**ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО    РЕГУЛИРОВАНИЯ**

1. Составление функциональных схем по принципиальным схемам систем автоматического регулирования.

2. Математическое описание систем автоматического регулирования. Формы записи дифференциальных уравнений. Определение передаточных функций отдельных элементов функциональных схем.

3. Типовые звенья. Дифференциальные уравнения, передаточные функции, временные и частотные характеристики звеньев

4. Основные правила составления и преобразования структурных схем и определение передаточных функций систем.

 5. Построение логарифмических частотных характеристик звеньев и систем.

7. Исследование устойчивости линейных систем с применением критерия Гурвица, Льенар-Шипара.

 8.Исследование устойчивости линейных систем на основе построения годографа Михайлова.

9. Исследование устойчивости линейных систем на основе построения графиков вещественной и мнимой функций Михайлова.

 10. 11. Исследование устойчивости линейной системы по логарифмическим частотным характеристикам.

12. Определение областей устойчивости по одному и двум параметрам.

 13. Определение запасов устойчивости системы по амплитуде и фазе на основе построения графика амплитудной фазовой частотной характеристики разомкнутой системы.

 14. Определение запасов устойчивости системы по амплитуде и фазе на основе построения графиков логарифмических частотных характеристик.

 15. Определение прямых и косвенных оценок качества регулировани линейной системой.

Методические  указания к выполнению практических работ

Составитель:Шортанбаева А.Т. Теория линейных систем автоматического ре-гулирования.  Методические  указания к выполнению практическийх ра-бот для студентов специальности 5В070200 – Автоматизация и управле-ние. – Алматы

В методических указаниях приведено описание практическийх работ, предназначенных для формирования навыков экспериментального исследова-ния линейных систем автоматического регулирования (САР). Даны краткие теоретические сведения о математическом описании, устойчивости и оценке качества линейных непрерывных САР, о типовых динамических звеньях. При-ведены описание практического оборудования, методики проводимых измере-ний и обработки опытных данных, перечень рекомендуемой литературы и кон-трольные вопросы.

Выпускники специальности 5В070200 – «Автоматизация и управление» должны уметь анализировать и разрабатывать линейные САР для различных технологических объектов и процессов. Существенную помощь в приобретении навыков по анализу и синтезу таких систем, помимо практических заня-тий, окажет практическийй практикум.

Практическийе работы выполняются на учебных стендах, в которых ус-тановлены промышленные импульсные регуляторы и исполнительные меха-низмы, а также широко распространенные в современных САР [1-7] электрон-ные устройства на операционных усилителях. Каждый стенд оснащен много-канальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и ПЭВМ со специаль-ным программным обеспечением, позволяющими измерять и регистрировать одновременно несколько сигналов, а также строить графики их функциональ-ных зависимостей.

До дня проведения праактической работы студент должен к ней подгото-виться: прочитать ее описание, выполнить предварительное расчетное зада-ние, обработать экспериментальные данные предыдущей работы. Вся без ис-ключения литература, приведенная в конце данных методических указаний, имеется в библиотеке университета.

Отчеты по практическийм работам излагаются и оформляются в соответ-ствии с требованиями фирменного стандарта [8] Алматинского университета энергетики и связи. Данные отчеты должны обязательно содержать выводы, в которых анализируются проведенные эксперименты, сравниваются получен-ные данные с теоретическими расчетами, отмечается познавательная цен-ность полученных результатов для усвоения учебного материала. Отчет по практической работе должен быть защищен студентом.

**1 Практическая работа. Позиционные динамические звенья**

 **Цель работы:** приобретение навыков экспериментального исследова-ния  статических (СХ), переходных (ПХ) и амплитудно-частотных (АЧХ) ха-рактеристик  и определения по ним параметров передаточных функций типо-вых позиционных звеньев систем автоматического регулирования (САР).

**Оборудование** (см. рисунок 1): установленные в настольном стенде «Многоконтурные САУ» регулируемый стабилизированный двухполярный источник возмущения (ИВ) с встроенным стрелочным вольтметром, выпол-ненная на операционных усилителях трехзвенная электронная модель объек-та управления (МОУ), стрелочный вольтметр V1, четырехканальный АЦП и ПЭВМ со специальным программным обеспечением, позволяющие измерять и регистрировать одновременно четыре сигнала, а также низкочастотный ге-нератор, например, функциональный генератор DEGEM SYSTEM-141В1 или прецизионный генератор Г3-110.

Для повышения стабильности амплитуды выходного напряжения в наз-ванных генераторах применены сложные замкнутые системы автоматической стабилизации.

АЦП предназначен для оцифровки аналоговых сигналов, снимаемых с выбранных точек стенда. Специальное программное обеспечение предназна-чено для числовой обработки, визуализации и регистрации сигналов, посту-пающих от АЦП стенда.

Стенд представляет собой ряд закрепленных на общей раме модулей, образующих единое *наборно-коммутационное поле* и имеющих постоянные внутренние электрические соединения между собой. Необходимые для выполнения рабочего задания схемы собираются на наборно-коммутационном  полес помощью делителей напряжения (потенциометров) α4… α7, резисторов,конденсаторов, тумблеров и специальных гибких электрических проводников разной длины, называемых *коммутационными шнурами*.



Рисунок 1- Функционально-принципиальная схема практической установки для исследования линейных САР

 Коммутационные шнуры имеют на своих концах однополюсные вилки, которые вставляются в гнезда наборно-коммутационного поля. Электричес-кие схемы модулей стенда имеют «общую точку», поэтому для соединения соответствующих входа и выхода модулей достаточно одного коммутацион-ного шнура.

Верхнее положение ручек тумблеров стенда соответствует их включен-ному состоянию. Стрелочный вольтметр модуля ИВ имеет нуль посредине шкалы. Расположение стрелки справа (слева) от нуля соответствует положи-тельному (отрицательному) напряжению UИВ.

Для удобства коммутации  выход каждого операционного усилителя повторен (размножен) три раза. Данные усилители имеют один вход (инвер-тирующий). Коэффициенты передачи делителей напряжения α4… α7 с по-мощью установочных ручек регулируются в пределах 0…1.

Измерение и регистрация сравнительно высокочастотных и импульс-ных сигналов могут производиться с помощью сервисного двухканального осциллографа типа С1- 83 или портативного осциллографа-мультиметра  типа С1-107, оснащенных *осциллографическими пробниками* стандартной конструкции.

Резисторы и конденсаторы  МОУ имеют следующие номинальные зна-чения:

R1 = R3 = R6 = R7 = R9 = R10 = 1 Мом;

R2= R4 = R5 = R8 = 200 кОм;

С1= С5 = С9= 4,7 мкФ;

С2 = С6 = С10= 1 мкФ;

С3 = С7 = С11= 0,47 мкФ;

С4 = С8= С12= 0,22 мкФ.

**1.1  Краткие теоретические сведения**

1.1.1 Типовые динамические звенья САР.

Для расчета САР они обычно разбиваются на динамические звенья. Под *динамическим звеном* понимают устройство любой физической природы и конструктивного оформления, но описываемое определенным дифферен-циальным уравнением [2, 9]. Классификация звеньев производится именно  по виду этого уравнения или, что то же самое, по виду их передаточной функции.

Одним и тем же уравнением могут описываться разнообразные устрой-ства. Для теории автоматического управления (ТАУ) это будет один и тот же тип звена. Под *типовым динамическим звеном* понимают звено, которое опи-сывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка.

В звеньях *позиционного* или *статического* типа выходная и входная ве-личины в установившемся режиме связаны линейной зависимостью. К пози-ционным относятся *пропорциональное* (безынерционное, усилительное), *инерционное* (апериодическое), *колебательное* и *консервативное* звенья.



Рисунок 2 – Схемы позиционных звеньев на операционных усилителях

Передаточная функция пропорционального звена равна постоянной величине  W(р) = к. Примером  такого звена является  широкополосный уси-

литель постоянного тока (УПТ), реализованный на элементах МОУ (см. ри-

сунок 2, *а*). При этом [2, 10] его *коэффициент передачи* определяется по формуле

к = - α4 R3⁄ R2.

Переходная функция пропорционального звена представляет собой сту-пенчатую функцию h(t) = к ∙1(t), а АЧХ А(ω) = к и постоянна на всех часто-тах. Пропорциональное звено является идеализацией реальных звеньев.

Передаточная функция инерционного звена W(р) = к  ⁄ (1+ рТ). Примером такого звена является фильтр низкой частоты (сглаживающий), реализованный на элементах МОУ (см. рисунок 2, *б*). При этом [2, 10] его *коэффициент пере-дачи* и *постоянная времени* определяются соответственно выражениями

                                к = - α4 R3⁄ R2;       Т = R3С1- 4,

где  С1- 4– суммарная емкость параллельно включенных конденсаторов в обратной связи операционного усилителя первого звена МОУ.

