

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации

Б.И. Авдоченко

**ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА**

Учебное методическое пособие

2006

Рецензент:

Авдоченко Б.И.

Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства: Учебное методическое пособие. – Томск:2006 xxx с.

Учебное методическое пособие предназначено для студентов очной формы обучения по специальности 210302 «Радиотехника» и других специальностей радиотехнического направления.

Содержание

1 Введение.....	3
2 Программа дисциплины «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства».....	4
2.1 Сигналы пикосекундного диапазона и их применение.....	4
2.2 Оптимальные характеристики быстродействующих устройств и систем.....	5
2.3 Моделирование характеристик в пикосекундном диапазоне.....	5
2.4 Коррекция искажений частотных и переходных характеристик	
2.5. Исследования с помощью пикосекундных импульсов	
2.6 Устройства пикосекундного диапазона	
2.7 Применение пикосекундных устройств и систем.	
3 Программа практических занятий	
3.1 Содержание практических занятий	
3.2. Содержание самостоятельных занятий	
3.3. Контрольные задания	
3.2.1 Общие требования	
3.2.2 Индивидуальное задание № 1. Коррекция характеристик быстродействующих устройств	
3.2.3 Индивидуальное задание № 2. Расчет устройств формирования импульсов	
3.1.1 Тестовые задания	
3333 контрольная работа	
3.1.2 Контрольная работа	

1 ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства» введена для инженерной подготовки студентов старших курсов радиотехнических специальностей. Целью данной дисциплины является знакомство студентов с

теорией, принципами проектирования и современными достижениями в разработке устройств и систем, использующих импульсные сигналы пикосекундной длительности, с шириной спектра от десятков – сотен килоггерц до единиц – десятков гигагерц. Такие сигналы имеют ряд количественных и качественных особенностей, что обусловило появление специфических решений при построении узлов и систем, перспективных для использования в новых и при модернизации старых разработок.

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- изучение общих подходов к проектированию быстродействующих устройств;
- освоение студентами методик расчета и принципов проектирования, оптимизации и синтеза быстродействующих устройств пикосекундного диапазона;
- знакомство с областями применения и перспективными направлениями разработки устройств пикосекундной техники, подготовка к работе с современными высокоскоростными системами и устройствами передачи, приема и обработки информации.

Изучение дисциплины базируется на основе знаний, полученных при изучении следующих дисциплин: «Математика» (преобразования Фурье, Лапласа, Гильберта, функции комплексного переменного); «Основы теории цепей»; «Радиотехнические цепи и сигналы»; «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств»; «Устройства генерирования и формирования сигналов»; «Электродинамика и распространение радиоволн».

При изучении дисциплины «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства» студент должен выполнить два индивидуальных задания и одну контрольную работу. Практические занятия рассчитаны на 14 часов аудиторной и 20 часов самостоятельной работы

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- основы моделирования быстродействующих процессов;
- формы оптимальных характеристик быстродействующих устройств и связи между ними;
- способы коррекции частотных и переходных характеристик;

- основные структуры корректирующих цепей, условия их физической реализуемости;
- методы определения основных характеристик объектов, исследуемых с помощью коротких импульсных сигналов;
- области применения пикосекундных сигналов, устройств и систем с их использованием.

Студент должен уметь:

- определять характеристики необходимых корректирующих и формирующих цепей;
- проводить расчет и реализовывать корректирующие и формирующие цепи на основе неоднородных линий передачи и неминимально-фазовых структур.
- использовать при проектировании новых систем и устройств методы моделирования характеристик, определять рациональные структуры построения устройств и систем пикосекундного диапазона.

Итогом практических занятий должно быть умение студентов оценивать потенциальные возможности высокоскоростных скоростных устройств и систем, определять пути повышения их быстродействия.

2 ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА»

2.1 Сигналы пикосекундного диапазона и их применение

Цели, задачи и содержание дисциплины. Назначение и области применения пикосекундных сигналов, устройств и систем. Количественные и качественные характеристики сигналов пикосекундного диапазона длительностей.

Основные свойства сигналов. Фильтрующие свойства, локализация сигналов во времени и в пространстве. Спектр, исследование частотные свойства различных объектов, проникающие способности пикосекундных сигналов.: Энергия, использование мощных редкоповторяющихся импульсов. Длительность, Импульсные системы передачи информации. Спектральная плотность, шумоподобные сигналы, скрытность передачи информации.

Применение пикосекундных сигналов, основные их преимущества.

Локализация сигнала в небольшом объеме пространства, локационные системы сред и объектов с большим количеством неоднородностей, подповерхностная локация, охранные системы.

Взаимодействие объектов с сигналами с широким спектром, возбуждение собственных колебаний исследуемого объекта. Снятие S-параметров четырехполюсников в широком диапазоне частот. Идентификация объектов по частотным свойствам.

Высокая проникающая способность, передача информации через сложные среды. Малая спектральная плотность, скрытность передачи информации Малая длительность сигналов, шумоподобные многоканальные системы передачи информации. Низкое энергопотребление.

2.2 Оптимальные характеристики быстродействующих устройств и систем

Критерии оптимальности. Оптимальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Оптимальная фазочастотная характеристика (ФЧХ). Оптимальная переходная характеристика (ПХ).

Аппроксимация отклонений от оптимальных характеристик Связь между отклонениями частотных характеристик и переходной характеристикой. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые характеристики.. Влияние изменения амплитудно-частотной характеристики на переходную характеристику. Влияние изменения фазочастотной характеристики на переходную характеристику. Влияние изменения частотной или фазовой характеристики на переходную характеристику в минимально-фазовых цепях.

2.3 Моделирование характеристик в пикосекундном диапазоне

Эквивалентные схемы. Порядок цепей в пикосекундном диапазоне, дробно-рациональные передаточные функции. Проблемы моделирования переходных процессов. Возможности математического и структурного моделирования характеристик сложных цепей.

Условия физической реализуемости минимально-фазовых и неминимально-фазовых характеристик. Аппроксимация частотных и переходных характеристик. Ряды Фурье, единичная дискретная функция $Q_i(t)$ (временное окно). Математические модели частотных и переходных характеристик. Структурные модели. Моделирование искажения спектра сигнала, дисперсия сигнала, возможности восстановления сигнала. Определение элементов модели по результатам экспериментальных исследований.

2.4 Коррекция искажений частотных и переходных характеристик

Принципы коррекции частотных и временных характеристик. Математические и структурные модели корректирующих цепей. Ограничения на элементы моделей. Условия физической реализуемости корректирующих цепей.

Многоканальные корректирующие цепи. Минимизация числа звеньев. Кольцевая корректирующая цепь параллельного типа, коэффициент отражения, основные расчетные соотношения.. Задержка отраженного сигнала, неоднородности в линии передачи и их влияние на характеристики. Кольцевая корректирующая цепь последовательного типа, основные расчетные соотношения. Применение отрезков линии передачи для коррекции характеристик. Влияние волнового сопротивления неоднородной линии передачи на характеристики. Связь формы корректирующей цепи с формой переходной характеристики.

Коррекция переходной характеристики изменением фазовой характеристики. Фазовые корректоры. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые цепи и характеристики. Связь формы переходной характеристики с линейностью фазовой характеристики.

2.5. Исследования с помощью пикосекундных импульсов

Принцип импульсного зондирования, рефлектометр. . Стандартные сигналы для зондирования. Стробоскопическое преобразование сигнала.

Определение параметров неоднородностей линии передачи, . структурная схема измерений. Коэффициент отражения при последовательном включении неоднородности в линию передачи. Коэффициент отражения при параллельном включении неоднородности в линию передачи. Параллельное подключение емкости в линию передачи, основные расчетные соотношения. Последовательное включении

в линию передачи индуктивности, основные расчетные соотношения. Изменение волнового сопротивления линии передачи, основные расчетные соотношения. Изменение нагрузки, включение в линию передачи сопротивления, основные расчетные соотношения.

Определение времени задержки через преобразование Гильберта. Проблема определения задержки, алгоритм определения задержки.

Измерение диэлектрической проницаемости методом импульсного зондирования. Прохождение плоской волны через неоднородный диэлектрический слой, коэффициенты отражения от границ слоя. Отклик на зондирующий сигнал в частотной области. Влияние формы зондирующего сигнала на погрешность измерения.

Измерение частотных характеристик методом импульсного зондирования. Спектры входного и выходного (отраженного) сигналов. Преимущества метода, погрешность измерения, требования к зондирующим сигналам.

Определение формы объектов методом импульсного зондирования. Общий подход к решению обратных задач радиолокации. Использование закона физической оптики. Поверхностные токи и напряженность рассеянного электрического поля. Вычисление площади отражающей поверхности. Формы зондирующих сигналов, результаты при зондировании короткими и длинными импульсами.

Селекция отражающих объектов по размерам. Принцип расширения динамического диапазона, разделение сигнала на медленную и быструю компоненты. Использование метода временного окна. Алгоритм поиска «невидимок».

Принципы идентификации объектов. Поиск объектов с известными характеристиками.

2.6 Устройства пикосекундного диапазона

Реализации оптимальных характеристик в устройствах пикосекундного диапазона. Реализация неминимально-фазовых передаточных функций. Коррекция переднего фронта в многоканальных устройствах. Управление коэффициентом усиления. Управление полярностью сигнала в пикосекундном диапазоне. Разветвители сигналов пикосекундного диапазона. Управляемые линии задержки.

Управление формой сигналов, линейное и нелинейное преобразование амплитудного и фазового спектров сигналов. Многоканальные матричные структуры и их использование.

Пикосекундные усилители импульсных сигналов, использование широкополосных усилителей для усиления пикосекундных сигналов. Реализация оптимальных характеристик в гибридных усилителях на транзисторах с барьером Шоттки. Монолитные усилители. Использование многоканальных усилителей с частотным разделением каналов. Повышение выходного напряжения в быстродействующих усилителях, используемые модели, схемы и структуры. Расширение динамического диапазона входных сигналов. Прием однократных и редкоповторяющихся сигналов

Аттенюаторы и регуляторы коэффициента передачи. Динамическое управление частотными характеристиками при регулировке, основные схемы аттенюаторов и корректирующих двухполюсников. Аттенюаторы на транзисторах с затвором Шоттки, преимущества и недостатки.

Интегральные микросхемы и их использование в пикосекундном диапазоне. Логические схемы, триггеры, генераторы. Устройства выборки и хранения, аналоговые ключи. Компараторы напряжения. Быстродействующие аналого-цифровые преобразователи.

Формирователи пикосекундных и гигабитных последовательностей импульсов. Линейные и нелинейные методы формирования. Многоканальные формирователи. Формирователи на основе коммутации разрядных линий. Диодные формирователи, формирователи на туннельных диодах, формирователи на лавинных диодах, формирователи на диодах с накоплением заряда формирователи на диодах Ганна. Формирователи и генераторы импульсов на транзисторах

2.7 Применение пикосекундных устройств и систем.

Подповерхностная локация. Использование подповерхностной локации для обеспечения безопасности в угольной отрасли. Использование подповерхностной локации в нефтегазодобывающей промышленности. Охранные системы Импульсные и непрерывные системы передачи информации. Применение пикосекундных

устройств и систем в ядерной физике. Применение пикосекундных устройств и систем в волоконно-оптических системах связи. Акустические микроскопы.

3 ПРОГРАММА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Содержание практических занятий

1. Оптимальные характеристики устройств – 2 часа
2. Связь между частотными и переходными характеристиками – 2 часа
3. Корректирующие цепи (аппроксимация характеристик, проверка условия физической реализуемости, схемы корректирующих цепей) – 4 часа
4. Неоднородные линии передачи и их применение – 2 часа
5. Математические модели устройств пикосекундной техники – 2 часа
6. Итоговая контрольная работа – 2 часа

3.2. Содержание самостоятельных занятий

1. Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекций и рекомендованной литературы – 4 часа
2. Выполнение домашнего задания по расчету КЦ – 6 часов
3. Выполнение домашнего задания по формированию сигналов – 6 часов
4. Подготовка к итоговой контрольной работе – 4 часа

3.3. Контрольные задания

3.3.1 Общие требования

Студент, изучающий дисциплину «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства» студент должен выполнить два индивидуальных задания и одну контрольную работу. Текущий контроль усвоения материала проводится на практических занятиях путем решения тестовых задач. Кроме того, в случае получения рейтингового балла, недостаточного для допуска на экзамен, студенту выдается творческое задание.

Тема первого индивидуального задания – коррекция частотных и переходных характеристик быстродействующих устройств. Для выполнения этого задания

необходимо знать следующие разделы дисциплины «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства»:

- Оптимальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Оптимальная фазочастотная характеристика (ФЧХ). Оптимальная переходная характеристика (ПХ).

- Аппроксимация отклонений от оптимальных характеристик Связь между отклонениями частотных характеристик и переходной характеристикой.

- Минимально-фазовые и неминимально-фазовые характеристики..

- Влияние изменения амплитудно-частотной характеристики на переходную характеристику

- Влияние изменения фазочастотной характеристики на переходную характеристику.

- Влияние изменения частотной или фазовой характеристики на переходную характеристику в минимально-фазовых цепях.

- Математические модели частотных и переходных характеристик.

- Структурные модели корректирующих цепей

- Кольцевая корректирующая цепь параллельного типа, (коэффициент отражения, основные расчетные соотношения)..

- Кольцевая корректирующая цепь последовательного типа, основные расчетные соотношения.

- Применение отрезков линии передачи для коррекции характеристик. Влияние волнового сопротивления неоднородной линии передачи на характеристики. Связь формы корректирующей цепи с формой переходной характеристики.

- Коррекция переходной характеристики изменением фазовой характеристики. Фазовые корректоры. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые цепи и характеристики.

Тема второго индивидуального задания – расчет устройств формирования импульсов для быстродействующих устройств. Для выполнения этого задания необходимо знать следующие разделы дисциплины «Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства»:

- Принцип импульсного зондирования, рефлектометр

- Формирователи пикосекундных и гигабитных последовательностей импульсов. Линейные и нелинейные методы формирования
- Многоканальные формирователи. Формирователи на основе коммутации разрядных линий. Диодные формирователи, формирователи на туннельных диодах, формирователи на лавинных диодах, формирователи на диодах с накоплением заряда Ганна. Формирователи и генераторы импульсов на транзисторах
- Коэффициент отражения при последовательном и параллельном включении неоднородности в линию передачи.
- Влияние изменение волнового сопротивления линии передачи, на форму импульса, основные расчетные соотношения.
- Влияние изменения нагрузки, включенной в линию передачи на форму импульса, основные расчетные соотношения.

Индивидуальные задания 1 и 2 содержат по 3 задачи, имеются 50 вариантов задания. На выполнение каждого индивидуального задания студенту дается две недели.

Контрольная работа является итоговой и содержит задания по всем материалам практических занятий

Текущий контроль усвоения материала проводится на практических занятиях путем решения тестовых задач. Темы тестовых заданий:

- Соответствие различных форм частотных и переходных характеристик критерию оптимальности.
- Сравнение быстродействия устройств с различными формами частотных и переходных характеристик.
- Расчет характеристик корректирующих цепей по эквивалентной схеме корректирующей цепи.
- Расчет электрической схемы корректирующей цепи по переходной характеристике устройства.

3.3.2 Индивидуальное задание № 1. Коррекция характеристик быстродействующих устройств

При выполнении индивидуального задания необходимо:

- Определить требуемые изменения в характеристиках устройств для получения минимального времени нарастания переходной характеристики или заданной формы переходной характеристики.
- Выбрать структуру корректирующей цепи.
- Провести расчет элементов корректирующей цепи.
- Провести расчет частотных и переходных характеристик корректирующих цепей и результирующих характеристик устройства.

Краткие методические указания по расчету корректирующих цепей

С помощью изменений в частотных и переходных характеристиках можно приблизить их к оптимальным, по предложенным критериям, характеристикам.

Необходимые изменения в характеристиках производятся с помощью корректирующих цепей. Для получения оптимальных характеристик требуется компенсация отклонений от оптимальных амплитудно-частотных $|\overline{\Delta K(\omega)}|$, фазочастотных $\Delta\varphi(\omega)$, переходных $\Delta h_k(t)$ и $\Delta h_\varphi(t)$ путем введения противоположного по знаку отклонения с помощью корректирующих цепей:

$$|\overline{\Delta K_k(\omega)}| = -|\overline{\Delta K(\omega)}|, \quad \Delta\varphi_k(\omega) = -\Delta\varphi(\omega), \quad \Delta h_{kk}(t) = -\Delta h_k(t) \quad \text{и} \quad \Delta h_{k\varphi}(t) = -\Delta h_\varphi(t)$$

Влияние отклонения частотных характеристик на переходные характеристики

Оптимальные характеристики являются идеализированными и могут быть реализованы с определенными отклонениями, поэтому необходимо определить, как отклонение частотных характеристик от оптимальных влияет на переходную характеристику.

Для этого частотные характеристики устройства нужно представить в виде:

$$|K(\omega)| = |K_0(\omega)| \cdot [1 + |\overline{\Delta K(\omega)}|]$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) + \Delta\varphi(\omega)$$

где $|K_o(\omega)|$ и $\varphi_o(\omega)$ - исходные (например, оптимальные) АЧХ и ФЧХ;

$$|\overline{\Delta K(\omega)}| = \frac{|K(\omega)| - |K_o(\omega)|}{|K_o(\omega)|}; \quad \Delta\varphi(\omega) = \varphi(\omega) - \varphi_o(\omega) - \text{относительные изменения в}$$

частотных характеристиках.

После подстановки в интегральное преобразование Фурье и необходимых тригонометрических преобразований, при условии $|\overline{\Delta K(\omega)}| \ll 1, \Delta\varphi(\omega) \ll \pi$

получается ПХ в виде: $h(t) = h_0(t) + \Delta h_k(t) + \Delta h_\varphi(t)$ (4), где

$$h_0(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{|K_o(\omega)| \sin[\omega t + \varphi_o(\omega)]}{\omega} d\omega \quad (5) - \text{исходная переходная}$$

характеристика (например, оптимальная);

$$\Delta h_k(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{|\overline{\Delta K(\omega)}| \sin[\omega t + \varphi_o(\omega)]}{\omega} d\omega \quad (6)$$

- изменения в ПХ, вызванные отклонением АЧХ от исходной (оптимальной) характеристики;

$$\Delta h_\varphi(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\Delta\varphi(\omega) \cos[\omega t + \varphi_o(\omega)]}{\omega} d\omega \quad (7)$$

- изменения в ПХ, вызванные отклонением ФЧХ от исходной (оптимальной) характеристики.

