МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ»

РАДИОАВТОМАТИКА

ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЕ ТИПОВОГО РАСЧЕТА

Для бакалавров направления 210400.62 «Радиотехника» профили подготовки 01 «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов» и 22 «Радиофизика» всех форм обучения.

МОСКВА 2012 г.

УДК 621.37:681.51 (076) ББК 32.84:32.965я75

Авторы: В.Л. Захаров, А.С. Сотникова, Ю.М. Фатьянов Редактор: С.Н. Замуруев

Данные методические указания предназначены для подго- товки бакалавров по направлению 210400.62 «Радиотехника» профили подготовки 01 «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов» и 22 «Радиофизика» всех форм обучения при изучении специальной дисциплины «Радиоавтома- тика» (Б3.Б.07) базовой части профессионального цикла ООП и выполнения ими индивидуального типового расчета.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета университета.

Нелегальное копирование и использование данного продук- та запрещено. Электронное издание, номер государственной ре- гистрации 0321203464 от 20 ноября 2012г.

ISBN 978-5-7339-1040-6

Рецензенты: д.т.н., проф. В.И. Нефедов;

д.т.н., проф. Б.В. Стрелков

© Захаров В.Л., 2012 г.

© Сотникова А.С., 2012 г.

© Фатьянов Ю.М., 2012 г.

© МИРЭА, 2012 г.

# ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Радиоавтоматика» является одним из базовых специальных предметов для бакалавров радиотехнических специ- альностей. Цель еѐ преподавания – подготовка студентов к само- стоятельной работе по созданию и применению систем радиоавто- матики (РА), широко используемых в современных радиотехни- ческих системах (РТС) для решения задач автоматической селек- ции, фильтрации, демодуляции и измерения полезных парамет- ров сигналов, включая их цифровую обработку, с целью авто- номного контроля состояния и изменения координат в простран- стве и времени разных динамических объектов. Программа курса предусматривает изучение основ теории автоматического управле- ния и основных методов анализа, синтеза и оптимизации РТС.

Требования к обязательному минимуму содержания дисци- плины «Радиоавтоматика» (Б3.Б.07) выполнены в полном соот- ветствии с ГОС дисциплины «Радиоавтоматика» (ОПД.Ф.08).

Настоящее пособие составлено в соответствии с ФГОС ВПО дисциплины «Радиоавтоматика» (Б3.Б.07) базовой части ОПП под- готовки бакалавров по направлению 210400.62 «Радиотехника» профили 01 «Радиотехнические средства передачи, приема и об- работки сигналов» и 22 «Радиофизика» всех форм обучения.

Студент по данному предмету обязан прослушать курс лекций, выполнить комплекс из четырех лабораторных работ общим объе- мом 18 учебных часов и один типовой расчет, после чего сдает ка- федральный зачет и итоговый экзамен. На зачете студент предъяв- ляет все оформленные отчеты о выполненных и защищенных лабо- раторных работах, а на экзамене – зачтенный типовой расчет.

# ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОАВТОМАТИКА»

* 1. **Теоретические основы построения систем РА**

Введение. Задачи и специфика курса «Радиоавтоматика». Основы теории автоматического управления (ТАУ): базовые по- нятия и определения. Отличительные особенности систем РА: основные виды, режимы работы и их свойства. Современная классификация систем РА. Инструментальные средства систем.

[1. с. 8-24; 2. I т. с. 11-44; 3. с. 7-18; 4. с. 4-9]

# Методические указания:

Ознакомиться с историей и основами ТАУ и систем автома- тического управления (САУ), понимать роль советских и россий- ских ученых в их развитии. Разомкнутый контур управления. На- правленные воздействия, влияющие на контур управления: за- дающие, корректирующие и возмущающие. Замкнутый контур управления – системы с обратной связью (ОС) как основная фор- ма построения систем РА. Сравнение разомкнутого и замкнутого контуров управления САУ. Знать назначение и область примене- ния систем РА, их отличия от САУ. Изучить современную клас- сификацию систем РА по различным отличительным признакам:

* принципам и законам управления; – режимам работы; – видам воздействий/радиосигналов и их рабочим параметрам; – матема- тическим средствам описания; – линиям связи и др. Разобраться в инструментальных средствах, применяемых в системах РА.

# Вопросы для самопроверки:

1. Расскажите о применении САУ и назовите имена совет- ских и российских ученых, внесших весомый вклад в теорию ав- томатического регулирования и технику этих систем.
2. Дайте краткую характеристику составных частей САУ.
3. Что собой представляют замкнутый и разомкнутый кон-

туры управления САУ? Укажите их недостатки и достоинства.

1. Дайте краткую характеристику всем воздействиям, ока- зывающим существенное влияние на контур управления САУ.
2. Какие основные функции выполняют системы РА?
3. Назовите отличительные особенности систем РА.
4. Какие принципы и законы управления и в каких случаях используют в современных системах РА?
5. Какие режимы работы и когда используют в системах РА?
6. По каким признакам идентифицируют системы РА?
7. Какие инструментальные средства и для чего использу- ют в современных системах РА?

# Анализ линейных систем РА при воздействии на них детерминированных радиосигналов

Формулировка и основные задачи анализа. Методы его про- ведения на основе математических моделей непрерывных линей- ных объектов и систем РА. Анализ с помощью дифференциаль- ных уравнений: преобразование Лапласа – передаточная функция (ПФ) системы в операторной форме. Анализ в режиме реального времени управления: переходная/разгонная и импульсная/весовая характеристики системы. Анализ в частотной области: преобра- зование Фурье – частотная ПФ (ЧПФ) системы и еѐ годограф. Амплитудно–частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характе- ристики и их логарифмические аналоги (ЛАЧХ/ЛФЧХ). Методи- ка и примеры построения асимптотических ЛАЧХ и ЛФЧХ сис- тем. Элементарные динамические звенья и их временные и час- тотные характеристики: усилительное (безынерционное), аперио- дическое (инерционное), дифференцирующее, форсирующее, ин- тегрирующее, изодромное, колебательное звенья и звено с чис- тым запаздыванием. Правила структурных преобразований схем.