Передаточная функция колебательного звена W(р) = к  ⁄ (Т2р2+ 2ξТр + 1). Примером такого звена является частотно-избирательное электронное устрой-ство, реализованное на элементах МОУ (см. рисунок 2, *в*). При этом [10, 11] его коэффициент передачи, *коэффициент затухания*(*демпфирования*) и постоян-ная времени определяются соответственно выражениями

                          к = - α4 R10 ⁄ (α7R2);         ξ = Т ⁄ (2R3С1- 4);

                           Т = √{R5R8R10С1- 4 С5- 8  ⁄ (α5 α6α7R9)}.

 Консервативное звено является частным случаем колебательного звена при коэффициенте затухания ξ = 0 (отключен резистор R3).

1.1.2 Электронно-лучевые осциллографы.

         Приборы, предназначенные для визуального наблюдения, измерения и ре-гистрации электрических сигналов в диапазоне частот от постоянного тока до сотен гигагерц, называют *осциллографами*. Осциллографы находят широкое применение в различных областях человеческой деятельности.

При эксплуатации радиоэлектронных средств САР распространение полу-чили электронно-лучевые осциллографы [12 - 18]. Данные осциллографы по функциональному назначению делят на следующие виды: С1- универсальные; С7 – скоростные и стробоскопические; С8 – запоминающие; С9 – специальные. Кроме того, выделяют осциллографы многолучевые, многоканальные (двухка-нальные) и цифровые.

         В электронно-лучевых (электронных) осциллографах для наблюдения и измерения параметров сигнала используют экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). В основу работы такого осциллографа положен принцип управления электронным лучом трубки самим исследуемым сигналом.

         Универсальные электронные осциллографы обладают большими возмож-ностями. Они позволяют наблюдать параметры различных сигналов в широком диапазоне уровней (от долей милливольт до сотен вольт) и частот (до десятков мегагерц). В универсальных осциллографах исследуемый сигнал обычно пода-ется через канал вертикального отклонения Y на вертикально отклоняющие пластины, а развертка изображения осуществляется через пластины горизон-тального отклонения за счет использования сигнала развертки.

         В осциллографе для отсчета отклонения луча по вертикали и горизонтали используется измерительная сетка-шкала, имеющая равноотстоящие вертикаль-ные и горизонтальные линии, образующие отсчетные деления.

Площадь, занимаемая шкалой на экране, определяет рабочую площадь эк-рана ЭЛТ, в пределах которой гарантированы технические параметры прибора. Осевые горизонтальные и вертикальные линии сетки, проходящие через центр экрана, дополнительно разбивают на 5 (осциллограф С1-107) или 10 (осцилло-граф С1- 83) вспомогательных малых делений в каждом основном делении для точных измерений.

         С помощью шкалы, используя значения масштабных коэффициентов по вертикали и горизонтали, можно непосредственно измерять на экране времен-ные параметры и напряжение сигнала. Масштабным коэффициентом измерения напряжения является *коэффициент отклонения* – напряжение на входе канала Y, соответствующее отклонению луча ЭЛТ на 1 деление шкалы по вертикали.

Масштабным коэффициентом при измерении интервалов времени являет-ся *коэффициент развертки*, определяемый как интервал времени, за который луч ЭЛТ пробегает по экрану расстояние, равное 1 делению по горизонтали. В осциллографах, имеющих «растяжку», значение коэффициента развертки умно-жается на установленный множитель «растяжки».

Коэффициенты отклонения и развертки в осциллографах имеют фиксиро-ванные значения, точность которых определяет класс точности осциллографа. Следует помнить, что использование плавной регулировки коэффициентов от-клонения и развертки исключает гарантированную точность измерения напря-жения и времени.

         Для достижения минимальных погрешностей при измерении амплитуд-ных и временных характеристик сигналов необходимо устанавливать значение коэффициента отклонения или развертки таким, чтобы измеряемый интервал (напряжение или время) составлял более 30 % шкалы по вертикали или гори-зонтали и находился в центральной части шкалы, в которой обычно гарантиро-вана более высокая точность калибровки.

Целесообразно, чтобы измеряемая часть сигнала занимала 80 – 90 % рабо-чей площади экрана ЭЛТ. В этом случае погрешность измерения можно умень-шить в 1,5 – 2 раза по сравнению с погрешностью, приведенной в технических характеристиках прибора.

         Измеряя напряжение, удобно совмещать уровень сигнала, принятый за нулевой, с нижней горизонтальной линией, а уровень сигнала в интересующей точке отсчитывать, пользуясь центральной вертикальной линией, имеющей большие и малые деления.

1.1.3 Измерение амплитудных и временных параметров сигналов с по-мощью универсального осциллографа.

*Универсальный* электронный осциллограф позволяет измерять значения постоянного, переменного и импульсного сигналов. Измерение осуществляется в амплитудных значениях напряжения электрического тока. При этом измеряе-мый сигнал подается на вход канала Y вертикального отклонения луча ЭЛТ.

Широкое распространение при измерении напряжений исследуемых сиг-налов получил метод *калиброванной шкалы* [12 – 15, 17, 18]. Он основан на ли-нейной зависимости между значением напряжения сигнала, поданного на вход канала Y, и размером его изображения на экране ЭЛТ (в мм, делениях шкалы). В этом случае при измерении напряжения путем изменения коэффициента от-клонения КОТК добиваются получения размера изображаемого сигнала lХв пре-делах шкалы ЭЛТ и измеряют его.

При откалиброванном усилителе вертикального отклонения измеренное напряжение вычисляют по формуле  UХ= lХ КОТК. Например, lХ = 3,5 дел, КОТК = = 0,2 В/дел, тогда UХ= 0,7 В. При данном измерении генератор развертки может быть отключен. Он включается при необходимости оценить форму исследуемо-го напряжения.

Погрешность измерения амплитудных  параметров сигналов (напряже-ний) рассматриваемым методом составляет 5…10 %. Она определяется рядом факторов. Основными из них являются частотные и нелинейные искажения ка-нала Y, погрешности коэффициента отклонения и визуального отсчета. Некото-рые составляющие погрешности измерения напряжений можно исключить или учесть при обработке результатов измерений.

Под временными параметрами сигналов понимаются период, длитель-ность импульсов, длительность фронтов импульсов, интервал между импульса-ми и т.д. Чаще всего измерение временных параметров сигналов осуществляет-ся методом калиброванной шкалы и методом *яркостных меток* [12–15, 17, 18].

При измерениях методом калиброванной шкалы измеряемый сигнал по-дают на вход канала Y и изменением положения переключателя коэффициента развертки КРпри значении множителя растяжки развертки nРдобиваются, что-бы измеряемая часть изображения сигнала занимала всю ширину экрана ЭЛТ, и измеряют линейный размер сигнала lХ.

 Искомое значение измеряемого временного интервала ТХвычисляют по формуле  ТХ = lХ КРnР. Например, при измерении длительности импульса ТИего размер изображения  lХ = 2,4 дел, КР= 0,5 мс/дел, nР = 0,1. Тогда ТИ= 0,12 мс.

         Погрешность данного метода высокая и составляет обычно 5…10 %. Она определяется погрешностями коэффициента развертки и визуального отсчета, нелинейностью временной развертки и др.

**1.2 Рабочее задание**

         1.2.1 Ознакомиться с конструкцией и техническим описанием стенда «Многоконтурные САУ», применяемых радиоизмерительных приборов.

1.2.2 Собрать, опробовать и настроить (на первом звене МОУ) пропор-циональное звено. Снять и графически построить его статическую характе-ристику (СХ) UВЫХ(UИВ).

1.2.3 Снять переходной процесс сигнала UВЫХ  при ступенчатом изме-нении воздействия UИВи АЧХ пропорционального звена. Рассчитать и пос-троить его асимптотическую логарифмическую АЧХ (ЛАЧХ).

1.2.4 Собрать, опробовать и настроить  (на первом звене МОУ) инерци-онное звено. Провести его исследование аналогично исследованию пропор-ционального звена.

1.2.5 Собрать, опробовать и настроить колебательное звено. Провести его исследование аналогично исследованию пропорционального звена.

1.2.6 Собрать и опробовать в статике и динамике консервативное звено.

1.2.7 На основании всех проведенных экспериментов определить вид и параметры передаточных функций  исследуемых звеньев. Сравнить расчет-ные и полученные различными экспериментами значения параметров этих передаточных функций.

**1.3  Порядок выполнения практической работы**

1.3.1 Собрать схему пропорционального звена в соответствии с рисун-ком 2, *а*. Значение α4установить согласно указанию преподавателя.  К входу и выходу звена подключить соответственно выход ИВ и вольтметр V1 для измерения напряжения UВЫХ.

1.3.2 Подать питание 220 В на стенд. Включить ИВ. Изменяя напряже-ние UИВ, снять и графически построить СХ UВЫХ(UИВ) данного звена.

