**7. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ**

**7.1. Основные понятия и соотношения**

**Реальные** электрические цепи (электромагнитные устройства) можно характеризовать двумя основными свойствами: *способностью накапливать* (*запасать*) *электромагнитную энергию и способностью рассеивать энергию.* Следовательно, реальные цепи (устройства) в этом физическом смысле являются *инерционными* и *диссипативными* (обладают потерями энергии).

Такие электрические цепи (устройства) называют *динамическими*.

Модели линейных динамических цепей (устройств) содержат, кроме источников сигналов, индуктивные, емкостные и резистивные элементы.

Индуктивные элементы моделируют в количественном отношении процесс накопления энергии в магнитном поле, емкостные моделируют процесс накопления энергии в электрическом поле, а резистивные моделируют процесс необратимого преобразования электромагнитной энергии в другие виды (потери энергии).

Как известно, процессы в линейных резистивных цепях описываются системами линейных алгебраических уравнений и реакции в таких цепях по форме подобны действующему сигналу.

Линейные индуктивные и емкостные элементы описываются интегральными и дифференциальными уравнениями. Поэтому, в общем случае, процессы в линейных динамических цепях описываются системами линейных интегро-дифференциальных уравнений. Форма реакции заранее не известна и зависит от формы сигнала и параметров цепи.

При работе в реальных устройствах действуют изменяющиеся во времени сигналы, происходят переключения, меняющие параметры и конфигурацию цепи. Режим работы электрического устройства (цепи) при изменении его структуры, параметров, или под воздействием изменяющихся во времени сигналов называют динамическим.

Частными случаями состояния цепи (динамических режимов) являются установившиеся режимы.

Установившиеся режимы это такие, при которых напряжения и токи в электрической цепи либо неизменны во времени, либо являются гармоническими функциями времени.

Любому установившемуся процессу (режиму), отличному от первоначального режима работы цепи, всегда предшествует переходный процесс.

*Переходным называют процесс в системе при переходе от одного установившегося состояния в другое.* Узкая трактовка понятия переходного процесса подразумевает анализ изменения во времени токов и напряжений в цепи при коммутациях.

Коммутация – это, в данном случае, любое скачкообразное изменение функции сигнала, параметров элементов, или конфигурации цепи (подключение и отключение отдельных ветвей с элементами, подключение к цепи или отключение источника сигнала).

Коммутация является причиной возникновения переходных процессов в электрической цепи. Возникновение переходных процессов при коммутациях обусловлено перераспределением электромагнитной энергии в элементах цепи (индуктивных и емкостных). Процессы перераспределения энергии всегда сопровождаются потерями (рассеянием) на резистивных элементах. Наступление нового установившегося режима невозможно без рассеяния энергии.

Задача анализа переходного процесса состоит в определении изменения во времени токов и напряжений в электрической цепи при коммутациях. Моделью реального устройства, используемой для анализа, является электрическая цепь, отвечающая определенному уровню идеализации реального процесса.

- В реальном устройстве энергия не может меняться скачком. В противном случае мощность, равная производной энергии по времени, достигала бы бесконечного значения. Это противоречит физическому смыслу явления.

- При разрыве реальной индуктивности с током в месте размыкания цепи обязательно возникает электрическая дуга. Энергия, запасенная в магнитном поле индуктивности , расходуется на сопротивлении дуги.

- При замыкании накоротко предварительно заряженной емкости (конденсатора) в месте контакта возникает электрическая искра. В этом случае энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора , расходуется в виде тепла на сопротивлениях проводов и контакта.

В общем случае электромагнитная энергия рассеивается на активных сопротивлениях цепи в виде тепла.

- В реальных устройствах невозможно сформировать идеальные скачкообразные изменения сигналов. Всегда существуют ненулевые длительности фронтов нарастания и спада токов и напряжений сигналов. Невозможны и идеальные скачкообразные изменения параметров и конфигурации цепи (структуры устройства).

- Теоретически для завершения переходного процесса и наступления установившегося режима (состояния равновесия) требуется бесконечно большое время.

Перечисленные выше особенности реальных процессов существенно усложняют или делают практически невозможным анализ динамики реальных электромагнитных устройств без принятия соответствующих упрощающих допущений. Например, учет искрообразования и дугообразования в электромагнитных устройствах при переходных процессах является сложной нелинейной задачей, требующей специальной постановки для каждого конкретного случая.

Поэтому на этапе постановки задачи анализа переходных процессов в реальном электромагнитном устройстве (цепи) принимается ряд корректных упрощающих допущений, позволяющих одновременно упростить задачу анализа и обеспечить требуемый уровень погрешности.

**Основные упрощающие допущения**

- При анализе переходных процессов в линейных цепях (устройствах) исключается рассмотрение искрообразования и дугообразования, т.е. не рассматриваются случаи разрыва индуктивностей с токами и короткого замыкания ветвей с емкостями.

- Процесс коммутации считается мгновенным. Длительность коммутации .

- Теоретически бесконечное время переходного процесса ограничивается конечным отрезком , в течение которого токи и напряжения приближаются к своим теоретическим установившимся значениям настолько, что удовлетворяют заданной погрешности анализа.

При анализе  определяется по моменту окончательного входа временной зависимости реакции в трубку заданной погрешности , откладываемой относительно теоретического установившегося значения реакции.

Для анализа составляется исходная схема цепи (модель устройства). В этой схеме коммутации (или коммутаторы) моделируются идеальными ключами (переключателями) [рис.7.1.](#Р71) Характер коммутации указывается стрелками.

*б*)

*а*)

**Рис.7.1**. Размыкающийся (*а*) и замыкающийся (*б*) ключи

При необходимости для каждого ключа указываются моменты наступления коммутаций.

**Общий порядок анализа переходных процессов**

- Рассматривается исходная схема цепи: коммутаторы находятся в исходном положении.

- Задаются условно положительные направления токов и полярности напряжений для всех элементов схемы (желательно согласованные).

- Выбираются в качестве неизвестных переменных только те реакции (токи и напряжения), для которых могут быть определены на основе физических законов независимые начальные условия. Эти переменные будем называть переменными состояния.

- По исходной схеме цепи определяются любым удобным методом значения переменных состояния. Эти значения являются независимыми начальными условиями.

- Составляется схема цепи для переходного режима: коммутаторы в сработанном состоянии.

- Для схемы, соответствующей переходному режиму, составляется математическая модель – уравнения цепи (на основе уравнений элементов и уравнений соединений). В общем случае – это система линейных неоднородных интегро-дифференциальных уравнений.

- Полученная система сводится дифференцированием левых и правых частей уравнений к системе линейных неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений.

- Из уравнений этой системы исключаются любым удобным методом, например преобразованиями, все переменные, не относящиеся к переменным состояния.

- В результате получается система обыкновенных линейных дифференциальных неоднородных уравнений относительно переменных состояния. Эту систему, при необходимости, можно упорядочить и представить в форме Коши.

- Если имеем дело не с системой, а с одним интегро-дифференциальным уравнением цепи, то оно сводится к уравнению состояния теми же приемами, что и система.

- Совокупность системы уравнений состояния (или одного уравнения состояния) и независимых начальных условий является окончательной математической моделью цепи для анализа переходных процессов.

- Система уравнений цепи (уравнение цепи) решается любым удобным методом (классическим, операторным, численным, матричных экспонент).

- Результаты решения проверяются на удовлетворение независимым начальным условиям.

- Результатами решения являются временные зависимости переменных состояния. Форма представления зависит от выбранного метода решения (аналитическая, графическая, массивы с координатами точек и т.д.).