[1. с. 25-33, 42-59; 2. I т. с. 50-113; 3. с. 19-57; 4. с. 91-104]

# Методические указания:

Рассматриваемые методы анализа используют практически

во всех последующих разделах курса, поэтому необходимо по- вторить материал, относящийся к методам решения дифференци- альных уравнений, преобразованиям Фурье и Лапласа (знать их основные свойства) и временным характеристикам (переходной и импульсной) систем РА, чтобы лучше усвоить область их приме- нения, преимущества и недостатки. Знать форму записи ПФ в операторной форме и ЧПФ (АЧХ и ФЧХ) и область их примене- ния, причем для ЧПФ уметь строить еѐ годограф, асимптотиче- ские ЛАЧХ и ЛФЧХ. Изучить основные характеристики типовых звеньев: временные, ЧПФ, ЛАЧХ и ЛФЧХ. Обратить внимание на отличия характеристик идеального дифференцирующего звена и реальной дифференцирующей цепочки, идеального интегратора и реальной интегрирующей цепочки. Уметь записать ЧПФ для любых соединений пассивных R, L и С цепей. Знать правила структурных преобразований схем РТС. Используя характери- стики элементарных типовых звеньев, уметь строить годографы и асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ любых их соединений.

# Вопросы для самопроверки:

1. Дайте определение ПФ системы в операторной форме и за- пишите еѐ стандартное аналитическое выражение.
2. Что такое собственный оператор и оператор воздействия?
3. Дайте определение переходной и импульсной характери- стик системы и назовите их отличительные особенности.
4. Запишите основные выражения для анализа систем с по- мощью временных характеристик и объясните их примерный вид.
5. Запишите аналитические выражения ЧПФ, АЧХ и ФЧХ для произвольной системы и объясните примерный вид их графиков.
6. Постройте годограф ЧПФ произвольной системы РА и объ- ясните его использование для анализа работы данной системы.
7. Запишите основные выражения для анализа работы систем с помощью преобразований Лапласа и Фурье и объясните их.
8. Объясните методику построения асимптотических ЛАЧХ и ЛФЧХ и их применение для анализа работы систем РА.
9. Дайте определение динамического звена, представьте диф-

ференциальное уравнение и примерный вид временных характери- стик, ЧПФ, ЛАЧХ и ЛФЧХ для всех элементарных звеньев.

1. Сформулируйте основные правила структурных преобра- зований радиотехнических схем и объясните их.

# Функциональные и структурные схемы систем РА

Обобщенные функциональная и структурная схемы следящей системы РА. Основные составные части и их элементы: задающее устройство (ЗУ) – датчики; регулятор или устройство управления (УУ) – дискриминатор и фильтр; объект управления (ОУ) – генера- тор радиосигналов; цепь ОС и промежуточные элементы – назна- чение, построение и математические модели устройств и элементов РА, принципы использования и методы их анализа. Основные виды систем: автоматической регулировки усиления (АРУ), автоматиче- ской подстройки частоты (АПЧ), фазовой автоподстройки (ФАП), фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), автоматического сопро- вождения по дальности (АСД) и автоматического сопровождения по направлению (АСН) – их назначение, функциональные и струк- турные схемы, принципы построения и режимы работы.

[1. с. 11-23, 33-42; 2. II т. с. 396-442; 3. с. 13-19, 58-73; 4. с. 9-79]

# Методические указания:

Изучить обобщенные функциональную и структурную схе- мы следящей системы РА и понимать их принципиальные разли- чия. Помнить, что входным сигналом для функциональных схем является аддитивная смесь радиосигнала с шумом, а для струк- турных – его заданный рабочий параметр. Знать свойства дина- мических характеристик основных видов дискриминаторов этих систем: амплитудного, фазового, частотного, временного и угло- вого. Понимать особенности работы фильтра, как исполнитель- ного устройства в составе УУ (регулятора). Разобраться в специ- фики использования промежуточных элементов и их основных видах. Ознакомиться с принципом работы типовых устройств, используемых в качестве ОУ в системах РА, знать их регулиро-

вочные характеристики. Понимать роль цепи отрицательной ОС (ООС) в системах и уметь формулировать индивидуальные тре- бования к еѐ частотным характеристикам. Изучить функциональ- ные и структурные схемы всех основных видов систем РА: АРУ, АПЧ, ФАПЧ, ФАП, АСД и АСН – и уметь объяснить их работу.

# Вопросы для самопроверки:

1. Что называется функциональной схемой РТС? Изобразите обобщенную функциональную схему следящей системы РА.
2. Что разъясняет структурная схема РТС? Изобразите обобщенную структурную схему следящей системы РА.
3. Объясните назначение датчиков, назовите основные типы, характеристики и особенности их работы в системах РА.
4. Что называется дискриминатором? Какие виды дискри- минаторов Вам известны? Какие особенности их динамических характеристик и как используют в системах РА?
5. Объясните назначение фильтра и особенности работы в системах РА с использованием его АЧХ и ФЧХ.
6. Приведите примеры типовых устройств, используемых в качестве ОУ систем РА, и объясните принцип их работы.
7. Объясните назначение цепи ООС и особенности еѐ рабо- ты в системах РА на основе соответствующих АЧХ и ФЧХ.
8. Изобразите функциональную и структурную схемы сис- тем АРУ «вперед» и «назад» и поясните принцип их работы.
9. Изобразите функциональную и структурную схемы сис- тем: а) АПЧ, б) ФАПЧ и в) ФАП. Поясните принцип их работы и функции дискриминатора и ОУ в каждой из этих систем.
10. Используя функциональную и структурную схемы, по- ясните принцип работы систем АСД и АСН и их особенности.

