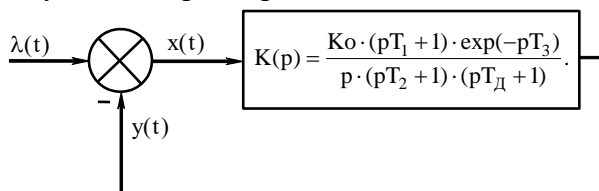


Рис. 5. Обобщенная математическая схема следящей системы

Структурная математическая схема анализируемой следящей системы радиоавтоматики приведена на рис. 5. Поскольку в основе оценки устойчивости следящих систем в данной работе лежит частотный критерий Найквиста, то программа позволяет с помощью описанной выше палитры кнопок нарисовать (восьмая кнопка) или стереть (девятая кнопка) изображения годографов.

При нажатии восьмой кнопки (равно как и после непосредственного ввода любого из параметров системы) в рабочем поле программы появляется система прямоугольных координат для построения годографов Найквиста (см. рис. 6). По горизонтальной оси системы координат откладывается значение действительной части  $\text{Re}K(j\omega)$  комплексного коэффициента передачи изучаемой разомкнутой системы радиоавтоматики, а по вертикальной – мнимой части  $\text{Im}K(j\omega)$ . Система координат для удобства визуального нахождения точек годографа, соответствующих единичным коэффициентам передачи радиоавтоматической системы, снабжена окружностью единичного радиуса. Кроме того, на экране должна быть видна метка в точке с координатами  $(2; 0j)$ .

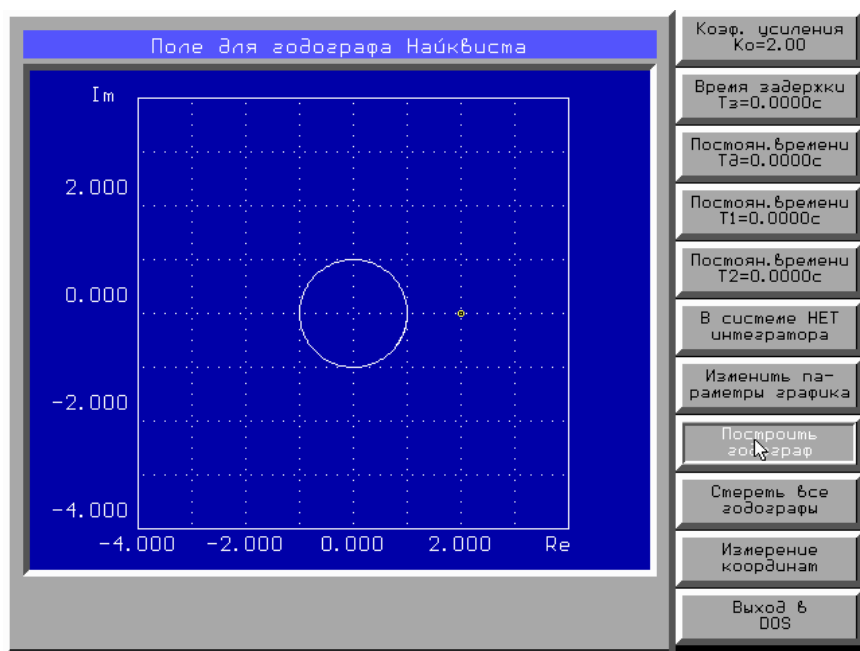


Рис. 6. Рабочее поле программы «L3.exe» в режиме построения годографа

### ***Изменение параметров графика, отображающего годограф***

Масштаб графика построенного программой годографа при желании может быть изменен. Для этого следует нажать кнопку «Изменить параметры графика», после чего на экране взамен основного появится дополнительное меню (см. рис. 7). Нажав четвертую кнопку дополнительного меню, Вы перейдете в режим установки максимального значения по осям графика, значение которого необходимо ввести нажатием клавиши «ENTER». После чего следует вернуться в главное меню путем активизации соответствующей кнопки.

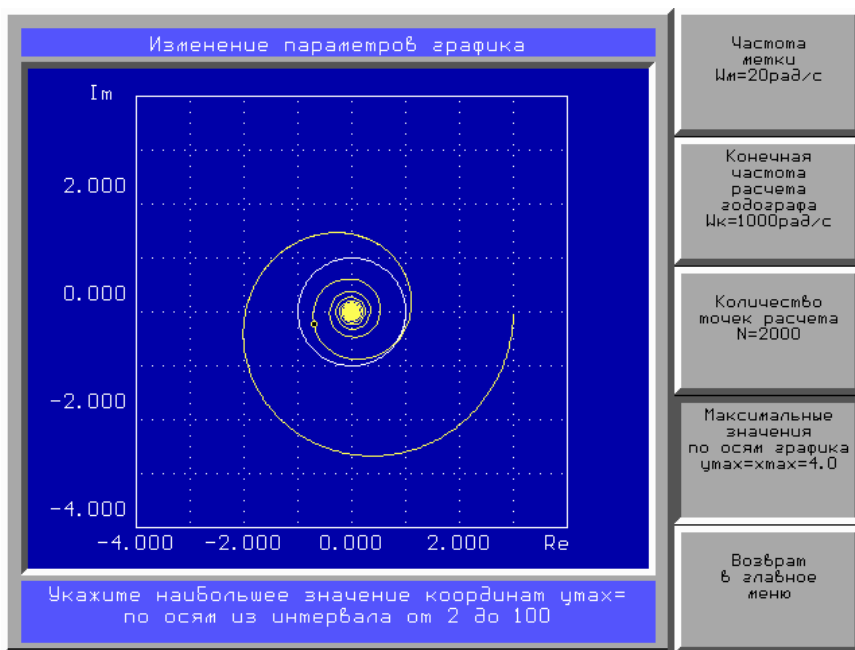


Рис. 7. Изменение параметров графика в программе «L3.exe»

Помимо вариации масштаба графика дополнительное меню программы «L3.exe» позволяет изменять качество отображаемого годографа путем установки корректных значений количества расчетных точек (третья кнопка на рис. 7) и конечной частоты расчета годографа (вторая кнопка). Подобные действия целесообразны, поскольку установленные по умолчанию значения соответствующих параметров графика годографа, зачастую могут не удовлетворять требуемому качеству визуализации. Так как программа не производит автоматического обновления поля для годографа после изменения параметров графика, то следует «старую» картинку стереть и анализируемый годограф построить заново.



### ***Определение частот, соответствующих точкам годографа***

Определение частот, которым соответствует та или иная точка годографа, осуществляется с помощью метки, перемещаемой по годографу путем изменения частоты метки в меню «Изменение параметров графика» (рис. 7). Так как частота метки  $\omega_m$  устанавливается нами (первая кнопка) и, следовательно, всегда известна, то, совмещая метку путем может быть неоднократного изменения  $\omega_m$  с исследуемой точкой годографа, можно достаточно точно определить частоту этой точки.