- Остальные переменные (реакции) определяются на основе переменных состояния без решения дифференциальных уравнений.

**Замечание**. Построение математической модели для анализа переходных процессов в форме уравнений состояния можно провести более эффективно с использованием направленного графа цепи, составленного по определенному алгоритму, который приводится в учебниках по теоретическим основам электротехники. В данной работе используется общий подход.

**Переменные состояния**

В математических задачах, связанных с решением систем дифференциальных уравнений, переменными состояния называются все неизвестные переменные, входящие в систему. В этих задачах для всех переменных задаются (считаются заданными) начальные условия.

В технических задачах, имеющих в качестве математических моделей системы дифференциальных уравнений, обязательно возникает дополнительная задача определения начальных условий для физических переменных. Зачастую она является весьма громоздкой и сложной.

Поэтому в технических задачах сводят количество неизвестных переменных по возможности к минимуму, оставляя только те, для которых начальные условия определяются однозначно на основе физических законов (или могут быть измерены физическими приборами в реальном устройстве).

Переменными состояния в электрических цепях являются переменные, для которых могут быть определены на основе физических законов начальные условия и это – минимально возможное количество переменных, полностью определяющих состояние цепи (системы).

Начальные условия для переменных состояния принято называть независимыми начальными условиями.

Независимые начальные условия определяются на основе законов коммутации.

**Законы коммутации**

В реальных цепях амплитуды токов и напряжений имеют конечные значения. Поэтому для элементов этих цепей соблюдаются как физические законы принципы непрерывности во времени потокосцепления  и электрического заряда .

В теории электрических цепей эти законы называют законами коммутации.

Обозначим условно момент наступления коммутации "*t*". С учетом допущения об идеальности коммутации  момент непосредственно перед коммутацией обозначим "- *t*" (подход к "*t*" слева), а момент непосредственно после коммутации - "+ *t*" (подход к "*t*" справа).

С учетом принятых обозначений принцип непрерывности потокосцепления  (закон коммутации для индуктивности) можно сформулировать следующим образом:

- *потокосцепление*  *индуктивности L не может меняться скачком, значение потокосцепления*  *непосредственно перед коммутацией равно значению*  *непосредственно после коммутации*.

. (7.1)

В противном случае на индуктивности *L* появилось бы бесконечно большое напряжение , что лишено физического смысла.

Принцип непрерывности заряда  (закон коммутации для емкости):

- *электрический заряд*  *емкости C не может меняться скачком, значение заряда*  *непосредственно перед коммутацией равно значению*  *непосредственно после коммутации.*

. (7.2.)

В противном случае через емкость протекал бы бесконечно большой ток , что лишено физического смысла.

Соотношения ([7.1](#Ф71)) и ([7.2](#Ф72)) являются выражениями физических законов коммутации и всегда выполнимы для реальных цепей (электромагнитных устройств).

Обозначим значения параметров индуктивности *L* и емкости *C* для моментов непосредственно перед и непосредственно после коммутации: ; и ;  соответственно.

Если в процессе коммутации параметры *L* и *C* не изменялись, т.е. выполнялись условия

, (7.3)

, (7.4)

то из законов коммутации (7.1) и (7.2) следует:

, (7.5)

. (7.6)

Выражения ([7.5](#Ф75)) и ([7.6](#Ф76)) являются следствиями из законов коммутации и выполняются только при соблюдении условий ([7.3](#Ф73)) и ([7.4](#Ф74)), что не всегда соответствует режимам в реальных цепях (устройствах). Это следует учитывать при постановке задач анализа переходных процессов.

Независимые начальные условия определяются из выражений ([7.1](#Ф71)),([7.2](#Ф72)) или ([7.5](#Ф75)), ([7.6](#Ф76)) как значения переменных состояния для моментов "+*t*". Очевидно, что для этого необходимо определить любым удобным методом значения этих переменных для момента "- *t*" из схемы, соответствующей состоянию до коммутации. При этом предполагается, что для  существует установившийся режим.

В общем случае независимыми начальными условиями для электрических цепей, определенными на основе физических законов, являются значения  или .

В качестве переменных состояния для анализа переходных процессов в электрических цепях принимаются потокосцепление  индуктивности *L* и заряд  емкости *C*.

При выполнении условий ([7.3](#Ф73)), ([7.4](#Ф74)) в качестве переменных состояния принимаются токи  в индуктивностях и напряжения  на емкостях.

Часто для удобства анализа условно принимают момент коммутации . В этом случае независимые начальные условия определяются из соотношений:

 (7.7)

; . (7.8)

В теории цепей в большинстве случаев используют в качестве переменных не  и , а токи  и напряжения . Поэтому далее будем использовать переменные  и .

Различают нулевые начальные условия:

 (7.9)

и ненулевые начальные условия:

 (7.10)

Независимые начальные условия характеризуют энергию магнитного поля  и энергию электрического поля , запасенные в элементах цепи к моменту коммутации.

Кроме независимых начальных условий в процессе анализа могут использоваться и зависимые начальные условия – значения токов, напряжений и их производных в начальный момент "+*t*" или "+0". Зависимые условия определяются на основе независимых начальных условий.

**Примеры расчета**

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С НУЛЕВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Линейная динамическая электрическая цепь, схема которой приведена на [рис.7.2](#Р72),*а*, содержит идеальный источник постоянного напряжения , потребитель, представляющий последовательное соединение элементов *R* и *C*. Емкость *C* разряжена, потребитель подключается к источнику сигнала идеальным коммутатором (ключом) в момент времени . Параметры сигнала и элементов потребителя заданы: *V* = 100 B; *R* = 10 Ом;

*C* = 100 мкФ. Требуется определить реакции цепи в переходном режиме.

*uC*(*t*)

##### V

*R*

*i*(*t*)

*С*

*uR*(*t*)

*а*)

0

##### V(t)

*t*0*=*0

2

1

*uC* пр(*t*)

##### V

*R*

*i*пр(*t*)*=*0

*б*)

0

1

2

**Рис.7.2**. Схема *RC*-цепи: *а* – исходная; *б* – для установившегося режима

()

- Очевидно, что для рассматриваемой цепи переменной состояния является только напряжение  на емкости *C*.

- Согласно условию емкость *C* до коммутации была разряжена . Следовательно независимые начальные условия, определяемые из ([7.8](#Ф78)), являются нулевыми:

. (7.11)

- Составим уравнение цепи для схемы, соответствующей переходному режиму (ключ замкнут).

Уравнения элементов:

 (7.12)

Уравнения соединений:

 (7.13)

Уравнение цепи:  (7.14)

С учетом ([7.12](#Ф712)) выражение ([7.14](#Ф714)) имеет вид: или

 (7.15)

*Уравнение* ([7.15](#Ф75)) *в совокупности с независимыми начальными условиями* ([7.11](#Ф711)) *представляет собой математическую модель цепи для анализа переходных процессов.*

В данном случае цепь достаточно простая, имеет первый порядок *n* = 1. Порядок цепи определяется порядком дифференциального уравнения (количеством переменных состояния). Решаем уравнение ([7.15](#Ф715)) классическим методом, определяя полный интеграл в виде суперпозиции частного и общего решений. В электротехнических задачах частное решение называется принужденной составляющей, а общее решение – свободной составляющей. Таким образом, переменная состояния определяется выражением:

 (7.16)

- Принужденная составляющая  соответствует установившемуся процессу при  и зависит от вида сигнала. В данном случае  и при  в цепи установится режим постоянного тока (напряжения), которому соответствует схема [рис.7.2](#Р72),*б*.