# Устойчивость линейных непрерывных систем РА

Понятие устойчивости для объектов и систем. Определение частотной устойчивости работы систем РА. Необходимое и дос- таточное условие устойчивости работы для линейных непрерыв-

ных систем РА. Алгебраический критерий устойчивости Рауса – Гурвица. Принцип аргумента. Частотные критерии устойчивости А.В. Михайлова и Найквиста. Анализ устойчивости, используя годограф ЧПФ и логарифмические характеристики ЛАЧХ/ЛФЧХ. Устойчивость работы систем с чистым запаздыванием. Методики исследования устойчивости работы и примеры анализа систем РА с использованием рассмотренных выше критериев.

[1. с. 71-85; 2. I т. с. 122-141; 3. с. 74-84; 4. с. 79-91]

# Методические указания:

Из определения устойчивости для системы, данного А.М. Ляпуновым, понять физический смысл необходимого и достаточ- ного условия частотной устойчивости работы для линейных не- прерывных РТС. Уметь объяснить, какие требования предъявля- ют к корням характеристического уравнения замкнутой системы РА для обеспечения еѐ частотной устойчивости работы. Разли- чать алгебраические и частотные критерии устойчивости на ос- нове ПФ замкнутой и разомкнутой систем: Рауса – Гурвица, А.В. Михайлова, Найквиста – область их применения, преимущества и недостатки. Для понимания частотных критериев необходимо ус- воить принцип аргумента. Особое внимание обратить на крите- рий Найквиста при наличии цепи ООС (Wос(p) ≠ 1), как имеющий большое практическое значение, и понимать его связь с анализом устойчивости работы РТС, используя годограф ЧПФ или ЛАЧХ и ЛФЧХ. Знать условия применения различных критериев устой- чивости и уметь их использовать для анализа работы систем РА, описываемых собственными ПФ не выше четвертого порядка.

# Вопросы для самопроверки:

1. Дайте определение устойчивости для системы, сформули- рованное А.М. Ляпуновым, и объясните его физический смысл.
2. В чем состоит необходимое и достаточное условие час- тотной устойчивости работы линейной непрерывной РТС?
3. Сформулируйте алгебраический критерий устойчивости

Рауса – Гурвица и объясните его сильные и слабые стороны.

1. В чем заключается принцип аргумента для РТС?
2. Сформулируйте частотный критерий устойчивости А.В. Михайлова и объясните его сильные и слабые стороны.
3. Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста без цепи ОС (Wос(p) = 1) и объясните его сильные и слабые стороны.
4. Дайте особенности использования частотного критерия

устойчивости Найквиста в сравнении с критерием Михайлова.

1. Изобразите годограф ЧПФ разомкнутой системы РА и по- кажите запасы устойчивости по амплитуде ±ΔА и фазе ±Δυ.
2. Как определяется устойчивость работы по ЛАЧХ/ЛФЧХ системы РА при наличии цепи ООС (Wос(p) ≠ 1)?
3. Сформулируйте критерий устойчивости работы для сис-

тем РА с чистым запаздыванием.

# Анализ эффективности и качества работы систем РА

Прямые и косвенные показатели качества работы систем: временные, корневые и частотные. Интегральные оценки качест- ва переходного процесса. Способы практической оценки и обес- печение необходимых качественных показателей устройств РА: устойчивость, точность, качество в переходном режиме и поме- хоустойчивость. Вывод уравнения ошибки сопровождения сле- дящей системы РА: динамическая и флуктуационная составляю- щие ошибки и их минимизация. Динамическая ошибка и зависи- мость еѐ величины от структуры и параметров системы РА. Точ- ность работы линейной следящей системы РА в установившемся режиме: коэффициенты ошибок. Системы РА с астатизмом раз- личного порядка. Методика и примеры расчета величины дина- мической ошибки для различных видов систем РА.

[1. c. 87-95, 108-113; 2. I т. с. 146-202; 3. с. 85-94; 4. с. 91-104]

# Методические указания:

Знать прямые (временные) и косвенные (корневые, частот- ные и интегральные) показатели качества для переходного про-

цесса и установившегося режима работы системы РА. На основе обобщенной структурной схемы следящей системы РА понять смысл и причину возникновения двух составляющих ошибки со- провождения: динамической и флуктуационной. Уметь записы- вать ПФ произвольной системы РА по динамической ошибке и по ней определять коэффициенты ошибок. Знать, чем определя- ется величина динамической ошибки конкретной системы и как на это влияет порядок еѐ астатизма. Уметь находить величину динамической ошибки для систем РА, описываемых дифферен- циальными уравнениями не выше третьего порядка.

# Вопросы для самопроверки:

1. Какие показатели качества характеризуют систему РА в переходном и в установившемся режимах работы?
2. Какие показатели качества называются прямыми?
3. Перечислите косвенные показатели качества работы.
4. Приведите пример линейных и квадратичных интеграль- ных оценок качества работы, объясните их физический смысл.
5. Выведите аналитическое выражение для ошибки сопро- вождения следящей системы при наличии цепи ООС (Wос(p) ≠ 1).
6. Как можно уменьшить суммарную ошибку сопровожде-

ния, используя физический смысл каждой из еѐ составляющих.

1. Выведите аналитическое выражение для ПФ системы по динамической ошибке и объясните еѐ физический смысл.
2. Как определяют коэффициенты ошибок? Поясните физи- ческий смысл нулевого и первого коэффициентов ошибки.
3. Чем различаются статические и астатические системы?
4. Найдите выражение для динамической ошибки системы, описываемой ПФ вида W(р) = К·(рτ + 1)/рτ0, если рабочий пара- метр входного радиосигнала изменяется по закону λ(τ) = λ0*+*V·τ.

