

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации

**Б.И. Авдоченко**

**АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА**

Методические указания по самостоятельной работе

**Томск - 2016**

Методические указания по самостоятельной работе предназначено для бакалавров очной формы обучения, обучающихся по направлению (специальности ) 11.03.01 Радиотехника и других специальностей радиотехнического направления.

## Содержание

1 Введение .....	3
2 Содержание самостоятельных занятий (48 часов) .....	3
3. Индивидуальное задание № 1. Коррекция характеристик быстродействующих устройств .....	4
3.1 Краткие методические указания по расчету корректирующих цепей .....	5
3.2 Влияние отклонения частотных характеристик на переходные характеристики .....	5
3.3 Аппроксимация изменений частотных характеристик .....	5
3.4 Влияние изменения амплитудно-частотной характеристики на форму переходной характеристики .....	6
3.5 Влияние изменения фазочастотной характеристики на переходную характеристику ..	7
3.6 Влияние изменения частотной или фазовой характеристики на переходную характеристику в минимально-фазовых цепях .....	8
3.7 Кольцевая корректирующая параллельного типа .....	10
3.8 Неоднородности в линии передачи и их влияние на характеристики .....	11
3.9 Применение отрезков линии передачи для коррекции характеристик .....	12
3.10 Основные этапы по расчету корректирующих цепей .....	13
3.11 Задания по расчету корректирующих цепей .....	14
4 Индивидуальное задание № 2. Расчет устройств формирования импульсов .....	15
4.1 Краткие методические указания по расчету формирующих цепей .....	16
4.2 Задания по расчету формирующих цепей .....	17
5 Контрольная работа .....	20
5.1 Краткие методические указания к контрольной работе .....	20
5.1.1 Связь изменений частотных характеристик с переходными характеристиками ..	20
5.1.2 Аппроксимация изменений частотных характеристик .....	21
5.1.3 Определение изменения переходной характеристики по изменению АЧХ корректирующей цепи .....	21
5.2 Задания на контрольную работу .....	22
ЛИТЕРАТУРА .....	22

## 1 Введение

Дисциплина «Аналоговые и цифровые быстродействующие устройства» введена для инженерной подготовки бакалавров 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 килогерц 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.

## 2 Содержание самостоятельных занятий (48 часов)

1. Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекций и рекомендованной литературы – 8 часов
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
5. Подготовка к экзамену – 24 часа

При изучении дисциплины «Аналоговые и цифровые быстродействующие устройства» студенты должны 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 «Аналоговые и цифровые 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)..
  - Применение отрезков линии передачи для коррекции характеристик. Влияние волнового сопротивления неоднородной линии передачи на характеристики. Связь формы корректирующей цепи с формой переходной характеристики.

**Тема второго индивидуального задания** – расчет устройств формирования импульсов для быстродействующих устройств. Для выполнения этого задания необходимо знать следующие разделы дисциплины

- 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 18 вариантов задания. На выполнение каждого индивидуального задания студенту дается две недели.

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

### **3. 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.

### **3.1 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  $\Delta h_\varphi(t)$  характеристик путем введения противоположного по знаку отклонения с помощью корректирующих цепей:

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

### **3.2 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  $|K_0(\omega)|$  и  $\varphi_0(\omega)$  - исходные (например, оптимальные) АЧХ и ФЧХ;

$$|\overline{\Delta K}(\omega)| = \frac{|K(\omega)| - |K_0(\omega)|}{|K_0(\omega)|}; \quad \Delta\varphi(\omega) = \varphi(\omega) - \varphi_0(\omega) - \text{относительные}$$

изменения в частотных характеристиках.

### **3.3 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

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

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

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

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

$\omega_A$  - верхняя частота интервала аппроксимации.

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

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

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

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

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

### 3.4 Влияние изменения амплитудно-частотной характеристики на форму переходной характеристики

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

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

где  $a_0, a_n$  - коэффициенты ряда Фурье. Подставляя изменения АЧХ в изменения ПХ

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

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 определим изменения в ПХ:

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

На рисунке 1 приведен пример влияния изменения АЧХ, описываемого двумя членами ряда Фурье, на ПХ.

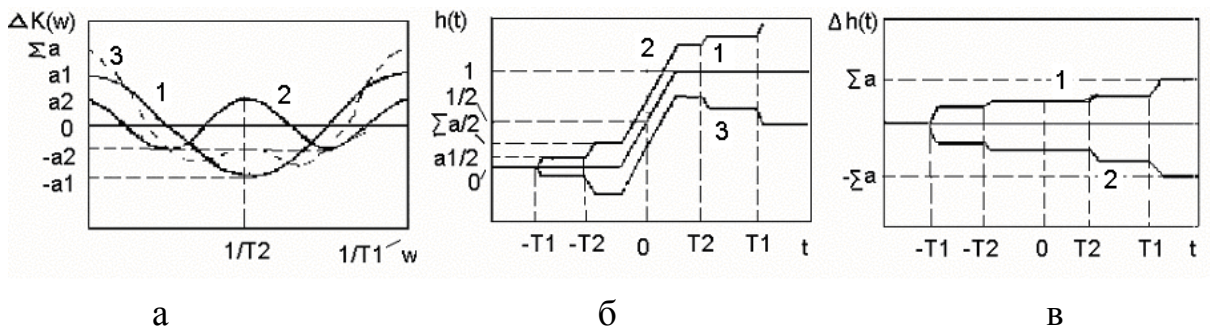


Рисунок 1. Коррекция ПХ изменением АЧХ:  
 а) изменения АЧХ а) 1 -  $a_1 \cos T_1 \Omega$ , 2 -  $a_2 \cos T_2 \Omega$ , 3 -  $\sum a_n T_n \Omega$ ;  
 б) измененная ПХ 1-  $h_0(t)$ , 2 -  $h_0(t) + \Delta h_k(t)$ , 3 -  $h_0(t) - \Delta h_k(t)$ ;  
 в) отклонения ПХ 1 -  $\Delta h_k(t)$ , 2-  $[-\Delta h_k(t)]$

### 3.5 Влияние изменения фазочастотной характеристики на переходную характеристику

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

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

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

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

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

Изменения ПХ, вызванные изменением ФЧХ, отличается от изменений, вызванных изменением АЧХ знаком перед вторым членом суммы.