Выражения (6) и (7) показывают, что отклонения АЧХ и ФЧХ от оптимальных характеристик по-разному изменяют переходные характеристики. Изменения ПХ, вызванные отклонениями АЧХ, описываются четной функцией, а отклонениями ФЧХ – нечетной функцией. Используя независимое изменение амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, можно изменять форму переходной характеристики в широких пределах.

Аппроксимация изменений частотных характеристик

Изменения частотных характеристик представляют собой отклонения между рассматриваемой и какой – либо эталонной характеристикой, например, оптимальной. Для описания отклонений частотных характеристик необходимо использовать тригонометрический ряд Фурье, который удобен при использовании спектральных преобразований и обеспечивает минимальную среднеквадратичную погрешность аппроксимации.

В общем виде изменения частотных характеристик можно представить как

$$\Delta(\Omega) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin T_n \Omega \quad (8)$$

где $\Delta(\Omega) = \begin{cases} \Delta\varphi(\Omega) \\ |\overline{\Delta K(\Omega)}| \end{cases}$ - при изменении ФЧХ и АЧХ; $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ - нормированная

частота; a_n и b_n - коэффициенты n-ой составляющей ряда Фурье;

$$T_n = \frac{2\pi}{\Omega_A} \cdot N - \text{период } n\text{-ой гармоники}; \quad \Omega_A = \frac{\omega}{\omega_A};$$

ω_A - верхняя частота интервала аппроксимации.

Коэффициенты ряда Фурье в (8) находят из известных соотношений:

$$a_0 = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} |\overline{\Delta K(\Omega)}| d\Omega$$

$$a_n = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} |\overline{\Delta K(\Omega)}| \cos \frac{2\pi\Omega}{\Omega_A} \cdot N d\Omega \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} \Delta\varphi(\Omega) \sin \frac{2\pi\Omega}{\Omega_A} \cdot N d\Omega$$

Для нахождения коэффициентов ряда Фурье обычно используются численные методы из - за сложного характера зависимостей $|\overline{\Delta K(\omega)}|$ и $\Delta\varphi(\omega)$.

Влияние изменения амплитудно-частотной характеристики на форму переходной характеристики

Амплитудно-частотная характеристика является четной функцией, поэтому для ее аппроксимации используется четный ряд Фурье:

$$|\overline{\Delta K(\omega)}| = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega \quad (10), \quad \text{где } a_0, a_n - \text{коэффициенты}$$

ряда Фурье (8), вычисляемые по выражениям (9).

Подставляя в $\Delta h_k(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{|\overline{\Delta K(\omega)}| \sin[\omega t + \varphi_0(\omega)]}{\omega} d\omega$ (6), получаем:

$$\Delta h_k(t) = \frac{a_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin[\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} \frac{\sin[(t + T_n)\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega + \int_0^{\infty} \frac{\sin[(t - T_n)\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega \right\}$$

откуда, с учетом (5), определим изменения в ПХ:

$$\Delta h_k(t) = a_0 h_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [h_0(t + T_n) + h_0(t - T_n)] \quad (11)$$

Из (11) следует, что изменения в ПХ представляют собой полусумму исходных ПХ с весовыми коэффициентами a_n (амплитудой гармоники с номером n аппроксимирующей функции)(9), сдвинутыми во времени на интервал $\pm T_n$ (период гармоники аппроксимирующей функции).

На рисунке 2 приведен пример влияния изменения АЧХ, описываемого двумя членами ряда Фурье, на ПХ.

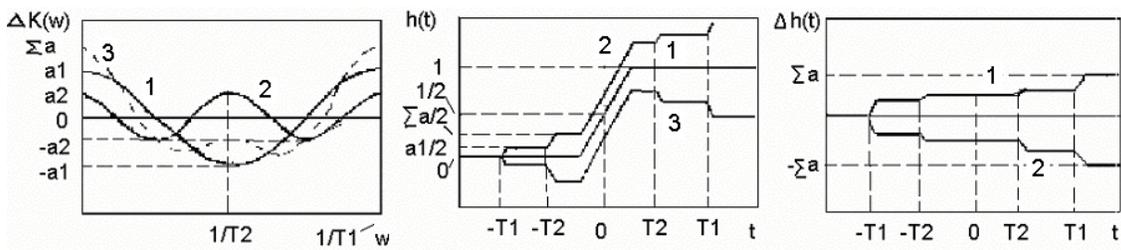


Рисунок 2 Коррекция ПХ изменением АЧХ

а) изменения АЧХ а) 1 - $a_1 \cos T_1 \Omega$, 2 - $a_2 \cos T_2 \Omega$, 3 - $\sum a_n T_n \Omega$;

б) измененная ПХ 1- $h_o(t)$, 2 - $h_o(t) + \Delta h_k(t)$, 3 - $h_o(t) - \Delta h_k(t)$;

в) отклонения ПХ 1 - $\Delta h_k(t)$, 2- $[-\Delta h_k(t)]$

Влияние изменения фазочастотной характеристики на переходную характеристику

Изменения ФЧХ в силу нечетности фазовой характеристики описывается нечетным рядом Фурье:

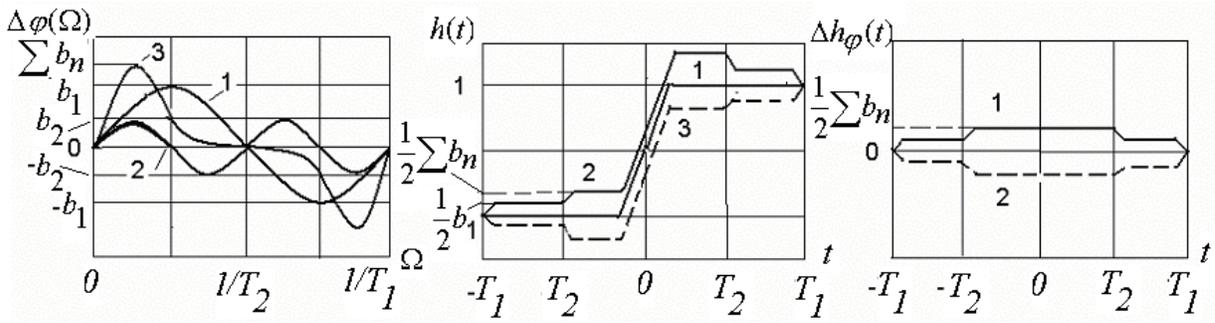
$$\Delta\varphi(\Omega) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin T_n \Omega \quad (12)$$

подставляя изменения ФЧХ в (7), получаем изменения в ПХ:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\varphi}(t) &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t+T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t-T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega \right] = \\ &= \frac{I}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n [h_o(t+T_n) - h_o(t-T_n)] \quad (13) \end{aligned}$$

Изменения ПХ, вызванные изменением ФЧХ, представляют собой полусумму взвешенных по b_n разностей исходных ПХ, сдвинутых во времени на $\pm T_n$. Отличается от изменений, вызванных изменением АЧХ знаком перед вторым членом суммы.

На рисунке 4 приведен пример влияния периодического отклонения ФЧХ от исходной характеристики, аппроксимированной двумя членами ряда Фурье, на ПХ. На рисунке также приведена ПХ, соответствующая изменению знака $\Delta\varphi(\Omega)$.



а)

б)

в)

Рисунок 4 - Коррекция ПХ изменением ФЧХ

а) изменения ФЧХ: а) $1 - b_1 \sin T_1 \Omega$, $2 - b_2 \sin T_2 \Omega$, $3 - \sum b_n \sin T_n \Omega$ б) измененная ПХ 1- $h_o(t)$, 2- $h_o(t) + \Delta h_\varphi(t)$, 3- $h_o(t) - \Delta h_\varphi(t)$, в) отклонения в ПХ 1- $\Delta h_\varphi(t)$, 2- $[-\Delta h_\varphi(t)]$

Влияние изменения частотной или фазовой характеристики на переходную характеристику в минимально-фазовых цепях

Выше рассмотрены независимые изменения АЧХ и ФЧХ, что возможно только в неминимально – фазовых цепях.

В минимально - фазовых цепях характеристики связаны между собой преобразованием Гильберта, и по любой из частотных характеристик можно однозначно определить другую характеристику:

$$\Delta\varphi(\omega_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Delta K(\omega)|}{\omega^2 - \omega_1^2} d\omega, \quad (14)$$

$$|\Delta K(\omega_1)| = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Delta\varphi(\omega)|}{\omega^2 - \omega_1^2} d\omega$$

Подставив в (14) выражение, описывающее изменение АЧХ в виде

$$|\Delta K(\omega)| = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega \quad (10),$$

в случае отсутствия постоянной составляющей ($a_0=0$)

получаем [2] выражение, описывающее изменения ФЧХ, вызванные изменениями АЧХ:

$$\Delta\varphi(\Omega) = -\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin T_n \Omega$$

Подставляя полученное выражение в (7), получим изменения в ПХ, вызванные изменением ФЧХ при изменении АЧХ в минимально-фазовой цепи:

$$\Delta h_{\varphi}(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t+T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t-T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega \right] = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [h_0(t+T_n) - h_0(t-T_n)]$$

Определим суммарные изменения ПХ в минимально-фазовых цепях, при изменении АЧХ с учетом (11):

$$\Delta h_{k,\varphi}(t) = \Delta h_k(t) + \Delta h_{\varphi}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n h_0(t-T_n) \quad (15)$$

При изменении ФЧХ в минимально – фазовой цепи, проделав аналогичные операции с выражениями (12),(14),(6) и суммируя с (13), получим соотношение, связывающее изменения в ПХ минимально-фазовой цепи по изменению ФЧХ:

$$\Delta h_{\varphi,k}(t) = -\sum_{n=1}^{\infty} b_n h_0(t-T_n) \quad (16)$$

Таким образом, при использовании минимально-фазовой цепи, изменения в ПХ можно определить по изменению любой из частотных характеристик.

Как следует из (15) и (16), при изменении АЧХ и ФЧХ в минимально-фазовой цепи в ПХ отсутствуют реакции перед передним фронтом

На рисунке 5 приведены графики для выражения (16), показывающие изменения в форме ПХ минимально-фазовой цепи, вызванные изменениями в ФЧХ, приведенными на рисунке 2а.

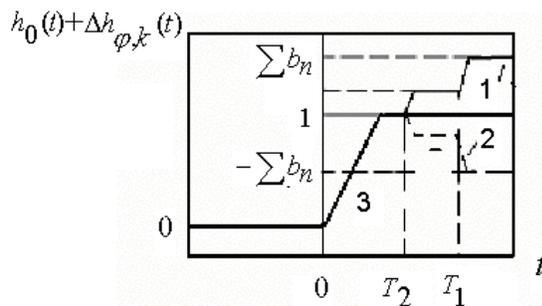


Рисунок 5 - Изменения в ПХ минимально-фазовой цепи при изменениях в ФЧХ:

1- при положительных b_n ; 2- при отрицательных b_n ; 3 - исходная ПХ $h_0(t)$

Передаточные функции корректирующих цепей описываются такими же математическими выражениями, которыми описывались отклонения в характеристиках:

$$|\overline{\Delta K(\omega)}| = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega$$

$$\Delta h_k(t) = a_0 h_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [h_0(t+T_n) + h_0(t-T_n)]$$

Эти выражения должны отличаться по знаку весовых коэффициентов a_n и b_n . Эти математические выражения могут быть реализованы в виде структурных многоканальных моделей

Структурные модели быстродействующих устройств и корректирующих цепей

Физически реализуемую частотную характеристику с достаточной точностью можно аппроксимировать рядом Фурье с конечным количеством членов в виде (8). Выше было показано, как аппроксимированные рядом Фурье изменения в частотных характеристиках влияют на переходную характеристику. В этом случае изменение переходной характеристики описывается математическими выражениями (11), (13), (15), (16). Для наглядного отображения процесса частотных и временных искажений сигнала в устройстве необходимо перейти от математических выражений, описывающих изменения в частотных и переходных характеристиках на операции над сигналами, производимыми простыми, хорошо изученными элементами. На основе этих выражения можно представить простую математическую модель изменения переходной характеристики.

Как следует из выражений, изменение переходной характеристики $\Delta \hat{h}(t)$ представляет собой сумму характеристик с весовыми коэффициентами a_n и b_n , смещенные во времени на интервалы T_n , где a_n , b_n , и T_n - соответствующие коэффициенты и период аппроксимирующего ряда Фурье, определяемые по выражению (9).

Операции суммирования, усиления или ослабления, определяемого коэффициентами a_n и b_n , задержки во времени на величину T_n могут быть реализованы с помощью стандартных структурных элементов: разветвителей, сумматоров, линий задержки, инверторов, устройств управления амплитудой сигнала. В результате реализации математических операций с помощью типовых элементов получим структурную многоканальную модель, которая описывает изменения переходной характеристики.

Возможны четыре варианта реализации математических выражений (11),(13),(15),(16) с помощью структурных схем, описывающих одинаковые изменения в переходной характеристике:

Эти структурные схемы приведены на рисунке 6.

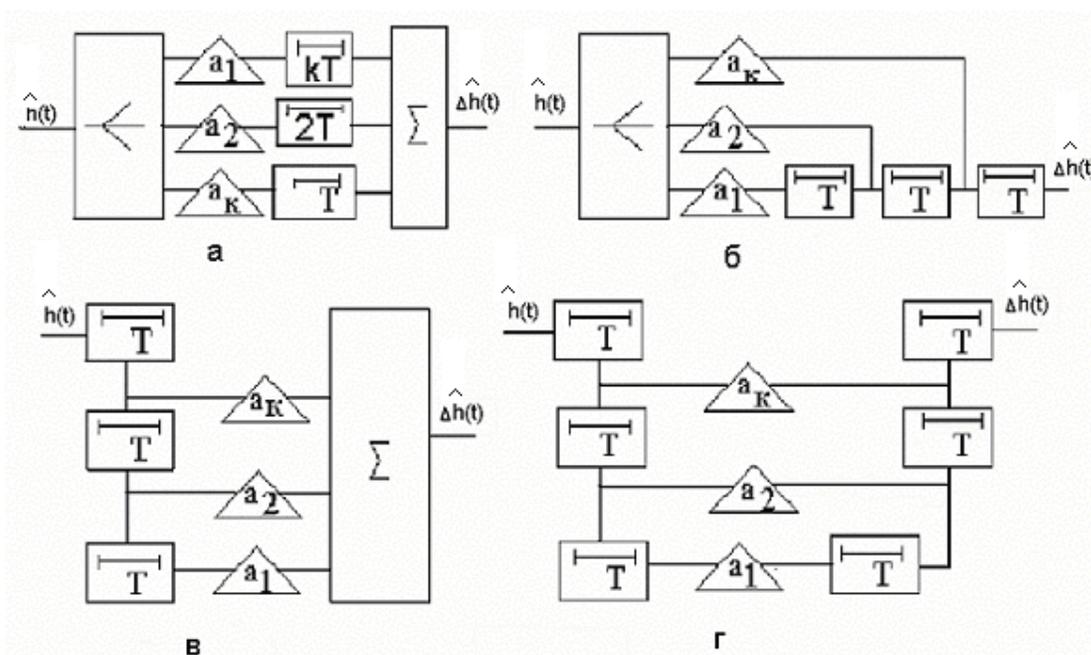


Рисунок 6 Структурные модели изменения переходной характеристики:

- а) параллельная модель б) параллельно-последовательная модель,
- в) последовательно-параллельная модель, г) последовательная модель.

Коэффициенты a_n и b_n являются весовыми коэффициентами, связывающими изменения амплитуды спектральных составляющих с изменениями формы переходной характеристики, а постоянные времени T_n показывают моменты

времени, в которые происходит изменение переходной характеристики. Приведенные на рисунке 6 структуры отражают особенность устройств пикосекундного диапазона – многоканальность передачи сигнала.

После дополнения каналом с единичным коэффициентом передачи получим модели передаточных характеристик устройства, показывающих процесс изменения сигнала при прохождении через устройство. На рисунке 7 приведена параллельная структура, моделирующая формирование переходной характеристики в соответствии с выражением (4), а на рисунке 8 – структурная схема передаточной функции по выражению (3).

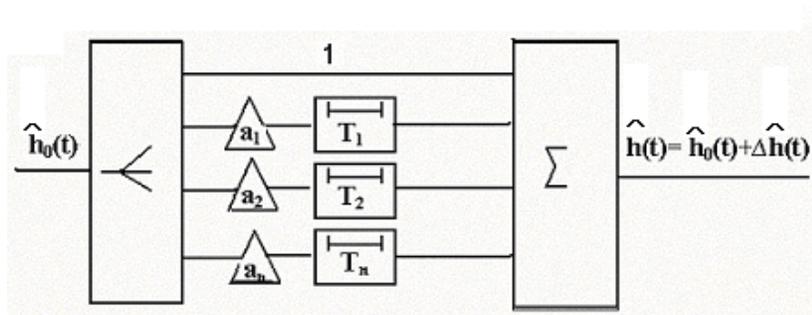


Рисунок 7. Структурная схема формирования переходной характеристики

$$\hat{h}(t) = \hat{h}_0(t) + \Delta\hat{h}_k(t)$$

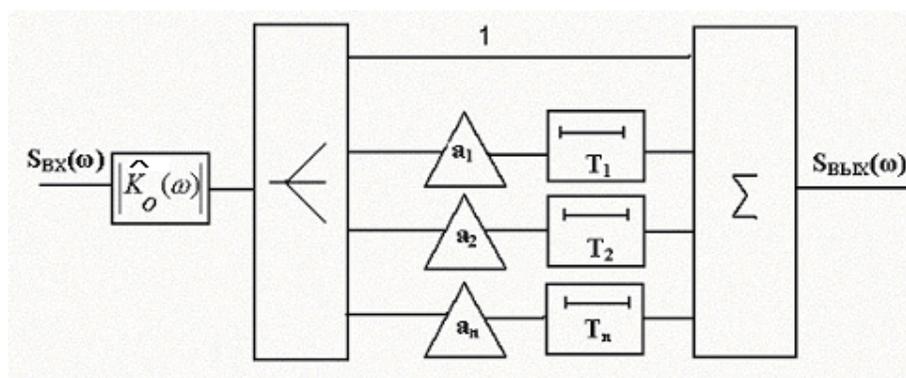


Рисунок 8. Структурная схема передаточной функции

$$|\hat{K}(\omega)| = |\hat{K}_o(\omega)| [1 + |\Delta\hat{K}(\omega)|]$$

В корректирующих цепях могут использоваться те же структуры и стандартные элементы, которые использовались в структурных моделях.. Дополнительно используются инверторы полярности для изменения знаков весовых коэффициентов.