# Анализ линейных систем РА при воздействиях на них в виде случайных процессов

Формулировка и основные задачи анализа. Определение

статистических характеристик случайных стационарных процес- сов. Идеализированный «белый» шум. Статистический анализ дискриминатора и его флуктуационная характеристика. Динами- ческая ошибка сопровождения системы РА при случайных воз- действиях. Флуктуационная составляющая ошибки сопровожде- ния системы РА и еѐ дисперсия. Эквивалентная шумовая полоса системы. Методика расчета дисперсии флуктуационной состав- ляющей ошибки сопровождения и шумовой полосы системы с помощью стандартных интегралов. Примеры расчета дисперсии и эквивалентной шумовой полосы типовых схем систем РА.

[1. с. 95-108; 2. I т. с. 403-464; 3. с. 104-130; 4. с. 105-128]

# Методические указания:

Уметь формулировать задачи анализа случайных процессов и определять их статистические характеристики. Уяснить осо- бенности работы дискриминаторов при действии на его вход ад- дитивной смеси полезного сигнала и случайного шума. Знать оп- ределение флуктуационной характеристики дискриминатора и уметь объяснить ее примерный вид; изображать структурную схему статистического эквивалента дискриминатора и объяснять его физический смысл. Флуктуационная составляющая ошибки сопровождения следящей системы РА: понимать причину еѐ воз- никновения, физический смысл и влияние на работу этой систе- мы, а также выводить аналитическое выражение для еѐ ПФ (см. раздел 1.5). Знать определение эквивалентной шумовой полосы и ее связь с дисперсией флуктуационной составляющей ошибки сопровождения, уметь их вычислять для систем, описываемых дифференциальными уравнениями не выше третьего порядка.

# Вопросы для самопроверки:

1. Сформулируйте задачи анализа линейных стационарных систем РА при входных сигналах в виде случайных процессов.
2. Запишите аналитические выражения основных статисти- ческих характеристик случайных стационарных процессов.
3. Приведите собственные характеристики «белого» шума.
4. Дайте определение флуктуационной характеристике дис- криминатора и объясните еѐ примерный внешний вид.
5. Дайте определение и изобразите структурную схему ста- тистического эквивалента дискриминатора.
6. Запишите выражение для ПФ по динамической ошибке сопровождения при наличии цепи ООС (Wос(p) ≠ 1).
7. Выведите выражение для ПФ по флуктуационной ошибке

сопровождения при наличии цепи ООС (Wос(p) ≠ 1).

1. Запишите аналитическое выражение дисперсии ошибки

сопровождения следящей системы в установившемся режиме.

1. Дайте определение эквивалентной шумовой полосы сис- темы и объясните еѐ физический смысл.
2. Найдите выражение для дисперсии и эквивалентной шу- мовой полосы системы РА, описываемой ПФ W(р)=К·(рτ+1)/рτ0 при шумах с равномерной спектральной плотностью Sξ(f).

# Анализ нелинейных систем РА

Особенности нелинейных систем РА. Статические режимы работы систем и основные виды нелинейностей. Методы анализа нелинейных РТС при детерминированных воздействиях: непо- средственной и гармонической линеаризации; кусочно-линейной аппроксимации и метод фазовой плоскости. Метод статистиче- ской линеаризации для анализа нелинейных систем при случай- ных воздействиях. Устойчивость работы нелинейных систем РА: полосы «удержания» и «захвата». Функциональная схема устрой- ства «поиска» и «захвата» полезного радиосигнала при срыве слежения. Пример применение метода фазовой плоскости для анализа нелинейной следящей системы РА первого порядка.

[1. с. 225-247; 2. II т. с. 10-70; 3. с. 147-176; 4. с. 129-156]

# Методические указания:

Необходимо понимать, что одна и та же РТС при различных режимах работы может рассматриваться как в качестве линейной,

так и нелинейной. Изучить аналитические и графические методы анализа нелинейных систем при детерминированных воздействи- ях. Понимать, как влияют шумы на работу системы РА. Знать, что такое зоны нечувствительности и устойчивость нелинейной системы в "малом", "большом" и "целом" и как еѐ исследовать методом фазовой плоскости. Иметь представление о методе ста- тистической линеаризации. Уметь объяснить сущность явлений захвата и срыва слежения, знать определения полос «удержания» и «захвата» и как влияют собственные параметры системы на их величину в статическом режиме без учета действия шумов.

# Вопросы для самопроверки:

1. Объясните особенности работы нелинейных систем РА.
2. Какой режим работы системы РА называется статическим?
3. Перечислите основные виды нелинейностей, присущие типовым элементам РА и изобразите их характеристики.
4. Какие методы анализа нелинейных систем Вам известны?
5. Дайте определение фазового пространства. Что такое фа- зовая плоскость, фазовая траектория, фазовый портрет?
6. Дайте определение устойчивости работы нелинейной РТС.
7. Как проводится исследование устойчивости работы нели- нейной системы методом фазовой плоскости?
8. Объясните метод статистической линеаризации и особен- ности его применения для систем РА.
9. Дайте определения понятиям полосы «удержания» и «за- хвата». Запишите аналитические выражения для этих полос.
10. Изобразите функциональную схему устройства «поиска» и «захвата» и объясните принцип его работы при срыве слежения.

# Системы РА прерывистого регулирования

Особенности работы систем РА прерывистого регулирова- ния. Классификация, достоинства и недостатки дискретных сис- тем. Квантование по времени и по уровню аналогового сигнала. Математическое описание и модели дискретных линейных ОУ и

систем: решетчатые функции и линейные разностные уравнения. Применение Z – преобразования для решения разностных урав- нений. Дискретные ПФ и условие эквивалентности дискретных и непрерывных радиосистем. Методы анализа систем РА с помо- щью дискретных ПФ и Z – преобразования. Цифровая фильтра- ция (обработка) радиосигналов во временной и частотной облас- тях. Применение ЭВМ и контроллеров в контуре управления сис- тем РА. Распределенные РТС. Функциональные и структурные схемы цифровых дискриминаторов, фильтров и генераторов опорного сигнала. Примеры построения цифровых систем РА.