На рисунке 2 приведен пример влияния периодического отклонения ФЧХ от исходной характеристики, аппроксимированной двумя членами ряда Фурье, на ПХ.

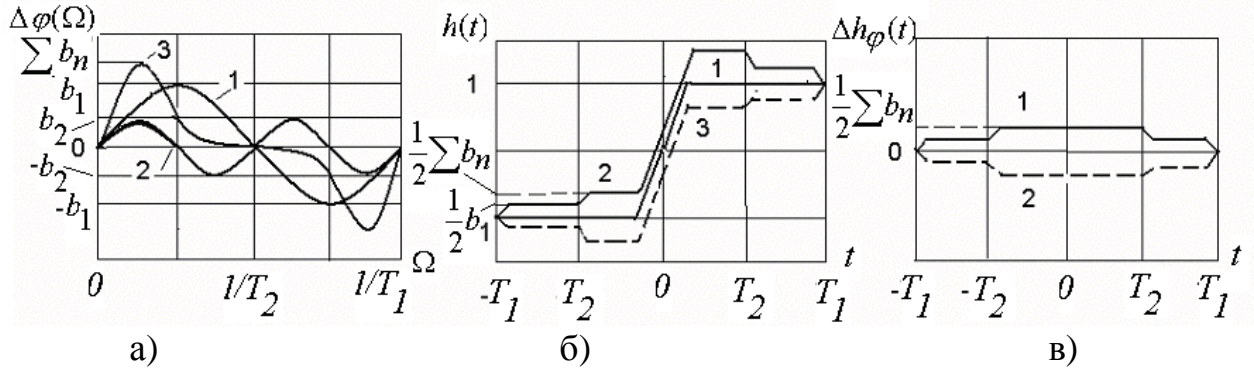


Рисунок 2. Коррекция ПХ изменением ФЧХ

- 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  $1 - h_0(t)$ ,  $2 - h_0(t) + \Delta h_\varphi(t)$ ,  $3 - h_0(t) - \Delta h_\varphi(t)$ ,  
 в) отклонения в ПХ  $1 - \Delta h_\varphi(t)$ ,  $2 - [-\Delta h_\varphi(t)]$

### 3.6 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:

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

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

Подставив изменение АЧХ в виде

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

в случае отсутствия постоянной составляющей ( $a_0=0$ ) получаем выражение, описывающее изменения ФЧХ, вызванные изменениями АЧХ:

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



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

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

Определим суммарные изменения ПХ в минимально-фазовых цепях, при изменении АЧХ:

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

При изменении ФЧХ в минимально – фазовой цепи, проделав аналогичные операции, получим соотношение, связывающее изменения в ПХ минимально-фазовой цепи по изменению ФЧХ:

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

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

При изменении АЧХ и ФЧХ в минимально-фазовой цепи в ПХ отсутствуют реакции перед передним фронтом

На рисунке 3 приведены графики, показывающие изменения в форме ПХ минимально-фазовой цепи, вызванные изменениями в ФЧХ, приведенными на рисунке 2а.

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

$$\begin{aligned} |\overline{\Delta K(\omega)}| &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega \\ \Delta h_k(t) &= a_0 h_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [h_0(t+T_n) + h_0(t-T_n)] \end{aligned}$$

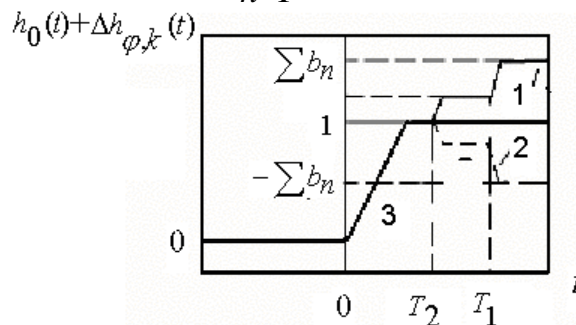


Рисунок 3. Изменения в ПХ минимально-фазовой цепи при изменениях в ФЧХ: 1- при положительных  $b_n$ ; 2- при отрицательных  $b_n$ ; 3 - исходная ПХ  $h_0(t)$

### 3.7 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. Примером такой цепи служит цепь отражательного типа, представляющая собой линию передачи с неоднородностями, включенную параллельно генератору и нагрузке, приведенную на рисунке 4. В таких цепях сигнал проходит, испытывая многократные отражения и как бы образуя кольцо.

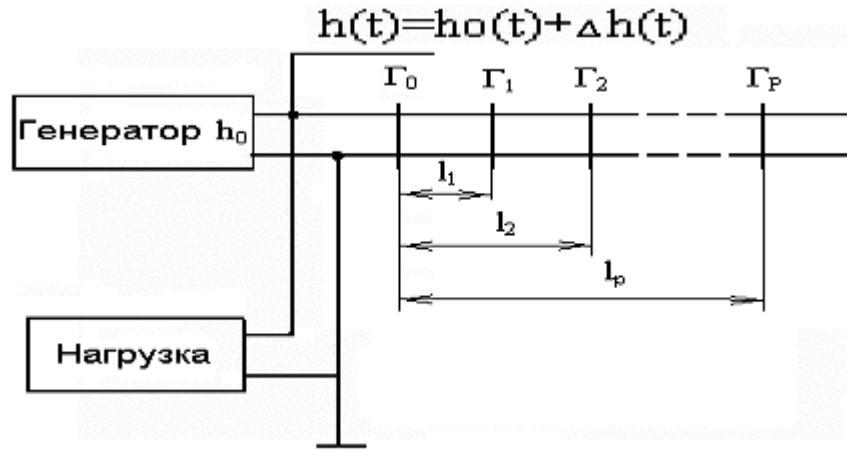


Рисунок 4. Параллельная корректирующая цепь отражательного типа

Для коррекции линия передачи с коэффициентом отражения от входа  $\Gamma_0$ , 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:

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

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;  $\lambda$  - длина волны в линии передачи.