На рисунке 13 приведена структура корректирующей цепи параллельного типа. Она отличается от структурной модели изменения переходной характеристики, приведенной на рисунке 6 наличием инвертора полярности.

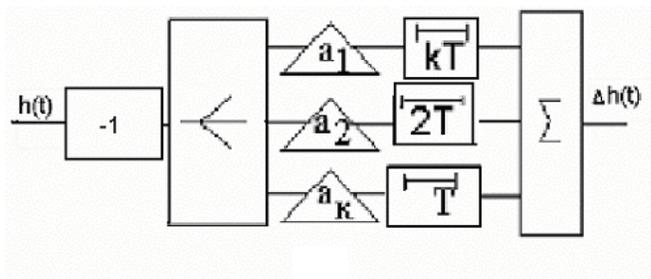


Рисунок 13. Параллельная структура корректирующей цепи

при параллельном или последовательном соединении корректирующей цепи, приведенной на рисунке 13 и цепи, моделирующей отклонения корректируемой цепи со структурой, приведенной на рисунке 6а, происходит полная компенсация искажений. В результате, с учетом (4), переходная характеристика устройства становится эталонной, $h(t)=h_0(t)$. Действие других структур корректирующих цепей дает аналогичные результаты, поэтому практическую реализацию корректирующих цепей выбирают с учетом конструктивных особенностей устройства.

Практическая реализация корректирующих цепей ограничивается условиями физической реализуемости, приведенными в разделе 2.2.

Кольцевая корректирующая параллельного типа

Реализация непосредственно многоканальных моделей связана с определенными трудностями, основная из которых - взаимное влияние каналов. Для уменьшения взаимного влияния необходимо применения однонаправленных разветвителей, сумматоров, устройств управления амплитудой. Эти трудности ограничивают число каналов и делают громоздкими корректирующие цепи.

Для коррекции можно использовать одноканальные корректирующие цепи, передаточные функции которых описывается теми же выражениями, что и передаточные функции многоканальной структуры [1], [4], [5], [7]. Примером такой цепи служит цепь отражательного типа [6], представляющая собой линию передачи с

неоднородностями, включенную параллельно генератору и нагрузке, приведенную на рисунке 14. В таких цепях сигнал проходит, испытывая многократные отражения и как бы образуя кольцо.

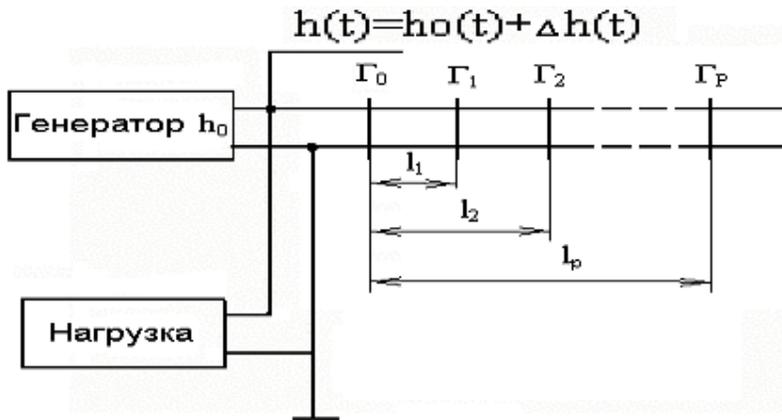


Рисунок 14. Параллельная корректирующая цепь отражательного типа

Для коррекции однородная, несогласованная линия передачи с коэффициентом отражения от входа Γ_0 , подключается к точке соединения генератора и нагрузки. На расстояниях l_1, l_2, \dots, l_p в линии передачи включаются неоднородности $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_p$. В результате отражения от неоднородностей в нагрузку поступает сумма разнесенных во времени отраженных от каждой неоднородности сигналов, складывающихся с сигналом, поступающим с генератора.

Коэффициент отражения от такой линии передачи со стороны входа описывается известным соотношением[8]:

$$\Gamma(j\omega) = \Gamma_0(j\omega) + \frac{\sum_{p=1}^m \Gamma_p(j\omega) \exp(-j2\beta l_p) + \sum 2\Gamma_p(j\omega)\Gamma_{p-1}(j\omega) \exp(2\beta l_{p+1})}{1 - \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \Gamma_p(j\omega)\Gamma_q(j\omega) \exp(-2\beta l_{pq})} \dots \quad (21)$$

где l_{pq} - расстояние между неоднородностями p и q [1]; $l_1 - l_m$ - расстояние от входа линии до соответствующей неоднородности; $\Gamma_0(j\omega) - \Gamma_m(j\omega)$ - комплексные коэффициенты отражения от неоднородностей; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ - фазовая постоянная; λ - длина волны в линии передачи.

Пренебрегая вторичными отражениями в линии, получим

$$\Gamma(j\omega) = \Gamma_0(\omega) + \sum_{p=1}^m \Gamma_p(j\omega) \exp(-j\beta l_p) \quad (22)$$

Сравнивая (22) с (10), получаем выражение для определения частотных характеристик корректирующей цепи $|\overline{\Delta K(\omega)}| = -|\Gamma(\omega)|$; $\Delta\varphi(\omega) = 2\omega\tau_p$, откуда определяем необходимые коэффициенты отражения и время задержки в линии передачи $a_n = -\Gamma_p$; $T_h = 2\pi\tau_p$

Кольцевая корректирующая цепь последовательного типа

Корректирующая цепь представляет собой линию передачи со включенными в нее различными неоднородностями, подключаемую последовательно между генератором $h_0(t)$ и нагрузкой (рисунок 15).

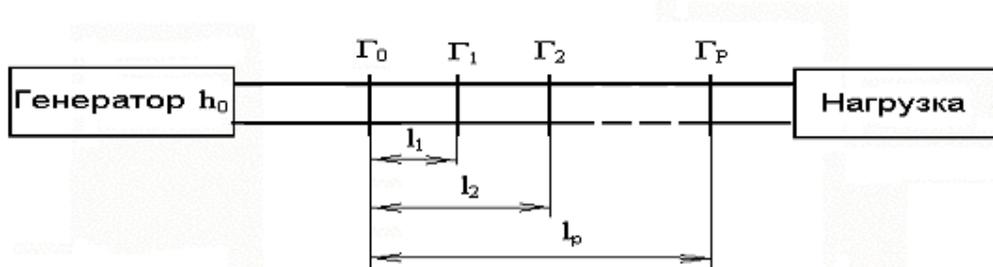


Рисунок 15. Последовательная корректирующая цепь отражательного типа

Коэффициент передачи такой КЦ описывается известным выражением:

$$K(j\omega) = 1 + \Gamma(j\omega), \quad \text{где } \Gamma(j\omega) - \text{коэффициент отражения от входа}$$

неоднородной линии передачи, определяемый по выражению (22).

С учетом выражения (22) получим передаточную функцию неоднородной линии передачи без учета вторичных отражений:

$$K(j\omega) = 1 + \Gamma_0(\omega) + \sum_{p=1}^m \Gamma_p(j\omega) \exp(-j\beta l_p) \quad (24)$$

Из полученного выражения следует, что отраженные от неоднородностей сигналы с величиной, определяемой коэффициентом отражения, поступают на генератор, где складываются с выходным сигналом с задержкой во времени, определяемой длиной отрезка линии передачи до неоднородности.

Неоднородности в линии передачи и их влияние на характеристики

Параметры неоднородностей, необходимых для реализации коэффициентов отражения $\Gamma_p(j\omega)$ определяются величиной сопротивления – при последовательном включении элементов в линию или величиной проводимости – при параллельном включении элементов по известным выражениям:

$$\Gamma(j\omega) = \frac{Z(j\omega)}{Z(j\omega) + 2\rho} \quad \Gamma(j\omega) = -\frac{Y(j\omega)}{Y(j\omega) + 2/\rho} \quad (23)$$

В качестве элементов неоднородностей используются включаемые параллельно или последовательно двухполюсники на основе дискретных сопротивлений, емкостей и индуктивностей, а также изменения волнового сопротивления по длине линии передачи $p(l)$, [5]. Для получения отрицательного коэффициента отражения используется параллельное подключение элементов к линии передачи или уменьшение волнового сопротивления линии, для получения положительного коэффициента отражения используется последовательное подключение элементов

Для определения значения элементов по временной зависимости коэффициента отражения используется зондирование линии стандартными сигналами с известным спектром. Чаще всего используется единичный перепад напряжения.

Рассмотрим параллельное подключение емкости в линию. Операторный коэффициент отражения, как следует из ТОЭ,

$$\Gamma(p) = -\frac{p\tau}{1 + p\tau}$$

При малых значениях емкости, $p\tau \ll 1$, $\Gamma(p) \approx -p\tau$ Выражение означает, что во временной области происходит дифференцирование зондирующего сигнала и инверсия.

В результате возникает отраженный сигнал $U_{\text{отп}}(t) = -\tau \frac{dU_{\text{зонд}}}{dt}$.

Если зондирующий сигнал имеет линейно нарастающий фронт $t_{\phi p}$ и амплитуду

$$E, \text{ то } U_{\text{отр}}(t) = -\frac{E\tau}{t_{\phi p}} = U_0$$

Учитывая, что постоянная времени заряда $\tau = \frac{c\rho}{2}$ определим значение емкости

$$\text{по величине отраженного сигнала: } C = 2 \frac{t_{\phi p} U_0}{\rho \cdot E}.$$

Обычно в расчетах используются нормированные значения коэффициента отражения, $\bar{U}_0 = \frac{U_0}{E}$, далее под U_0 будем подразумевать нормированную величину.

Заряд емкости происходит по экспоненциальному закону, поэтому погрешность определения величины емкости возрастает при увеличении U_0 . При $U_0 = 0,5$ погрешность $\Delta C = 20\%$. При больших значениях U_0 необходимо определять площадь

$$\text{отраженного сигнала: } C = \frac{2}{\rho E} \int_0^{\infty} U_0(t) dt.$$

При последовательном включении в линию передачи индуктивности

$$\Gamma(p) = \frac{p\tau}{1 + p\tau}$$

Меняется знак коэффициента отражения. Поэтому все полученные формулы справедливы и для индуктивности, с учетом $\tau = \frac{L}{2\rho}$. Величину индуктивности

$$\text{определяем по формуле } L = \frac{2 \cdot \rho \cdot t_{\phi p} \cdot u_0}{C}$$

$$\text{При больших коэффициентах отражения } L = \frac{2 \cdot \rho}{E} \int_0^{\infty} U_0(t) dt$$

Последовательная емкость в линии передачи: $\Gamma(p) = \frac{1}{1 + p\tau_0}$ Происходит заряд емкости с постоянной времени $\tau_0 = 2\rho \cdot C$

По известному времени нарастания напряжения на конденсаторе и фронту зондирующего импульса определим время заряда конденсатора

$$t_{зар} = \sqrt{t_{нар}^2 - t_{фр}^2}, \text{ с учетом } t_{зар} = 2,2 \tau_0$$

$$C = \frac{0,22}{\rho} \sqrt{t_{нар}^2 - t_{фр}^2}$$

Аналогичны определения параллельной индуктивности по операторному

коэффициенту передачи
$$\Gamma(p) = -\frac{1}{1 + p\tau_0} :$$

$$L = 0,22 \cdot \rho \sqrt{t_{нар}^2 - t_{фр}^2}$$

В отличие от классических корректирующих цепей, где для коррекции частотных характеристик используется согласование между генератором и нагрузкой, эффективность действия КЦ на переходной характеристике увеличивается при рассогласовании.

Применение отрезков линии передачи для коррекции характеристик

Для коррекции переходной характеристики возможно применение каскадного соединения отрезков линии передачи с изменяющимся волновым сопротивлением. Волновое сопротивление i – го отрезка линии передачи для получения необходимого коэффициента отражения определяется по известному выражению:

$$\rho_i = \rho_0 \frac{1 + \Gamma_i}{1 - \Gamma_i} \quad (25), \quad \text{где } \rho_0 - \text{ волновое сопротивление входного}$$

отрезка линии передачи, Γ_i - коэффициент отражения i – го отрезка линии передачи относительно входного отрезка.

Из (25) следует, что
$$\Gamma_i = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i + \rho_0}$$

Рассмотрим плавное изменение волнового сопротивления линии передачи. В случае небольшого скачка волнового сопротивления при переходе от отрезка линии передачи i к отрезку $i+1$ получим коэффициент отражения

$$\Gamma_{i+1} = \frac{\Delta\rho_{i+1}}{2\rho_0}, \quad \text{где } \Delta\rho_{i+1} = \rho_{i+1} - \rho_i$$

Учитывая, что $\frac{2\pi\Delta l_i}{\lambda} = \omega\Delta t_i = \beta\Delta l_i$, где Δl_i - длина i -ого отрезка линии, Δt_i - время, а β - постоянная распространения сигнала по i -ому отрезку линии, можем определить фазовый сдвиг, вносимый данным отрезком, путем введения экспоненциального множителя $e^{-j\beta\Delta l_i} = e^{-j\Delta\varphi}$

С учетом (15), скорректированную неоднородной линией передачи переходную характеристику представим в виде

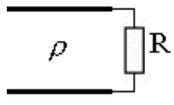
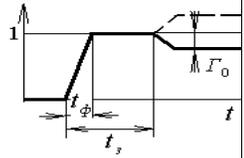
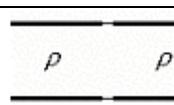
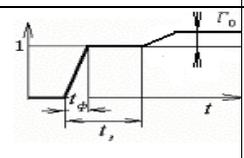
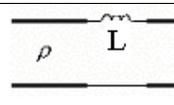
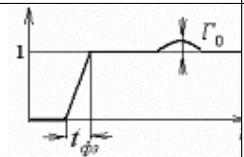
$$h_0(t) = h(t) + \Delta h_k(t) = h(t) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n h(t - T_n) = 1 + \Gamma_0 + \sum_{i=1}^p \Gamma_i \exp(-j\beta\Delta l_i)$$

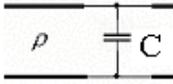
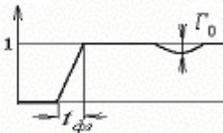
В случае согласования входного отрезка линии передачи, $\Gamma_0 = 0$, получим изменения в переходной характеристике, вызванные неоднородной линией передачи:

$$\Delta h_k(t) = \sum_{i=1}^p \frac{\Delta\rho_{i+1}}{2\rho_i} \exp(-j\beta\Delta l_i)$$

Полученное выражение показывает, как меняется переходная характеристика при изменении относительного волнового сопротивления корректирующей линии передачи по ее длине.

Сведем наиболее часто используемые схемы корректирующих цепей, формы переходных характеристик и расчетные формулы в таблицу.

Схема	Рефлектограмма	Расчетное соотношение
		$R = \rho \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$
		$\rho_1 = \rho \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$
		$L = 2\rho \cdot t_{\phi p} \cdot \Gamma_0$

		$C = \frac{2}{\rho} \cdot t_{\phi p} \cdot \Gamma_0$
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------

Коррекция переходной характеристики изменением фазовой характеристики

Выше было отмечено, что изменением фазовой характеристики можно уменьшать время нарастания ПХ путем ликвидации затянутого начального участка;. При этом достигается минимальное время нарастания при заданном значении верхней граничной частоты.

Для коррекции фазовой характеристики необходимо изменять фазовые сдвиги (задержки) спектральных составляющих сигнала. Для этого можно использовать каскадное соединение минимально-фазового звена с требуемой амплитудно-частотной характеристикой и соответствующей ей фазовой характеристикой с фазовым корректором с неминимально-фазовой передаточной функцией [8].

В качестве неминимально-фазового корректора может использоваться, например, классическая мостовая схема, приведенная на рисунке 16.

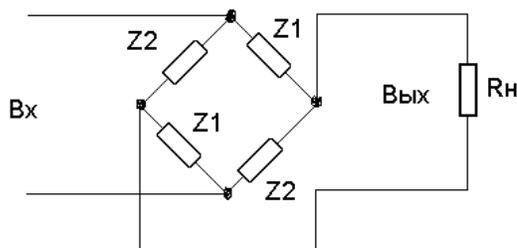


Рисунок 16. Мостовая схема фазового корректора

При $Z1=1/j\omega C$ и $Z2=1/j\omega L$, где $R_n^2 C = L$, получим передаточную функцию фазового корректора первого порядка:

$$K(j\omega) = \frac{j\omega RC - 1}{j\omega RC + 1} = e^{j\phi_n}$$

Передаточная функция этого звена имеет нуль в правой полуплоскости и полюс в левой полуплоскости на комплексной плоскости. Модуль коэффициента передачи фазового корректора равен 1, а фазовый сдвиг –

$$\varphi_n = -\text{Arctg} \frac{2\omega RC}{\omega^2 R^2 C^2 - 1} \quad (26)$$

Максимальный фазовый сдвиг, равный 90 градусов, получается при условии $\omega RC=1$.

Рассмотрим свойства каскадного соединения минимально-фазового и неминимально-фазового линейных звеньев. Пусть минимально-фазовое звено имеет оптимальную амплитудно-частотную характеристику, соответствующую выражению (1). Фазовая характеристика минимально-фазового звена определяется через преобразование Гильберта:

$$\varphi_m(\omega_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|K(\omega)|}{\omega^2 - \omega_1^2} d\omega .$$

при $|K(\omega)|=K_0$, $0<\omega<\omega_b$ получим [8] $\varphi_m(\Omega) = \frac{2K_0}{\pi} \text{Arth}\Omega$

где $\Omega = \frac{\omega}{\omega_g}$ - нормированная частота.

Обозначим в (26) $m = \omega_g RC$, тогда $\varphi_n(\Omega) = -\text{Arctg} \frac{2m\Omega}{m^2\Omega^2 - 1}$

Найдем нелинейную составляющую фазовой характеристики каскадного соединения минимально-фазового и неминимально-фазового линейных звеньев.