После пребывания в режиме «Измерение координат» значение частоты метки, как правило, выводится и индицируется в правом верхнем углу поля годографа. Учтите, что после каждого ее изменения необходимо кнопкой «Стереть все годографы», а затем заново «Построить годограф». Лишь после такой процедуры метка займет положение, определяемое «новым» значением частоты

### ***Измерение координат точек годографов***

В процессе выполнения работы необходимо производить измерения координат отдельных точек годографов исследуемых на устойчивость систем радиоавтоматики и их динамических звеньев. В программе «L3.exe» для этой цели имеется специальный режим измерения координат графиков. Его включение осуществляется лишь после появления на экране видеомонитора соответствующего годографа путем нажатия кнопки «Измерение координат» главного меню.

При нажатии кнопки «Измерение координат» на поле графика появляются две вертикальные и одна горизонтальная визирные линии, а над полем графика – информационная строка результатов измерений (см. рис. 8). Правая вертикальная визирная линия, находящаяся вблизи правого края поля графика, в данной работе не используется.

Положение левой вертикальной визирной линии на оси абсцисс может меняться. При этом ее координата указывается

в начале информационной строки результатов измерений. Таким образом, совмещая вертикальную визирную линию с любой точкой годографа, можно измерять значение действительной части комплексного коэффициента передачи  $ReK(j\omega)$  исследуемой разомкнутой системы.

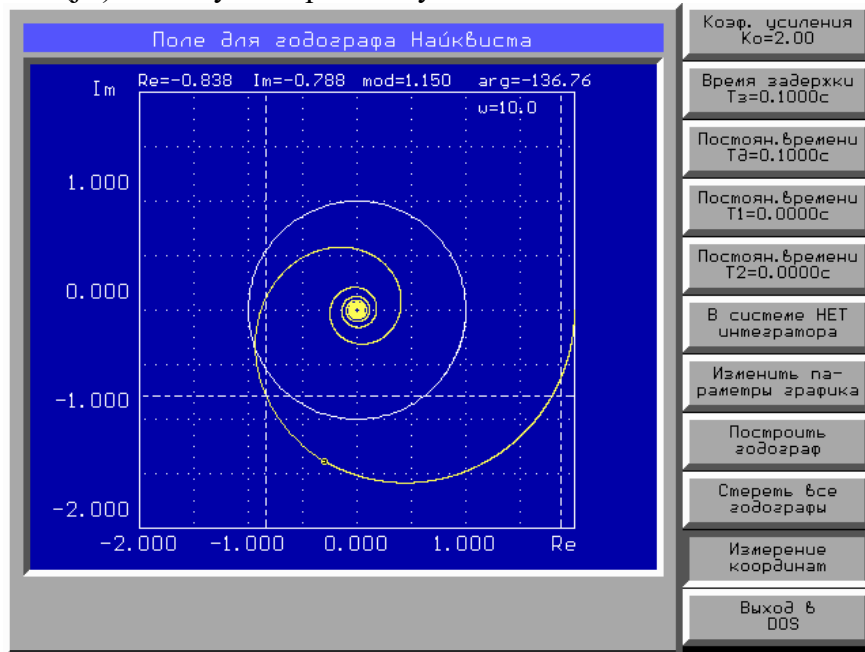


Рис. 8. Измерение координат годографа с помощью визирных линий

Перемещение левой вертикальной визирной линии влево и вправо с мелким шагом осуществляется повторным нажатием клавиш «q» и «w». При одновременном удержании одной из этих клавиш и клавиши “SHIFT” шаг перемещения линии будет увеличенным. Аналогичным образом можно перемещать и правую вертикальную визирную линию (с помощью клавиш «e» и «r»), но в данной работе этого не требуется. Положение горизонтальной визирной линии меняется с помощью клавиш «↑» и «↓», при этом в информационную строку выводится значение мнимой части

комплексного коэффициента передачи  $\text{Im}K(j\omega)$ , соответствующее ординате горизонтальной линии.

Величина модуля комплексного коэффициента передачи  $K(\omega) = |K(j\omega)|$  исследуемой системы радиоавтоматики, соответствующая точке пересечения вертикальной и горизонтальной визирных линий, а также условное значение аргумента комплексного коэффициента передачи  $\arg K(j\omega) = \arctg[\text{Im}K(j\omega)/\text{Re}K(j\omega)]$ , (в градусах) также выводятся в информационной строке.

Таким образом, совмещая точку пересечения визирных линий с точками годографа, можно осуществлять необходимые измерения его декартовых либо радиальных координат. Отмену операции измерения координат можно осуществить нажатием клавиши «ESC» или «ENTER».

### **3.ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ**

#### **3.1. Исследование годографов элементарных динамических звеньев и устойчивости простейших систем радиоавтоматики**

Исследование вопросов устойчивости линейных систем радиоавтоматики с помощью модели, изображенной на рис. 4 и имеющей передаточную функцию вида (19) с постоянными времени  $T_1, T_2, T_3, T_d$  отличными от нуля, несколько затруднительно. Поэтому в первой части работы предлагается провести исследование годографов элементарных звеньев, входящих в эту передаточную функцию в виде сомножителей, и освоить методику оценки запаса устойчивости простейших систем радиоавтоматики первого порядка по правилу Найквиста.

**Замечание 6.** Структурные математические схемы простейших систем радиоавтоматики представляют собой охваченные единичной отрицательной обратной связью элементарные линейные динамические звенья, как показано на рис. 9.

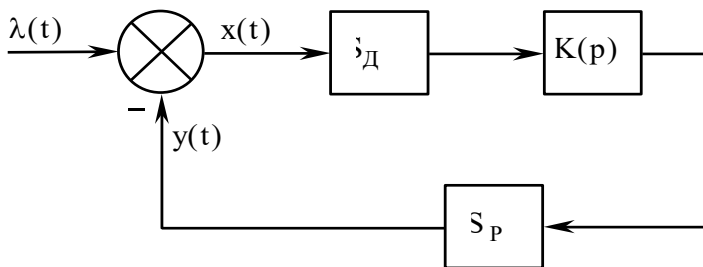


Рис. 9. Структурная математическая схема простейшей системы радиоавтоматики

Подобными схемами описываются, например, устройства частотной автоподстройки (ЧАП) при наличии в их схеме фильтра в виде инерционного звена с передаточной функцией  $K(p) = K/(pT + 1)$  или системы фазовой автоподстройки частоты (ФАП) без фильтра, в которых передаточная функция  $K(p) = K_v/p$ .

Крутизна дискриминационных характеристик  $S_D$  и регулировочных характеристик управляемых генераторов  $S_P$  объединена в программе с коэффициентами  $K$  и  $K_v$ , так что для систем с интегратором коэффициент усиления  $K_0 = S_D \cdot K_v \cdot S_P$ , а для систем с инерционным звеном –  $K_0 = S_D \cdot K \cdot S_P$ . Структурные схемы рассмотренных простейших систем имеют вид, представленный на рис. 10.