Пренебрегая вторичными отражениями в линии, получим

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

откуда получаем выражение для определения частотных характеристик корректирующей цепи  $|\Delta K(\omega)| = -|\Gamma(\omega)|$ ;  $\Delta\varphi(\omega) = 2\omega\tau_p$ ,  $a_n = -\Gamma_p$ ;  $T_h = 2\pi\tau_p$

### 3.8 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:

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

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  $\rho(l)$ . 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 коррекции используется параллельное включение в линию конденсатора. Значение емкости определяется по величине отраженного

сигнала:  $C = 2 \frac{t_{\phi p} \Gamma_0}{\rho}$

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 отраженного сигнала:  $C = \frac{2}{\rho} \int_0^{\infty} \Gamma_0(t) dt$

При последовательном включении в линию передачи индуктивности по коэффициенту отражения определяется

$$L = 2\rho \cdot t_{\text{фр}} \Gamma_0$$

При больших коэффициентах отражения  $L = 2\rho \int_0^{\infty} \Gamma_0(t) dt$

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.

### 3.9 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:

$$\rho_i = \rho_0 \frac{1 + \Gamma_i}{1 - \Gamma_i},$$

где  $\rho_0$  - волновое сопротивление входного отрезка линии передачи,  $\Gamma_i$  - коэффициент отражения  $i$  – го отрезка линии передачи относительно входного отрезка.

Из выражения следует, что  $\Gamma_i = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i + \rho_0}$

В случае плавного изменения волнового сопротивления линии при переходе от отрезка линии передачи  $i$  к отрезку  $i+1$  получим коэффициент отражения

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

Учитывая, что  $\frac{2\pi\Delta l_i}{\lambda} = \omega\Delta t_i = \beta\Delta l_i$ , где  $\Delta l_i$  - длина  $i$  – ого отрезка линии,  $\Delta t_i$  - время, а  $\beta$  - постоянная распространения сигнала по  $i$  – ому отрезку линии, можем определить фазовый сдвиг, вносимый данным отрезком. С учетом этого скорректированную неоднородной линией передачи переходную характеристику представим в виде

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

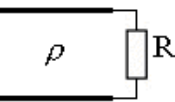
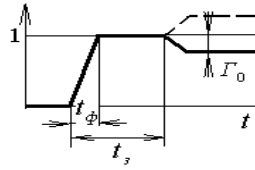
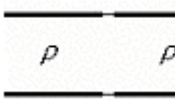
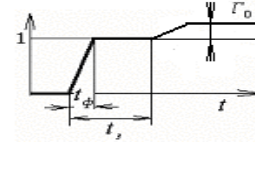
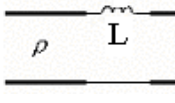
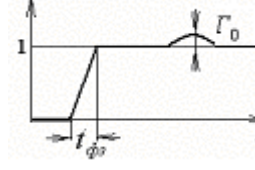
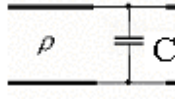
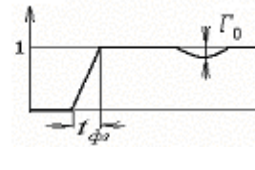
В случае согласования входного отрезка линии передачи,  $\Gamma_0 = 0$ , получим изменения в переходной характеристике, вызванные неоднородной

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

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

Наиболее используемые схемы корректирующих цепей, формы переходных характеристик и расчетные формулы приведены в таблице 1

Таблица 1. Схемы корректирующих цепей.

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

### 3.10 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  $\omega_s \cdot \tau = 1$   $\Omega = \frac{\omega}{\omega_s}$ , 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

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

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  $2 \cdot \Omega_c$ ,
- 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.

**6. Этап** Определить изменения в переходной характеристике и построить переходные характеристики.

### 3.11 Задания по расчету корректирующих цепей

Рассчитать схему параллельной КЦ, ликвидирующую искажения в ПХ, вид которой приведен на рисунке 5. Значения, вид и временное положение искажений приведены в таблице 2.