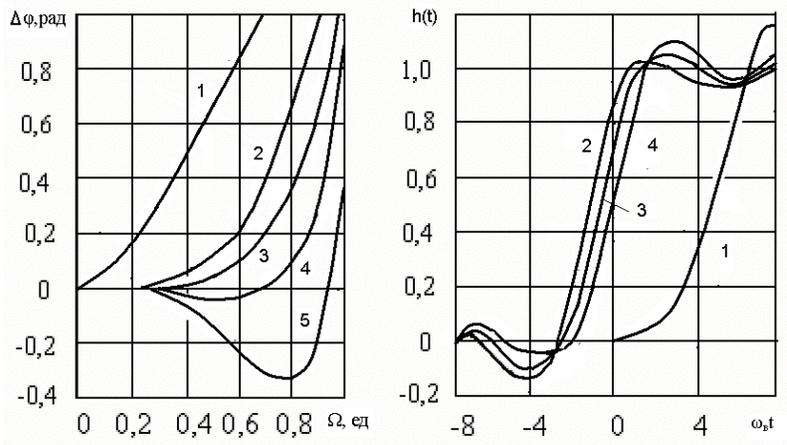
Разлагая выражения в ряд и сложив фазовые характеристики минимально-фазового и неминимально-фазового звеньев, определим нелинейную составляющую фазовой характеристики [8]:

$$\Delta\varphi(\Omega) = \varphi_m(\Omega) + \varphi_n(\Omega) = \frac{2K_0}{\pi} \text{Arth}\Omega - \text{Arctg} \frac{2m\Omega}{m^2\Omega^2 - 1} - \frac{2K_0}{\pi} + \frac{2m\Omega}{m^2\Omega^2 - 1} \quad (27)$$

Как следует из выражения (27), нелинейность фазовой характеристики каскадного соединения звеньев зависит от коэффициента передачи минимально-фазового звена K_0 и постоянной времени неминимально-фазового звена m . Путем

оптимизации параметров K_0 и m можно свести к минимуму нелинейность фазовой характеристики.

На рисунке 17а приведены зависимости $\Delta\varphi(\Omega)$ при различных значениях K_0 и m , а на рисунке 17б - соответствующие им переходные характеристики, рассчитанные на ЭВМ.



а

б

Рисунок 17. Коррекция переходной характеристики изменением фазовой характеристики: а) 1 - фазовый корректор отсутствует, 2 - $K_0 = \frac{3}{2}\pi, m=1$; 3 - $K_0 = \pi, m=1$; 4 - $K_0 = \frac{\pi}{2}, m=1$; 5 - $K_0 = \frac{\pi}{2}, m=1,5$, б) 1 - при отсутствии корректора, 2 - $K_0 = \frac{\pi}{2}, m=1,5$, 3 - оптимальная ПХ, $K_0 = \frac{\pi}{2}, m=1$; 4 - $K_0 = \frac{\pi}{2}, m=1$

Из рисунка 17а, видно, видно как влияет на нелинейность фазовой характеристики выбор коэффициента передачи минимально-фазового звена и постоянная времени фазового корректора. Например, при $K_0 = \frac{\pi}{2}$ и $m=1$ отклонение ФЧХ от линейной не более 0,05 рад до $\Omega = 0,8$. Применение фазового звена второго порядка позволяет дополнительно уменьшить нелинейность ($\Delta\varphi < 0,07$ рад до $\Omega=0,9$): [8].

Из рисунка 17б следует, что применение фазового корректора с $m=1$ и минимально-фазового звена с коэффициентом передачи $K_0 = \frac{\pi}{2}$ переходная характеристика каскадного соединения минимально-фазового и неминимально-фазового звена близка к оптимальной характеристике.

Используя плавное изменение K_0 , можно управлять величиной выброса. На использование изложенного выше способа управления формой переходной характеристики получено авторское свидетельство на изобретение [9].

Для реализации схем с неминимально – фазовыми передаточными функциями в пикосекундном диапазоне вместо мостовых часто используются многоканальные структуры (см. раздел 4.2).

Условия физической реализуемости минимально–фазовых и неминимально – фазовых устройств

Реализация временных характеристик.

Физически реализуемые цепи должны удовлетворять условию причинности: реакция на выходе устройства должна быть вызвана входным воздействием. Проверка выполнения условия причинности во временной области сводится к определению реакции устройства на входное воздействие в виде единичного перепада напряжения, имеющего бесконечный спектр. Необходимо, чтобы выполнялось условие $h(t) = 0$ при $t < 0$. Момент времени $t = 0$ соответствует времени подачи входного перепада напряжения.

Кроме того, реализуемая система должна быть устойчивой. Это означает, что переходная характеристика должна удовлетворять условию абсолютной интегрируемости:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt < \infty$$

Реализация частотных характеристик.

Амплитудно-частотная и фазочастотная составляющие причинной (минимально-фазовой) передаточной функции связаны преобразованием Гильберта, и выполнение условия физической реализуемости в частотной области можно проверить по любой частотной характеристике. Обычно проверяется выполнение критерия Пэйли - Винера,

который для амплитудно-частотной характеристики (3) имеет вид:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln \left\{ \left| \widehat{K}_o(\omega) \right| \left[1 + \left| \Delta \widehat{K}(\omega) \right| \right] \right\}}{1 + \omega^2} d\omega < \infty.$$

Критерий удобен при использовании аппроксимации частотных характеристик с помощью ряда Фурье. Для проверки условия физической реализуемости в частотной области нужно, чтобы за полосой пропускания, начиная с конечной частоты, амплитудно-частотная характеристика $|K(\omega)|$ спадала со скоростью большей, чем $1/\omega^2$. В предложенных моделях проверка выполнения критерия удобно проводить по коэффициентам ряда Фурье. Необходимо, чтобы, начиная с n -ого члена ряда, выполнялось условие: $a_n / a_1 \leq 1/n^2$, $b_n / b_1 \leq 1/n^2$.

Реализация неминимально-фазовых характеристик.

Как следует из рисунка 5, минимально – фазовые цепи удовлетворяют условию причинности. Приведенные на рисунках 2 и 4 переходные характеристики неминимально-фазовых цепей этому условию не отвечают, то есть являются условно – причинными или физически нереализуемыми без выполнения дополнительного условия. Для реализации неминимально-фазовых цепей необходимо введение в модель дополнительной линии задержки, ликвидирующей появление выходного сигнала раньше входного, со временем задержки $T = T_1$, где T_1 - период первой гармоники ряда Фурье, аппроксимирующего изменения частотных характеристик. Через эту линию задержки необходимо пропустить все спектральные составляющие сигнала.

Основные этапы по расчету корректирующих цепей

1 Этап

Записать выражения, описывающие частотные характеристики:

- исходную амплитудно-частотную характеристику $|K(\omega)|$,
- необходимую амплитудно-частотную характеристику $K_0(\omega)$

Применив нормировку $\omega_e \cdot \tau = 1$ $\Omega = \frac{\omega}{\omega_e}$, получим

$$|K(\Omega)|, |K_0(\Omega)|$$

2 Этап.

Определить отклонения между частотными характеристиками

$$\Delta K(\Omega) = K_0(\omega) - K(\omega)$$

3 Этап.

Проверить условие физической реализуемости. Для частотной характеристики используется критерий Пейли-Винера

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln \left\{ \widehat{K}_o(\omega) \left[1 + |\Delta \widehat{K}(\omega)| \right] \right\}}{1 + \omega^2} d\omega < \infty.$$

Для проверки условия физической реализуемости в частотной области нужно, чтобы за полосой пропускания, начиная с конечной частоты, амплитудно-частотная характеристика $|K(\Omega)|$ спадала со скоростью большей, чем $1/\Omega^2$.

4 **Этап.** Проведем аппроксимацию отклонения между частотными характеристиками::

- Продолжить рассматриваемую функцию четным или нечетным образом до частоты $2 \cdot \Omega_g$,
- Записать выражение аппроксимирующей функции для четного или нечетного ряда Фурье,
- Вычислить коэффициенты ряда Фурье по известным соотношениям:

$$a_0 = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} |\Delta K(\Omega)| d\Omega \quad a_n = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} |\Delta K(\Omega)| \cos \frac{2\pi\Omega}{\Omega_A} \cdot N d\Omega \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{\Omega_A} \int_0^{\Omega_A} \Delta \varphi(\Omega) \sin \frac{2\pi\Omega}{\Omega_A} \cdot N d\Omega.$$

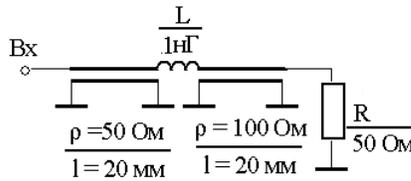
Коэффициенты определяются, как правило, численными методами

- По величине коэффициентов ограничить количество членов ряда Фурье, исходя из заданной точности реализации характеристики. Записать выражение для аппроксимирующей функции.
- 5 **Этап.** По известным коэффициентам ряда Фурье и временам задержки определить характер неоднородности, величину корректирующего элемента и длину линии задержки, реализующей нужное время задержки импульса до неоднородности.
- 6 **Этап** Определить изменения в переходной характеристике и построить переходные характеристики для неминимально-фазовой или для минимально-фазовой цепи

Задачи к индивидуальному заданию №1

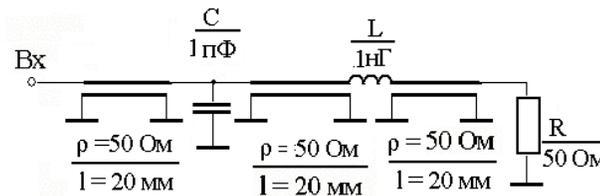
Индивидуальное задание №1

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр} = 200$ пс, $R_f = 100 \text{ Ом}$?

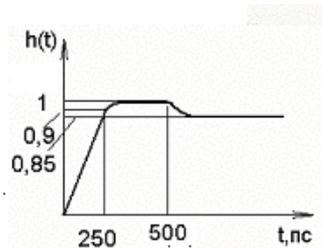
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 100 \text{ пс}, R_f = 50 \text{ Ом}$$

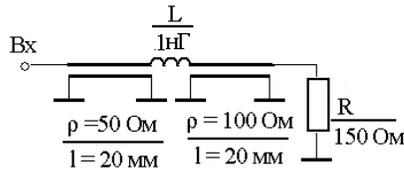
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_f = 50 \text{ Ом}$

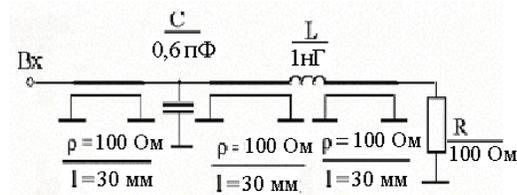
Индивидуальное задание №2

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



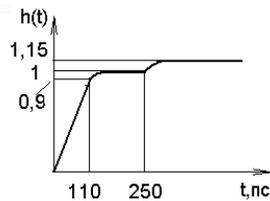
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

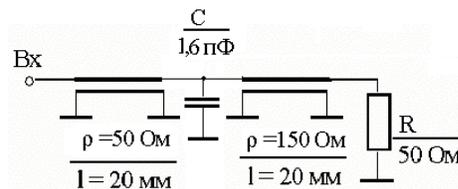
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс определите значения элементов схемы при $R_r=200 \text{ Ом}$

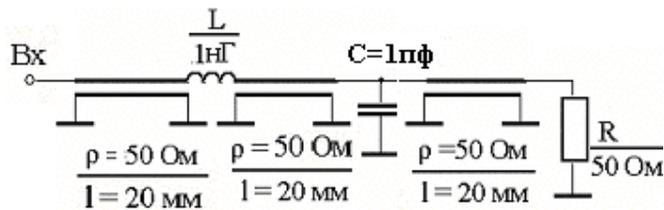
Индивидуальное задание №3

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



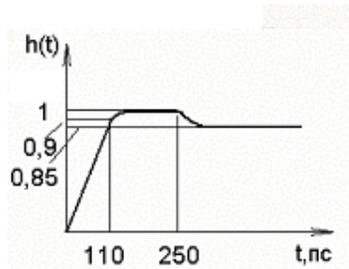
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=100$ пс.

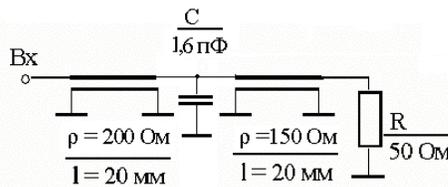
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=100$ Ом

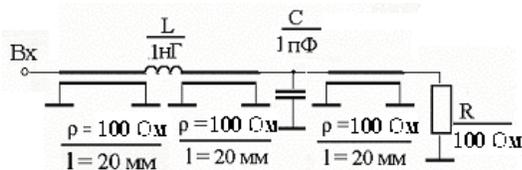
Индивидуальное задание №4

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



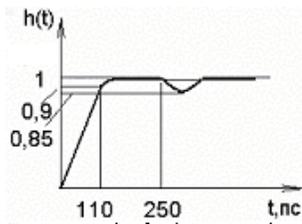
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 100$ Ом?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс, $R_r = 100$ Ом?

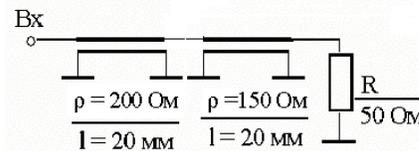
Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=150 \text{ Ом}$

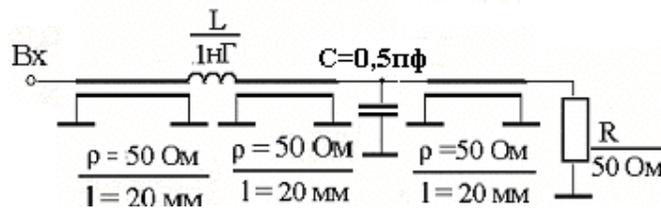
Индивидуальное задание №5

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



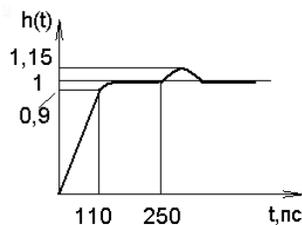
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200 \text{ пс}$, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=150 \text{ пс}$.

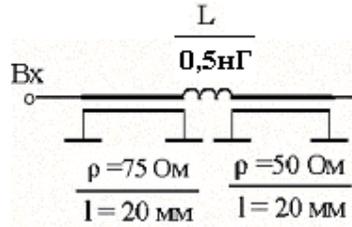
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=50 \text{ Ом}$

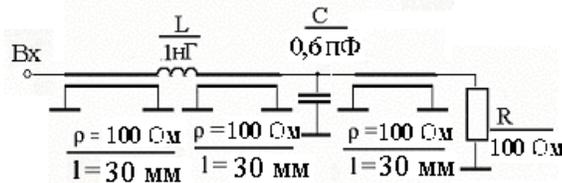
Индивидуальное задание №6

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



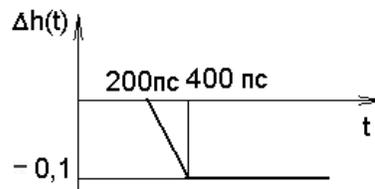
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=100$ пс.

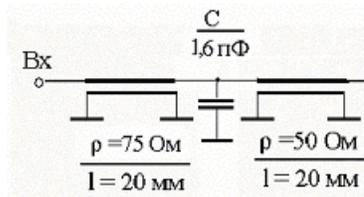
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=100$ Ом.

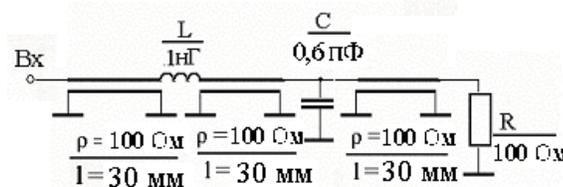
Индивидуальное задание №7

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



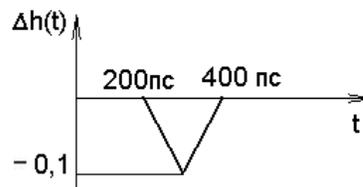
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=100$ пс.

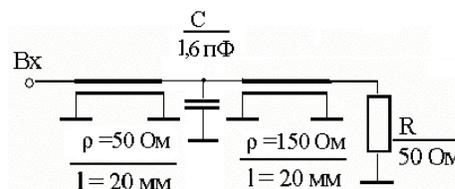
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=150$ Ом.

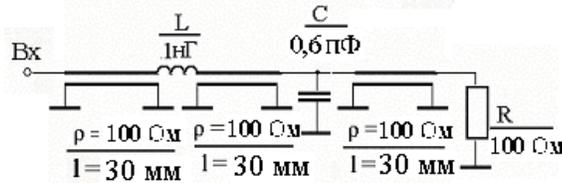
Индивидуальное задание №8

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



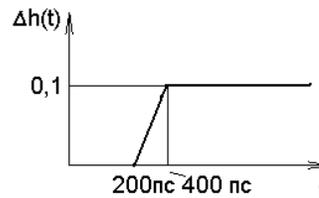
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

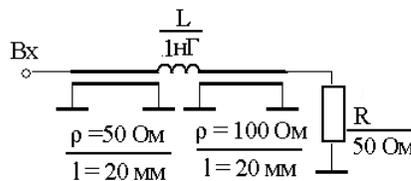
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=75$ Ом.

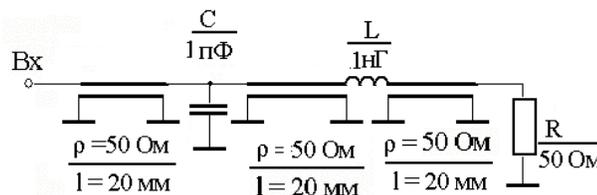
Индивидуальное задание №9

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



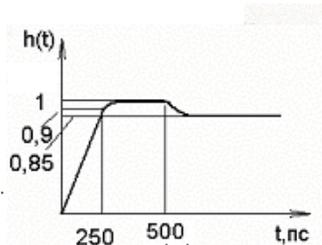
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 50$ Ом?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = \tau=200$ пс, $R_r = 50\text{Ом}$

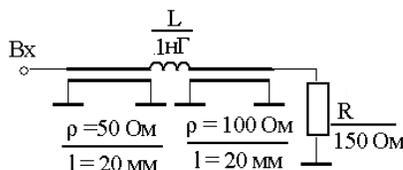
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100$ Ом

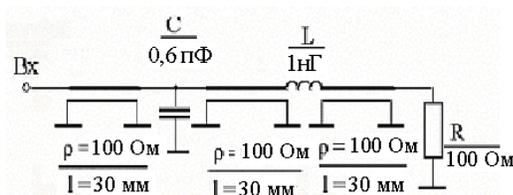
Индивидуальное задание №10

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 50\text{Ом}$?