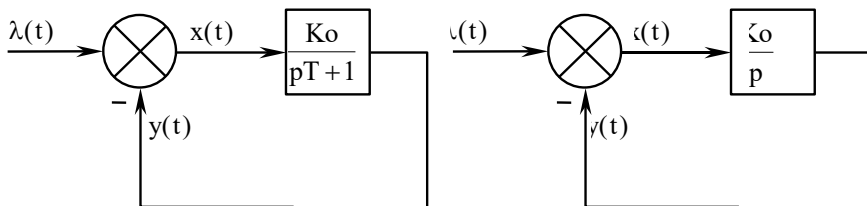


Рис. 10. Структурные схемы систем ЧАП и ФАП первого порядка

**Замечание 7.** Поскольку в лабораторной работе исследуются только системы с устойчивыми и нейтральными динамическими звеньями, то критерий устойчивости Найквиста может быть сформулирован следующим образом.

Если годограф разомкнутой линейной системы радиоавтоматики не охватывает точку с координатами  $(-1; j0)$ , то соответствующая этой системе замкнутая система, полученная путем замыкания единичной отрицательной обратной связью, будет устойчива.

Правило Найквиста применимо только тогда, когда порядок полинома числителя передаточной функции разомкнутой системы не превышает порядка полинома ее знаменателя.

**Замечание 8.** Как известно, годографом Найквиста (или чаще – просто годографом) называется линия, соединяющая концы радиусов-векторов, проведенных из начала комплексной системы координат в точки, соответствующие значениям комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  разомкнутой системы, определенным для различных значений частоты  $\omega$ . При этом предполагается, что частота изменяется от нуля до бесконечности.

Так как комплексный коэффициент передачи  $K(j\omega)$  разомкнутой системы представим в алгебраической форме (2), то годограф можно построить в прямоугольных координатах  $(\text{Re}K(j\omega); \text{Im}K(j\omega))$ , проводя для каждого значения частоты  $\omega$  вектор из начала координат в точку с координатами  $(\text{Re}K(j\omega); \text{Im}K(j\omega))$ . С другой стороны, записав комплексный коэффициент передачи в экспоненциальной форме (3), тот же годограф можно построить в полярной системе координат  $(K(\omega), \varphi(\omega))$ , откладывая для каждого значения частоты  $\omega$  радиус-вектор длиной  $K(\omega)$  под углом  $\varphi(\omega)$  от горизонтальной оси по ходу часовой стрелки при отрицательном значении угла  $\varphi(\omega)$  и против ее хода при положительном  $\varphi(\omega)$ . Соединив концы построенных векторов, получим кривую, называемую годографом.

Пример годографа разомкнутой системы радиоавтоматики третьего порядка с тремя одинаковыми инерционными звеньями представлен на рис. 11. Здесь же показана окружность единичного радиуса и радиусы-векторы

для трех характерных частот: нулевой  $\omega=0$ , частоты среза (единичного усиления)  $\omega = \omega_{CP}$  и критической частоты  $\omega = \omega_{KP}$ . Передаточная функция данной системы

$$K(p) = \frac{K_0}{(pT + 1) \cdot (pT + 1) \cdot (pT + 1)}. \quad (20)$$

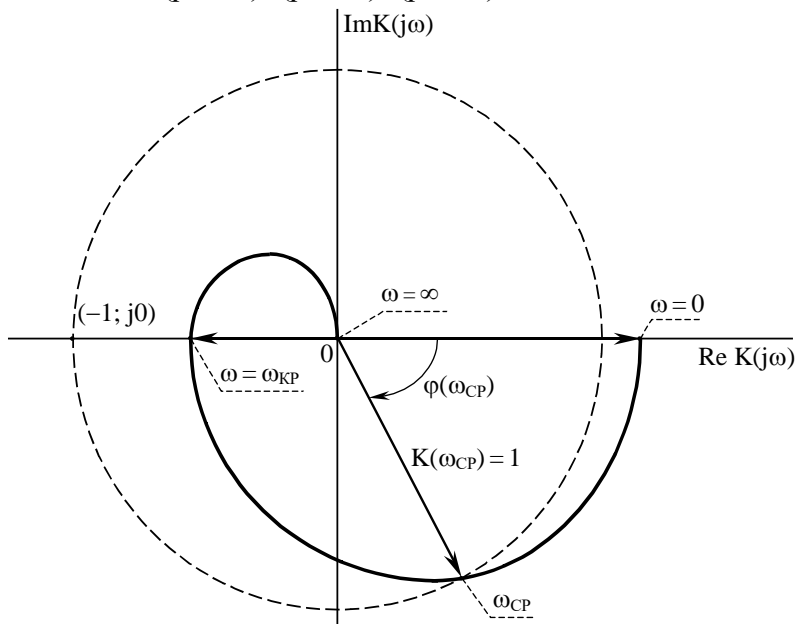


Рис. 11. Годограф разомкнутой системы третьего порядка

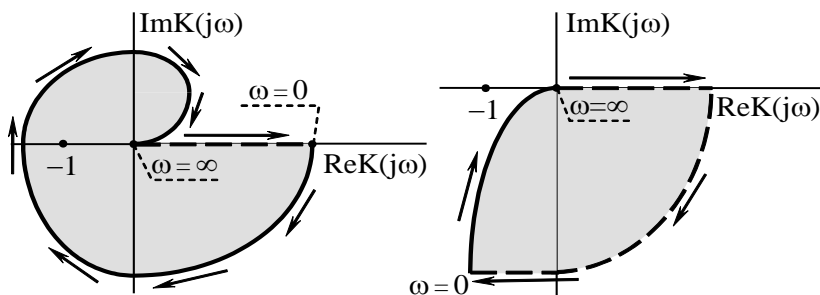


Рис. 12. Годографы неустойчивой и устойчивой систем радиоавтоматики

**Замечание 9.** При определении «охватываемости» годографом характерной точки  $(-1; j0)$  необходимо всегда следовать из начала координат комплексной плоскости вправо по оси действительных чисел, до точки начала годографа ( $\omega=0$ ) либо «до бесконечности». Далее следует «идти» по линии годографа, либо по окружности бесконечного радиуса до «встречи» с годографом, а затем по линии годографа к точке  $\omega=\infty$ , как это показано на рис. 12.

**Замечание 10.** В процессе работы необходимо уметь определять характерные точки годографа, соответствующие частоте среза и сопряжения амплитудно-фазовых характеристик, критической частоте, а также запасы устойчивости систем радиоавтоматики по фазе и усилению, допустимое время задержки сигнала в системе.

Уясните методику таких расчетов на примере анализа рассмотренной системы третьего порядка (годограф на рис. 11, передаточная функция – (20)). Занесите этот пример в отчет по работе.