Емкость *С* для постоянного тока представляет бесконечно большое сопротивление (разрыв цепи),  и . Таким образом:

 В. (7.17)

Свободная составляющая  (общее решение) определяется как сумма экспонент:

, (7.18)

где - постоянные интегрирования, определяемые на основе независимых начальных условий,  - корни характеристического уравнения.

Для нашего случая *n* = 1 и свободная составляющая будет определяться выражением:

. (7.19)

Характеристическое уравнение можно строить, используя дифференциальное уравнение (или систему дифференциальных уравнений), например из ([7.15](#Ф715)): .

В теории электрических цепей существует способ построения характеристического уравнения по выражению полного комплексного входного сопротивления цепи .

Схема, соответствующая переходному режиму цепи, разрывается в любой удобной точке. Относительно точек разрыва записывается выражение полного комплексного сопротивления . Точки разрыва в этом случае считаются входными полюсами. В выражении  комплексная частота  заменяется на  и выражение  приравнивается нулю:

 (7.20)

Выражение ([7.20](#Ф720)) соответствует характеристическому уравнению цепи.

Для нашей цепи ([рис.7.2](#Р72),*а*):

 или  (7.21)

Из ([7.21](#Ф721)) значение с-1.

Введем постоянную времени цепи . Тогда корень , где с = 1мс.

Для определения постоянной интегрирования *В* используем выражения ([7.16](#Ф716)), ([7.19](#Ф719)), ([7.17](#Ф717)) и ([7.11](#Ф711)) при :

, или .

Откуда имеем: ; 

Решение ([7.16](#Ф716)) принимает вид:



 В. (7.22)

- Проверка на удовлетворение независимым начальным условиям ([7.11](#Ф711)):

.

- Реакция  в переходном режиме определяется уравнением емкостного элемента *C*:

А.

- Реакция  в переходном режиме определяется уравнением резистивного элемента *R*:

В.

Графическая иллюстрация результатов анализа приведена на рис.7.3.

*i/I*0

0τ 2τ 3τ

*t*

1

*б*)

*uR /V*

*i*(*-*0)

*uC*(*∞*)

# *V*

*t*

*a*)

0τ 2τ 3τ

*uC*

*uC*(*-*0)

**Рис.7.3.** Временные зависимости реакций цепи в переходном процессе:

*а* – напряжение на емкости ; *б* – ток  и напряжение на резисторе 

Напряжение на емкости  не изменяется скачком в момент коммутации , а монотонно изменяется по экспоненциальному закону от значения начального условия  до установившегося значения . Происходит процесс заряда емкости до напряжения источника ([рис.7.3](#Р73),*а*).

Ток емкости , ток резистора  и напряжение на резисторе  изменяются скачком в момент коммутации, а затем плавно, по экспоненциальному закону стремятся к своим установившимся значениям ([рис.7.3](#Р73),*б*).

Крутизна характеристик (скорость изменения переменных) определяется значением постоянной времени цепи τ. Значение τ численно равно длине подкасательной в любой точке экспоненциальной функции ([рис.7.3](#Р73)).

В [табл.7.1](#Т71) приведены относительные значения переменной в процентах от ее теоретического установившегося значения через промежутки времени .

Таблица 7.1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, с |  |  |  |  |  |  |
|  | 63,2 | 86,5 | 95,0 | 98,2 | 99,3 | 100 |

Постоянная времени τ характеризует скорость протекания переходного процесса только в цепях первого порядка с монотонными (экспоненциальными) временными зависимостями реакций.

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С НЕНУЛЕВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Линейная динамическая цепь первого порядка, схема которой приведена на [рис.7.4](#Р74),*а*, содержит идеальные источники постоянных напряжений  и , потребитель, представляющий последовательное соединение элементов *R* и *L*. Потребитель переключается в момент времени  идеальным коммутатором (переключателем) с источника  на источник . Параметры сигналов и элементов потребителя заданы: ,В; ; B; Ом;  мГн. Требуется определить реакции цепи в переходном режиме.

- Для рассматриваемой цепи переменной состояния является только ток  в индуктивности *L*.

- Определим независимые начальные условия для переменной , используя исходную схему цепи ([рис.7.4](#Р74),*а*). Переключатель находится в положении "1" и потребитель подключен к источнику напряжения *V*0.

1

*а*)

*б*)

*uL*(*t*)

##### V1

*R*

*i*(*t*)

*L*

*uR*(*t*)

0

##### V1(t)

*t*0*=*0

2

##### V0(t)

##### V0

3

*iL*(*t*)

##### V1

*R*

*i*пр(*t*)

0

2

3

*iL*пр(*t*)

**Рис.7.4.** Схема *RL* - цепи: *а* – исходная; *б* – для установившегося режима (  )

В установившемся режиме, предшествующем моменту коммутации *t*0, в цепи существовал режим постоянного тока (напряжения). Индуктивность *L* в этом режиме представляет короткое замыкание между узлами "3" и "0". Следовательно, ток в индуктивности *L* непосредственно перед коммутацией определяется как

 A. (7.23)

Согласно следствию ([7.8](#Ф78)) независимое начальное условие для :

A. (7.24)

Уравнение цепи для схемы, соответствующей переходному режиму ([рис.7.4](#Р74),*а*, ключ в положении "2"), составляется аналогично рассмотренной ранее задаче.

Уравнения элементов:

. (7.25)

Уравнения соединений:

 (7.26)

Уравнение цепи: . (7.27)

С учетом ([7.25](#Ф725)) и ([7.26](#Ф726)) выражение ([7.27](#Ф727)) имеет вид:

. (7.28)

Уравнение ([7.28](#Ф728)) в совокупности с независимыми начальными условиями ([7.24](#Ф724)) представляет собой математическую модель цепи для анализа переходных процессов.

Решаем уравнение ([7.28](#Ф728)) классическим методом. Полный интеграл уравнения ([7.28](#Ф728)) имеет вид:

. (7.29)

Принужденная (установившаяся) составляющая тока  определяется из схемы [рис.7.4](#Р74),*б*. Для  в цепи устанавливается режим постоянного тока (напряжения), для которого индуктивность *L* представляет собой нулевое сопротивление, т.е. короткое замыкание между узлами 3 и 0. Таким образом, значение принужденной составляющей:

 (7.30)

Свободная составляющая определяется аналогично выражению ([7.19](#Ф719)):

. (7.31)

Характеристическое уравнение строится аналогично ([7.21](#Ф721)):

 или . (7.32)

Из ([7.32](#Ф732)) значение корня:  с-1.

Введем постоянную времени цепи .

Соответственно , где с = 1 мс.

Постоянную интегрирования *А* определяем на основе выражений ([7.29](#Ф729)), ([7.30](#Ф730)), ([7.31](#Ф731)) и ([7.24](#Ф724)) при :

,

откуда А.

Свободная составляющая:

 (7.33)

Решение ([7.29](#Ф729)) принимает вид:

 (7.34)

Проверка на удовлетворение независимым начальным условиям ([7.24](#Ф724)):

.

Реакция  в переходном режиме определяется из уравнения элемента *L*:

 В. (7.35)

Реакция  в переходном режиме определяется из уравнения

элемента *R*:

В. (7.36)

Графическая иллюстрация результатов анализа приведена на [рис.7.5](#Р75).

(*V*0*/R*)

τ

*t*

*iL=i*

(*-V*1 */R*)

*i*(-0)

*a*)

0

*iL*(*∞*)

*uL*

*б*)

*V*0

τ

*t*



*-V*1

0

*uR* (*∞*)

*uL*(*∞*)

*uR*(-0)

*uL*(-0)

(*-V*0*-V*1)

*uR*

**Рис.7.5.** Временные зависимости реакций цепи в переходном режиме: *а* – ток ;

*б* - напряжения на резисторе  и на индуктивности 

Ток в индуктивности  (входной ток цепи ) не изменяется скачком в момент коммутации , а монотонно изменяется по экспоненциальному закону от значения начального условия  до установившегося значения .