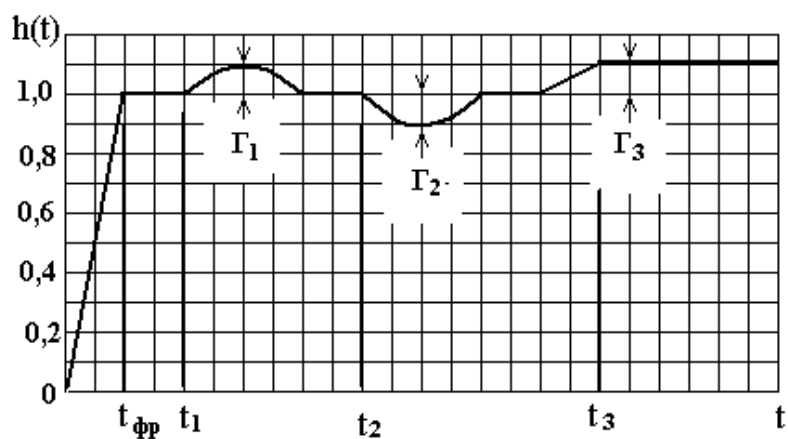


Рисунок 5. Вид искаженной переходной характеристики

Таблица 2 Значения, вид и временное положение искажений

№	R <sub>H</sub>	t <sub>фр</sub> , нс	t <sub>1</sub> , нс	t <sub>2</sub> , нс	t <sub>3</sub>	Γ <sub>1</sub>	Γ <sub>2</sub>	Γ <sub>3</sub>
1	50	0,5	3	6	10	0,1	-0,05	0,15
2	75	0,7	5	10	15	0,15	-0,1	0,05
3	100	1,0	7	12	20	0,05	-0,15	0,1
4	50	1,2	10	15	24	0,1	-0,05	-0,15
5	75	0,5	3	6	10	0,15	-0,1	-0,05
6	100	0,7	5	10	15	0,05	-0,15	-0,1
7	50	1,0	7	12	20	0,1	-0,05	0,15
8	75	1,2	10	15	24	0,15	-0,1	0,05
<b>9</b>	<b>100</b>	<b>0,5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,15</b>	<b>0,1</b>
10	50	0,7	5	10	15	0,1	-0,05	-0,15
11	75	1,0	7	12	20	0,15	-0,1	-0,05
12	100	1,2	10	15	24	0,05	-0,15	-0,1
13	50	0,5	3	6	10	0,1	-0,05	0,15
14	75	0,7	5	10	15	0,15	-0,1	0,05
15	100	1,0	7	12	20	0,05	-0,15	0,1
16	50	1,2	10	15	24	0,1	-0,05	-0,15
17	75	0,5	3	6	10	0,15	-0,1	0,05
18	100	0,7	5	10	15	0,05	-0,15	-0,1

Привести схему корректирующей цепи со значениями элементов и результаты расчетов

#### 4 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.

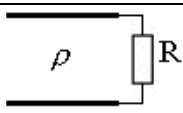
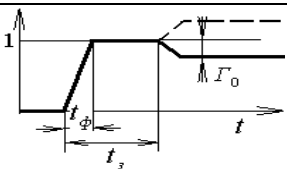
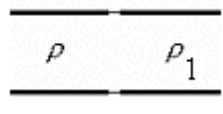
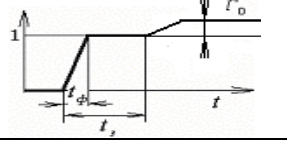
#### 4.1 Краткие методические указания по расчету формирующих цепей

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.

Для формирования импульса нужной формы используется изменение волнового сопротивления линии передачи и величины сопротивления нагрузки. Отличие формирующих цепей от корректирующих цепей, в которых используются аналогичные приемы, заключается в получении значительных величин коэффициентов отражения

Основные расчетные соотношения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные расчетные соотношения

Схема	Рефлектограмма	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

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

Формы импульсов, соответствующие значениям  $\Gamma_0 = 1$  и  $\Gamma_0 = -1$  приведены на рисунке 6.

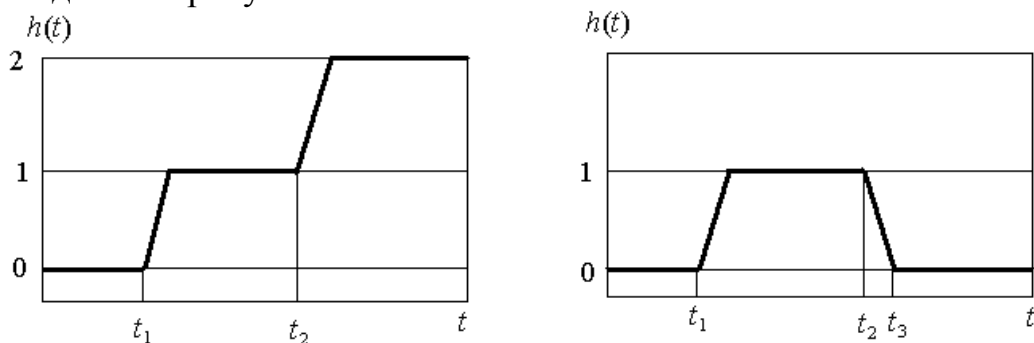


Рисунок 6. Формы импульсов при холостом ходе и коротком замыкании линии передачи



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 (Рисунок 7) производится изменением волнового сопротивления линий передачи по заданному значению коэффициента отражения.

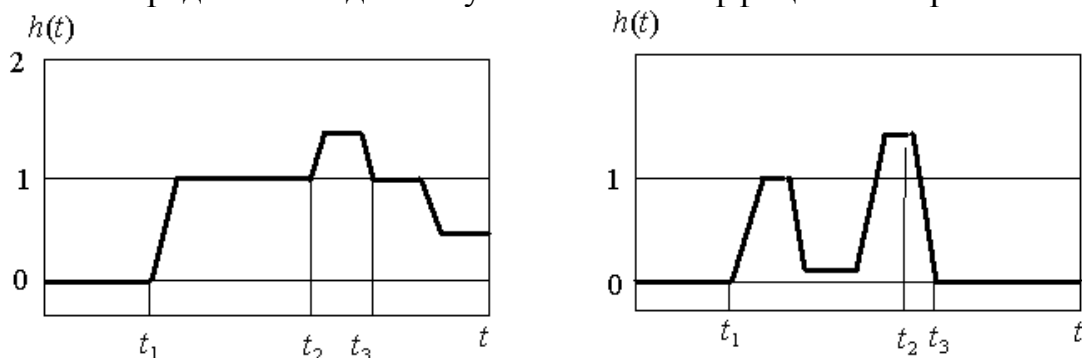
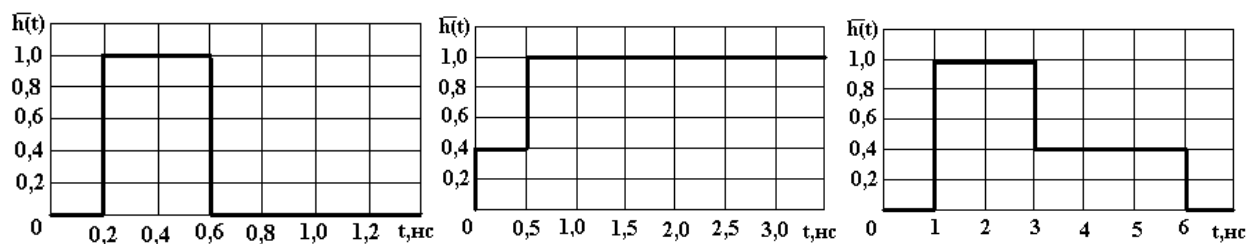