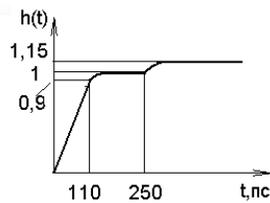
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 100 \text{ пс}, R_r = 100\text{Ом}?$$

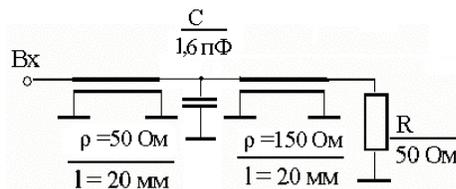
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс
определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

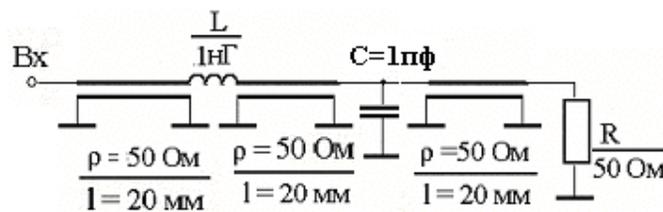
Индивидуальное задание №11

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



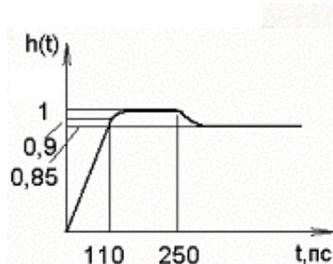
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если
длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100 \text{ пс}$, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной
характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200 \text{ пс}$.

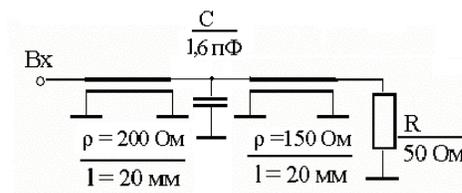
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и
определите значения элементов схемы при $R_r=75 \text{ Ом}$

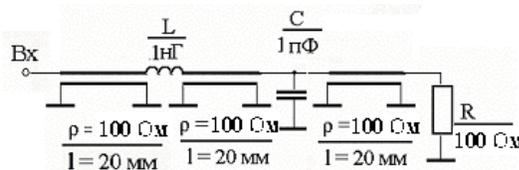
Индивидуальное задание №12

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

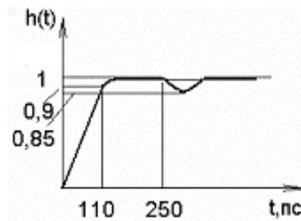
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 100 \text{ пс}, R_r = 100 \text{ Ом},$$

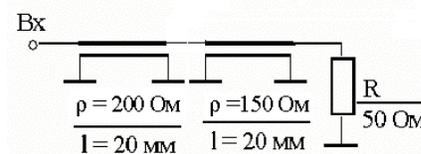
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=75 \text{ Ом}$

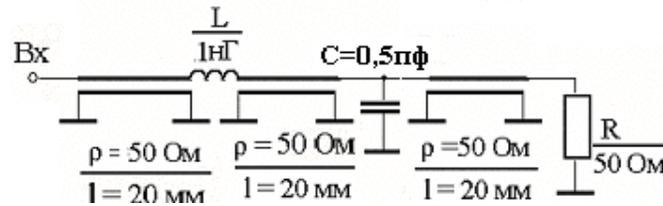
Индивидуальное задание №13

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



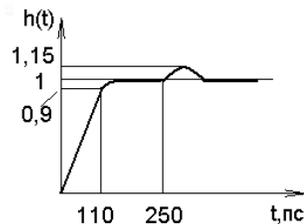
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = 100$ пс.

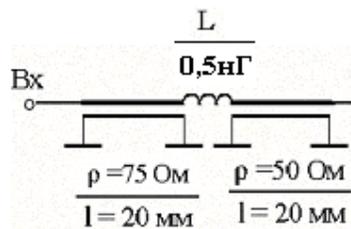
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

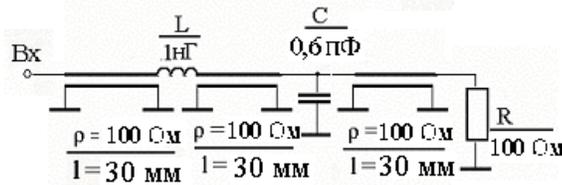
Индивидуальное задание №14

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



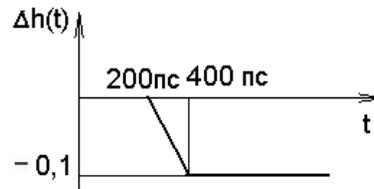
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=200$ пс, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

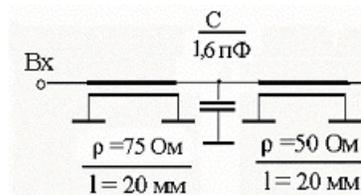
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=200$ Ом.

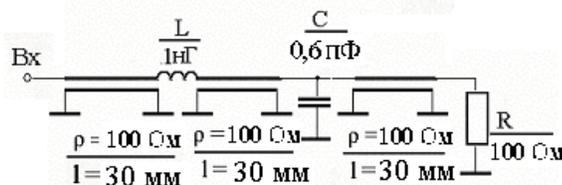
Индивидуальное задание №15

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



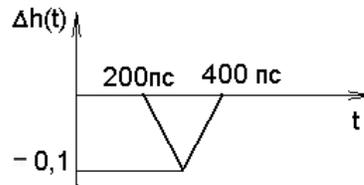
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 100$ Ом?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=150$ пс.

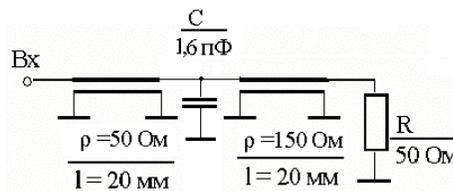
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=100 \text{ Ом}$.

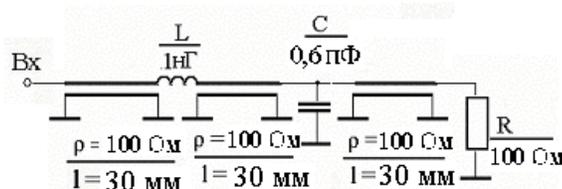
Индивидуальное задание №16

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



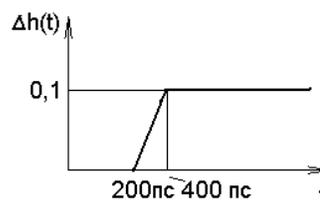
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200 \text{ пс}$, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=150 \text{ пс}$.

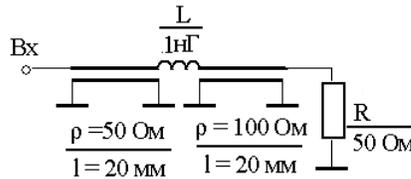
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=200 \text{ Ом}$.

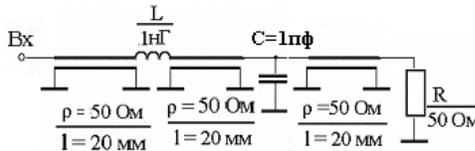
Индивидуальное задание №17

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



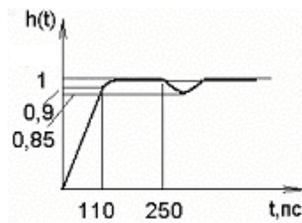
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100 \text{ пс}$, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200 \text{ пс}$.

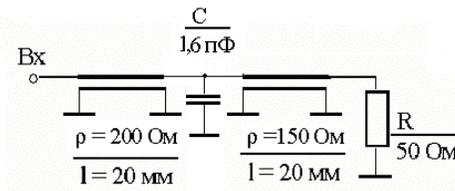
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=75 \text{ Ом}$

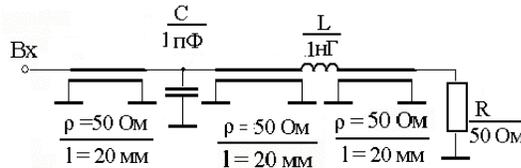
Индивидуальное задание №18

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

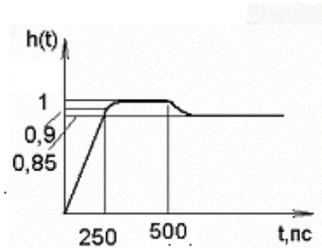
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

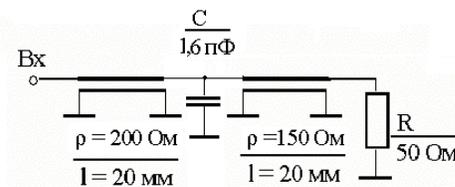
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r = 100 \text{ Ом}$

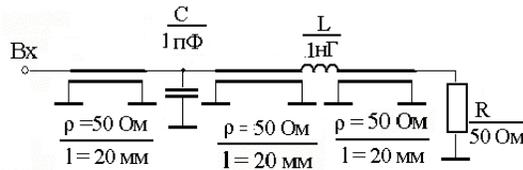
Индивидуальное задание №19

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

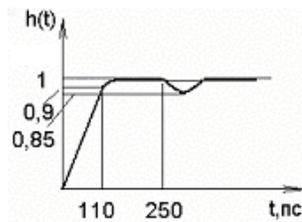
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

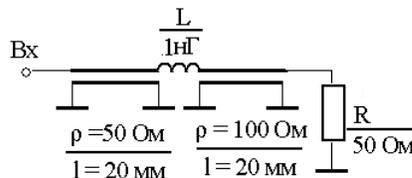
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r = 75 \text{ Ом}$

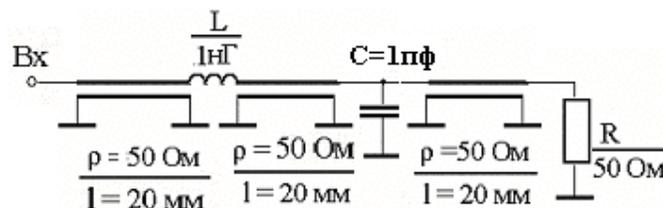
Индивидуальное задание №20

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



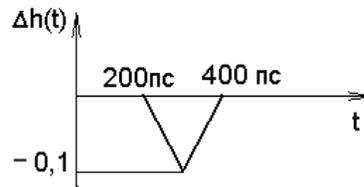
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}} = 100 \text{ пс}$, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

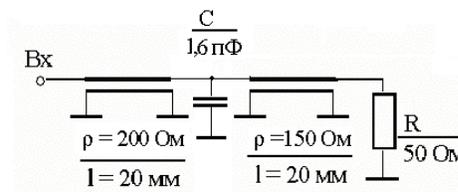
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=100$ Ом.

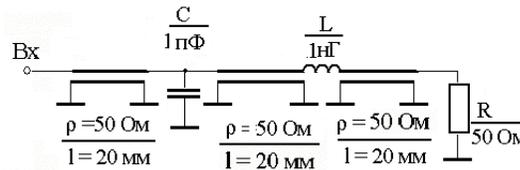
Индивидуальное задание №21

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200$ Ом?

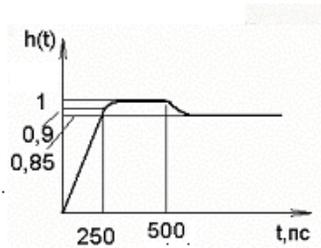
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

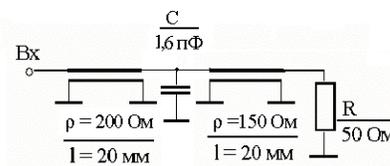
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

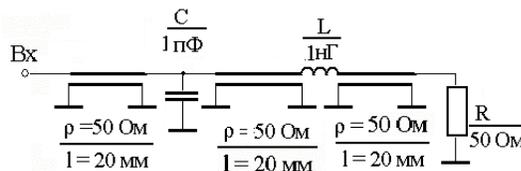
Индивидуальное задание №22

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100 \text{ пс}$, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

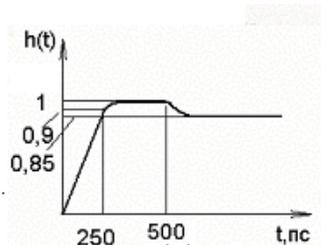
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

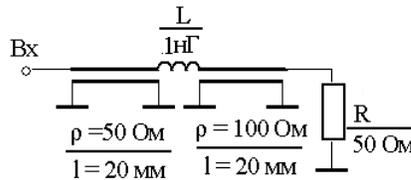
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

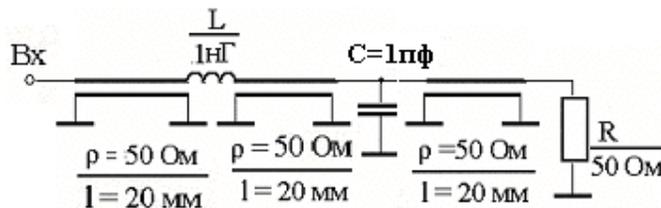
Индивидуальное задание №23

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



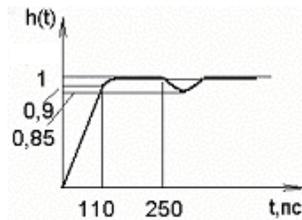
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $\tau = 100$ пс, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = 200$ пс.

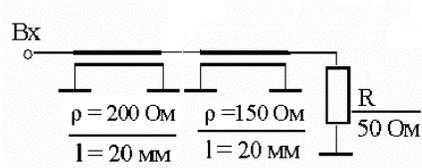
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r = 75 \text{ Ом}$

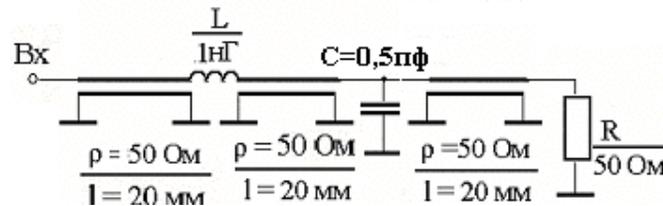
Индивидуальное задание №24

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



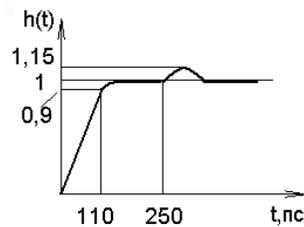
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = 100$ пс.

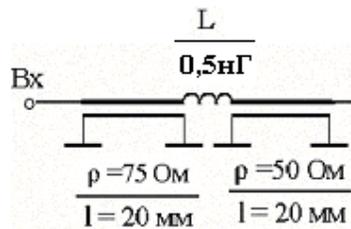
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

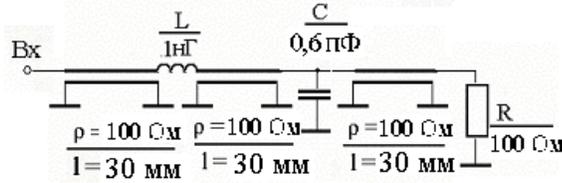
Индивидуальное задание №25

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



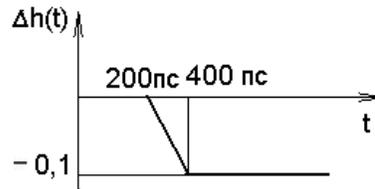
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

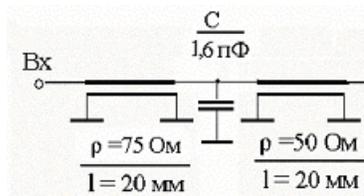
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=200$ Ом.

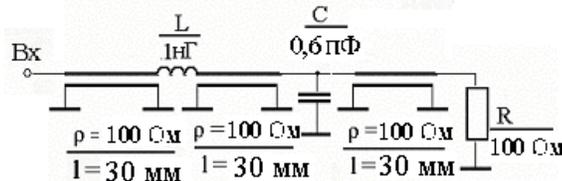
Индивидуальное задание №26

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 100$ Ом?

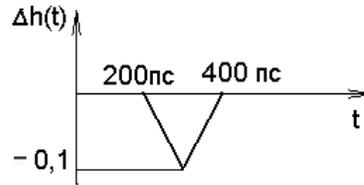
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 150 \text{ пс.}$$

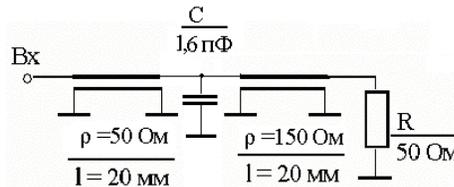
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_T = 100 \text{ Ом}$.

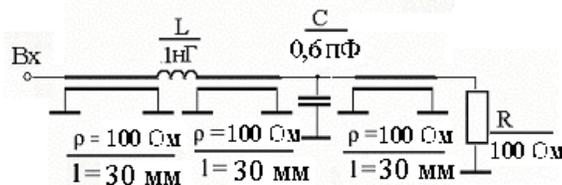
Индивидуальное задание №27

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



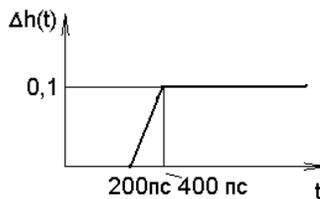
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр} = 200 \text{ пс}$, $R_T = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = 150 \text{ пс}$.

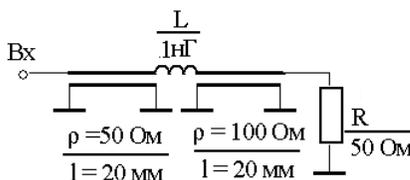
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=200 \text{ Ом}$.

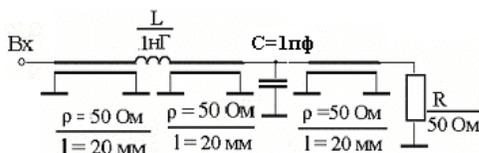
Индивидуальное задание №28

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



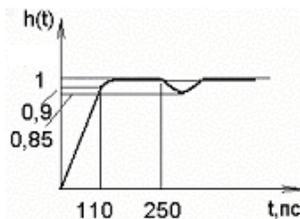
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=100 \text{ пс}$, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200 \text{ пс}$.

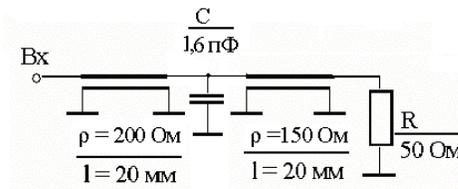
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=75 \text{ Ом}$

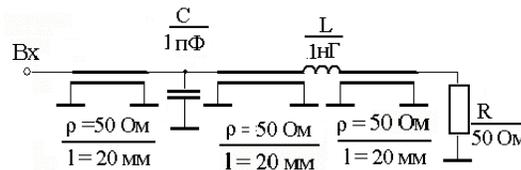
Индивидуальное задание №29

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200$ Ом?