Напряжение  на резисторе *R* повторяет форму тока  с точностью до масштаба *R*.

Напряжение  на индуктивности *L* изменяется скачком в момент коммутации, а затем плавно по экспоненциальному закону стремится к своему установившемуся значению .

Все временные зависимости экспоненциальные, имеют одинаковую крутизну, определяемую значением постоянной времени .

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В *RLC* - ЦЕПИ ВТОРОГО

ПОРЯДКА С НУЛЕВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Линейная динамическая цепь второго порядка, схема которой приведена на [рис.7.6](#Р76),*а*, содержит идеальный источник постоянного напряжения , потребитель, представляющий последовательное соединение элементов *R*, *L* и *C*. Потребитель подключается к источнику сигнала в момент  идеальным коммутатором (ключом). Параметры сигнала и элементов потребителя заданы: . Требуется определить реакции цепи в переходном режиме.

##### V(s)

*UC*(*s*)

*LiL*(0)

*UL*(*s*)

*R*

*I*(*s*)

*sL*

*uR*(*s*)

*б*)

2

3

1 */sС*

1

0

*uC*(0)*/s*

*iL*(*t*)

*uL*

*R*

*i*(*t*)

*L*

*uR*

*а*)

*t=*0

2

##### V(t)

3

*uC*

*С*

1

0

**Рис.7.6.** Схема *RLC*- цепи: *а* – исходная; *б* – эквивалентная для изображений по Лапласу

Для рассматриваемой цепи переменными состояния являются ток  в индуктивности *L* (он же входной ток ) и напряжение  на емкости *C*.

Очевидно, что непосредственно перед коммутацией ток в контуре отсутствовал, т.е. , следовательно, независимое начальное условие для :

. (7.37)

Поскольку в условии задачи не указывается на предварительный заряд емкости, то, исходя из схемы [рис.7.6](#Р76),*а*, считаем, что напряжение на емкости непосредственно перед коммутацией отсутствует и независимое начальное условие для :

 . (7.38)

Определим реакции цепи в переходном режиме операторным методом, суть которого достаточно подробно изложена в курсе высшей математики. Построение эквивалентной схемы для изображений ([рис.7.6](#Р76),*б*) осуществляется достаточно просто в соответствии с [табл.7.2](#Т72).

Функции - оригиналы сигнала и реакций имеют каждая свое единственное изображение по Лапласу:

; .

Уравнение цепи (рис.7.6,*б*) в операторной форме:

 (7.39)

С учетом нулевых начальных условий ([7.37](#Ф737)) и ([7.38](#Ф738)) уравнение ([7.39](#Ф739)) имеет вид:

 (7.40)

где  . Из ([7.40](#Ф740)) находим функцию-изображение тока :

. (7.41)

Для дальнейшего определения функции – оригинала  воспользуемся теоремой разложения. Представим функцию – изображение  в форме правильной операторной дроби:

, (7.42)

где , а .

Таблица 7.2

**Таблица соответствия элементов, уравнений элементов, функций сигналов области "*t*" их изображениям в области переменной Лапласа "*s*"**

|  |  |
| --- | --- |
| Оригиналы в обл. "*t*" | Изображения в обл. "*S*" |
| *R*  *u*(*t*)  *i*(*t*) | *I*(*s*)  *U*(*s*)  *R* |
| *L*  *i*(*t*)  *u*(*t*) | *I*(*s*)  *U*(*s*)  *Li*(0)  *sL* |
| *i*(*t*)  *u*(*t*)  *С* | 1 */sС*  *u* (0)*/s*  *I*(*s*)  *U*(*s*) |
| V(t) | V(s) |
| J(t) | J(s) |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Для нахождения корней характеристического уравнения операторного выражения ([7.42](#Ф742)) определяем полюсы функции  (нули функции ). Формально заменяем в выражении  комплексную переменную Лапласа *s* на :

. (7.43)

Корни характеристического уравнения (7.43):

. (7.44)

Обозначим константы: ; , где  - резонансная (собственная) частота контура. Таким образом, корни:

. (7.45)

Вид корней зависит от соотношения параметров цепи *R*, *L* и *C*.

Для реальных электрических цепей (электромагнитных устройств) в общем случае возможны два вида корней:

- корни вещественные простые при ;

- корни комплексные сопряженные при .

Для устойчивых систем (цепей) согласно теореме Ляпунова вещественные части корней должны быть отрицательными. В противном случае система неустойчива и не имеет решения (полный интеграл не сходится, т. е. отсутствует установившаяся составляющая). Диссипативные системы (цепи) без обратных связей устойчивы.

В рассматриваемой цепи корни характеристического уравнения: . Корни вещественные, отрицательные, простые, цепь устойчива (переходные процессы устойчивые).

Функция – оригинал  определяется по теореме разложения, имеющей для случая простых корней выражение:

, (7.46)

где  = 1, 2, 3, …, *n*; *n* – порядок полинома знаменателя *F*2(*s*) ; ;

 при .Таким образом: .

Для 

Для  

 (7.47)

Временная зависимость  представляет собой разность двух экспонент, имеющих разную крутизну. Это апериодический немонотонный процесс. В момент коммутации  ток  не меняется скачком.

Проверка на удовлетворение независимым начальным условиям ([7.37](#Ф737)):

.

Реакция  в переходном режиме определяется из уравнения

элемента *R* и повторяет форму тока :

,В. (7.48)

Реакции  и  также целесообразно определить из соответствующих уравнений элементов *L* и *C*:

 ,В. (7.49)

 (7.50)

Временная зависимость реакции  представляет собой сумму двух экспонент с разной крутизной. Причем в момент коммутации  напряжение  изменяется скачком от  до В, а затем плавно и немонотонно стремится в пределе к своему установившемуся значению .

Временная зависимость реакции  является суммой двух экспонент с разной крутизной и постоянной составляющей.

В момент коммутации  напряжение  не меняется скачком. Зависимость , строго говоря, немонотонная, в пределе стремится к своему установившемуся значению  В (емкость заряжается до значения напряжения сигнала).

Графическая иллюстрация результатов анализа приведена на [рис.7.7](#Р77).

*t*

*uL*(*-*0)

*t*

*i*(*-*0)

*a*)

0

*i*(*∞*)

*iL=i*

*б*)

*uC*(*∞*)

# V

0

*uC*

*uC*(*-*0)

*uL*

*uL*(*∞*)

*uL*

*uC*

**Рис.7.7.** Временные зависимости реакции *RLC* - цепи в переходном режиме :

*а* – ток ; *б* – напряжения  на емкости и  на индуктивности

Процессы в рассматриваемой цепи при заданных значениях параметров являются апериодическими, немонотонными, устойчивыми (корни характеристического уравнения отрицательные, вещественные, простые).

При иных значениях параметров *R*, *L* и *C* в этой цепи переходные процессы могут иметь принципиально другой вид. Если изменить значения *R*, *L* и *C* таким образом, чтобы выполнялось условие , то корни характеристического уравнения цепи будут комплексными сопряженными с отрицательными вещественными частями. Например, при  Ом;

 мГн;  мкФ имеем: ;  рад/с, . Корни характеристического уравнения:

 , (7.51)

где  - частота свободных колебаний системы (цепи),  рад/с.

; . (7.52)

Корни  и  - комплексные, сопряженные с отрицательными вещественными частями.