[1. с. 164-211; 2. II т. с. 76-216; 3. с. 196-246; 4. с. 202-270]

# Методические указания:

Уяснить причины, приводящие к прерыванию информации в РТС; понимать, чем отличаются импульсные, релейные и циф- ровые системы РА, носящие общее название систем прерывисто- го регулирования. Знать определение импульсного элемента. Уметь изображать радиосигнал, квантованный по времени и по уровню и знать, чем отличаются основные виды импульсной мо- дуляции: АИМ, ШИМ, ВИМ (ФИМ) и ЧИМ. Иметь представле- ние об анализе систем РА прерывистого регулирования при де- терминированных воздействиях и используемом математическом аппарате (решетчатых функциях, линейных разностных уравне- ниях, Z – преобразовании). Понимать, в каких случаях прерыва- ние информации не оказывает существенного влияния на работу системы РА, т.е. когда система прерывистого регулирования мо- жет быть заменена эквивалентной непрерывной системой. Пони- мать, какие перспективы открываются при использовании ЭВМ и контроллеров в контуре управления систем РА. Знать принципы построения распределенных радиосистем. Уметь изображать функциональные и структурные схемы основных узлов цифро- вых систем РА: цифровых дискриминаторов, фильтров, генерато- ров опорного сигнала – и объяснять их работу. Знать, что из себя представляет цифровая система РА, какие причины в настоящее время привели к широкому использованию таких систем.

# Вопросы для самопроверки:

1. Какие радиосистемы называются системами прерывисто- го регулирования? Дайте классификацию этих систем.
2. Запишите условия определения эквивалентного периода квантования по времени и по уровню аналогового сигнала.
3. Объясните методы анализа систем прерывистого регули- рования с помощью дискретных ПФ и Z – преобразования.
4. Сформулируйте условия эквивалентности дискретных и непрерывных радиосистем и объясните их физический смысл.
5. Какие радиосистемы называются цифровыми? Объясните достоинства и недостатки цифровых систем РА.
6. Объясните особенности построения цифровых фильтров - систем обработки радиосигналов во временной области.
7. Объясните особенности построения цифровых систем об- работки радиосигналов в частотной области.
8. Приведите примеры функциональных схем цифровых дискриминаторов: а) временного; б) фазового и в) частотного.
9. Дайте определение цифрового фильтра, приведите его дискретную ПФ и возможные структурные схемы реализации.
10. Приведите пример возможной функциональной схемы цифрового генератора опорного радиосигнала.

# Синтез и оптимизация систем РА

Формулировка и основные задачи синтеза РТС: методы, этапы и порядок его проведения. Синтез в «большом»: во вре- менной и в частотной областях. Оптимизация: критерии, методы, этапы и порядок еѐ проведения. Синтез оптимальных структур: линейные и нелинейные; импульсные, релейные и цифровые замкнутые системы РА. Оптимальная линейная «фильтрация»: особенности фильтров Винера и Калмана-Бьюси. Оптимальная нелинейная «фильтрация»: особенности при Марковской аппрок- симации случайных процессов и «белом» шуме. Синтез в «ма- лом»: выбор типов регуляторов (УУ) и корректирующих уст- ройств. Современные комплексирование и адаптация систем РА. [1. с.114-163, 212-270; 2. II т. с.288-393; 3. с.177-195; 4. с.157-202]

# Методические указания:

Используя определения синтеза и оптимизации, уметь фор- мулировать конкретные задачи их проведения для любых РТС. Знать особенности синтеза в «большом» и в «малом»; во времен- ной и в частотной областях. Разобраться в различиях между оп- тимальными линейной и нелинейной «фильтрациями». Четко за- помнить принципиальные качественные различия между синте- зом и оптимизацией систем РА. Изучить методы повышения ка- чества работы систем за счет их адаптации и комплексирования.

# Вопросы для самопроверки:

1. Дайте определения понятий «синтез» и «оптимизация» и примеры их критериев для радиотехнических систем.
2. В чем совпадают и в чем различаются задачи синтеза и оптимизации для систем РА?
3. Уточните порядок проведения оптимизации в РТС.
4. Расскажите о решении задачи линейной «фильтрации» во временной области на примере синтеза фильтра Калмана-Бьюси.
5. Расскажите о решении задачи линейной «фильтрации» в частотной области на примере синтеза фильтра Винера.
6. Расскажите об особенностях решения задачи нелинейной

«фильтрации» при Марковской аппроксимации воздействий.

1. Расскажите об особенностях решения задачи нелинейной

«фильтрации» при «белом» шуме.

1. Объясните стратегию выбора типа регулятора для САУ.
2. Объясните стратегию выбора конкретного корректирую- щего устройства с использованием его АЧХ и ФЧХ.
3. Для чего используют комплексирование в РТС?

# 2. ТИПОВОЙ РАСЧЕТ

В типовом расчете студенту надо выполнить анализ работы одной из 6-ти видов предложенных систем РА: АРУ, АПЧ, ФАП, ФАПЧ, АСД или АСН. Индивидуальный вариант задания и ис-

ходные данные определяются студентом самостоятельно по двум последним цифрам шифра своего студенческого билета (зачетки):

− конкретный тип анализируемой системы РА выбирается по его последней цифре: цифра 0 соответствует системе ФАП, 1 и 6 − АПЧ, 2 и 7 − АСН, 5 − ФАПЧ, 3 и 8 − АСД, 4 и 9 − АРУ;

− режим работы этой системы выбирается по предпоследней цифре шифра, причем четные номера соответствуют следящему режиму (система РА), а нечетные − информативному (СПИ);

− номер варианта числовых данных своего задания выбира- ется по двум последним цифрам номера шифра по табл. 1.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Десятки/Единицы | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 00, 20, 40, 60, 80 | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** |
| 10, 30, 50, 70, 90 | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** |

По согласованию с преподавателем можно индивидуально выбрать иное эквивалентное задание по заданной тематике.