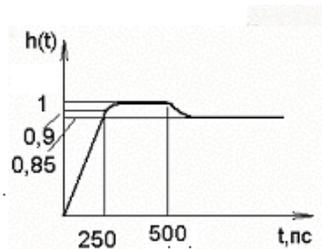
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

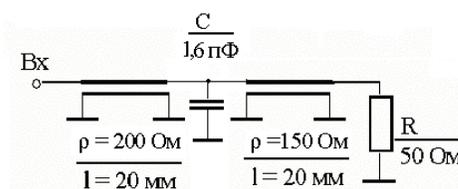
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100$ Ом

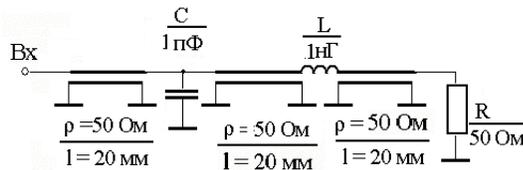
Индивидуальное задание №30

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=100$ пс, $R_r = 200\text{Ом}$?

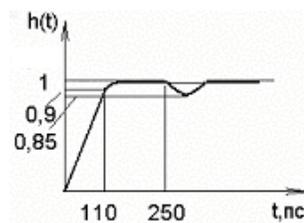
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50\text{Ом}$$

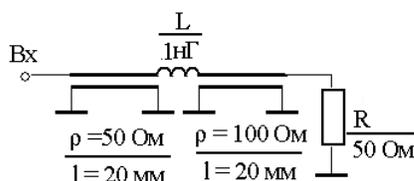
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=75 \text{ Ом}$

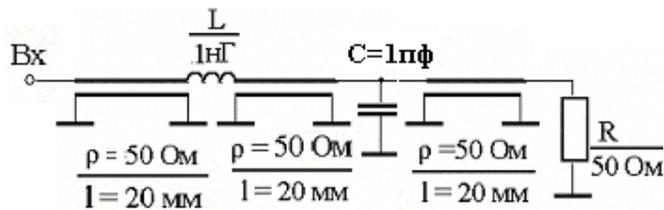
Индивидуальное задание №31

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



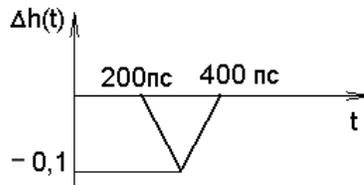
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=100$ пс, $R_r = 50\text{Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

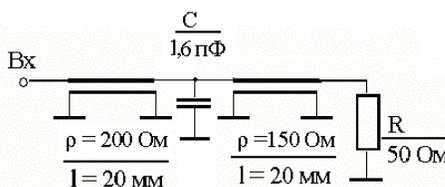
3. Изменения в переходной характеристике, вызванные параллельной корректирующей цепью, имеют вид:



Изобразите принципиальную схему корректирующей цепи и определите значения элементов при $R_r=100$ Ом.

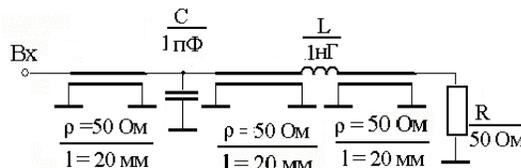
Индивидуальное задание №32

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r = 200$ Ом?

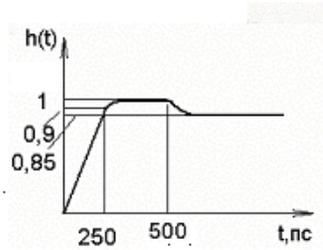
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

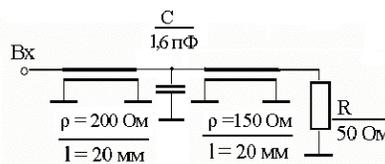
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

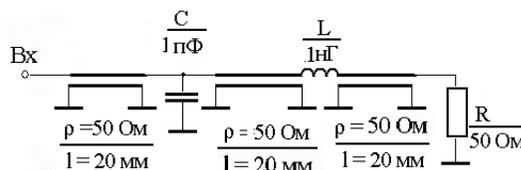
Индивидуальное задание №33

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{\text{фр}}=100 \text{ пс}$, $R_r = 200 \text{ Ом}$?

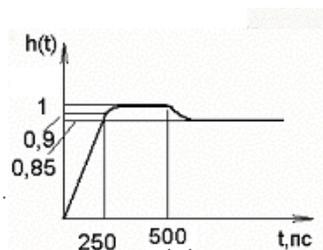
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau=200 \text{ пс}, R_r = 50 \text{ Ом}$$

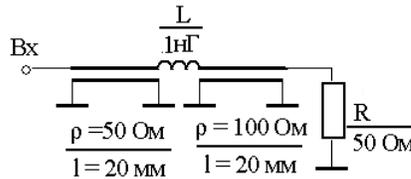
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=100 \text{ Ом}$

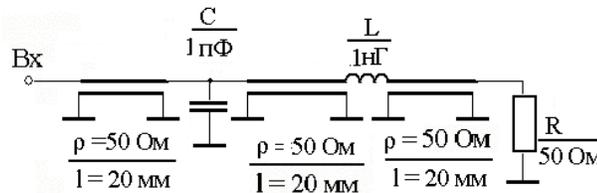
Индивидуальное задание №34

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



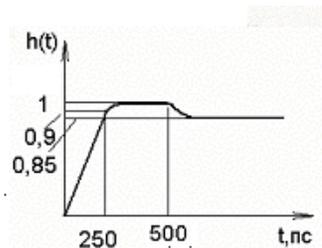
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100 \text{ пс}$, $R_r = 100 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau = \tau=100 \text{ пс}$, $R_r = 50 \text{ Ом}$

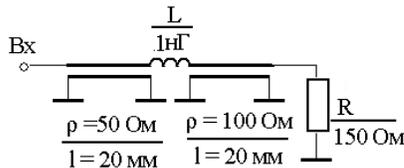
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс, определите значения элементов схемы при $R_r=200 \text{ Ом}$

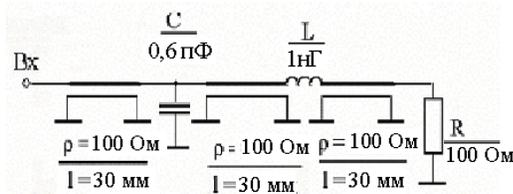
Индивидуальное задание №35

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=300$ пс, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

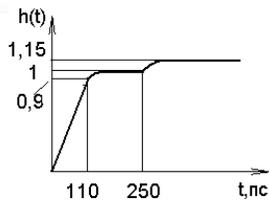
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 100 \text{ пс}, R_r = 100 \text{ Ом} ?$$

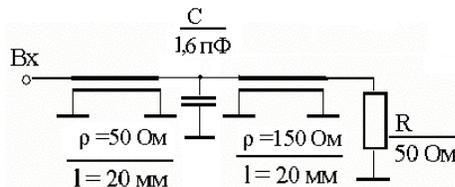
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс определите значения элементов схемы при $R_r=50 \text{ Ом}$

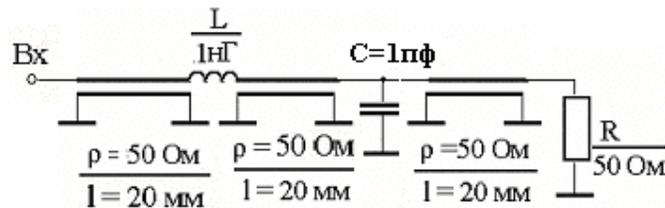
Индивидуальное задание №36

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



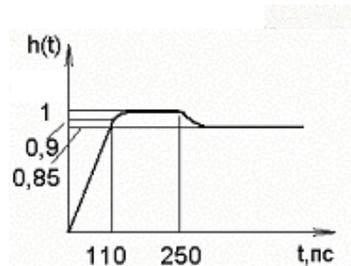
Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=200$ пс, $R_r = 50 \text{ Ом}$?

2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при $\tau=200$ пс.

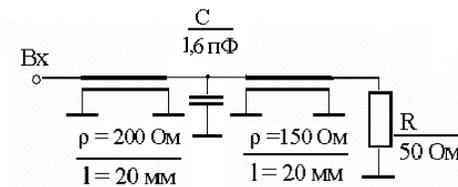
3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи, ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_r=75$ Ом

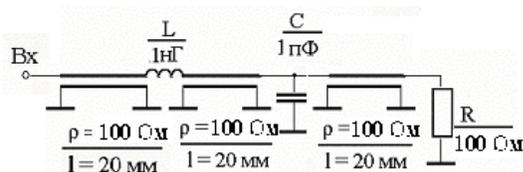
Индивидуальное задание №37

1. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Какие изменения в переходной характеристике вызовет такая цепь, если длительность переднего фронта входного сигнала $t_{фр}=100$ пс, $R_r=100$ Ом?

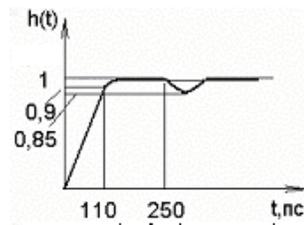
2. Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке



Напишите аналитическое выражение, описывающее изменение в частотной характеристике, которое вызовет эта цепь при

$$\tau = 150 \text{ пс}, R_T = 100 \text{ Ом}?$$

3. Переходная характеристика устройства имеет вид:



Нарисуйте схему параллельной корректирующей цепи ликвидирующей выброс и определите значения элементов схемы при $R_T=100 \text{ Ом}$

3.3.3 Индивидуальное задание № 2. Расчет устройств формирования импульсов.

При выполнении индивидуального задания необходимо:

- Выбрать структуру формирующих цепей.
- Провести расчет элементов формирующих цепей.
- Провести расчет переходных характеристик формирующих цепей.

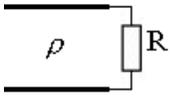
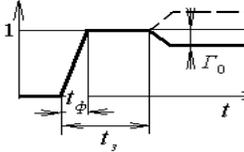
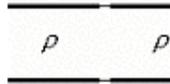
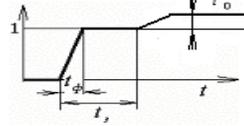
Краткие методические указания по расчету формирующих цепей

Задачей формирования является получение различных последовательностей, групп или одиночных импульсов. Все они характеризуются фронтами субнаносекундной длительности (десятки – сотни пикосекунд) с протяженностью самих импульсов от удвоенной длительности фронта до теоретически неограниченного времени в случае формирования перепадов напряжения. Минимальная длительность генерируемых импульсов определяется потенциальным временем переключения активных элементов.

Формирование импульсов заданной длительности из единичного перепада напряжения.

Для формирования импульса нужной формы используется изменение волнового сопротивления линии передачи и величины сопротивления нагрузки.

Основные расчетные соотношения:

Схема	Рефлектограм ма	Расчетное соотношение
		$R = \rho \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$
		$\rho_1 = \rho \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$

Рассмотрим, что происходит при коротком замыкании и разрыве линии передачи, при $R=0$ и $R=\infty$. Из приведенного выше выражения

$$\Gamma_0 = \frac{R - \rho}{R + \rho}, \text{ при } R = \rho \quad \Gamma_0 = 0, \text{ при } R = 0 \quad \Gamma_0 = -1, \text{ при } R = \infty \quad \Gamma_0 = 1$$

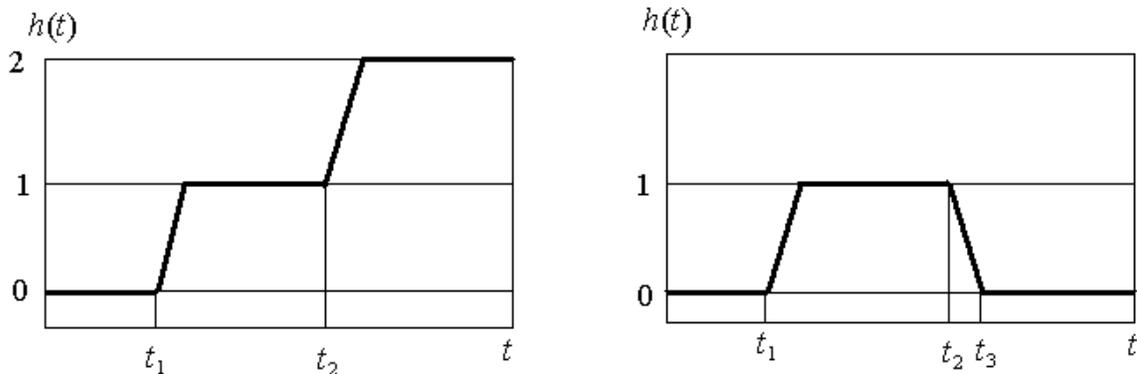
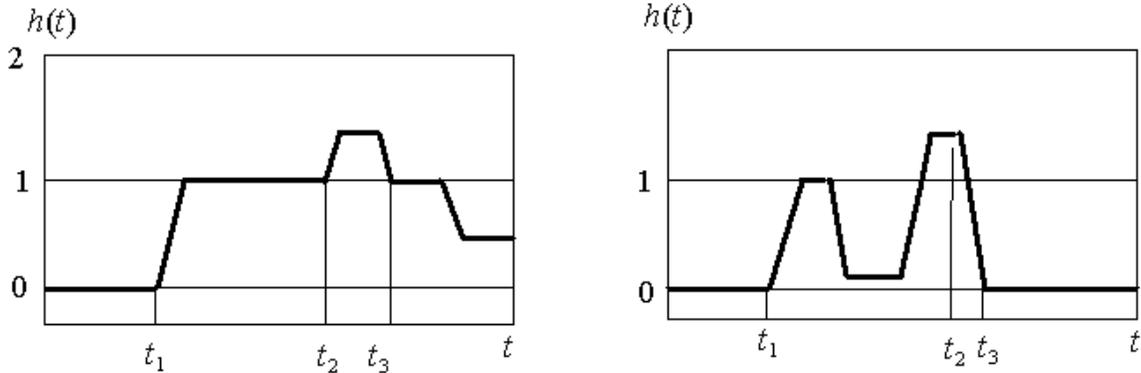


Рис 1. Рефлектограммы при холостом ходе и коротком замыкании линии передачи

Формирование импульса нужной длительности производится путем короткого замыкания отрезка линии передачи соответствующей длины.

$$l = \frac{C \cdot t}{2\sqrt{\epsilon}}$$

Получение импульса сложной формы или последовательности импульсов производится изменением волнового сопротивления линий передачи.



Формирование импульсов с помощью коммутируемой разрядной линии

Принцип работы формирователей с разрядной линией основан на преобразовании в прямоугольные импульсы путем периодической коммутации в нагрузку энергии, накопленной от источника U_0 [1, 2]. Накопительная линия в таком формирователе (рис. 2) медленно заряжается от источника постоянного напряжения через сопротивление $R_3 \gg p$.

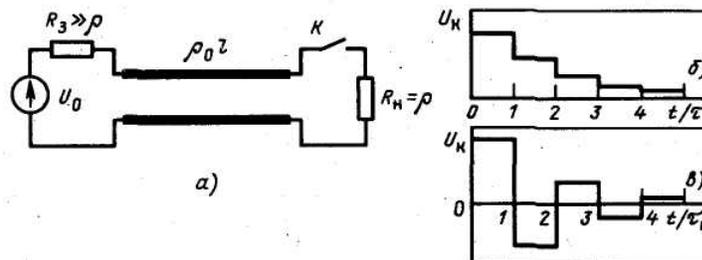


Рис.2. Схема формирователя импульсов с разрядной линией (а) и формы импульсов на нагрузке при $R_H / p > 1$ (б) и $R_H / p < 1$ (в)

Прямоугольный импульс напряжения амплитудой $U_H = U_0 R_H / (p + R_H) = U_0 / 2$ формируется при замыкании линии ключом K на резистивную согласованную нагрузку $R_H = p$. Длительность импульса τ_H , формируемого на нагрузке, определяется удвоенным временем хождения электромагнитной волны по отрезку линии $\tau_H = 2l / (c / \sqrt{\epsilon})$, где c - скорость света в вакууме; l - длина линии; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость линии.

Если нагрузка не согласована с накопительной линией, то формируемый импульс имеет вид, изображенный на рис. 2, б при $R_H/p > 1$ и на рис. 2, в при $R_H/p < 1$. В общем случае выражение для напряжения k -й ступени ($k = 1$ - соответствует основному импульсу) имеет вид [1,105]:

$$U_k = U_0 \frac{R_H}{R_H + p} \left(\frac{R_H - p}{R_H + p} \right)^{k-1},$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Импульсы, изображенные на рис. 2, б, в, по форме совпадают с реакцией многоканальных структур на входной сигнал в виде прямоугольного импульса. Поэтому структурные многоканальные модели могут быть использованы при описании формирователей с разрядными линиями.

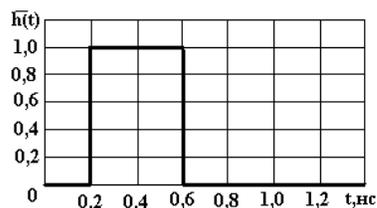
В случае, когда разрядная линия представляет собой неоднородную линию передачи с $\rho = f(l)$, величина выходного сигнала будет изменяться во времени: $U_H = U_0 R_H / [p(t) + R_H]$, где $t = \frac{l\sqrt{\epsilon}}{c}$. При увеличении волнового сопротивления уровень выходного сигнала уменьшается, а при уменьшении – увеличивается.

При использовании несимметричной линии передачи амплитуда выходного сигнала повторяет форму линии передачи (в логарифмическом масштабе).