Функция-оригинал  определяется по выражению (7.46):

, где ,;

; ;

;(7.53)

 (7.54)

Выражение ([7.53](#Ф753)) представляет собой гармоническую функцию, амплитуда которой  изменяется во времени по экспоненциальному закону , а частота .

Остальные реакции цепи ,  и  можно получить на основе выражения ([7.53](#Ф753)) используя соответствующие уравнения элементов *R*, *L* и *C* аналогично ([7.48](#Ф748)), ([7.49](#Ф749)) и ([7.50](#Ф75)).

На [рис.7.8](#Р78) приведена графическая иллюстрация результатов анализа рассматриваемой цепи для случая комплексных сопряженных корней ([7.52](#Ф752)).

*uC*

*uL*

*uC*

*t*

*i*(*-*0)

*a*)

0

*i*(*∞*)

*iL=i*

*б*)

# *V*

*t*

0

*uL*(*-*0)

*uL*(*∞*)

*uL*

*uC*(*-*0)

*uC*(*∞*)

**Рис.7.8.** Временные зависимости реакций *RLC* - цепи в переходном режиме при : *а* - ток ; *б* – напряжения  и 

Процессы в рассматриваемой цепи при таких соотношениях параметров являются колебательными затухающими (корни характеристического уравнения комплексные, сопряженные с отрицательными вещественными частями).

Из рассмотренных примеров можно сделать **вывод**: *характер переходных процессов зависит от вида корней характеристического уравнения цепи, т.е. определяется соотношением значений параметров элементов цепи.*

Необходимо заметить, что приведенные выше методы анализа переходных процессов являются аналитическими и эффективны лишь для относительно простых цепей первого и второго порядков.

Для анализа цепей высоких порядков (*n* > 2) следует использовать матричные и численные методы, либо профессиональные пакеты прикладных программ.

**Выбор значения расчетного времени переходного процесса**

Расчетное время переходного процесса  является значением верхнего предела интегрирования при решении системы дифференциальных уравнений цепи (определении полного интеграла).

Момент коммутации  является значением нижнего предела интегрирования.

Если момент  при решении практических задач либо задан, либо условно принимается равным нулю, то задание значения  представляет определенную проблему.

При экспериментальных исследованиях по показаниям приборов, регистрирующих переходные характеристики, можно судить о степени приближения наблюдаемых переменных к их установившимся значениям и по результатам измерений прекращать или продолжать процесс наблюдения.

При анализе моделей реальных устройств верхний предел интегрирования  определяется однозначно при заданном значении допустимой погрешности только для монотонных переходных характеристик, т.е. для цепей (системы) первого порядка. Можно использовать следующий порядок определения.

- Определяется значение принужденной составляющей реакции (для установившегося режима) .

- Определяется базисное значение реакции в переходном режиме. За базисное значение принимается максимальное значение реакции, если установившаяся составляющая равна нулю (), Если , то за базисное значение принимается значение установившейся составляющей .

- Вычисляется абсолютное значение допустимой погрешности , где  - заданная допустимая погрешность.

- Составляется показательное уравнение относительно неизвестной :

. (7.55)

- Из уравнения ([7.55](#Ф755)) определяется значение .

В качестве примера определим значение  для реакции  из выражения ([7.22](#Ф722)) при .

Из ([7.22](#Ф722)) имеем значение установившейся (принужденной) составляющей . Очевидно, что значение базисной величины выбирается как  Абсолютная погрешность  Показательное уравнение из ([7.22](#Ф722)):

 или .

Откуда имеем:

. (7.56)

Окончательно  определяем логарифмированием выражения ([7.56](#Ф756)):

мс.

Задание приближенного значения  для цепей первого порядка можно осуществить, используя данные [табл.7.1](#Т71).

Для цепей порядка  следует определять значение  по моменту окончательного входа временной зависимости реакции (временной характеристики) в трубку допустимой погрешности  (см. [рис.7.9](#Р79)).

При немонотонных процессах трубка допустимой погрешности откладывается относительно установившегося значения функции реакции . Выбор базисной величины  аналогичен выбору в цепях первого порядка.

При использовании современных пакетов прикладных программ для численного анализа переходных процессов задание верхнего придела интегрирования  в общем случае следует проводить в режиме итераций, контролируя результаты анализа. Такой подход является некоторым аналогом эксперимента.

# 

*б*)

*a*)

*y*(*∞*)

*t*

0

*∆*

*y*(*-*0)

*t*рас

*y*

*t*

*∆*

*y*(*-*0)

*y*

*t*рас

# *ymax*

*y*(*∞*)

0

*t*

*± ∆*

*y*(*∞*)

*y*(*-*0)

0

*t*рас

# 

*y*

**Рис.7.9.** Определение реального (расчетного) времени *t*рас. переходного процесса:

*а* – для монотонных процессов; *б* – для немонотонных

**Временные характеристики линейных цепей**

Временные характеристики переходная и импульсная отражают динамические свойства линейных цепей (электромагнитных устройств) во временной области "". В этом смысле они аналогичны частотным характеристикам: являются реакциями линейной цепи (устройства) на типовые воздействия (напряжение или ток) при нулевых начальных условиях.

В качестве типовых воздействий при исследованиях во временной области принимаются два типа импульсных воздействий: единичная ступенчатая функция  и единичная импульсная функция  - функция Дирака. Эти функции представляют идеализацию реальных импульсных сигналов и широко используются как идеализированные математические модели этих сигналов ([рис.7.10](#Р710)).

0

*t*

*u*

*i*

1

*t*ф

реальный

*a*)

модель

*t*ф*→*0

*t*

*u*

0

*i*

1

1(*t*)

*б*)

(*∞*)

*t*

*u*

0

*i*

модель

*t*пф*→*0

*t*зф*→*0

δ(*t*)

*t*

*u*

0

*i*

*t*пф

реальный

*t*зф

**Рис.7.10**. Реальные импульсные сигналы и их модели: *а* - "ступенчатый";

*б* - "импульсный"

Математические модели типовых сигналов можно представить следующими выражениями:

 (7.57)

 (7.58)

Функция Дирака  - это особая функция. Обычная (регулярная) функция не может обладать свойствами  - функции. При анализе цепей и систем  - функция широко используется. Для ее применения достаточно знания формальных свойств этой функции, например, свойство выборки и свойства производных от  - функции.

Связь между двумя типовыми воздействиями  и  определяется соотношениями:

; . (7.59)

Переходной характеристикой  *называют реакцию линейной цепи (системы) на воздействие единичного ступенчатого сигнала (напряжения или тока) при нулевых начальных условиях.*

Импульсной переходной характеристикой  *называют реакцию линейной цепи (системы) на воздействие единичной импульсной функции при нулевых начальных условиях.*

Характеристику  называют часто весовой функцией системы или весовой характеристикой.

Известно свойство линейных цепей (или систем линейных дифференциальных уравнений): если к цепи с нулевыми начальными условиями вместо исходного воздействия прикладывается его производная или интеграл, то реакция будет равна соответственно производной или интегралу от исходной реакции. Следовательно, связь между переходной и импульсной переходной характеристиками устанавливается на основе ([7.59](#Ф759)) следующими соотношениями:

; . (7.60)

В теории цепей для анализа переходных процессов при импульсных сигналах широко используется переходная характеристика. Она определяется относительно просто. Фактически ее определение сводится к анализу цепи с нулевыми начальными условиями при подключении к источнику постоянного напряжения или тока. Если известна реакция цепи при включении на постоянное напряжение или ток, то переходную характеристику можно получить делением этой реакции на амплитуду сигнала.