**Пример анализа линейной системы радиоавтоматики третьего порядка**

Комплексный коэффициент передачи анализируемой системы с передаточной функцией, описываемой формулой (20), равен

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{(j\omega T + 1) \cdot (j\omega T + 1) \cdot (j\omega T + 1)} = \frac{K_0}{\left(\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}\right)^3} \cdot e^{-3j \cdot \arctg(\omega T)}. \quad (21)$$

Частота среза АЧХ  $\omega_{CP}$  (частота единичного усиления) разомкнутой системы вида рис. 5 определяется путем приравнивания модуля комплексного коэффициента передачи этой системы к единице и решения полученного таким образом уравнения относительно частоты  $\omega_{CP}$ :

$$\frac{K_0}{\left(\sqrt{\omega_{CP}^2 \cdot T^2 + 1}\right)^3} = 1, \quad (22)$$

откуда имеем

$$\omega_{\text{CP}} = \frac{\sqrt[3]{\sqrt{3}K_0^2 - 1}}{T}. \quad (23)$$

Набег фазы в системе на частоте среза соответственно равен

$$\varphi(\omega_{\text{CP}}) = -3 \cdot \text{arctg}(\omega_{\text{CP}} \cdot T) = -3 \cdot \text{arctg} \sqrt[3]{\sqrt{3}K_0^2 - 1}. \quad (24)$$

Запас устойчивости по фазе  $\varphi_{\text{ЗАП}}$  замкнутой системы определяется углом, дополняющим до  $180^\circ$  угол разворота вектора, соответствующего комплексному коэффициенту передачи разомкнутой системы на частоте среза  $K(j\omega_{\text{CP}})$ :

$$\varphi_{\text{ЗАП}} = \pi + \varphi(\omega_{\text{CP}}) = \pi - 3 \cdot \text{arctg} \sqrt[3]{\sqrt{3}K_0^2 - 1}. \quad (25)$$

Допустимое время задержки сигнала  $T_{\text{ЗДОП}}$  – время запаздывания сигнала в разомкнутой системе, способное «поглотить» ее запас устойчивости по фазе:

$$T_{\text{ЗДОП}} = \frac{\varphi_{\text{ЗАП}}}{\omega_{\text{CP}}} = \frac{(\pi - 3 \cdot \text{arctg} \sqrt[3]{\sqrt{3}K_0^2 - 1}) \cdot T}{\sqrt[3]{\sqrt{3}K_0^2 - 1}}. \quad (26)$$

Критическая частота  $\omega_{\text{КР}}$  – частота, для которой набег фазы в разомкнутой системе равен  $-\pi$ ; определяется из выражения

$$\varphi(\omega_{\text{CP}}) = -\pi, \text{ т.е. } -3 \cdot \text{arctg}(\omega_{\text{КР}} \cdot T) = -\pi, \quad (27)$$

$$\text{откуда } \omega_{\text{КР}} = \frac{\sqrt{3}}{T}. \quad (28)$$

Запас устойчивости системы радиоматематики по усилению  $\mu_{\text{ЗАП}}$  равен безразмерному коэффициенту, показывающему во сколько раз достаточно увеличить коэффициент усиления в разомкнутой системе на критической частоте, чтобы вывести систему из состояния устойчивости. Соответственно он рассчитывается как



$$\mu_{\text{ЗАП}} = \frac{1}{|K(j\omega_{\text{КР}})|} = \frac{\left(\sqrt{\omega_{\text{КР}}^2 \cdot T^2 + 1}\right)^3}{K_0} = \frac{8}{K_0}. \quad (29)$$

**Замечание 11.** В процессе выполнения лабораторно-практического занятия годографы систем радиоавтоматики и их динамических звеньев строятся «автоматически» с помощью описанной выше прикладной программы. Однако изображения радиусов-векторов на экране монитора не воспроизводятся. Это требует дополнения рисунков изображением векторов и нанесением на него характерных точек самими студентами. «Слепые» рисунки, механически перерисованные с экрана, не могут служить свидетельством выполненной работы.

### 3.2. Исследование влияния параметров динамических звеньев на их годографы и на устойчивость систем первого порядка. Изучение годографа пропорционального звена

С помощью меню программы установите значение коэффициента усиления  $K_0 = 2$ , а также следующие значения постоянных времени  $T_d = T_1 = T_2 = 0$  и времени запаздывания сигнала в разомкнутой системе  $T_3 = 0$ . Исключите из анализируемой схемы системы интегратор. Получите изображение годографа пропорционального (безынерционного) звена на мониторе.

Так как комплексный коэффициент передачи пропорционального звена  $K(j\omega) = K_0$  не зависит от частоты, то для всех частот от 0 до  $\infty$  векторы, соответствующие  $K(j\omega)$ , займут на комплексной плоскости одно и то же положение, начинаясь в нуле и заканчиваясь в точке  $(2; j0)$ . Очевидно, что в этой же точке будет находиться и конец вектора, помеченного меткой. Частота, соответствующая этому вектору, установлена по умолчанию равной 20 рад/с (см. п. 2.3).

Зарисуйте годограф пропорционального звена при заданном значении параметра  $K_0$ .

Измените значение коэффициента усиления звена  $K_0$ , установив его новое значение не большим четырех. Зарисуйте новый годограф звена.

Не забывайте наносить на графики годографов векторы, соответствующие частотам меток, и подписывать у их конца значения частоты. Оси комплексной системы координат в отчете проводите через нулевые значения координат, а не по краям рамки, как на экране компьютера.

В заключение данного пункта сформулируйте выводы.

### 3.3. Оценка устойчивости простейшей системы ЧАП по годографу инерционного звена

Установите значение коэффициента усиления инерционного звена для постоянного сигнала  $K_0=2$ , а его постоянную времени  $T_2$  примите равной значению, соответствующему вашему варианту в приведенной ниже таблице. Поскольку все другие параметры звеньев разомкнутой системы равны нулю, то ее структурная схема будет соответствовать схеме, представленной на рис. 10.

Исходные данные к работе

Номер варианта	Постоянная времени $T_1$ , с	Постоянная времени $T_2$ , с	Время задержки $T_3$ , с
1	0.01	0.15	0.01
2	0.01	0.10	0.02
3	0.05	0.10	0.03
4	0.05	0.50	0.04
5	0.01	0.50	0.05
6	0.05	0.50	0.06

Далее, прежде чем строить годограф простейшей системы ЧАП, рассчитайте характерные параметры ее годографа:

- ◆ частоту сопряжения логарифмической амплитудно-частотной характеристики звена  $\omega_C = 1/T_2$ ;
- ◆ частоту среза АЧХ звена ( $\omega_{CP}$ );
- ◆ фазовый угол  $\varphi(\omega)$  вектора единичной длины на частоте среза  $\omega_{CP}$ ;

- ◆ запас устойчивости по фазе  $\varphi_{\text{зап}}$  замкнутой системы;
- ◆ допустимое время запаздывания  $T_3$  доп сигнала в системе.