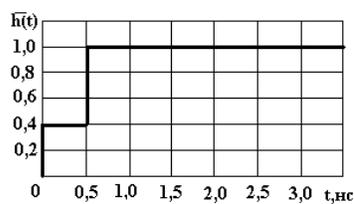
Задачи к индивидуальному заданию №2. Формирование импульсов

Индивидуальное задание № 2/1

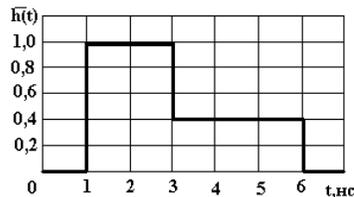
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

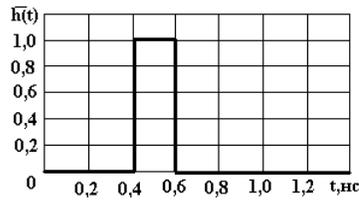


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

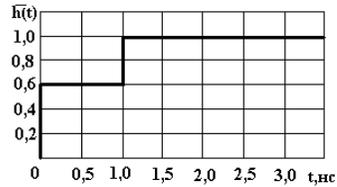


Индивидуальное задание № 2/2

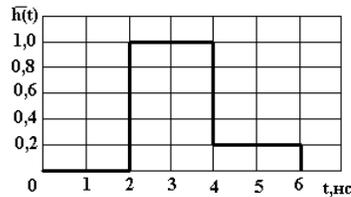
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

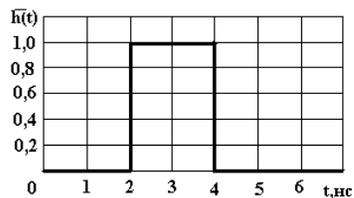


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

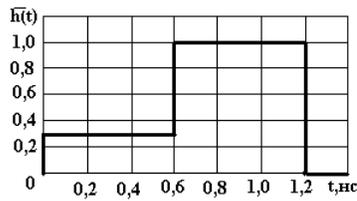


Индивидуальное задание № 2/3

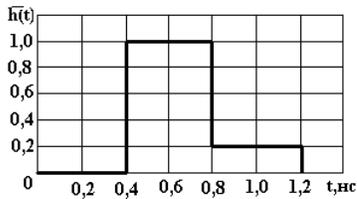
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

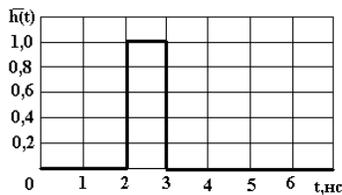


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

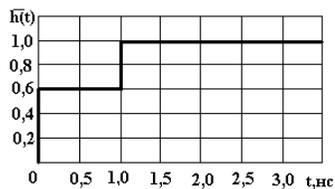


Индивидуальное задание № 2/4

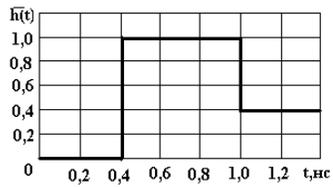
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

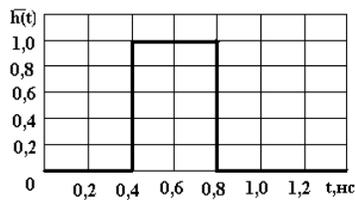


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

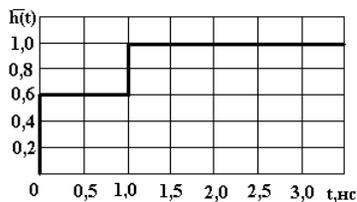


Индивидуальное задание № 2/5

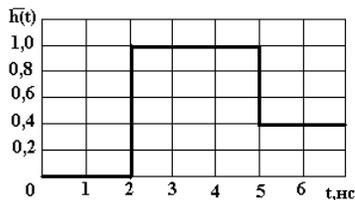
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

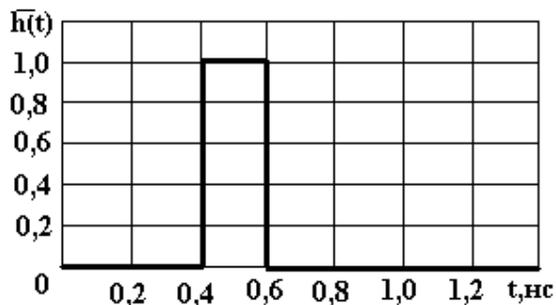


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

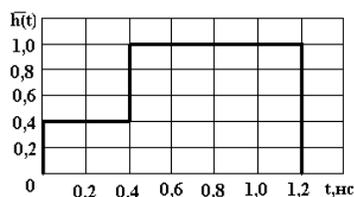


Индивидуальное задание № 2/6

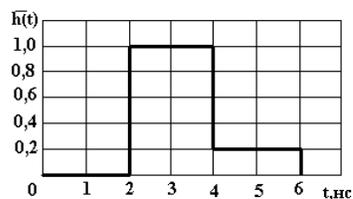
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

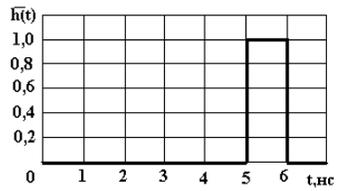


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

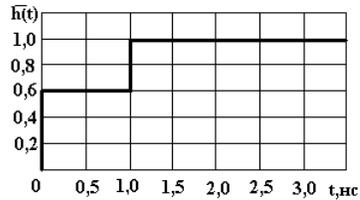


Индивидуальное задание № 2/7

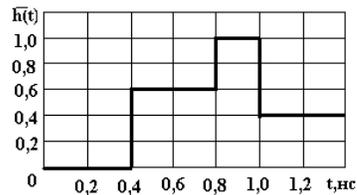
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

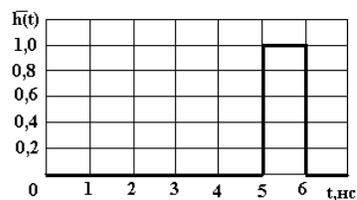


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

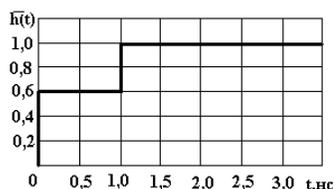


Индивидуальное задание № 2/8

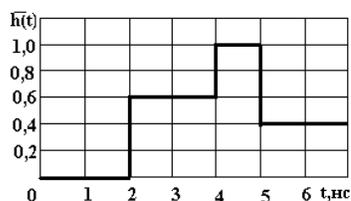
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

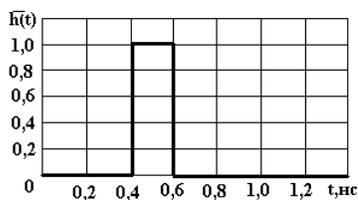


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

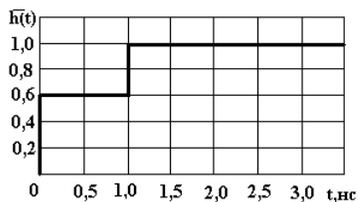


Индивидуальное задание № 2/9

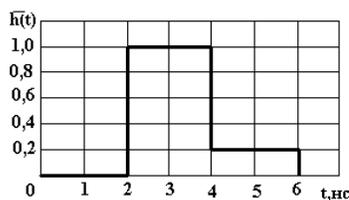
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

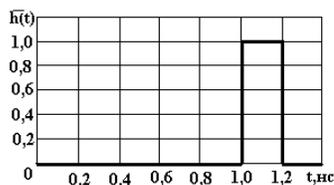


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

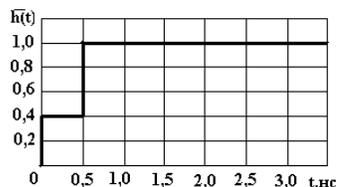


Индивидуальное задание № 2/10

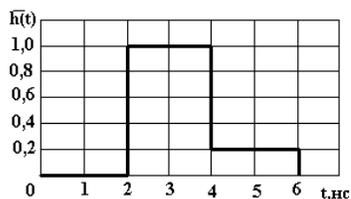
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

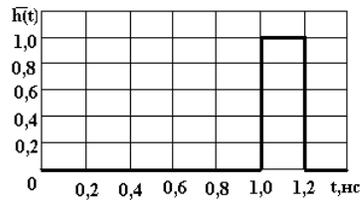


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

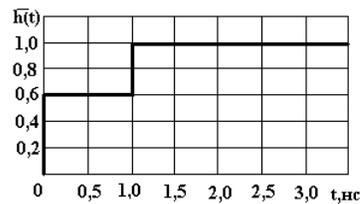


Индивидуальное задание № 2/11

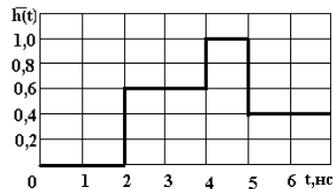
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

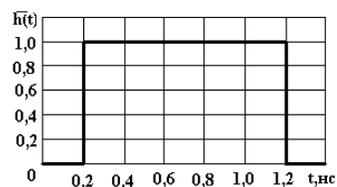


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

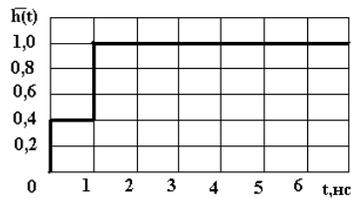


Индивидуальное задание № 2/12

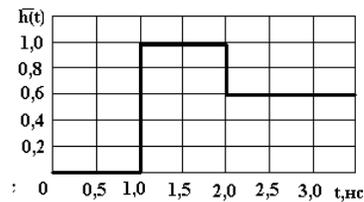
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

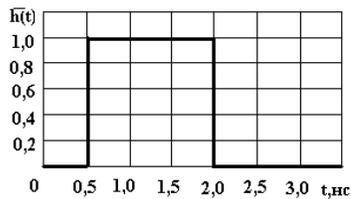


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

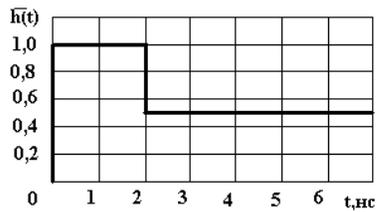


Индивидуальное задание № 2/13

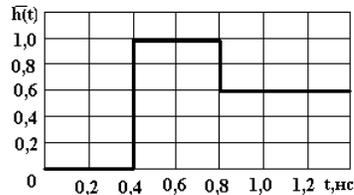
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

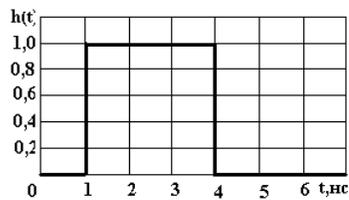


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

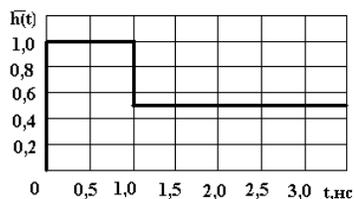


Индивидуальное задание № 2/14

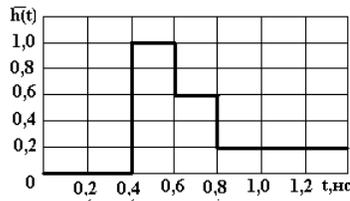
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

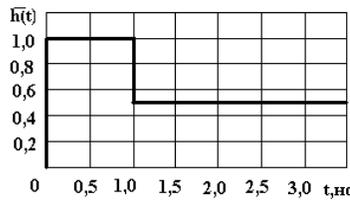


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

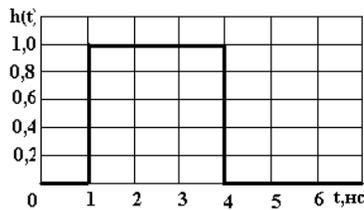


Индивидуальное задание № 2/15

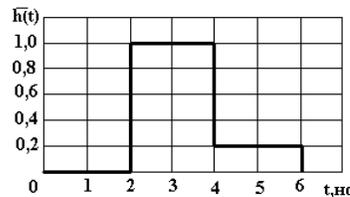
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $l(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $l(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

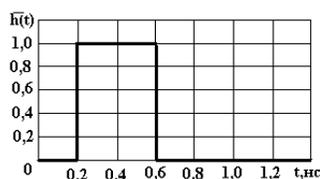


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $l(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

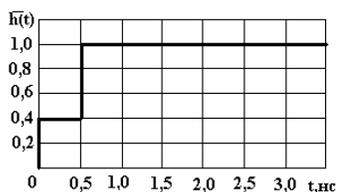


Индивидуальное задание № 2/16

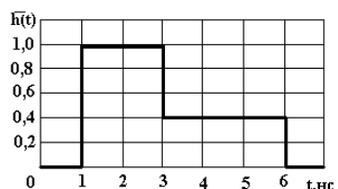
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

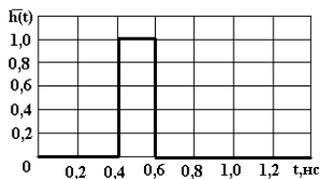


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

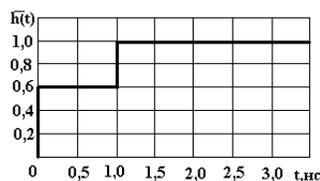


Индивидуальное задание № 2/17

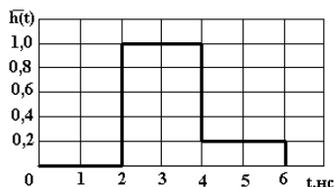
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

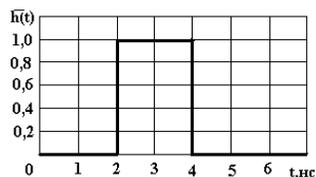


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

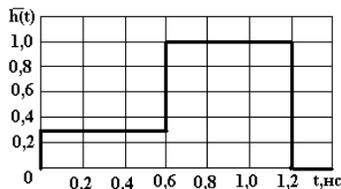


Индивидуальное задание № 2/18

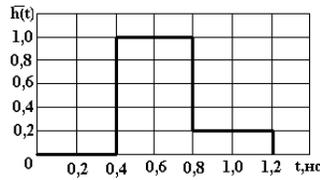
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

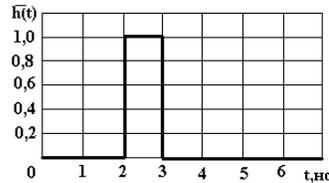


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
 Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
 приведенный на рисунке и определите значения элементов

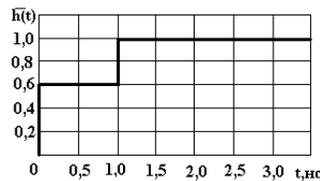


Индивидуальное задание № 2/19

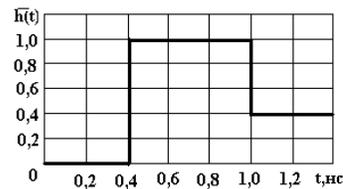
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

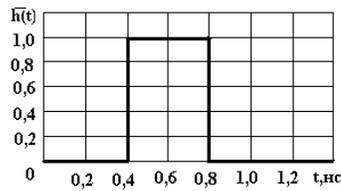


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

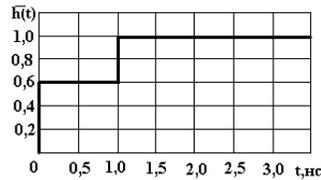


Индивидуальное задание № 2/20

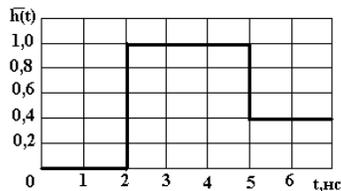
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

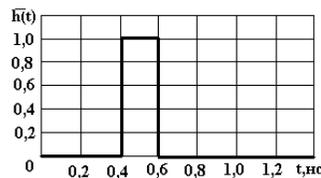


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

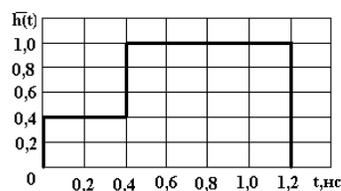


Индивидуальное задание № 2/21

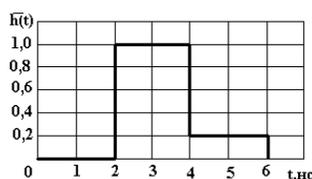
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

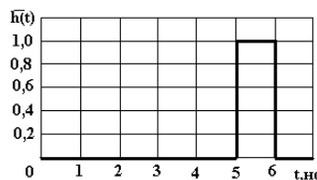


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

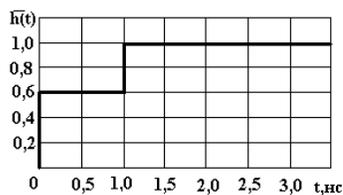


Индивидуальное задание № 2/22

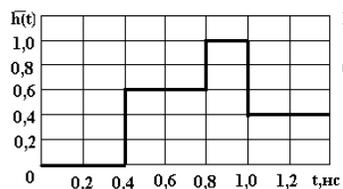
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

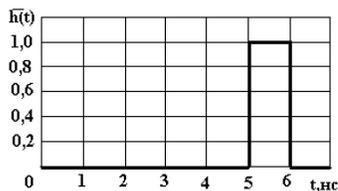


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

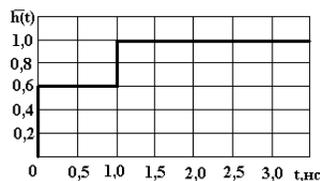


Индивидуальное задание № 2/23

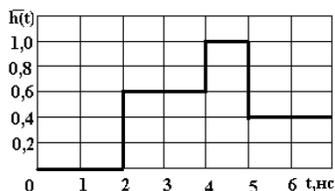
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

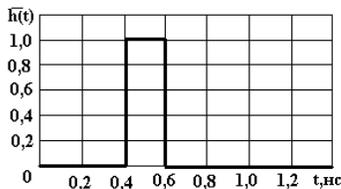


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

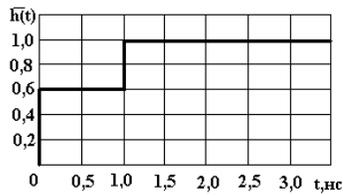


Индивидуальное задание № 2/24

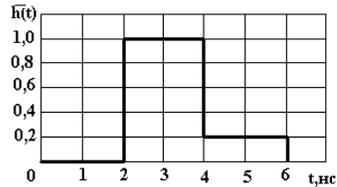
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

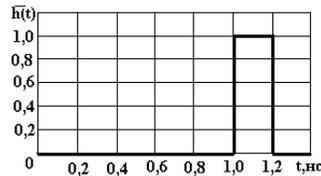


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

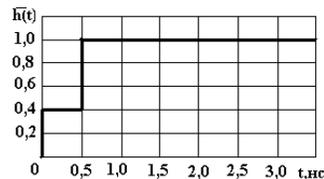


Индивидуальное задание № 2/25

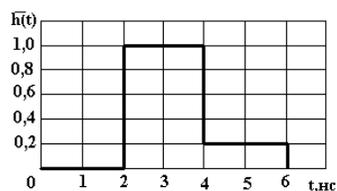
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

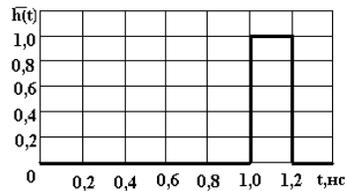


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

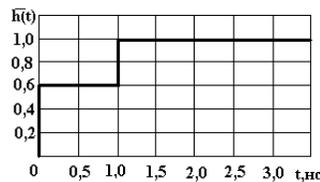


Индивидуальное задание № 2/26

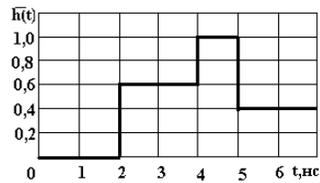
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