1.3.3 Входы первого и второго каналов АЦП соединить с выходами со-ответственно  ИВ и исследуемого звена.

1.3.4 Подать питание 220 В на ПЭВМ. Запустить программу регистра-ции измеряемых сигналов двойным щелчком левой кнопки «мыши» по ярлы-ку «САР» на рабочем столе.

         Регистрация сигналов начинается (продолжается) или заканчивается (останавливается) после выбора щелчком левой кнопки «мыши» подпунктов соответственно «Соединить» или «Разъединить» меню «Измерение».

После останова регистрации диаграмма сигналов остается неизменной для просмотра, сохранения данных или настройки ее внешнего вида.

         Настройка диаграммы сигналов может выполняться предварительно или во время измерений с помощью диалогового окна, которое выводится на экран ПЭВМ после выбора двойным щелчком левой кнопки «мыши» подпун-кта «Настройка» меню «Измерение».

Во время настройки регистрация сигналов, проводившаяся в режиме «Измерение», временно прекращается и автоматически возобновляется при завершении настройки.

В режиме «Настройка» могут независимо меняться масштабы всех че-тырех отображаемых сигналов и масштаб времени.

1.3.5 Зарегистрировать одновременные переходные процессы сигналов  UВЫХи UИВ при ступенчатом изменении последнего с 0 до 2 В и с 2 В до 0.

1.3.6 Подать питание 220 В на генератор и осциллограф. Подключить выход генератора к одному из входов осциллографа. Изменяя частоту генера-тора, убедиться в независимости амплитуды напряжения генерируемых сигна-лов от их частоты.

1.3.7 Подключить выход генератора к входу исследуемого звена, а вхо-ды осциллографа - к входу и выходу этого звена для измерения амплитуд на-пряжения входного UВХmи выходного UВЫХm сигналов и наблюдения формы этих сигналов.

 Если в п. 1.3.6 установлена независимость амплитуды сигнала генерато-ра UВХmот частоты, то можно использовать только один вход двухканального осциллографа С1- 83 (или одноканальный осциллограф С1- 107) при пооче-редном одном измерении UВХmи многократных измерениях UВЫХm.

1.3.8 При снятии АЧХ пропорционального звена амплитуду UВХm целе-сообразно поддерживать постоянной и равной значению, при котором отсут-ствуют нелинейные искажения в выходном сигнале.

Результаты измерений частоты генератора f, амплитуд UВХm, UВЫХm и вычислений угловой частоты  ω = 2πf, коэффициентов усиления  L = 20lgК и

К = UВЫХm/ UВХm занести в таблицу 1. Значения частоты в ней указаны приме-нительно к  генератору  ГЗ -110. При необходимости могут быть применены и большие значения частоты: 328, 656, 1312, 2624, 5248 Гц  и т. д.

1.3.9  Собрать схему инерционного звена в соответствии с рисунком 2,*б*.  Для этого дополнительно к  п. 1.3.1 подключается задаваемая преподавателем комбинация  конденсаторов  С1…С4. Исследование этого звена проводится аналогично пунктам 1.3.2…1.3.8.

Т а б л и ц а  1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| f,  Гц | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,08 | 0,16 | 0,32 | 0,64 | 1,28 | 2,56 | 5,12 | 10,2 | 20,5 | 41 | 82 | 164 |
| ω,  с -1 | 0,06 | 0,13 | 0,25 | 0,50 | 1,01 | 2,01 | 4,02 | 8,04 | 16,1 | 32,2 | 64,3 | 129 | 257 | 515 | 1033 |
| UВХm,В |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| UВЫХm,В |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| К |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| L,  дБ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

1.3.10 Собрать схему колебательного звена в соответствии с рисунком 2, *в*. Установить α7 = 1, а остальные органы настройки - согласно указанию преподавателя. Исследование этого звена проводится аналогично исследова-

нию пропорционального звена. Для приведения интегратора второго звена МОУ в исходное состояние необходимо перед опытами на 3…5 с включать резистор R6.

1.3.11 Собрать консервативное звено. Для этого вдобавок к п. 1.3.10 от-ключается резистор R3.

1.3.12  Повторить п. 1.3.3. К входу рассматриваемого звена подключить ИВ. Привести интеграторы МОУ в исходное состояние, включив на 3…5 с одновременно резисторы  R3 и R6. Зарегистрировать одновременные переход-ные процессы сигналов  UВЫХи UИВ при ступенчатом изменении последнего.

1.3.13  Применяя приложение А, рассчитать и построить асимптотичес-кие ЛАЧХ исследованных звеньев.

 При построении ЛАЧХ рекомендуются следующие масштабы: для уг-ловой частоты  декада /10 см, 5 дБ /см - для модуля. Для откладывания по оси абсцисс угловой частоты  в логарифмическом масштабе может использовать-ся одна из логарифмических шкал счетной линейки.

1.3.14 Оформить в соответствии с [8] подробный отчет с вычерчивани-ем собранных схем, таблиц и графиков полученных СХ, ЛАЧХ и переходных процессов, с выполнением п. 1.2.7 задания и написанием выводов.

**1.4  Контрольные вопросы**

1. Передаточные функции позиционных звеньев первого порядка.

2. Передаточные функции позиционных звеньев второго порядка.

3. Переходные функции позиционных звеньев первого порядка.

4. Переходные функции позиционных звеньев второго порядка.

5. ЛАЧХ и логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ) пози-ционных звеньев первого порядка.

6. ЛАЧХ и ЛФЧХ позиционных звеньев второго порядка.

7. Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) инерционного звена.

8. АФХ колебательного звена.

9. Нахождение параметров инерционного звена из его ЛАЧХ.

10. Нахождение параметров инерционного звена из его h(t).

11. Нахождение параметров колебательного звена из его ЛАЧХ.

12. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ инерционного звена по его W(р).

13. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена по его W(р).

14. Понятие переходной характеристики, ее применимость и   эксперименталь-ное определение.

15. Понятие СХ, ее применимость и экспериментальное определение.

16. Понятие АЧХ, ее применимость и экспериментальное определение.

17. Понятие типового динамического звена. Виды типовых звеньев.

18. Понятие передаточной функции.

**2 Практическая работа. Интегрирующие и дифференцирующие звенья**

**Цель работы:** приобретение навыков экспериментального исследова-ния  переходных (ПХ) и амплитудно-частотных (АЧХ) характеристик  и оп-ределения по ним параметров  передаточных функций типовых интегрирую-щих и дифференцирующих звеньев.

Применяемое оборудование и схема лабораторной установки приведе-ны в разделе 1 и на рисунке 1.

**2.1 Краткие теоретические сведения**

2.1.1 Виды интегрирующих и дифференцирующих звеньев.

Для входной Х1и выходной Х2величин *звеньев интегрирующего типа* в установившемся режиме справедливо равенство Х2=к ∫ Х1dt, откуда и про-изошло название этого типа звеньев [2]. К интегрирующим относятся интег-рирующее (идеальное) звено, интегрирующее  звено с замедлением и *изод-ромное звено.*

В *звеньях дифференцирующего типа* линейной зависимостью связаны в установившемся режиме выходная величина и производная входной величи-ны  Х2= к dХ1⁄ dt, откуда и произошло название этого типа звеньев [2]. К дифференцирующим относятся идеальное и реальное (с замедлением) диф-ференцирующие звенья, а также *форсирующее звено*.

Передаточная функция интегрирующего звена W(р) = к  ⁄ р. Примером такого звена является операционный усилитель в режиме интегрирования, ре-ализованный на элементах МОУ (см. рисунок 3, *а*). При этом [2, 11] его коэф-фициент передачи определяется выражением

                                     к = - α4 ⁄ (R2 С1- 4).

Передаточная функция дифференцирующего звена в виде W(р) = кр не удовлетворяет условию физической реализуемости, поэтому такое дифференци-рующее звено называется *идеальным.*

Передаточная функция *реального дифференцирующего звена*  имеет вид             W(р) = кр **⁄ (**1+ рТ). Примером такого звена является устройство, реализованное на элементах МОУ (см. рисунок 3, *б*) и аналогичное промышленным дифферен-циаторам типа БДП комплекса АКЭСР. При этом [19, 20] его коэффициент пе-редачи и постоянная времени определяются соответственно выражениями

к = - α4R3Т⁄ R2 = - α4R5R8R10С5- 8 ⁄ (α5α6α7R2R9);

Т =R5R8R10С5- 8 ⁄ (α5α6α7R3R9).



Рисунок 3 - Схемы интегрирующего (*а*) и дифференцирующего (*б*) звеньев на операционных усилителях

2.1.2 Измерительные генераторы сигналов.

*Измерительные генераторы* (ИГ) – источники, вырабатывающие ста-бильные сигналы с известными параметрами, частотой, напряжением (мощ-

ностью) и формой [13, 14, 16, 17, 21, 22]. Измерительные генераторы обладают высокой точностью установки и стабильностью, а также возможностью регули-ровки параметров выходного сигнала. Их применяют при настройке измери-тельной и радиоэлектронной аппаратуры, устройств автоматики и вычислитель-ной техники, градуировки приборов [12, 23].