Рисунок 7. Импульсы сложной формы, полученные изменением волнового сопротивления линии

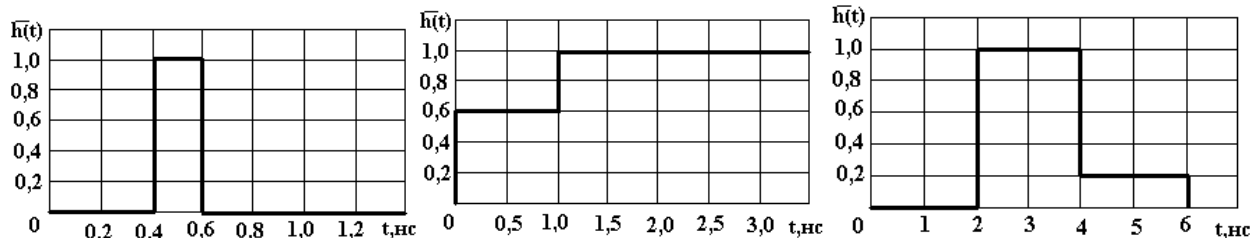
#### 4.2 Задания по расчету формирующих цепей

Генератор с заданным выходным сопротивлением вырабатывает импульс  $h(t)$ . Приведите схемы параллельных корректирующих цепей, формирующих импульсы, приведенный на рисунке и определите значения элементов

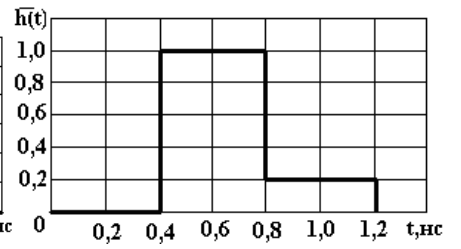
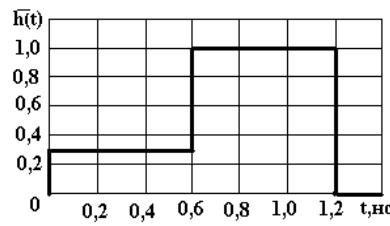
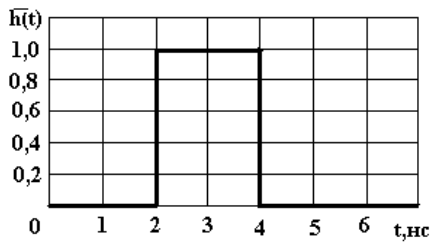
##### Задание № 1. $R_{г}=100 \text{ Ом}$



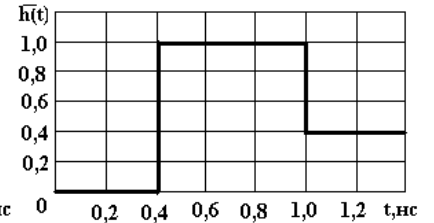
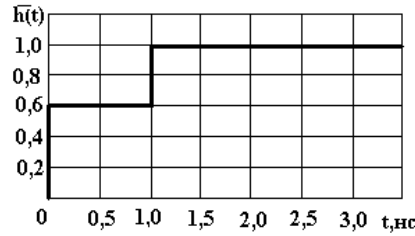
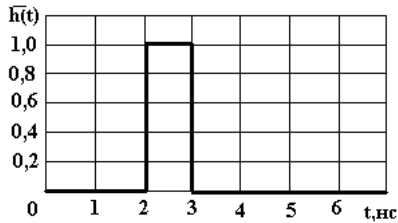
##### Задание № 2. $R_{г}=50 \text{ Ом}$



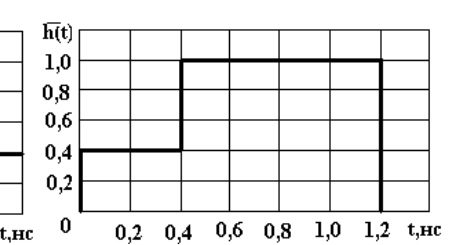
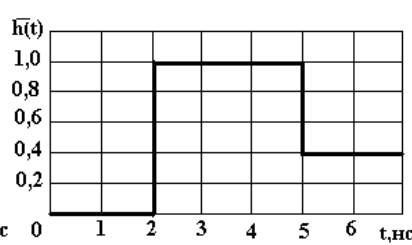
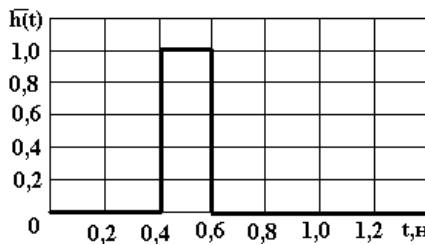
##### Задание № 3. $R_{г}=75 \text{ Ом}$