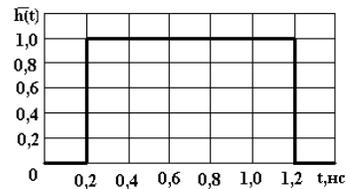


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

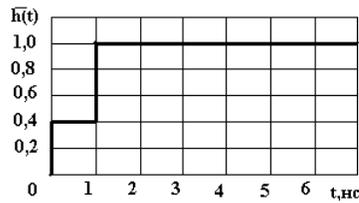


Индивидуальное задание № 2/27

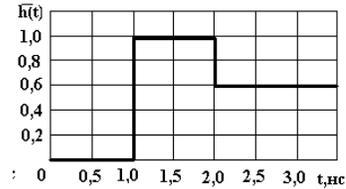
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

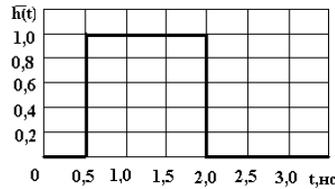


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

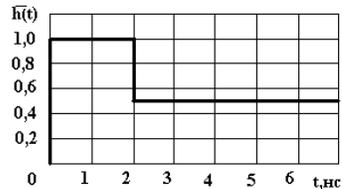


Индивидуальное задание № 2/28

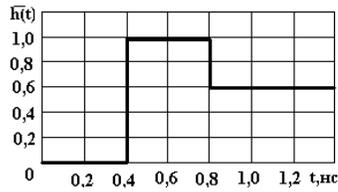
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

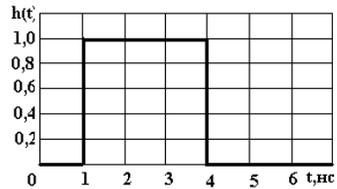


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

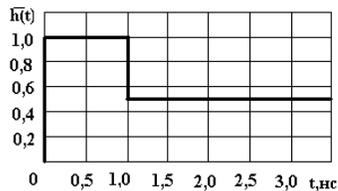


Индивидуальное задание № 2/29

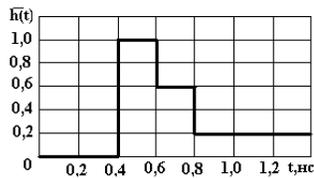
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

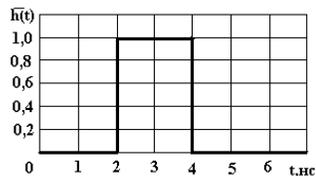


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

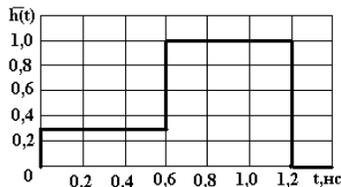


Индивидуальное задание № 2/30

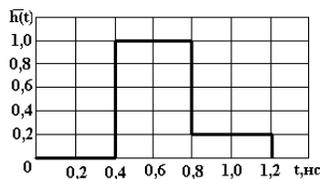
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

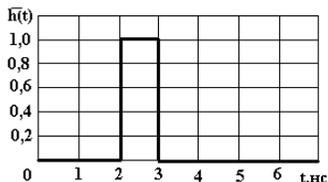


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

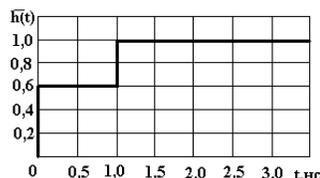


Индивидуальное задание № 2/31

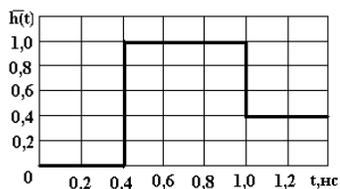
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

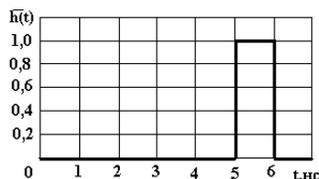


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

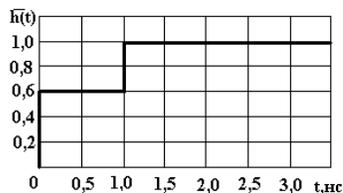


Индивидуальное задание № 2/32

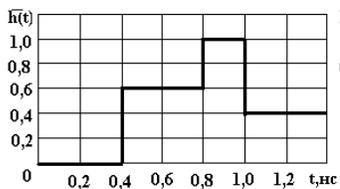
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

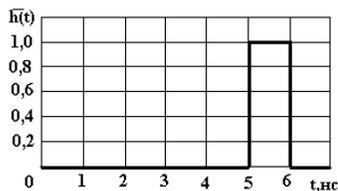


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$.
Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс,
приведенный на рисунке и определите значения элементов

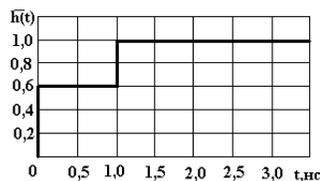


Индивидуальное задание № 2/33

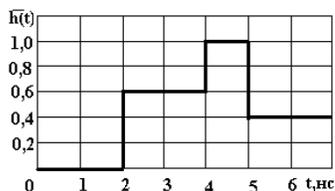
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

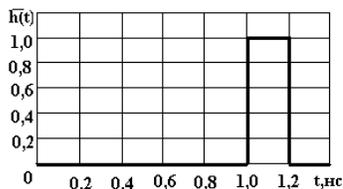


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

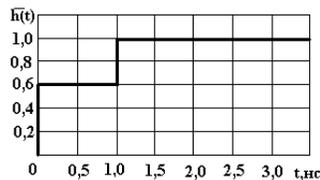


Индивидуальное задание № 2/34

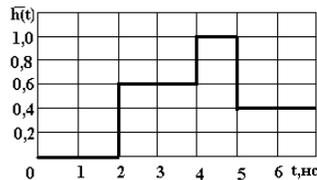
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $i(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

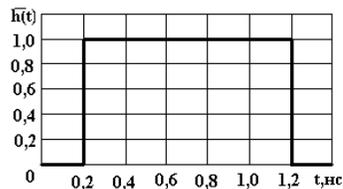


3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов

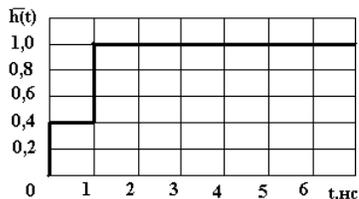


Индивидуальное задание № 2/35

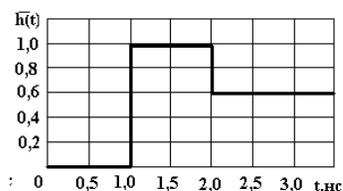
1. Генератор с выходным сопротивлением 100 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



2. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



3. Генератор с выходным сопротивлением 75 Ом вырабатывает импульс $h(t)$. Приведите схему параллельной корректирующей цепи, формирующей импульс, приведенный на рисунке и определите значения элементов



3.3.4 Контрольная работа

Задача №1

1 Действие корректирующей цепи на частотную характеристику описывается выражением:

$$\Delta K(\omega) = a_1 \cos \Omega t + a_2 \cos 2\Omega t + a_3 \cos 3\Omega t$$

- Составить принципиальную схему параллельной корректирующей цепи и определить значения элементов схемы;
- Нарисовать график изменения переходной характеристики $\Delta \bar{h}(t)$

1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
$a_1=0,1$	$a_1=-0,1$	$a_1=0,15$	$a_1=0,15$
$a_2=-0,1$	$a_2=0,1$	$a_2=-0,1$	$a_2=0,1$
$a_3=0,05$	$a_3=0,07$	$a_3=0,07$	$a_3=-0,05$
$R_r=R_n=50$ Ом	$R_r=R_n=75$ Ом	$R_r=R_n=100$ Ом	$R_r=R_n=150$ Ом
$\omega_b=2$ ГГц	$\omega_b=1$ ГГц	$\omega_b=1,5$ ГГц	$\omega_b=2$ ГГц
$t_{фр}=220$ пс	$t_{фр}=450$ пс	$t_{фр}=300$ пс	$t_{фр}=220$ пс
$\varepsilon=4$	$\varepsilon=9$	$\varepsilon=4$	$\varepsilon=1$

Задача №2

Принципиальная схема параллельной корректирующей цепи приведена на рисунке.

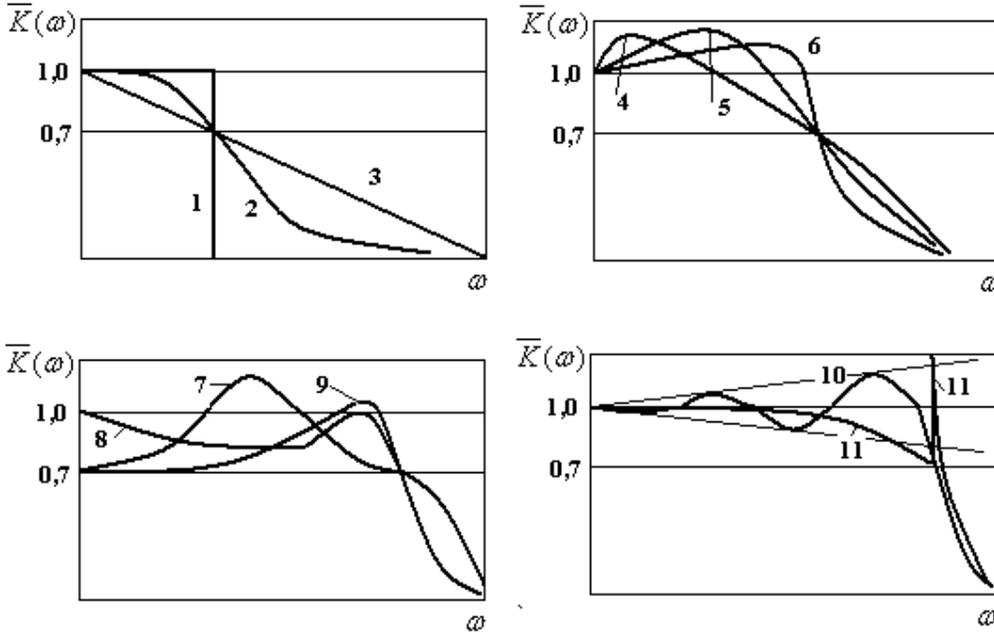
1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
$C=0,5$ пф	$C=1$ пф	$C=0,8$ пф	$C=0,5$ пф
$L=1$ нГ	$L=0,5$ нГ	$L=1$ нГ	$L=0,5$ нГ
$\varepsilon=4$	$\varepsilon=5,6$	$\varepsilon=9$	$\varepsilon=1$

$t_{\text{фр}} = 200\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 300\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 250\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 200\text{пс}$
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

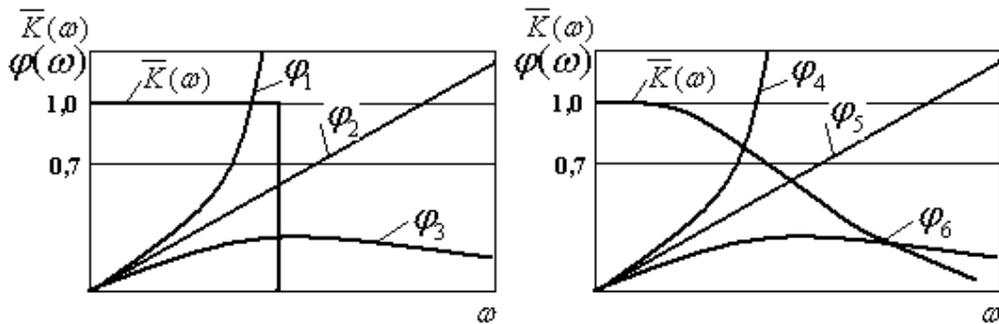
Нарисовать график зависимости $\Delta \bar{h}(t)$ при заданной длительности переднего фронта импульса от генератора.

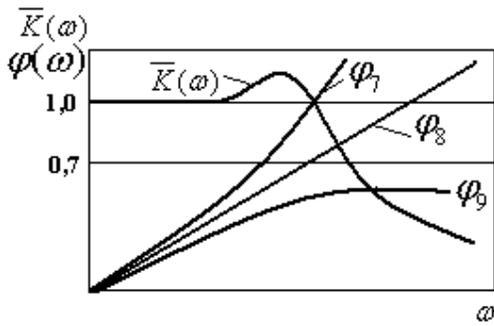
3.3.5 Тестовые задания

1. По приведенной на рисунке форме амплитудно-частотной характеристики минимально-фазового устройства определите форму переходной характеристики.



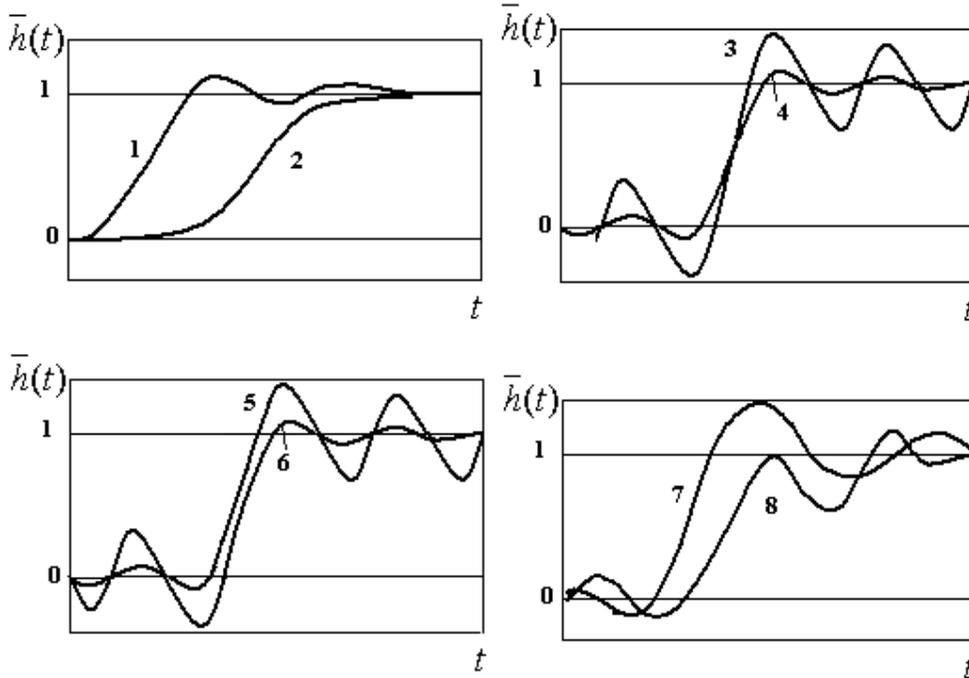
2. По приведенной на рисунке формах амплитудно-частотной и фазочастотной характеристики неминимально-фазового устройства определите форму переходной характеристики





3. По приведенной на рисунке форме переходной характеристики устройства определите:

- К какому классу цепей (минимально-фазовому или неминимально-фазовому) относится это устройство?
- Определите форму амплитудно-частотной характеристики устройства;
- Определите форму фазочастотной характеристики устройства



Творческие задания по ОПТ

Задача №1

Действие параллельной корректирующей цепи на частотную характеристику описывается выражением:

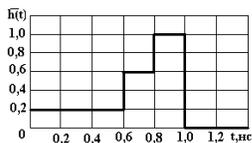
$$\Delta K(\omega) = a_1 \cos \Omega t + a_2 \cos 2\Omega t + a_3 \cos 3\Omega t$$

Определить принципиальную схему и значения элементов корректирующей цепи.

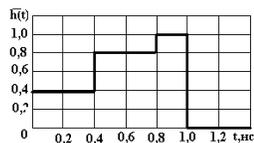
1	2	3	4	5
$a_1=0,1$	$a_1=-0,1$	$a_1=0,05$	$a_1=-0,05$	$a_1=0,07$
$a_2=-0,5$	$a_2=0,0$ 7	$a_2=-0,1$	$a_2=0,1$	$a_2=-0,07$
$a_3=0,0$ 5	$a_3=-0,05$	$a_3=0,07$	$a_3=-0,05$	$a_3=0,05$
$R_r=R_H=500\text{Ом}$	$R_r=R_H=750\text{Ом}$	$R_r=R_H=1000\text{Ом}$	$R_r=R_H=500\text{Ом}$	$R_r=R_H=1000\text{Ом}$
$\omega_B=2$ ГГц	$\omega_B=1$ ГГц	$\omega_B=1,5$ ГГц	$\omega_B=1,2$ ГГц	$\omega_B=1,8$ ГГц
$\varepsilon=4$	$\varepsilon=9$	$\varepsilon=4$	$\varepsilon=9$	$\varepsilon=4$

Задача №2

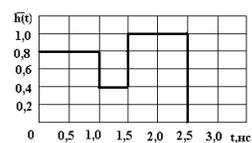
Генератор вырабатывает импульс $1(t)$. Приведите схему цепи, подключение которой позволит сформировать следующий импульс:



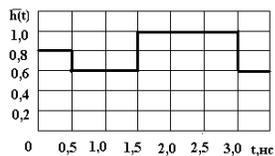
1



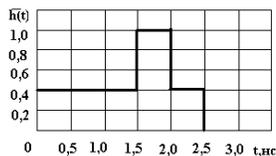
2



3



4



5

ЛИТЕРАТУРА

1. Пикосекундная импульсная техника Ильюшенко В.Н., Авдоченко Б.И. и др. /под ред. Ильюшенко В.Н. – М., Энергоатомиздат, 1993, 368с.
2. Микроэлектронные устройства СВЧ. Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов, Веселов Г.И., Егоров Е.Н. и др. /под ред. Веселова Г.И. – М., Высшая школа, 1988, 280с.
3. Антенны и устройства СВЧ. Учебное пособие для вузов, Воскресенский Д.И., Грановская Р.А. и др./под ред. Воскресенского Д.И. – М., Радио и связь, 1981, 432с.
4. Электроника. Курс лекций. Прянишников В.А. – Санкт – Петербург : Корона, 1998, 400с.
5. Телекоммуникационные системы и сети, Том 1, учебное пособие/ Крук Б.И., Шувалов В.П. изд. 2-е, Новосибирск : Наука, 1998, 248с.
6. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. Глебович Г.В., Андриянов А.В. и др. / под ред. Глебовича Г.В. – М: Радио и связь, 1984, 256с.