С помощью ИГ снимают амплитудные, амплитудно-частотные и переход-ные характеристики четырехполюсников, определяют их коэффициенты пере-дачи и шума; питают различные измерительные устройства, построенные на ре-зонансных и мостовых методах.

         *По диапазону частот генерируемых сигналов* различают ИГ инфраниз-кочастоные  – до 20 Гц; низкочастотные  – 20 Гц … 200 кГц (20 Гц … 20 кГц – звуковые, 20… 200 кГц  – ультразвуковые);  высокочастотные  – 200 кГц …      50 МГц; сверхвысокочастотные с коаксиальным выходом  – 50 МГц …10 ГГц; сверхвысокочастотные с волноводным выходом – выше 10 ГГц.

         *По форме генерируемых сигналов* различают ИГ синусоидальных сиг-налов низкой частоты (Г3); синусоидальных сигналов высокой частоты (Г4); периодических импульсов прямоугольной формы (Г5); сигналов специальной формы (треугольной, трапецеидальной, пилообразной, синус-квадратной и др.) (Г6); качающееся частоты – маломощные источники колебаний со специаль-ным, часто линейным законом изменения частоты (Г8); шумовых сигналов – переменных напряжений с бесконечно широким сплошным спектром частот и калиброванным уровнем (Г2).

         *По виду модуляции* различают ИГ с модуляцией амплитудной синусои-дальной, частотной синусоидальной, импульсной, частотной, фазовой, комби-нированной (одновременное осуществление двух видов модуляции и более).

         Измерительные генераторы характеризуются диапазоном генерируемых частот; точностью установки частоты и постоянством ее градуировки; стабиль-ностью генерируемых сигналов по частоте, амплитуде и форме; искажением генерируемых сигналов заданной формы; зависимостью параметров выходного сигнала от внешней нагрузки и пределами их регулировки; степенью экраниро-вания паразитных электромагнитных полей.

**2.2 Рабочее задание**

2.2.1 Собрать, опробовать и настроить (на первом звене МОУ) интегри-рующее звено. Снять переходной процесс сигнала UВЫХ  при ступенчатом из-менении воздействия UИВ.

2.2.2. Снять АЧХ интегрирующего звена. Рассчитать и построить его асимптотическую ЛАЧХ.

2.2.3 Собрать, опробовать и настроить реальное дифференцирующее  звено. Провести его исследование аналогично исследованию интегрирующе-го звена.

2.2.4 На основании всех проведенных экспериментов определить вид и параметры передаточных функций  исследуемых звеньев. Сравнить расчет-ные и полученные различными экспериментами значения параметров этих передаточных функций.

**2.3 Порядок выполнения лабораторной работы**

2.3.1 Собрать схему интегрирующего звена в соответствии с рисунком 3, *а*. Значения α4и емкости С1- 4конденсаторов в обратной связи  операцион-ного усилителя установить согласно указанию преподавателя.

2.3.2 К входу звена подключить выход ИВ. Входы первого и второго каналов АЦП соединить с выходами соответственно ИВ и данного звена.

2.3.3 Подать питание 220 В на ПЭВМ. Запустить программу регистра-ции измеряемых сигналов по п. 1.3.4. Включить ИВ. Для приведения интег-ратора  в исходное состояние и в данном пункте и в дальнейшем необходимо на 3…5 с включать резистор R3.

2.3.4 Зарегистрировать одновременные переходные процессы сигналов  UВЫХи UИВ при ступенчатом изменении последнего.

2.3.5 Подать питание 220 В на генератор и осциллограф. Подключить выход генератора к одному из входов осциллографа. Изменяя частоту генера-тора, убедиться в независимости амплитуды напряжения генерируемых сигна-лов от их частоты.

2.3.6 Подключить выход генератора к входу исследуемого звена , а вхо-ды осциллографа - к входу и выходу этого звена для измерения амплитуд на-пряжения входного UВХmи выходного UВЫХm сигналов и наблюдения формы этих сигналов.

Если в п. 2.3.5 установлена независимость амплитуды сигнала генерато-ра UВХmот частоты, то можно использовать только один вход двухканального осциллографа С1- 83 (или одноканальный осциллограф С1- 107) при пооче-редном одном измерении UВХmи многократных измерениях   UВЫХm.

2.3.7 При снятии АЧХ интегрирующего звена амплитуду  UВХm целесо-образно поддерживать постоянной и равной значению, при котором отсутст-вуют нелинейные искажения в выходном сигнале.

Результаты измерений частоты генератора  f, амплитуд  UВХm,  UВЫХm  и вычислений угловой частоты  ω = 2πf, коэффициентов усиления  L = 20lgК и К = UВЫХm/ UВХm занести в таблицу 1 (см. с. 12). Значения частоты в ней указа-ны применительно к  генератору  ГЗ -110. При необходимости могут быть применены и большие значения частоты: 328, 656, 1312, 2624, 5248 Гц и т. д.

2.3.8 Собрать схему дифференцирующего звена в соответствии с ри-сунком 3, *б*. Значения коэффициентов α4… α7 и емкости С5- 8конденсаторов в  обратной связи усилителя установить согласно указанию преподавателя.

2.3.9 Повторить п. 2.3.2. Для приведения интегратора  в исходное сос-тояние и в данном пункте и в дальнейшем необходимо на 3…5 с включать резистор R6.

2.3.10 Повторить пункты  2.3.4 и 2.3.6.

2.3.11 При снятии АЧХ дифференцирующего звена  амплитуду UВХm на низких частотах следует применять максимально большую, а на средних час-тотах амплитуду UВХmследует уменьшить до значения, при котором отсутст-вуют нелинейные искажения в выходном сигнале.

Результаты измерений частоты генератора  f, амплитуд  UВХm,  UВЫХm и вычислений  угловой частоты ω = 2πf, коэффициентов усиления  L = 20lgК  и   К = UВЫХm/ UВХm занести в таблицу 1(см. с. 12). Значения частоты в ней указа-ны применительно к  генератору  ГЗ -110. При необходимости могут быть применены и большие значения частоты: 328, 656, 1312, 2624, 5248 Гц и т. д.

         2.3.12  Применяя приложение А, рассчитать и построить асимптотичес-кие ЛАЧХ исследованных звеньев.

При построении ЛАЧХ рекомендуются следующие масштабы: для уг-ловой частоты  декада /10 см, 5 дБ /см - для модуля. Для откладывания по оси абсцисс угловой частоты  в логарифмическом масштабе может использовать-ся одна из логарифмических шкал счетной линейки.

2.3.13 Оформить в соответствии с [8] подробный отчет с вычерчивани-ем собранных схем, таблиц и графиков  полученных ЛАЧХ и переходных процессов, с выполнением п. 2.2.4 задания и написанием выводов.

**2.4  Контрольные вопросы**

1. Передаточные функции интегрирующих звеньев и их параметры.

2. Передаточные функции и параметры дифференцирующих звеньев.

3. Переходные функции интегрирующих звеньев.

4. Переходные функции дифференцирующих звеньев.

5. ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующих звеньев.

6. ЛАЧХ и ЛФЧХ дифференцирующих звеньев.

7. Нахождение параметров интегрирующего звена из его ЛАЧХ.

8. Нахождение параметров интегрирующего звена из его h(t).

9. Нахождение параметров дифференцирующего звена из его ЛАЧХ.

10. Нахождение параметров дифференцирующего звена из его h(t).

11. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующего звена по его W(р).

12. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ дифференцирующего звена по W(р).

13. Почему нереализуемо идеальное дифференцирующее звено?

14. Вид выходных сигналов интегратора при прямоугольных входных.

15. Вид выходных сигналов дифференциатора при треугольных и пилообраз-ных входных сигналах.

16. Вид выходных сигналов дифференциатора при трапецеидальных  и синусо-идальных входных сигналах.

17. Вид выходных сигналов дифференциатора при прямоугольных входных.

18. Вид выходных сигналов интегратора при симметричных прямоугольных импульсах (*меандр*) на входе.

**3 Лабораторная работа. Исследование характеристик звеньев САР**

 **Цель работы**: приобретение навыков экспериментального исследования  статических (СХ), переходных (ПХ) и амплитудно-частотных (АЧХ) характе-

ристик  и определения по ним передаточных функций звеньев линейной САР.

**Оборудование** (см. рисунок 4): установленные в настольном стенде «Многоконтурные САУ» регулируемый стабилизированный двухполярный ис-точник возмущения (ИВ) с встроенным стрелочным вольтметром, выполненная на операционных усилителях трехзвенная электронная модель САР, стрелоч-ный вольтметр V3, четырехканальный АЦП и ПЭВМ со специальным програм-мным обеспечением, позволяющие измерять и регистрировать одновременно четыре сигнала, а также низкочастотный генератор, например, функциональный генератор DEGEM SYSTEM-141В1 или прецизионный генератор Г3-110.