С другой стороны, переходные характеристики позволяют определять при нулевых начальных условиях реакции цепи на постоянные сигналы любой амплитуды.

Другим вариантом аналитического определения переходных характеристик является использование соотношений ([7.60](#Ф760)) и взаимосвязи между импульсной переходной характеристикой и передаточной функцией, которая устанавливается выражением:

. (7.61)

Импульсная переходная характеристика  является функцией-оригиналом, у которой изображение по Лапласу есть соответствующая передаточная функция .

В качестве примера рассмотрим определение временных характеристик *RC*- цепи, схема которой приведена на [рис.7.2](#Р72),*а*. Значения параметров элементов остаются прежними: *R=*10 Ом; *C*=100 мкФ . Согласно смыслу временных характеристик напряжениями сигнала должны быть  или , а независимые начальные условия - нулевые .

Определим временные характеристики как реакцию  на соответствующие сигналы. Для простоты решения воспользуемся операторным методом.

Изображение реакции при нулевых начальных условиях и при воздействии в виде единичной ступенчатой функции будет определяться по соответствующим уравнениям элементов и соединений в операторной форме.

. (7.62)

Для переходной характеристики  используем . Таким образом .

Тогда: , где

- постоянная времени цепи.

Оригинал  определим по теореме разложения ([см.7.46](#Ф746)).

, где  ; ; ; ; ; ; *n* = 2 (считать и нулевой корень).

 В. (7.63)

Импульсную переходную характеристику (весовую функцию) определим, используя соотношения ([7.60](#Ф760)):

. (7.64)

Окончательно для рассматриваемой цепи временные характеристики: В; 

Для определения временных характеристик можно использовать выражение соответствующей передаточной функции и зависимость ([7.61](#Ф761)). В данном случае .

Передаточная функция , где  и ; ; . Таким образом, выражение передаточной функции: . Оригиналом этого изображения является импульсная переходная характеристика, которую определяем по теореме разложения:

,

где ,  .

Согласно соотношениям ([7.60](#Ф760)) переходная характеристика

 В.

Результаты совпадают с полученными ранее выражениями ([7.64](#Ф764)) и ([7.63](#Ф763)).

Графическая иллюстрация временных характеристик представлена на [рис.7.11](#Р711).

*h(∞)*

# 1

*t*

*a*)

0τ

*h*

ω

0τ

τ

*t*

*б*)

1*/*τ

ω(*∞*)

**Рис.7.11**. Временные характеристики *RC* - цепи: *а* – переходная; *б* – импульсная переходная (весовая)

По временным характеристикам можно определять динамические показатели цепи (например, ).

**7.2. Исследование переходных процессов в линейных цепях первого и второго порядков**

7.2.А. **Цель работы**: исследование переходных процессов и определение переходных характеристик в линейных *RC* - и *RL* - цепях первого порядка и в *RLC*- цепи второго порядка.

В работе студенты экспериментально исследуют переходные процессы в линейных последовательных *RC* - и *RL* - цепях при ненулевых начальных условиях. Исследуется характер временных зависимостей реакций в переходном режиме.

Методом численного анализа определяются переходные характеристики исследуемых цепей.

Переходные процессы в линейной *RLC*- цепи исследуются в режиме численного анализа по переходным характеристикам.

Создаются схемы для проведения виртуальных экспериментов и численного анализа.

Анализируются результаты моделирования.

Виртуальные эксперименты и численный анализ проводятся на базе пакета *MultiSim*10. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.

**Рабочее задание**

7.2.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ *RC* - ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

7.2.Б.1. Сформировать схему для проведения виртуального эксперимента согласно [рис.7.12](#Р712).

**XFG1**

**C1**

**1µF**

**XSC1**

A

B

C

D

G

T

**R1**

**10**Ω

**Vi**

**1**Ω

I

**Рис.7.12.** Схема виртуального эксперимента для получения временных зависимостей реакций  *RC* - цепи в переходных режимах

Исследование переходных процессов в линейных цепях осуществляется при импульсных периодических сигналах прямоугольной формы. В этом случае коммутации в цепи происходят, благодаря импульсному характеру функции сигнала. В качестве источника сигналов в работе используется генератор сигналов *XFG*… . Входным сигналом цепи является периодическая последовательность разнополярных прямоугольных импульсов напряжения (разнополярный меандр). Разнополярность импульсов обеспечивает ненулевые независимые начальные условия для переменных цепи.

7.2.Б.2. Модели генератора *XFG*1, резистора *R*1, емкости *C*1, управляемого током источника напряжения *Vi*, четырехканального осциллографа *XSC*1 и заземлений вызываются аналогично [п.п.1.2.Б.6](#Б6), [1.2.Б.4](#Б4), [1.2.В.2,](#В2) [1.2.Б.11](#Б11), [3.2.Б.4](#Зад32Б4) и [1.2.Б,2](#Б2), [1.2.Б.3](#Б3) соответственно.

7.2.Б.3. Разместить все элементы и соединить между собой согласно схеме [рис.7.12](#Р712) (см. п.[1.2.Б.13](#Б13)).

-Для удобства сборки схемы развернуть изображение модели генератора *XFG*1 в горизонтальной плоскости на  (см. [п.6.2.Б.3](#Зад62Б3)).

- Для удобства визуального наблюдения временных зависимостей сигнала и реакций задать различные цвета проводникам, соединяющим входы каналов осциллографа *А*, *В*, *С* со схемой (см. п.[1.2.Б.12](#Б12), [1.2.Б.13](#Б13)).

7.2.Б.4. По заданию преподавателя задать параметры пассивных элементов: *R*1*-* в диапазоне 10 … 20 Ом; *C*1*-* в диапазоне 100 … 200 мкФ (см. п.п.[1.2.Б.15](#Б15), [1.2.В.7](#В7) соответственно).

7.2.Б.5. Для заданных значений *R*1 и *C*1 рассчитать постоянную времени цепи  в секундах и частоту импульсного периодического сигнала , Гц.

7.2.Б.6. Задать параметры входного сигнала , используя лицевую панель генератора.

- В разделе *Waveforms* задать форму сигнала – разнополярные прямоугольные импульсы.

- В разделе *Signal Options* в строке *Frequency* задать значение частоты *f*, рассчитанное в п.7.2.Б.5.

- В строке *Duty Cycle* установить значение скважности сигнала 50% (по умолчанию 50%).

- В строке *Amplitude* установить по заданию преподавателя значение амплитуды входного напряжения  в диапазоне 100 … 200 В.

- В строке *Offset* установить значение напряжения смещения, равным нулю (по умолчанию 0 *V*).

- Остальные параметры сигнала оставить по умолчанию.

7.2.Б.7. Настроить четырехканальный осциллограф *XSC*1 аналогично п.[3.2.Б.11](#Зад32Б11). Задать режим по входу *DC*.

7.2.Б.8. Задать параметры управляемого током источника напряжения *Vi* аналогично п.[1.2.Б.21](#Б21). В этой цепи источник *Vi* используется в качестве безынерционного линейного датчика тока с внутренним сопротивлением .

7.2.Б.9. Провести виртуальный эксперимент получения временных зависимостей ,,.

- Запустить модель переключателем .

- Зафиксировать временные зависимости ,  и  на экране осциллографа в процессе двух-трехкратного заполнения экрана.

**Замечание**. *Показания всех приборов следует фиксировать по завершении переходных процессов измерения в вычислительном эксперименте*.

- Отключить модель переключателем .

- Сохранить изображение (снимок экрана).

- Используя визиры определить координаты 6…7 точек на периоде для каждой временной зависимости, включая обязательно точки, в которых происходят коммутации (скачки) напряжения сигнала.