# Условия заданий типового расчета

Для заданной системы, на входе которой присутствует ад- дитивная смесь радиосигнала uс(t) и шумов с равномерной спек- тральной плотностью мощности Sξ(f), **изобразить** еѐ функцио- нальную и структурную схемы с указанием соответствующих ра- бочих сигналов/параметров во всех линиях связи и **определить**:

1. Критическое значение коэффициента Ккр передачи фильт- ра или постоянной времени τкр цепи ООС системы (в зависимо- сти от индивидуального варианта задания) с помощью:

а) алгебраического критерия устойчивости Рауса-Гурвица; б) частотного критерия устойчивости А.В. Михайлова;

в) частотного критерия устойчивости Найквиста.

Вариант критерия устойчивости для анализа выбирается по двум последним цифрам номера шифра по табл. 2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Десятки/Единицы | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 00, 30, 60, 90 | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** |
| 10, 40, 70 | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** |
| 20, 50, 80 | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** | **а** | **б** | **в** |

1. Режим работы системы РА по графическим характери- стикам для Кф = 0,8 или τос = 1,2 от ранее полученного крити- ческого значения, причем указать все *w*с, *w*ср и *w*кр и запасы ус- тойчивости по амплитуде ±ΔА и фазе ±Δυ, и что надо сделать, чтобы перевести полученную неустойчивую систему в устой- чивый режим работы, учитывая *w* = 1/τ = 2πf = 2π/t (данный пункт выполняется по последней цифре шифра студ. билета):

а) для цифр 0, 1, 2, 3 и 4 – по годографу ЧПФ системы;

б) для цифр 5, 6, 7, 8 и 9 – по асимптотическим логарифми- ческим характеристикам (ЛАЧХ/ЛФЧХ) системы.

1. Величину динамической ошибки Δλдин воспроизведения заданной для анализа системы РА.

2

1. Дисперсию Dфл = σ флуктуационной ошибки воспроиз-

ξ

ведения и эквивалентную шумовую полосу 2∆Fэкв этой системы.

1. Оптимальное значение коэффициента Ккр передачи

фильтра или постоянной времени τкр цепи ООС для обеспечения

минимума суммарной ошибки σ 2 воспроизведения системы РА.

Σ

# Варианты систем «Радиоавтоматики»

1. Для системы АРУ с ООС и фиксированным напряжением u0 входного гармонического сигнала uс(τ) в качестве дискримина- тора, фильтра и цепи ООС используют инерционные звенья с ко- эффициентами передачи Sд, Кф и Кос = 5,0 и постоянными време- ни Тд, Тф и Тос соответственно, а управляющий элемент – безы- нерционное звено с коэффициентом передачи Sу. Исходные дан- ные для расчета приведены в табл. 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Sд раз | Sу раз | Тд с | Тф с | Тос с | u0 В | Sξ(f) |
| 1. | 10–3 | 102 | 10–2 | 0,1 | 10–3 | 3,0 | 5·10–15 |
| 2. | 10–3 | 50 | 3·10–2 | 0,05 | 10–3 | 2,5 | 5·10–16 |
| 3. | 10–3 | 50 | 5·10–2 | 0,1 | 5·10–3 | 3,0 | 10–15 |
| 4. | 10–3 | 20 | 7·10–2 | 0,05 | 5·10–3 | 1,0 | 10–16 |

1. Для системы АПЧ/ЧАП с фиксированной частотой *w*с входного радиосигнала uс(τ) в качестве дискриминатора, фильтра и гетеродина используют инерционные звенья с коэффициентами передачи Sд, Кф и Sг и постоянными времени Тд, Тф и Тг соответ- ственно. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | SдВ/Гц | SгГц/В | Тд с | Тф с | Тг с | *w*с Гц | Sξ(f)Вт/Гц |
| 1. | 10–2 | 50 | 3·10–2 | 0,1 | 10–3 | 107 | 10–15 |
| 2. | 10–3 | 102 | 10–2 | 0,05 | 10–3 | 108 | 10–16 |
| 3. | 10–3 | 50 | 3·10–2 | 0,05 | 5·10–3 | 107 | 5·10–15 |
| 4. | 10–3 | 102 | 5·10–2 | 0,1 | 5·10–3 | 108 | 5·10–16 |

1. Для систем ФАП/ФАПЧ полезный параметр входного ра- диосигнала uс(τ) меняется со скоростью V; в качестве дискрими- натора и фильтра используют инерционные звенья с коэффици- ентами передачи Sд и Кф и постоянными времени Тд и Тф соответ- ственно, а гетеродин – безынерционное звено с коэффициентом передачи Sг. Исходные данные для расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Sд В/па-рам. | Sг па-рам./В | Тд с | Тф с | V па- рам./τ | Sξ(f)Вт/Гц |
| 1. | 10–2 | 5∙102 | 10–3 | 2∙10–3 | 200 | 10–16 |
| 2. | 2∙10–2 | 5∙102 | 10–4 | 5·10–3 | 360 | 5·10–15 |
| 3. | 10–2 | 103 | 10–4 | 10–3 | 300 | 5·10–16 |
| 4. | 10–3 | 2·103 | 5·10–4 | 5·10–2 | 250 | 10–15 |

1. Для системы АСД задержка Δτ(t) входного сигнала uс(τ) меняется со скоростью V, два опорных строба можно рассматри- вать как один. Дискриминатор и генератор импульсов – безынер- ционные звенья с коэффициентами передачи Sд и Sг=1,0; фильтр
* интегратор с коэф. передачи Кф, и постоянной времени Тф, а ре-

гулируемая линия задержки и цепь ООС – инерционные звенья с коэф. передачи Sз, Кос= 1,0 и постоянными времени Тз, τос соот- ветственно. Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.