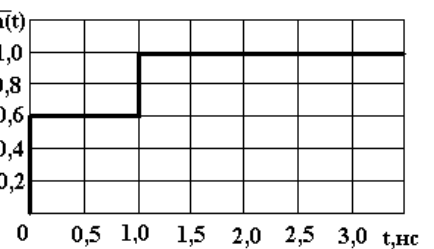
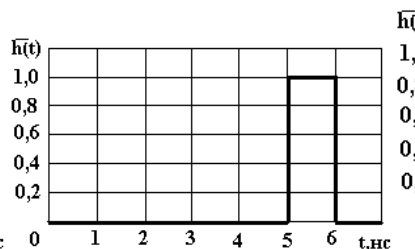
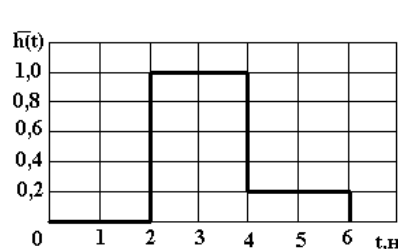
**Задание № 4.  $R_{\Gamma}=100 \text{ Ом}$**



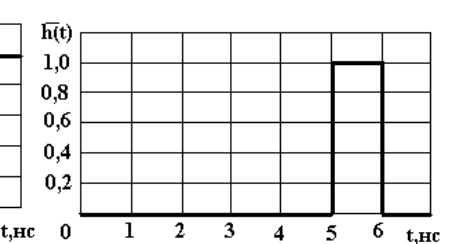
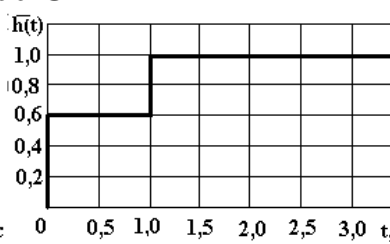
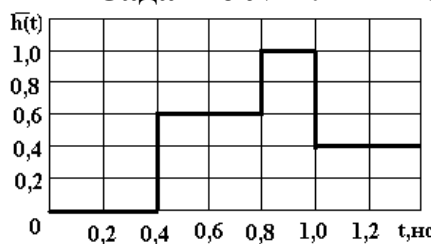
**Задание № 5.  $R_{\Gamma}=50 \text{ Ом}$**



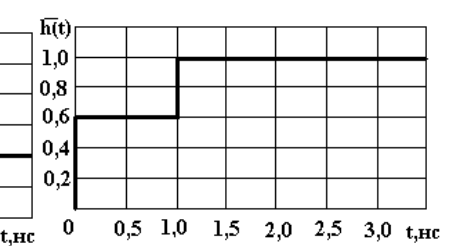
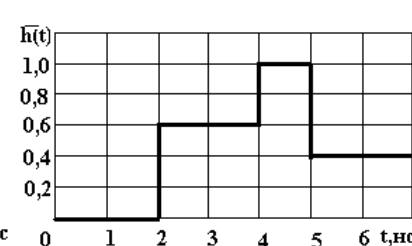
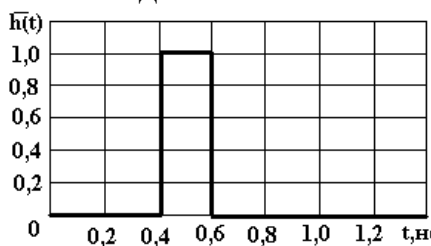
**Задание № 6.  $R_{\Gamma}=75 \text{ Ом}$**



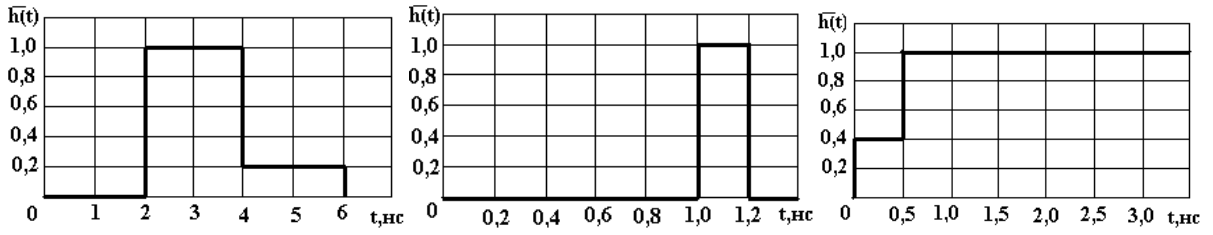
**Задание № 7.  $R_{\Gamma}=100 \text{ Ом}$**



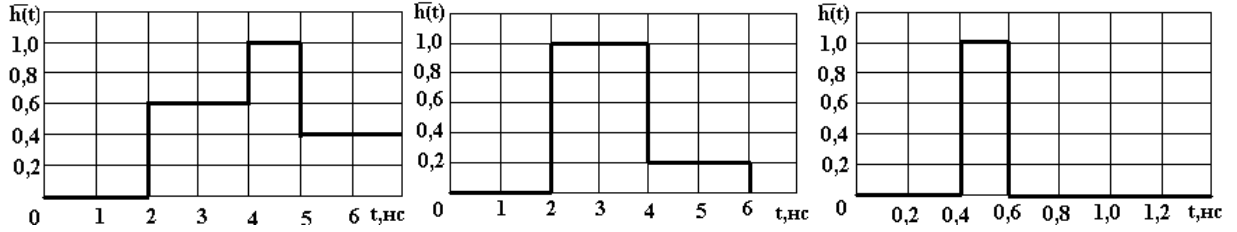
**Задание № 8  $R_{\Gamma}=75 \text{ Ом}$**



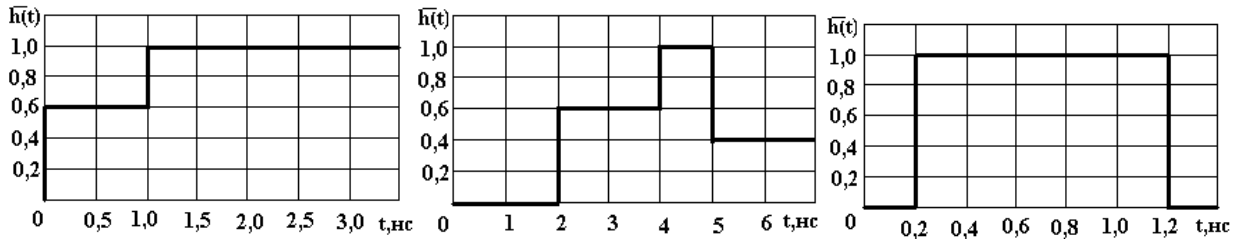
**Задание № 9.  $R_{\Gamma}=50 \text{ Ом}$**