Для повышения стабильности амплитуды выходного напряжения в наз-ванных генераторах применены сложные замкнутые системы автоматической стабилизации.

Измерение и регистрация сравнительно высокочастотных сигналов мо-гут производиться с помощью сервисного осциллографа типа С1- 83 или пор-тативного осциллографа-мультиметра С1-107.

Стенд представляет собой ряд закрепленных на общей раме модулей, образующих единое наборно-коммутационное поле и имеющих постоянные внутренние электрические соединения между собой.

Необходимые для выполнения рабочего задания схемы собираются на наборно-коммутационном поле с помощью тумблеров и специальных лабора-торных электрических проводников разной длины. Электрические схемы мо-дулей стенда имеют «общую точку», поэтому для соединения соответствую-щих входа и выхода модулей достаточно одного проводника.



Рисунок 4 – Функционально-принципиальная схема лабораторной установки

Верхнее положение ручек тумблеров стенда соответствует их включен-ному состоянию. Коэффициенты передачи делителей напряжения (потенцио-метров) α5 … α7 регулируются в пределах 0…1.

Более подробное описание лабораторного оборудования приведено в разделе 1.

**3.1 Краткие теоретические сведения о математическом описании непрерывных САР**

Анализ и синтез САР включает в себя следующие этапы: математическое описание, исследование установившихся режимов, исследование переходных режимов. Математическое описание в форме дифференциальных уравнений в ТАУ обычно не применяется из-за сложности их решения.

 Исследование САР существенно упрощается при использовании прик-ладных математических методов операционного исчисления. Преобразование Лапласа позволяет свести задачу решения системы дифференциальных урав-нений высших порядков к решению системы алгебраических уравнений. Дан-ное преобразование дает возможность ввести фундаментальное понятие: отно-шение изображения выходной величины элемента (или системы) Y(р) к изоб-ражению его входной величины Х(р) при нулевых начальных условиях назы-вается *передаточной  функцией* W(р) элемента (или системы).

Передаточная функция является основной формой математического опи-сания объектов в ТАУ, и так как она полностью определяет динамические свой-ства объекта, то первоначальная задача расчета САР сводится к определению W(р) [1, 24 - 36].

Для перехода из области изображений в частотную область достаточно в изображениях Х(р) и Y(р) заменить оператор Лапласа  *р* на оператор Фурье *jω*. Функция комплексного переменного W(jω) называется *комплексным коэффи-циентом передачи.*

Функцию W(jω) можно представить в  показательной форме записи в ви-де выражения

                                     W(jω) = А(ω)еjφ(ω),

         где А(ω) и φ(ω) – модуль и аргумент комплексного коэффициента пере-дачи элемента (или системы).

Зависимость А(ω) показывает отношение амплитуд выходного и входно-го гармонических сигналов при изменении частоты и называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ). Зависимость φ(ω) показывает сдвиг фазы выходного гармонического сигнала относительно входного при изменении час-тоты и называется *фазовой частотной характеристикой*(ФЧХ).

Для сокращения объема вычислительных работ АЧХ и ФЧХ изображают в логарифмическом масштабе. Величина L(ω) = 20lgА(ω) называется *логариф-мической АЧХ* (ЛАЧХ). ФЧХ φ(ω), построенная в полулогарифмическом мас-штабе, называется *логарифмической ФЧХ* (ЛФЧХ). Точка пересечения ЛАЧХ с осью абсцисс называется *частотой среза ωср.*

АЧХ и ФЧХ можно получить экспериментально. Рассчитав по экспери-ментальным данным W(jω), путем замены *jω* на *р* можно получить передаточ-ную функцию W(р).

Под *временными характеристиками* понимается графическое изображе-ние процесса изменения выходной величины в функции времени при переходе системы из одного равновесного состояния в другое в результате поступления на вход системы некоторого типового воздействия.

Так как дифференциальное уравнение системы тоже определяет измене-ние выходной величины в функции времени при некоторых начальных услови-ях, то временная характеристика изображает собой решение дифференциально-го уравнения для  принятого типового воздействия и, следовательно, полностью характеризует динамические свойства системы.

Поскольку временные характеристики могут быть получены не только путем решения дифференциального уравнения, но и экспериментально, то воз-можность определения динамических свойств системы по временной характе-ристике имеет исключительно важное практическое значение, так как в этом случае не требуется выводить и решать дифференциальное уравнение [1].

В качестве типового наиболее широкое применение находит *единичное ступенчатое воздействие.*Графическое изображение реакции системы на это воздействие называется *переходной характеристикой*.

Аналитическое выражение переходной характеристики называется *пере-ходной функцией*. Переходная характеристика  широко применяется при прак-тических расчетах [1], так как ее достаточно просто получить эксперименталь-но, а определяемый ею переходной процесс часто возникает при включениях и изменениях (вариациях) задающего воздействия.

Зависимость выходной величины элемента (системы) от его входной ве-личины в статическом (установившемся) режиме работы называется *стати-ческой характеристикой* элемента (системы).

**3.2 Рабочее задание**

         3.2.1 Ознакомиться с конструкцией и техническим описанием стенда «Многоконтурные САУ», применяемых радиоизмерительных приборов.

3.2.2 Снять и графически построить статические характеристики (СХ) трех звеньев САР. Определить линейные и нелинейные участки этих СХ.

3.2.3 Снять переходные характеристики (ПХ) и АЧХ звеньев САР на линейном участке СХ. Рассчитать и построить их асимптотические ЛАЧХ.

3.2.4  На основании  проведенных экспериментов определить вид и па-раметры передаточных функций  исследованных звеньев. Сравнить между собой значения коэффициентов усиления и постоянных времени, получен-ных из СХ, ПХ и ЛАЧХ.

**3.3  Порядок выполнения лабораторной работы**

3.3.1 В электронной модели (см. рисунок 4) включить резисторы R6и R9, установить α6=α7= 1, а конденсаторы  С1…4, С5…8, С9…12 и резистор R3ис-пользуются согласно указанию преподавателя. Тумблером «f1» подключить выход ИВ к задающему входу первого звена модели. Вольтметр V3 подклю-чить к выходу этого звена  для измерения напряжения U1.

3.3.2 Подать питание 220 В на стенд. Включить ИВ. Изменяя напряже-ние UИВ, снять и графически построить СХ  U1(UИВ) первого звена модели по задающему входу.

3.3.3 Отключить тумблер «f1», выход ИВ соединить проводником с вхо-дом потенциометра «α7». Изменяя напряжение UИВ, снять и графически пост-роить СХ  U1(UИВ) первого звена модели по входу обратной связи.

3.3.4 Проводник с потенциометра «α7» переставить на вход потенцио-метра «α5», вольтметр V3 подключить к выходу второго звена модели для измерения напряжения U2.

3.3.5 Установить коэффициент передачи второго звена модели К2= 0,5. Для этого при некотором постоянном напряжении UИВ, например, 10 В изме-ряют напряжение U2. Изменяя положение движка потенциометра «α5», до-биться U2= 0,5UИВ = 5 В.

 Полученное К2= 0,5 нужно поддерживать неизменным до конца вы-полнения лабораторной работы. Далее, изменяя напряжение UИВ, снять и гра-фически построить СХ  U2(UИВ) второго звена модели.

3.3.6 Проводник с потенциометра «α5» переставить на вход потенцио-метра «α6», вольтметр V3 подключить к выходу третьего звена модели для измерения напряжения UВЫХ. Изменяя напряжение UИВ, снять и графически построить СХ  UВЫХ(UИВ) третьего звена модели.

3.3.7 Входы первого, второго и третьего каналов АЦП соединить с вы-ходами соответственно первого, второго и третьего звеньев модели. Выход ИВ соединить с входами  потенциометров «α5», «α6» и «α7».

3.3.8 Подать питание 220 В на ПЭВМ. Запустить программу регистра-ции измеряемых сигналов по п. 1.3.4.

3.3.9 Зарегистрировать одновременные переходные процессы сигналов U1, U2и UВЫХ при ступенчатом изменении UИВ с 0 до 2 В.

3.3.10 Подать питание 220 В на генератор и осциллограф. Подключить выход генератора к одному из входов осциллографа. Изменяя частоту генера-тора, убедиться в независимости амплитуды напряжения генерируемых сигна-лов от их частоты.

3.3.11 Подключить выход генератора к входу потенциометра «α7» пер-вого звена модели, а входы осциллографа - к входу «α7» и выходу этого звена для измерения амплитуд напряжения входного UВХmи выходного UВЫХm сиг-налов и наблюдения формы этих сигналов.