Постройте годограф системы ЧАП – инерционного звена с комплексным коэффициентом передачи  $K(j\omega) = K_0/(j\omega T_2 + 1)$ . При остановке конца годографа далеко от точки начала координат, в которую он теоретически должен прийти при  $\omega = \infty$ , перейдите в режим «Изменить параметры графика» и увеличьте конечную частоту расчетов  $\omega_K$  (см. п. 2.2). Если на экране монитора годограф выглядит не плавным, а состоящим из отрезков прямой, то увеличьте число точек  $N$  годографа в режиме «Изменить параметры графика» (см. п. 2.2).

Зарисуйте годограф в отчет по работе. Постройте на плоскости годографа вектор для частоты  $\omega = 0$ , вектор единичной длины, а также вектор, соответствующий фазовому углу, равному  $-\pi/4$  радиан. Очевидно, что первый из них будет располагаться на действительной оси  $\text{Re}K(j\omega)$ , второй – упираться концом в точку пересечения годографа с единичной окружностью, а третий – в наинизшую точку годографа с координатами  $(K_0/2; -K_0/2)$ .

Меняя положение метки на комплексной плоскости путем изменения частоты метки (см. п. 2.3), последовательно совместите ее с концами указанных векторов и проставьте найденные экспериментальным образом частоты на графике годографа у концов соответствующих векторов. Убедитесь, что найденные частоты совпадают с теоретически рассчитанными.

Определите запас устойчивости по фазе  $\varphi_{\text{зап}}$  замкнутой системы с инерционным звеном (для чего используйте режим измерения координат точек годографа). Сопоставьте его с расчетным значением.

Докажите аналитически (расчетным образом) и экспериментально (с помощью модели), что ни форма годографа, ни запас устойчивости по фазе системы с инерционным звеном не зависит от постоянной времени  $T_2$ . С

этой целью увеличьте постоянную времени  $T_2$  вдвое по сравнению с изначально установленным значением. Постройте заново годограф звена и определите по нему частоты среза  $\omega_{CP}$  и сопряжения  $\omega_C$ . Занесите результаты в виде нового рисунка в отчет по работе. Вновь определите фазовый угол единичного вектора годографа на частоте среза и запас устойчивости по фазе  $\varphi_{зап}$ .

Рассчитайте допустимое время запаздывания сигнала  $T_{3 доп}$  для двух взятых значений постоянной времени  $T_2$ . Сделайте выводы о влиянии параметров системы на ее запас устойчивости.

### 3.4. Исследование годографа форсирующего звена

Установите  $K_0 = 0.5$  и значение постоянной времени  $T_1$  из таблицы 1. Остальные параметры системы положите равными нулю. Убедитесь в том, что интегратор выключен. Постройте годограф полученной системы, представляющей собой форсирующее звено с комплексным коэффициентом передачи  $K(j\omega) = K_0 \cdot (j\omega T_1 + 1)$ . Зарисуйте его.

Рассчитайте углы набега фазы и постройте вектора для частот  $\omega = 0$ ,  $\omega = \omega_C$  и  $\omega = \omega_{CP}$ , где  $\omega_C$ ,  $\omega_{CP}$  – частоты сопряжения и среза АЧХ. Настройте метку на эти частоты и убедитесь в правильности расчетов.

Установите наименее возможное в программе значение коэффициента  $K_0$ , а постоянную времени  $T_1$  – наибольшей. В этом случае форсирующее звено будет близко по своим свойствам к дифференцирующему, так как в широком диапазоне частот  $\omega$  действительная часть комплексного коэффициента передачи существенно меньше мнимой:  $\text{Re}K(j\omega) \ll \text{Im}K(j\omega)$ . Постройте годограф этого звена с  $K(j\omega) \approx j\omega K_0 T_1$ . Настройте метку на частоты 5 и 10 рад/с. Зарисуйте годограф и нанесите на рисунок векторы для этих частот. Определите их фазовые углы.

### **3.5. Исследование годографа звена идеальной задержки (запаздывания)**

Установите постоянные времени  $T_D = T_1 = T_2 = 0$ . Коэффициент усиления введите равным  $K_0 = 2$ , а значение времени запаздывания звена  $T_3$  возьмите из таблицы 1. Постройте годограф звена идеальной задержки.

Рассчитайте частоты, на которых годограф звена пересекает координатные оси. Убедитесь с помощью перемещения меток, что эти частоты соответствуют значениям  $\omega_n = n \cdot \pi / (2T_3)$ , где  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Постройте самостоятельно фазо-частотную характеристику звена идеальной задержки.

Сформулируйте окончательные выводы.

### **3.6. Исследование устойчивости простейшей системы ФАП по годографу интегрирующего звена**

Предварительно рассчитайте при  $K_V = N_0 + 1$  ( $N_0$  – номер Вашего варианта задания) запас устойчивости по фазе  $\varphi$  замкнутой системы радиоавтоматики с одним интегратором. Рассчитайте допустимое время задержки  $T_{3\text{доп}}$  в такой системе. Покажите, как влияет добротность звена  $K_V$  на запас устойчивости системы по фазе и на допустимое время запаздывания сигнала в ней.

В программе установите значения всех временных констант звеньев модели равными нулю. Введите в систему интегрирующее звено. Установите значение коэффициента  $K_0$ , имеющего теперь смысл скорости интегрирования  $K_V$  [1/с], равное  $(N_0 + 1)$ . Постройте годограф интегрирующего звена с  $K(j\omega) = K_V / j\omega$ . Зарисуйте его. Определите экспериментально частоту среза  $\omega_{ср}$  и постройте соответствующий ей вектор. Оцените по годографу величину запаса устойчивости по фазе.

Полученные результаты анализа элементарных динамических звеньев следует использовать в последующих заданиях работы.

### **3.7. Исследование влияния дополнительных звеньев на устойчивость простейших систем радиоавтоматики**

В данной части работы предполагается, что Вам заданы своими структурными схемами системы первого порядка с интегратором или с инерционным звеном (см. рис. 10). Запасы устойчивости в таких системах Вами уже выявлены в предыдущей части работы. Теперь Вам следует установить, как повлияет на устойчивость этих систем радиоавтоматики введение в их структурные схемы дополнительных линейных динамических звеньев.

Введение дополнительных звеньев в схему системы радиоавтоматики является обычным приемом улучшения характеристик проектируемой системы. Наиболее распространенным является введение параллельного дифференцирования и последовательного интегрирования сигнала ошибки в системе. Поэтому необходимо хорошо представлять себе те последствия, к которым приводит подобные изменения схемы и, в частности, как они влияют на устойчивость системы.

Данная часть работы посвящена вопросам исследования влияния на устойчивость простейших систем радиоавтоматики введения в них дополнительных рабочих звеньев, а также звена идеальной задержки, имитирующего реальное запаздывание сигнала в системах.

Все графики в отчете, относящиеся к этой части работы должны содержать два сопоставляемых годографа, один из которых характеризует исходную систему, а второй – систему, дополненную указанным в задании звеном.