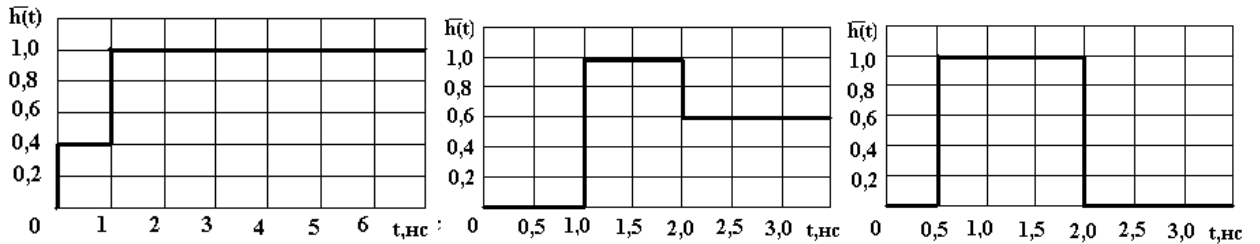
**Задание № 10.  $R_{г}=100 \text{ Ом}$**



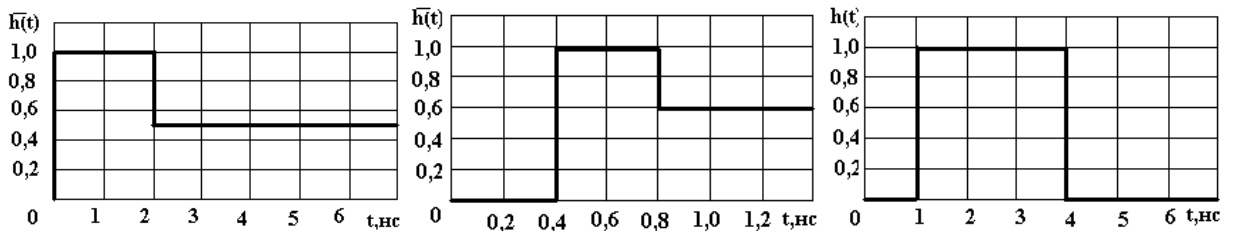
**Задание № 11.  $R_{г}=75 \text{ Ом}$**



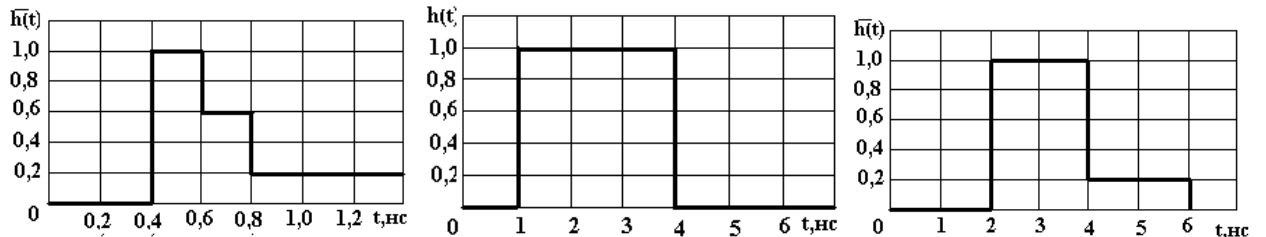
**Задание № 12.  $R_{г}=50 \text{ Ом}$**



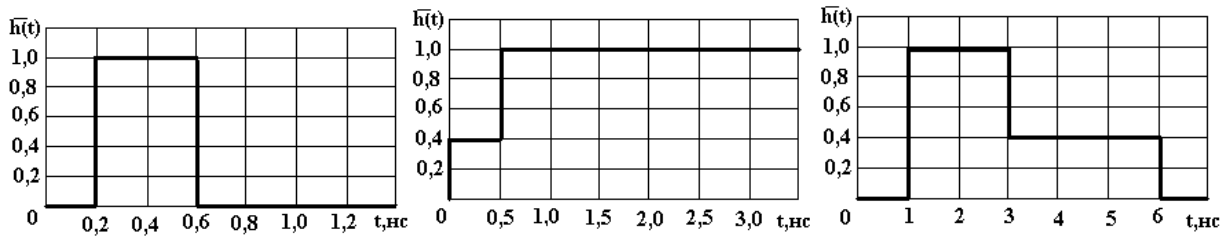
**Задание № 13.  $R_{г}=100 \text{ Ом}$**



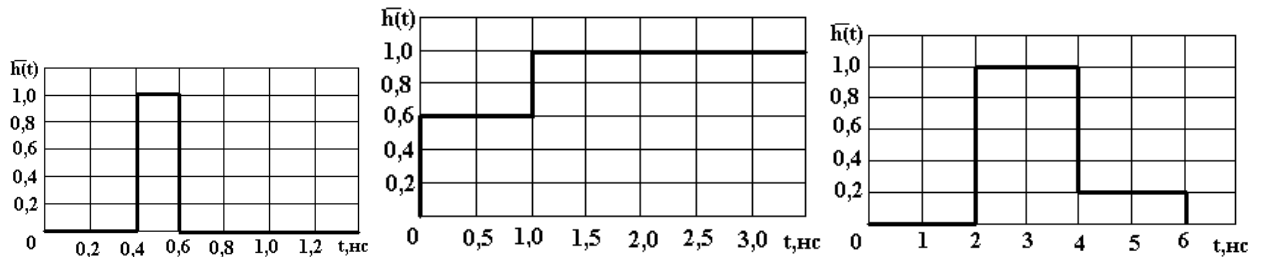
**Задание № 14.  $R_{г}=50 \text{ Ом}$**