Если в п. 3.3.10  установлена независимость амплитуды сигнала генера-тора UВХmот частоты, то можно использовать только один вход двухканаль-ного осциллографа С1- 83 (или одноканальный осциллограф С1-107) при по-очередном однократном измерении UВХmи многократных измерениях UВЫХm.

3.3.12 При снятии АЧХ исследуемого звена амплитуду UВХm целесооб-разно поддерживать постоянной и равной значению, при котором отсутству-ют нелинейные искажения в выходном сигнале.

 Результаты измерений частоты генератора  f, амплитуд UВХm, UВЫХm и вычислений угловой частоты ω = 2πf, коэффициентов усиления  L = 20lgК и  К = UВЫХm/ UВХm  занести в таблицу 1 (см. с. 12). Значения частоты в ней ука-заны применительно к  генератору ГЗ -110. При необходимости могут быть применены и большие значения частоты: 328, 656, 1312, 2624, 5248 Гц и т. д.

3.3.13 Исследование АЧХ второго и третьего звеньев модели САР про-водятся аналогично пунктам 1.3.11 и 1.3.12.

3.3.14 Применяя приложение А, рассчитать и построить асимптотичес-кие ЛАЧХ исследованных звеньев САР.

При построении ЛАЧХ рекомендуются следующие масштабы: для уг-ловой частоты  декада /10 см, для модуля 5 дБ /см. Для откладывания по оси абсцисс угловой частоты  в логарифмическом масштабе может использовать-ся одна из логарифмических шкал счетной линейки.

3.3.15 Оформить в соответствии с [8] подробный отчет с вычерчивани-ем собранных схем, таблиц и графиков полученных СХ, ЛАЧХ и переходных процессов, с выполнением п. 3.2.4 задания и написанием выводов.

**3.4  Контрольные вопросы**

1. Понятие СХ, ее применимость и экспериментальное определение.

2. Понятие переходной характеристики (ПХ), ее применимость и эксперимен- тальное определение.

3. Понятие АЧХ, ее применимость и экспериментальное определение.

4. Понятие ЛАЧХ и ЛФЧХ.

5. Получение передаточной функции W(р) инерционного звена из его ПХ.

6. Нахождение W(р) инерционного звена из его ЛАЧХ.

7. Нахождение W(р) интегрирующего звена из его ПХ.

8. Нахождение W(р) интегрирующего звена из его ЛАЧХ.

9. Нахождение W(р) дифференцирующего звена из его ПХ.

10. Нахождение W(р) дифференцирующего звена из его ЛАЧХ.

11. Нахождение передаточной функции изодромного звена из его ПХ.

12. Нахождение W(р) изодромного звена из его ЛАЧХ.

13. Построить асимптотическую ЛАЧХ звена, имеющего передаточную функ-цию W(р) = (р +1) / р.

14. Построить асимптотическую ЛАЧХ звена, имеющего передаточную функ-цию  W(р) = (5р +1) / (р +1).

15. Построить асимптотическую ЛАЧХ звена, имеющего передаточную функ-цию  W(р) = 2р / (3р +1).

16. Построить асимптотическую ЛАЧХ звена, имеющего передаточную функ-цию  W(р) = 10 / [(5р +1)(2р +1)].

17. Построить асимптотическую ЛАЧХ звена, имеющего передаточную функ-цию  W(р) = 100 / р2.

**4 Лабораторная работа. Исследование устойчивости и качества САР**

 **Цель работы**: получение навыков в исследовании замкнутых САР.

**Оборудование** (см. рисунок 5): установленные в настольном стенде «Многоконтурные САУ» регулируемый стабилизированный двухполярный источник возмущения (ИВ) с встроенным стрелочным вольтметром, выпол-ненная на операционных усилителях трехзвенная электронная модель САР, че-тырехканальный АЦП и ПЭВМ со специальным программным обеспечением, позволяющие измерять и регистрировать одновременно четыре сигнала, а так-же низкочастотный генератор, например, функциональный генератор DEGEM SYSTEM-141В1 или прецизионный генератор Г3-110.

Верхнее положение ручек тумблеров стенда соответствует их включен-ному состоянию. Коэффициенты передачи делителей напряжения (потенцио-метров) α5 … α7 регулируются в пределах 0…1.

Более подробное описание лабораторного оборудования приведено в разделе 1.

**4.1 Краткие теоретические сведения**

4.1.1 Понятие устойчивости линейных непрерывных САР.

Система называется устойчивой, если:



Рисунок 5 – Функционально-принципиальная схема модели замкнутой САР

- после снятия воздействия по окончании переходного процесса она воз-вращается в исходное равновесное состояние;

- после изменения воздействия на постоянную величину по окончании переходного процесса она приходит в новое равновесное состояние.

Необходимым и достаточным условием устойчивости САР является рас-положение корней ее характеристического уравнения в левой комплексной по-луплоскости. Мнимая ось плоскости корней служит границей устойчивости.

Вычисление корней просто лишь для уравнений первой и второй степени. Поэтому важное значение приобретают правила, называемые *критериями ус-тойчивости*, позволяющие определять устойчивость системы без вычисления корней ее характеристического уравнения.

К основным критериям устойчивости относятся *алгебраический критерий*Гурвица и *частотные критерии* Михайлова и Найквиста [1].

Если КР- коэффициент передачи разомкнутой САР, то его предельное значение КГР, при котором САР теряет устойчивость, называют *критическим*или *граничным*.

С помощью критериев устойчивости можно строить *области устойчиво-сти.* Если система в пространстве всех своих параметров не имеет области ус-тойчивости, она называется *структурно неустойчивой*. Для получения устой-чивой САР в этом случае надо изменить ее структуру.

4.1.2 Критерий устойчивости Найквиста и его физический смысл.

Критерий Найквиста позволяет оценить устойчивость замкнутой САР по ее разомкнутой цепи. Для этого строят амплитудно-фазовую характеристику (АФХ) W(jω) разомкнутой САР (годограф Найквиста).

Если разомкнутая САР устойчива, то формулировка критерия Найквиста такова: *для устойчивости замкнутой САР необходимо и достаточно, чтобы годограф Найквиста при изменении ω от 0 до ∞ не охватывал точку с коорди-натами (-1, j0).*

Физический смысл критерия Найквиста состоит в том, что при увеличе-нии частоты входного воздействия до некоторого значения ωπсигнал, проходя--щий по цепи обратной связи, оказывается в противофазе с входным. Это равно-сильно замене отрицательной обратной связи (ООС)  положительной (ПОС). Если же при частоте ωπразомкнутый контур обладает усилением, т. е. К(ωπ) >1, то замкнутая САР становится неустойчивой. Частоту ωπ называют *частотой переворота фазы.*

Несмотря на наглядность и физическую простоту, критерий Найквиста имеет существенный недостаток – вычислительные трудности при разделении вещественной и мнимой частей W(jω).

В соответствии с критерием Найквиста об устойчивости можно судить не только по АФХ, но и совместно по АЧХ и ФЧХ разомкнутой цепи. Обычно при этом пользуются логарифмическими характеристиками ЛАЧХ и ЛФЧХ из-за простоты их построения. САР будет абсолютно устойчива, если ωср< ωπ.

4.1.3 Запасы устойчивости САР.

При оценке устойчивости САР одного факта устойчивости недостаточно. Надо еще оценить величину запаса устойчивости, т. е. удаленность системы от границы устойчивости. Основное распространение получили вытекающие из критерия Найквиста *запас устойчивости по фазе* *Δφ* и *запас устойчивости по амплитуде* (*модулю*) *ΔL*.

Запас ΔL определяется величиной подъема ЛАЧХ, при котором система окажется на границе устойчивости:

                   ΔL = 20lgКГР- 20lgКРили ΔL = │L(ωπ)│.                                (1)

Запас устойчивости по фазе Δφ показывает, на какое значение ФЧХ ра-зомкнутой САР на частоте ωсротличается от – π. При наличии ЛАЧХ и ЛФЧХ запасы устойчивости ΔL и Δφ отсчитываются прямо с графиков.

4.1.4 Показатели качества управления в статическом режиме.

САР может находиться в одном из двух режимов – *стационарном* (уста-новившемся) и *переходном*. Стационарный режим может быть двух типов: *ста-тический*и *динамический* [1].

В статическом режиме, при котором все внешние воздействия и парамет-ры системы не меняются, качество управления характеризуется *точностью*.

Относительная статическая ошибка САР при отработке задающего воз-действия (называется также *коэффициентом ошибки по положению* [4], *коэф-фициентом статизма статической системы* [2]) рассчитывается по формуле

                                       ε =1/(1 + КР).                                                            (2)

При α7 = 1 и R1 = R10исследуемая САР имеет единичную ООС. В этом случае экспериментально данная ошибка может быть оценена как

                                     εЭ= 100 % (UИВ- UВЫХ) / UИВ.                                             (3)

При коэффициенте передачи первого звена САР К1= 1 можно воспользо-ваться дополнительной формулой

                                      εЭ= 100 % U1 / UИВ.                                                   (4)

Системы, в которых нельзя полностью устранить  статическую ошибку, называются *статическими.* Системы, в которых при возмущающем воздейст-вии отклонение выходной величины стремится к нулю и не зависит от величи-ны приложенного воздействия, называются *астатическими* [1].