### **3.8. Исследование влияния дополнительных звеньев на устойчивость системы ЧАП первого порядка (с одним инерционным звеном)**

Для проведения такого исследования, прежде всего, выведите интегратор из схемы соответствующей кнопкой меню. Установите значение коэффициента усиления  $K_0 = 2$ , постоянную времени  $T_2$  – в соответствии с таблицей на с. 16, а

постоянные времени  $T_d$ ,  $T_1$  и  $T_3$  равными нулю. Очевидно, что в этом случае мы приходим к структурной схеме, показанной на рис. 10, и уже исследованной Вами в п. 3.2 настоящей работы.

### **3.9. Влияние введения звена идеальной задержки (имитация запаздывания сигнала в системе)**

Располагая ранее рассчитанным допустимым временем запаздывания  $T_{3 \text{ доп}}$  сигнала в замкнутой системе ЧАП первого порядка (с одним инерционным звеном), введите в схему системы звено идеальной задержки, характеризующееся значением времени задержки, равным расчетному  $T_{3 \text{ доп}}$ .

Постройте годограф системы с учетом запаздывания сигнала. Определите по годографу с помощью метки критическую частоту  $\omega_{кр}$  сигнала, удовлетворяющую уравнению

$$-\arctg \sqrt{K_0^2 - 1} - \omega_{кр} \cdot T_{3 \text{ доп}} = -\pi, \quad (30)$$

и убедитесь, что она совпадает с частотой среза  $\omega_{ср}$ , определяемой из уравнения

$$\left| \frac{K_0}{j\omega_{ср} \cdot T_2 + 1} \cdot e^{-j\omega_{ср} \cdot T_{3 \text{ доп}}} \right| = 1. \quad (31)$$

Сделайте вывод об устойчивости системы ЧАП при таком по величине запаздывании сигнала в системе.

### **3.10 Исследование влияния форсирующего звена (коррекция системы ЧАП методом параллельного дифференцирования сигнала ошибки)**

Введите в потерявшую устойчивость систему ЧАП дополнительно форсирующее звено с частотной характеристикой  $K(j\omega) = 1 + j\omega \cdot T_1$ . Очевидно, что это эквивалентно коррекции системы путем дополнительного дифференцирования сигнала ошибки, как показано на рис. 13. Установите значение постоянной времени форсирующего звена, исходя из соотношения  $T_1 < 0.25 \cdot T_2$ .

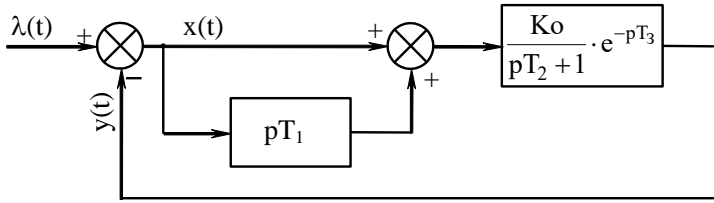


Рис. 13. Система ЧАП с дополнительным дифференцированием сигнала ошибки

Постройте годограф Найквиста получившейся скорректированной системы ЧАП. Оцените количественно, как повлияло на запас устойчивости системы введение в ее схему форсирующего звена (дифференциального корректора). Аргументируйте ответ значениями количественного изменения запаса устойчивости по фазе и величиной допустимого времени задержки.

Установите новое значение постоянной времени  $T_1$  формирующего звена, приняв  $T_1 > 0.3 \cdot T_2$ . Оцените устойчивость системы по вновь построенному годографу системы ЧАП.

Сделайте окончательные выводы о влиянии коррекции системы методом параллельного дифференцирования сигнала ошибки на устойчивость системы.

Исключите форсирующее звено из схемы, положив его постоянной времени  $T_1 = 0$ .

### 3.11. Определение запаса устойчивости по усилению в системе ЧАП

Возьмите время задержки  $T_3$  сигнала в системе ЧАП равным  $0.5 \cdot T_3 \text{ доп}$ , где  $T_3 \text{ доп}$  – допустимое время запаздывания сигнала в системе ЧАП первого порядка. Рассчитайте критическую частоту  $\omega_{\text{кр}}$ , приравняв фазовый набег в системе к  $180^\circ$ :

$$-\arctg(\omega_{\text{кр}} \cdot T_2) - \omega_{\text{кр}} \cdot T_3 = -\pi. \quad (32)$$



Поскольку аналитически решить такое уравнение не представляется возможным, используйте результаты графического способа решения, отображенного на рис. 14. Отыскав  $\omega_{кр}$ , рассчитайте величину запаса устойчивости системы по усилению  $\mu_{ЗАП} = 1/|K(j\omega_{кр})|$ .

Постройте годограф Найквиста системы ЧАП с указанным временем запаздывания. Проверьте правильность проведенных Вами расчетов по годографу. Для этого переместите метку в точку пересечения годографа с горизонтальной осью и выпишите частоту метки, на которой это произойдет. Используйте визирные линии, измерьте абсциссу точки с критической частотой, а также набег фазы в системе на частоте среза. Сделайте выводы о запасах устойчивости системы по амплитуде  $\mu_{ЗАП}$  и по фазе  $\varphi_{ЗАП}$ .

По окончании исследований выведите из системы звено идеального запаздывания, положив  $T_3 = 0$ .

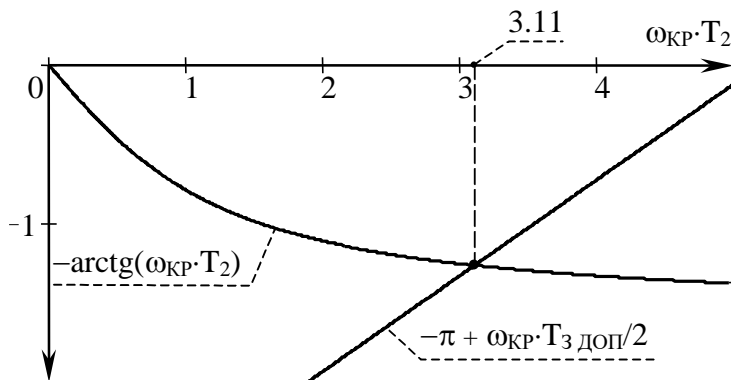


Рис. 14. К расчету критической частоты в системе ЧАП первого порядка с запаздыванием сигнала

### 3.12. Исследование влияния на простейшую систему ЧАП дополнительного интегрирующего звена

Рассмотренная система ЧАП первого порядка (с одним инерционным звеном) является так называемой статической системой, и поэтому даже при воздействии в виде скачка входного сигнала не может «отработать» до нуля

появляющуюся при этом ошибку. Более подробно эти особенности системы ЧАП обсуждаются в рамках следующего лабораторно-практического занятия. Для придания системе астатизма и уменьшения подобного рода динамических ошибок в нее вводят корректирующий интегратор сигнала ошибки так, как показано на рис. 15.