Таблица 6

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | SдВ/мкс | Кф | Sзмкс/В | Тф с | Тз с | Vмкс/τ | Sξ(f)Вт/Гц |
| 1. | 1,2 | 100 | 1,0 | 10–2 | 10–3 | 360 | 10–16 |
| 2. | 1,0 | 250 | 0,5 | 5·10–2 | 2·10–3 | 300 | 10–15 |
| 3. | 1,6 | 200 | 0,6 | 10–2 | 4·10–4 | 200 | 10–16 |
| 4. | 1,8 | 180 | 0,5 | 5·10–2 | 5·10–4 | 250 | 10–15 |

1. Для системы АСН/УгС с амплитудным угловым дискри- минатором, который является инерционным звеном с коэффици- ентом передачи Sд и постоянной времени Тд, ускорение измене- ния углового положения цели равно g. Фильтр – последователь- ное соединение двух интеграторов с общим коэффициентом пе- редачи Кф = 1,0 и постоянными времени Т1 и Т2 соответственно, а устройство управления ДНА– безынерционное звено с коэффи-

циентом передачи Sу. В цепь ООС включено форсирующее звено

коэффициентом передачи К =103 и постоянной времени τ . Ис-

ос

ходные данные для расчета приведены в табл. 7.

ос

Таблица 7

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | SдВ/град | Sуград/В | Тд с | Т1 с | Т2 с | g град/τ2 | Sξ(f)Вт/Гц |
| 1. | 1,0 | 0,8 | 10–3 | 10–2 | 3·10–2 | 7,0 | 10–15 |
| 2. | 0,8 | 0,5 | 2·10–3 | 10–2 | 10–2 | 10,0 | 10–16 |
| 3. | 1,2 | 1,0 | 4·10–4 | 10–2 | 5·10–2 | 5,0 | 10–16 |
| 4. | 1,8 | 0,5 | 5·10–4 | 10–2 | 7·10–2 | 3,0 | 10–15 |

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ТИПОВОГО РАСЧЕТА

Выполнение типового расчета следует начать с построения функциональной и структурной схем полученной для анализа системы РА, учитывая особенности каждого вида и требования индивидуального задания, с обязательным указанием рабочих сигналов/параметров во всех линиях связи. Затем, в соответствии с заданием записывают ПФ в операторной форме каждого струк- турного звена: дискриминатора – Wд(p), фильтра – Wф(p), объекта управления – Wоу(p) и цепи ООС – Wос(p), причем надо учиты- вать, что общий коэффициент Коб передачи замкнутой системы, который является произведением коэф. передачи дискриминатора

– Sд, фильтра – Кф, объекта управления – Sоу и цепи ООС – Кос – всегда безразмерен. При выполнении вычислений незаданные параметры в формулах численно подставляются: слагаемые в ви- де абсолютного нуля, а сомножители – единичных значений.

* 1. Определение критического значения коэффициента Ккр передачи фильтра или постоянной времени τкр цепи ООС систе- мы (в зависимости от полученного индивидуального задания).

ПФ замкнутой Wз(p) и разомкнутой Wр(p) систем и цепи ООС Wос(p) могут быть найдены как произведения ПФ соответ- ствующих структурных звеньев заданной системы РА. Затем, ис- пользуя граничные условия устойчивости, сформулированные для различных критериев, в соответствии со своим заданием оп- ределяют критическое значение соответствующих коэффициента Ккр передачи фильтра или постоянной времени τкр цепи ООС. Для реального определения Ккр или τкр в этом случае надо:

а) По алгебраическому критерию устойчивости Гурвица.

Из коэффициентов характеристического уравнения анали- зируемой замкнутой системы РА составляют матрицу Гурвица, а затем, пользуясь граничными условиями устойчивости системы по данному критерию, вычисляют значение Ккр или τкр.

б) По частотному критерию устойчивости Михайлова.

Записывают функцию Михайлова, получая еѐ путем замены

оператора р в характеристическом уравнении анализируемой замкнутой системы на комплексную величину j*w*, и приравнива- ют друг другу корни действительной U(*w*) и мнимой V(*w*) частей этой функции, используя граничные условия устойчивости сис- темы по данному критерию для вычисления значения Ккр или τкр.

в) По частотному критерию устойчивости Найквиста.

Записывают, заменяя оператор р на комплексную величину j*w*, произведение ЧПФ разомкнутой системы и цепи ООС (при Wос(j*w*) = 1,0 – только разомкнутую ЧПФ Wр(j*w*)) и находят его действительную U(*w*) и мнимую V(*w*) части. Затем, приравнивая нулю мнимую часть V(*w*), определяют значение критической частоты *w*кр, и, подставляя найденное значение в действительную часть U(*w*), из выражения U(*w*кр) = **–** 1,0 находят искомое значе- ние определяемых коэффициента Ккр или постоянной τкр.

* 1. Определение режима работы системы для Кф = 0,8 или τос= 1,2 от полученного критического значения с указанием *w*с, *w*ср и *w*кр и запасов устойчивости по амплитуде ±ΔА и фазе ±Δυ.

а) По годографу ЧПФ заданной системы РА.

Для построения годографа в координатах U(*w*) и V(*w*) нахо- дят значения модуля А(*w*) произведения ЧПФ разомкнутой сис- темы и цепи ООС (при Wос(j*w*) = 1,0 – только разомкнутой ЧПФ Wр(j*w*)) и еѐ аргумента υ(*w*) при 0,8Ккр/1,2τкр для 8÷10 значений частоты *w* от 0 до +∞, затем строят годограф, определяют усло- вия работы заданной системы РА, значения частот *w*ср и *w*кр и за- пасов устойчивости по амплитуде ±ΔА и фазе ±Δυ.