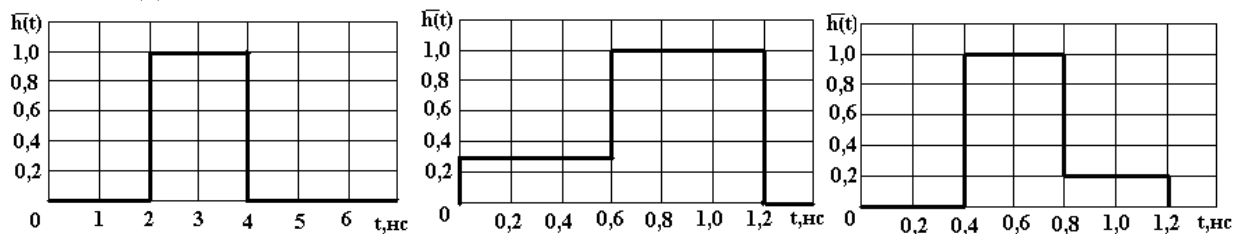
**Задание № 15.  $R_{г}=75 \text{ Ом}$**



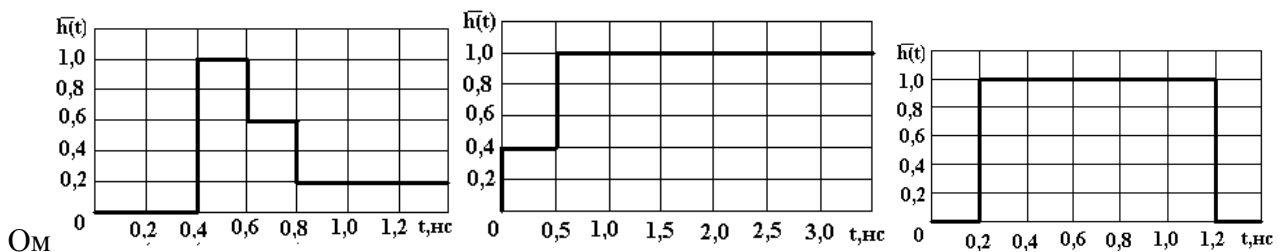
### Задание № 16. $R_{г}=100 \text{ Ом}$



### Задание № 17. $R_{г}=50 \text{ Ом}$



### Задание № 18. $R_{г}=75$



## 5 Контрольная работа

### 5.1 Краткие методические указания к контрольной работе

#### 5.1.1 Связь изменений частотных характеристик с переходными характеристиками

Для выполнения первой части контрольной работы необходимо определить, как изменения частотных характеристик влияет на переходную характеристику.

Для этого частотные характеристики устройства представим в виде:

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

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

где  $|K_0(\omega)|$  и  $\varphi_0(\omega)$  - 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.

### 5.1.2 Аппроксимация изменений частотных характеристик

В общем виде изменения частотных характеристик можно представить как

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

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;

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

$\omega_A$  - верхняя частота интервала аппроксимации.

### 5.1.3 Определение изменения переходной характеристики по изменению АЧХ корректирующей цепи

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

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

где  $a_0, a_n$  - коэффициенты ряда Фурье.

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

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

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

Из выражения следует, что изменения в ПХ представляют собой полусумму исходных ПХ с весовыми коэффициентами  $a_n$  сдвинутыми во времени на интервал  $\pm T_n$ .

## 5.2 Задания на контрольную работу

### Задача №1

Действие корректирующей цепи на частотную характеристику описывается выражением:

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

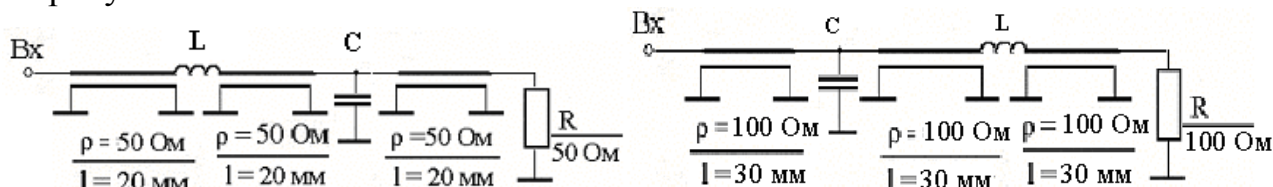
Составить принципиальную схему параллельной корректирующей цепи и определить значения элементов схемы и нарисовать график изменения переходной характеристики  $\Delta \bar{h}(t)$ . Варианты заданий представлены в таблице

Таблица Варианты характеристик корректирующих цепей

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

### Задача №2

Принципиальные схемы параллельной корректирующей цепи приведены на рисунках а и б.



Варианты значений элементов цепи приведены в таблице

Таблица Значения элементов корректирующих цепей

1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
$C=0,5\text{ пф}$	$C=1\text{ пф}$	$C=0,8\text{ пф}$	$C=0,5\text{ пф}$
$L=1\text{ нГ}$	$L=0,5\text{ нГ}$	$L=1\text{ нГ}$	$L=0,5\text{ нГ}$
$\varepsilon=4$	$\varepsilon=5,6$	$\varepsilon=9$	$\varepsilon=1$
$t_{\text{фр}} = 200\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 300\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 250\text{пс}$	$t_{\text{фр}} = 200\text{пс}$

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пикосекундная импульсная техника Ильюшенко В.Н., Авдоченко Б.И. и др. /под ред. Ильюшенко В.Н. – М., Энергоатомиздат, 1993, 368с.

2. . Авдоченко Б. И. Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства: Курс лекций /<http://edu.tusur.ru/training/publications/954> –2012.– 174с.

3. Авдоченко Б. И. Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям <http://edu.tusur.ru/training/publications/950>. – 2012. – 100 с

4. 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.