Введите в исследуемую систему ЧАП интегратор с комплексным коэффициентом передачи  $K(j\omega) = 1/(j\omega)$ . Все постоянные времени, кроме  $T_2$ , при выполнении этого задания должны быть равны нулю, в том числе не забудьте «отключить» звено идеального запаздывания. Постройте годограф. Зарисуйте его в отчете по работе.

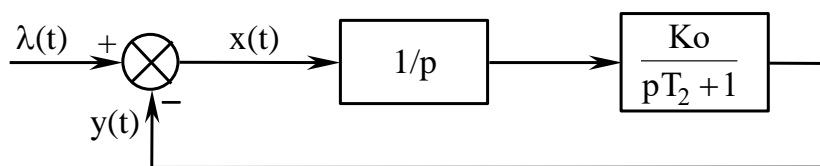


Рис. 15. Система ЧАП с дополнительным интегратором

Определите по годографу запас устойчивости по фазе  $\varphi_{зап}$  в получившейся замкнутой системе второго порядка. Сделайте вывод о том, как изменился запас устойчивости исходной системы после включения дополнительного интегрирующего звена.

Увеличьте вдвое постоянную времени  $T_2$  инерционного звена в анализируемой системе ЧАП. Прокомментируйте влияние ее величины на устойчивость системы. Исключите инерционное звено из схемы, положив  $T_2 = 0$ .

*Исследование влияния дополнительных звеньев на устойчивость системы ФАП первого порядка (с одним интегратором)*

Для формирования исходной системы ФАП первого порядка (см. рис. 10) включите интегратор. Примите равными нулю все временные параметры модели. Коэффициент  $K_0$

(добротность интегратора –  $K_0 = K_V$ ) установите равным ( $N_0 + 1$ ), где  $N_0$  – номер Вашего варианта задания.

### 3.13. Исследование влияния на систему ФАП звена идеальной задержки

Постройте годограф разомкнутой системы ФАП при отсутствии задержки сигнала в системе ( $T_3 = 0$ ). Зная частоту среза АЧХ  $\omega_{CP}$  и запас устойчивости по фазе  $\phi_{ЗАП}$  интегратора, рассчитайте допустимое время задержки  $T_{3\text{доп}}$  сигнала в системе.

Введите это значение времени задержки в программу. Тем самым Вы «включите с систему» звено идеального запаздывания. Постройте новый годограф на том же графике. Определите по годографу критическую частоту  $\omega_{КР}$  сигнала и убедитесь, что она совпадает с частотой среза АЧХ  $\omega_{CP}$  разомкнутой системы.

Возьмите время задержки  $T_3$  сигнала в системе равным  $0.5 \cdot T_{3\text{доп}}$ . Рассчитайте критическую частоту  $\omega_{КР}$ , исходя из соотношения

$$-\pi/2 - \omega_{КР} \cdot T_3 = -\pi, \quad (33)$$

и запас устойчивости по усилению  $\mu_{ЗАП} = 1/|K(j\omega_{КР})|$ , где соответственно  $K(j\omega) = K_V/j\omega \cdot \exp(-j\omega \cdot T_3)$ . Постройте годограф для исследуемой системы с временем запаздывания сигнала в системе  $T_3 = 0.5 \cdot T_{3\text{доп}}$ .

Проверьте, используя перемещаемую по годографу метку, правильность расчетов. Для этого поместите метку в точку пересечения годографа с горизонтальной осью и запишите частоту, на которой это произойдет. Сделайте выводы об устойчивости системы ФАП и запасах ее устойчивости по усилению  $\mu_{ЗАП}$  и по фазе  $\phi_{ЗАП}$ .

Все исследования необходимо проиллюстрировать рисунками годографов, проставляя на них характерные частоты, модули и фазы векторов.

### **3.14. Исследование влияния форсирующего звена на систему ФАП первого порядка, потерявшую устойчивость из-за запаздывания сигнала**

Задайте в системе ФАП первого порядка коэффициент  $K_0 = N_0 + 1$ . Введите в качестве параметра звена идеальной задержки  $T_3$  допустимое время запаздывания сигнала  $T_3 \text{ доп}$  в системе ФАП. Постройте годограф получившейся системы и еще раз убедитесь в том, что система исчерпала запас устойчивости до нуля.

Введите в систему дополнительное форсирующее звено с частотной характеристикой  $K(j\omega) = j\omega T_1 + 1$ , приняв  $T_1 = T_{и}/2$ , где  $T_{и} = 1/K_0$ . Постройте годограф скорректированной таким способом системы. Определите запас устойчивости в этой системе.

Увеличьте постоянную времени  $T_1$  форсирующего звена до значения  $T_{и}$ . Постройте годограф, изобразите его на общем графике годографов. Сделайте выводы о возможности использования форсирующих звеньев для повышения устойчивости системы ФАП.

## **4. Исследование возможности упрощения структурной схемы при оценке устойчивости сложных систем**

Обнаружив в сложной системе радиоавтоматики, например, в системе третьего порядка, что одна из постоянных времени намного меньше других, естественно желание разработчика принять ее равной нулю и тем самым, понизив порядок системы, упростить задачу анализа ее устойчивости. Подобная задача часто встречается на практике. В частности, например, когда постоянная времени дискриминатора радиосигналов существенно меньше постоянной времени фильтра нижних частот на входе управляемого генератора. В каких случаях будет правомерно указанное допущение?

#### 4.1. Теоретическая часть исследования

Теория дает следующий метод решения такой задачи.

Прежде всего следует записать характеристическое уравнение системы в следующем виде

$$m \cdot (a_N \cdot p^N + a_{N-1} \cdot p^{N-1} + \dots + a_0) + b_n \cdot p^n + b_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + b_0 = 0, \quad (34)$$

где  $m$  – наименьшая постоянная времени звена.

Если в записанном в таком виде уравнении разность  $N - n > 2$ , то упрощение системы недопустимо!

Если разность  $N - n = 1$ , то следует рассмотреть отношение коэффициентов в старших членах полного уравнения и укороченного уравнения

$$b_n \cdot p^n + b_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + b_0 = 0. \quad (35)$$

Если  $b_n / a_N > 0$ , то упрощение возможно и дальнейший анализ устойчивости системы можно вести по укороченному уравнению (35).

Если разность  $N - n = 2$ , необходимо рассмотреть неравенство

$$a_{N-1} / a_N - b_{n-1} / b_n > 0. \quad (36)$$

Если оно удовлетворяется, то систему можно исследовать на устойчивость по укороченному уравнению.

Системы, допускающие использование укороченных уравнений, называются грубыми. К сожалению, теория ничего не говорит о том, насколько параметр  $m$  должен быть малым. Попробуйте выяснить это для системы третьего порядка с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{K_0 \cdot (pT_1 + 1)}{p \cdot (pT_2 + 1) \cdot (pT_d + 1)}. \quad (37)$$

Рассмотрим случай, когда  $T_1 = 0$ , то есть когда форсирующее звено отсутствует.