б) По асимптотическим логарифмическим характеристикам (ЛАЧХ/ЛФЧХ) заданной системы РА.

Для ЛАЧХ записывают выражение L(*w*)=20lgA(*w*), где А(*w*)

* модуль произведения ЧПФ разомкнутой системы и цепи ООС (при Wос(j*w*) = 1,0 – только разомкнутой ЧПФ Wр(j*w*)), а для ЛФЧХ – еѐ аргумент υ(*w*). Затем для Кф = 0,8 или τос = 1,2 от по- лученного критического значения строят асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ в логарифмическом масштабе и определяют условия ра- боты заданной системы РА, значения частот *w*ср и *w*кр и запасов

устойчивости по амплитуде ±ΔА и фазе ±Δυ.

* 1. Определение динамической ошибки Δλдин воспроизведе- ния заданной системы РА, учитывая *w* = 1/τ = 2πf = 2π/t.

Данная ошибка Δλдин системы находится с помощью задан- ной функции изменения рабочего параметра входного радиосиг- нала uс(τ) и коэффициентов ошибок, которые выражаются через коэффициенты вспомогательных полиномов числителя и знаме- нателя ПФ по динамической ошибке Wдин(j*w*), полученной через ПФ элементов анализируемой системы РА, причем размерность

Δλдин должна всегда совпадать с размерностью отслеживаемого рабочего параметра входного радиосигнала uс(τ).

2

* 1. Определение дисперсии Dфл = σ флуктуационной ошиб-

ξ

ки и эквивалентной шумовой полосы 2∆Fэкв заданной системы.

Дисперсия флуктуационной составляющей ошибки σ 2 вос-

ξ

произведения системы находится с помощью спектральной плот- ности Sξ(f) шумов, выделяемой на единичном сопротивлении, и ПФ Wξ(j*w*) по флуктуационной ошибке, которая выражается че- рез ПФ элементов анализируемой системы, причем размерность σξ должна соответствовать размерности отслеживаемого рабочего параметра входного радиосигнала uс(τ). Чтобы упростить вычис-

ления дисперсии σ 2, подынтегральное выражение |W (j*w*)|2 в

ξ ξ

формуле приводят к стандартному виду, а искомое значение ин-

теграла Jn находят через коэффициенты полиномов полученного подынтегрального выражения (см. размерность параметров).

При вычислении эквивалентной шумовой полосы 2∆Fэкв ис- пользуются ранее полученный стандартный интеграл Jn и ПФ Wξ(j*w*) по флуктуационной ошибке на частоте *w* = 0.

* 1. Определение оптимального значения полученного коэф-

фициента Ккр передачи фильтра или постоянной времени τкр цепи

ООС для обеспечения минимума суммарной ошибки σ 2 воспро- изведения заданной для анализа системы РА.

Σ

Для выполнения данного пункта необходимо найти выра-

жение для дисперсии σ

2 флуктуационной составляющей и ди-

намической Δλдин ошибок сопровождения, причем квадрат соб-

ξ

ственной ошибки σ 2 воспроизведения будет равен сумме их

Σ

квадратов (обеспечить размерность). Затем необходимо взять

производную σ 2 по заданному искомому параметру (К или

Σ

кр

τкр) и, приравняв эту производную нулю, определить числовое значение искомого параметра (см. его размерность).

# 4. ОФОРМЛЕНИЕ ТИПОВОГО РАСЧЕТА

1. Типовой расчет выполняется в полном соответствии с ин- дивидуальным заданием каждым студентом самостоятельно в тетради с полями для замечаний и пометок преподавателя.
2. В титуле работы записывают еѐ полное название с указа- нием заданного типа системы РА, режима еѐ работы и номера ва- рианта числовых данных, фамилию, инициалы и шифр студента, а также номер его учебной группы, число и фамилию преподава- теля кафедры, подписавшего это задание.
3. При выполнении работы по каждому пункту задания расчету отдельных величин искомых параметров должны предшествовать полные текст условия задания с исходными данными и вывод расчетной формулы в общем виде с необхо- димыми пояснениями и ссылками на литературу. Заданные сравнение результатов, оценка погрешностей, полученные гра- фики и выводы по каждому пункту работы должны быть пред- ставлены в отчете четко и наглядно, а все необходимые графи- ческие работы следует выполнять строго по ГОСТу. В конце типового расчета приводится список используемой литературы.

# 5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК: Основной

1. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика, М.: Радиотехника, 2003 г.
2. Арсеньев Г.Н., Зайцев Г.Ф. Радиоавтоматика в 2–х томах, М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008 г.
3. Радиоавтоматика / Под ред. В.А. Бесекерского, М.: Высшая школа, 1985 г.
4. Первачев С.В. Радиоавтоматика, М.: Радио и Связь, 1982 г.

# Дополнительный

1. Справочник «Радиоэлектронные системы» – Основы по- строения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана (изд. 2-е перерабо- танное и дополненное), М.: Радиотехника, 2007 г.
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления в 2–х томах, М.: Физматлит, 2007 г.
3. Нефедов В.И., Сигов А.С. Основы Радиоэлектроники и Свя- зи, М.: «Высшая школа», 2009 г.
4. Справочник по радиоэлектронным системам / Под ред. Б.Х. Кривицкого в 2–х томах, М., Энергия, 1979 г.
5. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьюте- ризованный курс, М.: Форум-Интра-М, 2005 г.
6. Брызгалова Г.Г., Замуруев С.Н., Прокофьев П.Р. Радиоавто- матика. Методические указания по выполнению лабораторных работ, М.: МИРЭА, 2002 г. инв. № 0239

# СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение 3
2. Программа, методические указания и контрольные вопросы по дисциплине «Радиоавтоматика» 4
3. Задание для индивидуального типового расчета 17
4. Методические указания по выполнению типового расчета 22
5. Требования по оформлению типового расчета 25
6. Библиографический список 25
7. Содержание 26