- Результаты измерений занести в [табл.7.3](#Т73).

Таблица 7.3

**Временные зависимости , , **

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, c |  |  |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |  |  |
| , A |  |  |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |  |  |

7.2.Б.10. ***При оформлении отчета необходимо обработать полученные на осциллографе результаты эксперимента*:** *временные зависимости* **, , . *Обработку осциллограмм выполнить аналогично п.***[**1.2.Б.25**](file:///C:\Documents%20and%20Settings\User\Рабочий%20стол\Моделирование%20процессов%20в%20электрических%20цепях.docx#Б25#Б25)**.** Полученные в результате эксперимента точки (таблица 7.3) нанести на осциллограммы.

7.2.Б.11. Для каждого момента коммутации определить независимые начальные условия переменной состояния, используя данные табл.7.3. Указать эти условия на осциллограмме.

7.2.Б.12. Подготовить схему виртуального эксперимента *RC* – цепи для определения переходных характеристик в режиме численного анализа согласно [рис.7.13](#Р713).

**C1**

**1µF**

**R1**

**10**Ω

**Vi**

**1**Ω

I

**RVi**

**1k**Ω

**V1**

**1 V**

**Рис. 7.13.** Схема RC-цепи для определения переходных характеристик в режиме численного анализа

- Заменить генератор сигналов *XFG*1 на источник постоянного напряжения *V*1, отключив предварительно генератор *XFG*1 от цепи (см. п.п.[1.2.Б.13](#Б13), [1.2.Б.2](#Б2)).

- Отсоединить от исследуемой цепи осциллограф *XSC*1, удалив проводники, соединяющие осциллограф с цепью (см. [п.1.2.Б.13](#Б13)).

- Присоединить к выводам управляемого источника *Vi* нагрузочный резистор *RVi*.

- Задать параметры источника постоянного напряжения *V*1 в соответствии с определением переходных характеристик: установить по заданию преподавателя значение напряжения источника. (см. п.[1.2.Б.14](#Б14)).

- Задать параметры нагрузочного резистора *RVi* аналогично п.[1.2.Б.15](#Б15). Установить значение сопротивления *RVi* равным 1кОм.

- Идентифицировать узлы (узловые напряжения) схемы аналогично п.[6.2.Б.15](#Зад62Б15).

- Выбрать в качестве реакций для определения переходных характеристик напряжение на емкости и ток, которому соответствует напряжение на выходе источника *Vi*.

7.2.Б.13. Задать вид численного анализа и его параметры.

- Вызвать окно перечня видов анализа кнопкой  на инструментальной панели.

- Выбрать анализ переходных режимов *Transient Analysis* и, активизируя эту строку, открыть окно задания параметров анализа *Transient Analysis* на закладке *Analysis Parameters*.

- В разделе *Initial Conditions* (начальные условия) выбрать вид независимых начальных условий в перечне падающего меню: *Set to zero* – *нулевые*.

- В разделе *Parameters* в строке *Start time (TSTART)* установить значение нижнего предела интегрирования (момент коммутации) .

- В строке *End time (TSTOP)* установить значение верхнего предела интегрирования  в секундах, используя значение τ, рассчитанное в [п.7.2.Б.5](#Зад72Б5).

- Включить режим автоматического выбора максимального шага интегрирования *Maximum time step setting (TMAX)*.

- Включить режим *Minimum number of time points* (задание минимального количества точек расчета, выводимых на графики) и установить значение равное 1000.

- Открыть закладку *Output variables*.

- В обоих разделах *Variables in circuit* и *Selected variables for analysis* в падающих меню установить вид списка переменных *All variables* (все переменные).

- Перевести из окна раздела *Variables in circuit* в окно раздела *Selected variables for analysis* номера узлов (узловых напряжений), выбранных в п.[7.2.Б.12](#Зад72Б12) реакций (см. п.[6.2.Б.16](#Зад62Б16)).

7.2.Б.14. Запустить процесс анализа кнопкой .

- Результаты анализа отображаются в окне *Grapher View* (см. п.[6.2.Б.17](#Зад62Б17)).

Обработка изображения результатов анализа – окна *Grapher View*.

Изменение цвета фона экрана (с черного на белый) осуществляется нажатием кнопки *Reverse Colors* - .

При необходимости вводится вторая вертикальная ось справа. Если изображения какой-то из кривых недостаточно наглядно, следует ввести правую ось с измененным масштабом. Для этого необходимо подвести стрелку курсора к левой оси и кликнуть правой клавишей мыши. Появляется надпись *Axis Properties*.

Кликом левой кнопки мыши по этой надписи вызывается окно графического редактора *Graph Properties* на закладке *Left Axis*. В строке *Label* поставить название оси, соответствующее откладываемым по ней переменным. В строке *Axis* активируется окно *Enabled.* При необходимости изменяется толщина оси в окне *Pen Size.* В строке *Scale* указывается тип шкалы(активируется *Linear*). В строке *Range* задается диапазон шкалы в соответствии с полученными в результате анализа кривыми. В строке *Divisions*  в окне *Total Ticks* указывается число масштабных делений таким образом, чтобы отношение значения *Max* к *Total Ticks* давало целое число.

На закладке *Right Axis* повторяются все операции, проведенные для оси на закладке *Left Axis*. При этом, в строках *Range* и *Divisions* следует подобрать такие значения *Max* к *Total Ticks*, чтобы масштабная сетка получилась единой для левой и правой осей.

В случае необходимости аналогично редактируется нижняя горизонтальная ось на закладке *Bottom Axis.*

Далее проводится редактирование изображения полученных в результате анализа кривых на закладке *Traces.* В строке *Trace* выбирается номер редактируемой кривой. В строке *Label* задается название выбранной кривой. В строке *Pen Size* устанавливается толщина линии кривой, которую следует задавать не менее выбранной ранее толщины осей. В строке *Color* выбирается цвет кривой. Редактируемая кривая привязывается к соответствующей вертикальной оси в окне *Y-Vertical Axis*. Значения смещений по осям в окнах *X Offset* и *Y Offset* задаются равными нулю.

Далее нажатием кнопки *Show/Hide Grid* накладывается масштабная сетка. Сетка редактируется в окне *Graph Properties* на закладке *General* в строке *Grid.* В окне *Pen Style* выбирается тип линии сетки, например, *Dash.* В окне  *Pen Size* устанавливается толщина линий сетки: предпочтительно минимальная – 1 п. Цвет сетки черный.

Для осуществления необходимых измерений вызываются визиры кнопкой *Show/Hide Cursors*  . При этом появляется окно *Transient Analysis* с данными анализа. При использовании в измерениях только одного визира в этом окне следует оставить только строки *x*1 и *y*1 (см. п.[6.2.Б.18](#Зад62Б18)). В строке *x*1 – значения моментов времени в секундах, в строке *y*1 – значения соответствующих измеряемых переменных.

7.2.Б.15. Используя визиры снять с результатов анализа координаты 4…6 точек для каждой переходной характеристики:  и  (см. п.[6.2.Б.18](#Зад62Б18)). Координаты точек обеих характеристик следует снимать для одинаковых значений времени *t*, т.е. использовать один визир (положение визира измеряет одновременно значение  и значение  для момента *t*, соответствующего этому положению).

- Данные измерений занести в [табл.7.4](#Т74).

Таблица 7.4

**Переходные характеристики** *RC* **- цепи первого порядка , **

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , с |  |  |  |  |  | , с |
| , А |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |

7.2.Б.16. Принять значение допустимой погрешности по заданию преподавателя  в диапазоне (3…5)%.