Пусть имеем систему с параметрами

$$T_d \ll T_2 \text{ и } T_d \ll T_{И} = 1 / K_0. \quad (38)$$

Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы

$$T_d \cdot T_2 \cdot p^3 + (T_d + T_2) \cdot p^2 + p + K_o = 0 \quad (39)$$

можно записать в виде

$$T_d \cdot (T_2 \cdot p^3 + p^2) + T_2 \cdot p^2 + p + K_o = 0, \quad (40)$$

а усеченное уравнение

$$T_2 \cdot p^2 + p + K_o = 0. \quad (41)$$

Так как в данном случае  $N - n = 3 - 2 = 1$ , и отношение коэффициентов старших членов равно единице ( $1 > 0$ ), то упрощение допустимо. Действительно, по критерию Рауса-Гурвица условием устойчивости в соответствии с полным характеристическим уравнением будет неравенство

$$(T_2 + T_d) > T_2 \cdot T_d / T_i, \quad (42)$$

которое при выполнении условия малости  $T_d$  требует всегда выполняемого в этом случае условия

$$T_d / T_i < 1. \quad (43)$$

Усеченное уравнение (41) не накладывает никаких требований на параметры системы при условии их положительности. Так что условие малости  $T_d$  в обоих случаях является одновременно и условием устойчивости.

## 4.2. Лабораторная часть исследования

Выберите параметры системы радиоавтоматики, удовлетворяющие условию (42). Увеличивая постоянную времени  $T_d$ , постройте несколько годографов, контролируя по ним устойчивость системы. Зафиксируйте значение варьируемой постоянной времени в момент нарушения устойчивости. Проверьте выполнение условий малости и условий устойчивости в этом случае. Сделайте вывод о требуемой величине малости постоянной  $T_d$ .

Осуществите аналогичный анализ для случая, когда в системе имеется и форсирующее звено, то есть, когда  $T_1$  не равно нулю.

## 5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К РАБОТЕ

1. Возможен ли анализ устойчивости нелинейной системы радиоавтоматики по ее линейной модели? Насколько пригоден результат такого анализа на практике, если реальные системы всегда нелинейные?

2. Как связана устойчивость системы радиоавтоматики с положением полюсов ее передаточной функции?

3. Какие системы считаются структурно-неустойчивыми? Приведите примеры таких систем.

4. Как влияет на устойчивость системы радиоавтоматики задержка сигнала в УПЧ? Каким методом следует выявлять это влияние?

5. Каким образом влияет на устойчивость повышение порядка системы?

6. Какой вид имеет годограф разомкнутой системы с одним интегратором? С интегратором и инерционным звеном? С корректирующим звеном?

7. Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста.

8. Сформулируйте критерий устойчивости Рауса-Гурвица.

9. В каких практических случаях устойчивость следует оценивать по положению полюсов передаточной функции? По критерию Рауса-Гурвица? По критерию Найквиста?

10. Что такое запас устойчивости системы по фазе и по усилению?

11. Как оценивается устойчивость системы по ее логарифмическим частотным характеристикам?

12. В каком случае можно судить об устойчивости сложной системы по ее укороченному характеристическому уравнению?

13. Сформулируйте упрощенное алгебраическое правило устойчивости систем радиоавтоматики первого, второго и третьего порядка.

14. Приведите примеры устойчивых, неустойчивых и нейтральных динамических звеньев первого порядка.

## 6. ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

1. Каким образом Вы контролировали в процессе эксперимента частоту, на которой годограф пересекает действительную ось?

2. Как изменится устойчивость интегратора, если его охватить единичной отрицательной обратной связью?

3. Как выглядит годограф комплексного коэффициента передачи разомкнутой безынерционной системы? Может ли такая система быть неустойчивой после ее замыкания единичной отрицательной обратной связью?

4. Может ли система радиоавтоматики с одним инерционным звеном в замкнутом контуре потерять устойчивость при изменении ее параметров?

5. Стоит ли при анализе устойчивости системы для Вашего варианта учитывать задержку сигнала в УПЧ, найденную в первой лабораторной работе?

6. Как обеспечить устойчивость структурно-неустойчивой системы?

7. Каким образом определяют запасы устойчивости системы по усилению и по фазе по годографу Найквиста?

8. Как повлияет на устойчивость системы с двумя интеграторами введение в ее электрическую схему форсирующего звена?

9. Влияет ли на устойчивость системы с безынерционным звеном и ФНЧ инерционность дискриминатора? И каким образом?

10. В систему с одним интегратором вводят форсирующее звено. Как изменится запас устойчивости системы по фазе?

11. В систему ФАП без фильтра вводят инерционное звено. Каким образом это повлияет на запас устойчивости системы по фазе?



12. Всегда ли форсирующее звено увеличивает запас устойчивости в системе по фазе и по усилению?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	1
1. Подготовительные задания и методические указания к выполнению	2
1.1. Задание первое	2
1.2. Задание второе	2
1.3. Задание третье	10
2. Указания по методике лабораторных исследований	10
3. Лабораторные задания и порядок их выполнения	17
3.1. Исследование годографов элементарных динамических звеньев и устойчивости простейших систем радиоавтоматики	17
3.2. Исследование влияния параметров динамических звеньев на их годографы и на устойчивость систем первого порядка. Изучение годографа пропорционального звена	23
3.3. Оценка устойчивости простейшей системы ЧАП по годографу инерционного звена	24
3.4. Исследование годографа форсирующего звена	26
3.5. Исследование годографа звена идеальной задержки (запаздывания)	26
3.6. Исследование устойчивости простейшей системы ФАП по годографу интегрирующего звена	27
3.7. Исследование влияния дополнительных звеньев на устойчивость простейших систем радиоавтоматики	27

3.8. Исследование влияния дополнительных звеньев на устойчивость системы ЧАП первого порядка (с одним инерционным звеном)	28
3.9. Влияние введения звена идеальной задержки (имитация запаздывания сигнала в системе)	26
3.10. Исследование влияния форсирующего звена (коррекция системы ЧАП методом параллельного дифференцирования сигнала ошибки)	29
3.11. Определение запаса устойчивости по усилению в системе ЧАП	30
3.12. Исследование влияния на простейшую систему ЧАП дополнительного интегрирующего звена	31
3.13. Исследование влияния на систему ФАП звена идеальной задержки	33
3.14. Исследование влияния форсирующего звена на систему ФАП первого порядка, потерявшую устойчивость из-за запаздывания сигнала	34
4. Исследование возможности упрощения структурной схемы при оценке устойчивости сложных систем	34
4.1. Теоретическая часть исследования	35
4.2. Лабораторная часть исследования	36
5. Вопросы для самопроверки при подготовке к работе	37
6. Вопросы по выполненной работе	38
Библиографический список	39

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе № 3 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. 2,5

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