4.1.5 Показатели качества управления в динамических режимах.

Основными показателями, характеризующими работу САР в динамичес-ких режимах, являются *время переходного процесса  tП*и *перерегулирование  σ*. Их можно определить по переходной характеристике h(t) CАР.

Время  tП характеризует быстродействие системы и определяется как ин-тервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее нового установившегося значения  hУСТ становится меньше достаточно малой величины, обычно принимаемой  0,05 hУСТ.

Перерегулированием называется максимальное отклонение выходной величины  hМ1от  hУСТ, выраженное в процентах,

                                 σ = 100 % ( hМ1- hУСТ)/ hУСТ.                                          (5)

Дополнительными показателями качества считаются [1] *колебатель-ность  μ* и *период собственных колебаний.*Колебательность характеризует сте-пень затухания переходного процесса и обычно определяется отношением со-седних максимумов на переходной характеристике μ = hМ1/ hМ2.

В зависимости от характера затухания различают следующие типы пере-одных характеристик: *монотонная* (нет ни одного колебания), *апериодическая*(не более одного колебания) и *колебательная* (несколько колебаний).

**4.2 Предварительное расчетное задание**

4.2.1 Определить устойчивость САР, характеристики звеньев которой получены при выполнении лабораторной работы № 3. Устойчивость опреде-лить по логарифмическим частотным характеристикам (ЛЧХ) разомкнутой системы.

 При построении ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуются следующие масшта-бы: для угловой частоты  декада /10 см, для модуля 5 дБ /см, для фазы 20º/см. Для откладывания по оси абсцисс угловой частоты  в логарифмическом мас-штабе может применяться одна из логарифмических шкал счетной линейки.

4.2.2 Используя формулы (1) и приложение А, рассчитать значение коэф-фициента усиления разомкнутой системы КГР, при котором замкнутая система будет находится на границе устойчивости.

4.2.3 Рассчитать значение частоты среза разомкнутой САР.

4.2.4 Если САР устойчива, рассчитать ее запасы устойчивости по модулю ΔL и фазе Δφ.

4.2.5 По формуле (2) рассчитать величину относительной статической ошибки САР по задающему воздействию.

**4.3 Рабочее задание**

4.3.1 Собрать замкнутую САР, звенья которой имеют настроечные пара-метры, примененные в лабораторной работе № 3.

4.3.2 Снять переходной процесс сигнала UВЫХ модели САР при ступен-чатом изменении задающего воздействия UИВ. Определить показатели переход-ного процесса (tП, σ, время установления первого максимума и др.) и статичес-кую ошибку САР по задающему воздействию.

4.3.3 Определить частоту среза разомкнутой САР.

4.3.4 Изменяя коэффициент усиления КР, вывести САР на границу устой-чивости и определить КГР и запас устойчивости по амплитуде (модулю).

4.3.5 Сравнить результаты расчетного задания и эксперимента. Если на-блюдается их существенное отличие, надо выявить и устранить ошибки.

**4.4  Порядок выполнения лабораторной работы**

4.4.1 Подать питание 220 В на стенд. С помощью потенциометра «α5» установить коэффициент передачи второго звена модели К2= 0,5 (см. п.3.3.5).

4.4.2 Собрать схему замкнутой САР по рисунку 5. Выставить α6=α7=1. Включить резисторы R6и R9. Конденсаторы  С1…4, С5…8, С9…12 и резистор R3используются так же, как в лабораторной работе № 3.

4.4.3 Входы с первого по четвертый каналов АЦП соединить с выхода-ми соответственно первого, второго, третьего звеньев САР и ИВ.

4.4.4 Подать питание 220 В на ПЭВМ. Запустить программу регистра-ции измеряемых сигналов по п. 1.3.4.

4.4.5 Зарегистрировать одновременные переходные процессы сигналов U1, U2,UВЫХ и UИВ при ступенчатом изменении UИВ с 0 до - 5 В. При этом ве-личины регистрируемых сигналов должны соответствовать линейным участ-кам СХ звеньев САР.

4.4.6 Показатели переходного процесса и статическая ошибка рассчи-тываются по формулам (3 – 5).

4.4.7 Для определения частоты среза разомкнутой САР нужно отклю-чить ИВ, подать питание 220 В на генератор.

 Вход четвертого канала АЦП отсоединить от ИВ и соединить с выхо-дом генератора, вход потенциометра «α7» отсоединить от выхода САР и сое-динить также с выходом генератора. В генераторе выставить частоту f =1 Гц и амплитуду сигнала UВХm= 2 В.

4.4.8 Контролируя на мониторе ПЭВМ напряжения U1, U2и амплитуду UВЫХm гармонического выходного сигнала разомкнутой САР и не допуская их выхода за линейные участки СХ звеньев САР, путем изменения частоты генератора добиться равенства  UВХm= UВЫХmпри некоторой частоте fСР, ре-гистрируемой на генераторе. Тогда искомая частота находится по формуле ωср = 2π fСР.

4.4.9 Отключить генератор, восстановить схему по рисунку 5 и п. 4.4.3.

4.4.10 Изменяя α5 и неоднократно повторяя п. 4.4.5, добиться незатуха-ющего переходного процесса при некотором значении коэффициента пере-дачи второго звена К2ГР.

4.4.11 Определить К2ГР. Для этого вход потенциометра «α5» отсоединя-ется от первого звена и подключается к выходу ИВ. Задается некоторое зна-чение UИВ, например, 2 В и с монитора считывается значение напряжения U2. Тогда

      К2ГР = U2/ UИВ;    ΔL = 20lg(К2ГР/ К2) = 20lg(К2ГР/0,5) = 20lg(2К2ГР).

Экспериментальное значение КГРрассчитывается  с помощью приложе-ния А и формул (1). Приложение А выполнено на основе [37 - 39].

4.4.12 Оформить в соответствии с [8] подробный отчет с вычерчивани-ем собранных схем, таблиц и графиков полученных ЛЧХ и переходных про-цессов, с выполнением предварительного расчетного задания и п. 4.3.5, с на-писанием выводов.

**4.5 Контрольные вопросы**

1. Понятие устойчивости линейных непрерывных САР.

2. Охарактеризуйте критерий устойчивости Гурвица.

3. Охарактеризуйте критерий устойчивости Найквиста.

4. Оценка устойчивости по ЛЧХ.

5. Определение граничного усиления и запаса устойчивости по ЛЧХ.

6. Аналитическое и опытное определение статической ошибки.

7. Экспериментальное определение запаса устойчивости по амплитуде.

8. Экспериментальное определение ωср.

9. Показатели переходного процесса САР.

10. Абсолютно и условно устойчивые САР.

11. Влияние коэффициента усиления разомкнутой САР на ее статическую ошибку и устойчивость в замкнутом состоянии.

12. Понятие запасов устойчивости.

13. Физический смысл критерия устойчивости Найквиста.

14. Понятие частоты переворота фазы.

15. Понятие частоты среза.

16. Понятие годографа Найквиста.

17. Понятие кривой Михайлова.

18. Охарактеризуйте критерий устойчивости Михайлова.

**Приложение А**

**Перевод отношения амплитуд в децибелы [37 - 39]**

Т а б л и ц а  А.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Отно-шение | Деци-белы | Отно-шение | Деци-белы | Отно-шение | Деци-белы | Отно-шение | Деци-белы | Отно-шение | Деци-белы |
| 1,000 | 0,0 | 1,641 | 4,3 | 2,692 | 8,6 | 4,416 | 12,9 | 7,244 | 17,2 |
| 1,012 | 0,1 | 1,660 | 4,4 | 2,723 | 8,7 | 4,467 | 13,0 | 7,328 | 17,3 |
| 1,023 | 0,2 | 1,679 | 4,5 | 2,754 | 8,8 | 4,519 | 13,1 | 7,413 | 17,4 |
| 1,035 | 0,3 | 1,698 | 4,6 | 2,786 | 8,9 | 4,571 | 13,2 | 7,499 | 17,5 |
| 1,047 | 0,4 | 1,718 | 4,7 | 2,818 | 9,0 | 4,624 | 13,3 | 7,586 | 17,6 |
| 1,059 | 0,5 | 1,738 | 4,8 | 2,851 | 9,1 | 4,677 | 13,4 | 7,674 | 17,7 |
| 1,072 | 0,6 | 1,758 | 4,9 | 2,884 | 9,2 | 4,732 | 13,5 | 7,762 | 17,8 |
| 1,084 | 0,7 | 1,778 | 5,0 | 2,917 | 9,3 | 4,786 | 13,6 | 7,852 | 17,9 |
| 1,096 | 0,8 | 1,799 | 5,1 | 2,951 | 9,4 | 4,842 | 13,7 | 7,943 | 18,0 |
| 1,109 | 0,9 | 1,820 | 5,2 | 2,985 | 9,5 | 4,898 | 13,8 | 8,035 | 18,1 |
| 1,122 | 1,0 | 1,841 | 5,3 | 3,020 | 9,6 | 4,955 | 13,9 | 8,128 | 18,2 |
| 1,135 | 1,1 | 1,862 | 5,4 | 3,055 | 9,7 | 5,012 | 14,0 | 8,222 | 18,3 |
| 1,148 | 1,2 | 1,884 | 5,5 | 3,090 | 9,8 | 5,070 | 14,1 | 8,318 | 18,4 |
| 1,161 | 1,3 | 1,905 | 5,6 | 3,126 | 9,9 | 5,129 | 14,2 | 8,414 | 18,5 |
| 1,175 | 1,4 | 1,928 | 5,7 | 3,162 | 10,0 | 5,188 | 14,3 | 8,511 | 18,6 |
| 1,189 | 1,5 | 1,950 | 5,8 | 3,199 | 10,1 | 5,248 | 14,4 | 8,610 | 18,7 |
| 1,202 | 1,6 | 1,972 | 5,9 | 3,236 | 10,2 | 5,309 | 14,5 | 8,710 | 18,8 |
| 1,216 | 1,7 | 1,995 | 6,0 | 3,273 | 10,3 | 5,370 | 14,6 | 8,811 | 18,9 |
| 1,230 | 1,8 | 2,018 | 6,1 | 3,311 | 10,4 | 5,433 | 14,7 | 8,913 | 19,0 |
| 1,245 | 1,9 | 2,042 | 6,2 | 3,350 | 10,5 | 5,495 | 14,8 | 9,016 | 19,1 |
| 1,259 | 2,0 | 2,065 | 6,3 | 3,388 | 10,6 | 5,559 | 14,9 | 9,120 | 19,2 |
| 1,274 | 2,1 | 2,089 | 6,4 | 3,428 | 10,7 | 5,623 | 15,0 | 9,226 | 19,3 |
| 1,288 | 2,2 | 2,113 | 6,5 | 3,467 | 10,8 | 5,689 | 15,1 | 9,333 | 19,4 |
| 1,303 | 2,3 | 2,138 | 6,6 | 3,508 | 10,9 | 5,754 | 15,2 | 9,441 | 19,5 |
| 1,318 | 2,4 | 2,163 | 6,7 | 3,548 | 11,0 | 5,821 | 15,3 | 9,550 | 19,6 |
| 1,334 | 2,5 | 2,188 | 6,8 | 3,589 | 11,1 | 5,888 | 15,4 | 9,661 | 19,7 |
| 1,349 | 2,6 | 2,213 | 6,9 | 3,631 | 11,2 | 5,957 | 15,5 | 9,772 | 19,8 |
| 1,365 | 2,7 | 2,239 | 7,0 | 3,673 | 11,3 | 6,026 | 15,6 | 9,886 | 19,9 |
| 1,380 | 2,8 | 2,265 | 7,1 | 3,715 | 11,4 | 6,095 | 15,7 | 10,00 | 20,0 |
| 1,396 | 2,9 | 2,291 | 7,2 | 3,758 | 11,5 | 6,166 | 15,8 | 31,62 | 30,0 |
| 1,413 | 3,0 | 2,317 | 7,3 | 3,802 | 11,6 | 6,237 | 15,9 | 100 | 40,0 |
| 1,429 | 3,1 | 2,344 | 7,4 | 3,846 | 11,7 | 6,310 | 16,0 | 316,2 | 50,0 |
| 1,445 | 3,2 | 2,371 | 7,5 | 3,890 | 11,8 | 6,383 | 16,1 | 103 | 60,0 |
| 1,462 | 3,3 | 2,399 | 7,6 | 3,936 | 11,9 | 6,457 | 16,2 | 3162 | 70,0 |
| 1,479 | 3,4 | 2,427 | 7,7 | 3,981 | 12,0 | 6,531 | 16,3 | 104 | 80,0 |
| 1,496 | 3,5 | 2,455 | 7,8 | 4,027 | 12,1 | 6,607 | 16,4 | 31620 | 90,0 |
| 1,514 | 3,6 | 2,483 | 7,9 | 4,074 | 12,2 | 6,683 | 16,5 | 105 | 100,0 |
| 1,531 | 3,7 | 2,512 | 8,0 | 4,121 | 12,3 | 6,761 | 16,6 | 316200 | 110,0 |
| 1,549 | 3,8 | 2,541 | 8,1 | 4,169 | 12,4 | 6,839 | 16,7 | 106 | 120,0 |
| 1,567 | 3,9 | 2,570 | 8,2 | 4,217 | 12,5 | 6,918 | 16,8 | 3162·103 | 130,0 |
| 1,585 | 4,0 | 2,600 | 8,3 | 4,266 | 12,6 | 6,998 | 16,9 | 107 | 140,0 |
| 1,603 | 4,1 | 2,630 | 8,4 | 4,315 | 12,7 | 7,079 | 17,0 | 3162·104 | 150,0 |
| 1,622 | 4,2 | 2,661 | 8,5 | 4,365 | 12,8 | 7,161 | 17,1 | 108 | 160,0 |

**Список литературы**

1. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 224 с.

2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управ-ления. – СПб.: Изд-во  «Профессия»,  2004. – 752 с.

3. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления. – Мн.: Дизайн ПРО, 2002. – 352 с.

4. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. – М.: Радиотехника, 2003. – 288 с.

5. Теория автоматического управления / Под ред. В.И. Лачина. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. - 469 с.

6. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах  с решениями в МАТLАВ. - СПб.: Издатель-ство «Лань», 2011. – 464 с.

7. Шишмарев В.Ю. Основы автоматического управления. – М.: Изда-тельский центр «Академия», 2008. – 352 с.

8. Стандарт организации СТ НАО 56023-1910-01-2009  Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию учебной документации. – Алматы: АИЭС, 2009. – 38 с.

9. Теория автоматического управления / Под ред. Ю.М. Соломенцева. -М.: Высш. шк., 2003 – 268 с.

10. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.

11. Сборник задач по теории  автоматического регулирования и управ-ления / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Издательство «Наука», Главная ре-дакция физико-математической литературы,1978. – 512 с.

12. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 544 с.

13. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических вели-чин. – М.: Дрофа, 2005. – 415 с.

14. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных си-стемах / Под общей редакцией Б.Н.Тихонова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 374 с.

15. Дьяконов В.П. Современная осциллография и осциллографы. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 320 с.

16. Бишард Е.Г., Киселева Е.А., Лебедев Г.П. и др. Аналоговые электро-измерительные приборы. – М.: Высш. шк., 1991. - 415 с.

17. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.

18. Справочник по радиоизмерительным приборам: В 3-х т. Т.3. Измере-ние электромагнитных полей. Анализ спектра. Осциллография. Импульсные измерения / Под ред. В.С. Насонова. – М.: Сов. Радио, 1979. – 424 с.

19. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирова-ния динамических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

20. Горбацевич Е.Д., Левинзон Ф.Ф. Аналоговое моделирование систем управления. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литерату-ры, 1984. - 304 с.

21. Справочник по радиоизмерительным приборам: В 3-х т. Т.2. Измере-ние частоты, времени и мощности. Измерительные генераторы / Под ред.  В.С. Насонова. – М.: Сов. Радио, 1978. – 272 с.

22. Вавилов А.А., Солодовников А.И., Шнайдер В.В. Низкочастотные измерительные генераторы. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 104 с.

23. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.

24. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные систе-мы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312 с.

25. Ким Д.П., Дмитриева Н.Д. Сборник задач по теории автоматическо-го управления. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 168 с.

26. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные сис-темы. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.

27. Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.

28. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Основы автоматики и системы авто-матического управления. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 384 с.

29. Волобуева О.П. Основы теории управления. – Алматы: КазНТУ, 2005. – 256 с.

30. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического управле-ния. – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.

31. Гальперин М.В. Автоматическое управление. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007. – 224 с.

32. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

33. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2009. – 567 с.

34. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления. - М.: Высш. шк., 2006. – 590 с.

35. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – СПб.: БХВ-Пе-тербург, 2007. – 560 с.

36.  Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: Издательство МЭИ, 2008. – 400 с.

 37. Задачник по теории автоматического управления / Под ред. А.С. Ша-талова. – М.: Энергия, 1979. – 544 с.

38. Сигов А.С., Нефедов В.И. Метрология, стандартизация и техничес-кие измерения. - М.: Высш. шк., 2008. – 624 с.

39. Деньгуб В.М., Смирнов В.Г. Единицы величин. – М.: Изд-во стан-дартов, 1990. – 240 с.