7.2.Б.17. Используя визиры определить значение времени переходного процесса  по моменту окончательного входа характеристики  в трубку заданной (допустимой) погрешности. Результат измерения занести в [табл.7.4](#Т74).

7.2.Б.18. Сохранить изображение окна  *Grapher View*.

- Закрыть окно *Grapher View*.

*- При оформлении отчета необходимо обработать полученные результаты численного анализа* и указать на графиках независимые начальные условия для переменной состояния.

7.2.Б.19. Проанализировать характер переходных характеристик и сделать выводы.

7.2.Б.20. Провести численный анализ переходных процессов в исследуемой цепи ([рис.7.13](#Р713)) в режиме перебора (изменения) параметра резистора *R*1. В качестве изменяемого параметра принять сопротивление резистора.

По существу такой анализ позволяет исследовать влияние значений параметров элементов на скорость протекания переходного процесса. При неизменном значении емкости конденсатора *C*1 изменение сопротивления резистора *R*1 приводит к соответствующему изменению постоянной времени цепи .

- Выбрать в перечне видов анализа режим изменения параметров *Parameter Sweep* и открыть окно задания параметров режима *Parameter Sweep* на закладке *Output variables*.

- Оставить (или перевести) в окне *Selected variables for analysis* номер только одного узла (узлового напряжения), соответствующего переменной состояния: для цепи *RC* – напряжение .

- Открыть закладку *Analysis Parameters* и повторить далее все соответствующие операции аналогично п[.6.2.Г.30](#Зад62Г3).

- В блоке *Points to sweep* в разделе *Start* задать начальное значение изменяемого параметра равным 0,5 ∙ *R*1 Ом, где *R*1 - сопротивление исходной схемы (см.п.[7.2.Б.4](#Зад72Б4)).

- В разделе *Stop* задать конечное значение параметра равным 1,5 ∙ *R*1 Ом.

- В разделе # *of points* задать число изменений параметра равное 3.

- Шаг изменения параметра в разделе *Increment* выбирается автоматически.

- Расширить окно *Parameter sweep*  (закладку *Analysis Parameters*) кнопкой  .

- В разделе *Analysis to sweep*  блока *More Options* выбрать из списка вид анализа – *Transient* *analysis*.

- Кнопкой  вызвать окно задания параметров анализа *Sweep of Transient* *Analysis* на закладке *Analysis Parameters*.

- Задать все параметры анализа одинаковыми с соответствующими параметрами п.[7.2.Б.13](#Зад72Б13). (Если значения параметров остались прежними с предыдущего численного анализа, то оставить их значения без изменений).

- Закрыть окно *Sweep of Transient Analysis* кнопкой .

- Запустить процесс анализа кнопкой .

7.2.Б.21. Результатами анализа в этом случае являются переходные характеристики  при различных значениях сопротивления резистора *R1*, т.е. при различных значениях .

7.2.Б.22. Повторить п.[7.2.Б.15](#Зад72Б15). Результаты измерения координат переходных характеристик занести в [табл.7.5](#Т75).

Таблица 7.5

**Переходные характеристики *RC* - цепи первого порядка при различных значениях активного сопротивления ()**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| с |  |  |  |  | , с | *R1*, Ом | , с |
| , В |  |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |  |  |

7.2.Б.23. Рассчитать значения постоянной времени цепи τ для каждого варианта *R*1 и занести их в [табл.7.5.](#Т75)

7.2.Б.24. Повторить для каждого варианта *R1* п.п.[7.2.Б.17](#Зад72Б17) и [7.2.Б.18](#Зад72Б18). Результаты измерений  занести в [табл.7.5](#Т75).

7.2.Б.25. Сохранить изображение окна  *Grapher View*.

- Закрыть окно *Grapher View*.

*- При оформлении отчета необходимо обработать полученные результаты численного анализа* и указать на осциллограммах независимые начальные условия для переменной состояния при соответствующих значениях сопротивления *R*1.

7.2.Б.26. Проанализировать характер переходных характеристик и сделать выводы о влиянии значений параметров цепи на скорость протекания переходного процесса (оценить быстродействие цепи).

7.2.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ *RL* - ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

7.2.В.1. Сформировать схему для проведения виртуального эксперимента согласно [рис.7.14](#Р714).

**XFG1**

**XSC1**

A

B

C

D

G

T

**R1**

**10**Ω

**Vi**

**1**Ω

I

**L1**

**10mH**

**Рис.7.14.** Схема виртуального эксперимента для получения временных зависимостей реакций *RL* - цепи в переходных режимах.

7.2.В.2. Вызвать модель линейной индуктивности *L*1 аналогично п.[1.2.В.2](#В2).

7.2.В.3. Все остальные операции создания схемы [рис.7.14](#Р714) практически полностью повторяют операции формирования схемы *RC* - цепи [рис.7.12](#Р712) (см.п.п.[7.2.Б.1](#Зад72Б1), [7.2.Б.2](#Зад72Б2) и [7.2.Б.3](#Зад72Б3)).

7.2.В.4. По заданию преподавателя задать параметры пассивных элементов: *R*1*-* в диапазоне 10…20 Ом; *L*1*-* в диапазоне 10…20 мГн (см. п.п.[1.2.Б.15](#Б15), [1.2.В.6](#В6) соответственно).

7.2.В.5. При заданных значениях *R*1 и *L*1 рассчитать постоянную времени цепи  в секундах и частоту импульсного сигнала  Гц.

7.2.В.6. Задать параметры входного сигнала  полностью идентичными параметрам, заданным в п.[7.2.Б.6](#Зад72Б6).

7.2.В.7. Настройка четырехканального осциллографа *XSC*1 и параметры управляемого током источника напряжения *Vi* полностью совпадают с настройкой и параметрами, указанными в п.п. [7.2.Б.7](#Зад72Б7) и [7.2.Б.8](#Зад72Б8).

7.2.В.8. Провести виртуальный эксперимент получения временных зависимостей , ,  аналогично п.[7.2.Б.9](#Зад72Б9). Результаты измерений занести в табл.7.6.

7.2.В.9. ***При оформлении отчета необходимо обработать полученные на осциллографе результаты эксперимента*:** *временные зависимости* **, ,** **. *Обработку осциллограмм выполнить аналогично п.***[**1.2.Б.25**](file:///C:\Documents%20and%20Settings\User\Рабочий%20стол\Моделирование%20процессов%20в%20электрических%20цепях.docx#Б25#Б25)**.** Полученные в результате эксперимента точки (таблица 7.6) нанести на осциллограммы.

По данным [табл.7.6](#Т76) построить графики ,  и  на одной координатной сетке.

Таблица 7.6

**Временные зависимости** , , 

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , с |  |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |  |  |
| , А |  |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |  |  |

7.2.В.10. Для каждого момента коммутации определить независимые начальные условия переменной состояния, используя данные [табл.7.6](#Т76) и указать их на осциллограммах временных зависимостей.

7.2.В.11. Подготовить схему виртуального эксперимента *RL* - цепи для определения переходных характеристик в режиме численного анализа согласно [рис.7.15](#Р715).

**R1**

**10**Ω

**Vi**

**1**Ω

I

**RVi**

**1k**Ω

**V1**

**1 V**

**L1**

**10mH**

**Рис.7.15.** Схема *RL* - цепи для определения переходных характеристик в режиме численного анализа

Подготовка схемы [рис.7.15](#Р715) полностью аналогична подготовке схемы [рис.7.13](#Р713) п.[7.2.Б.12](#Зад72Б12).

7.2.В.12. Выбрать в качестве реакций для определения переходных характеристик ток , который является переменной состояния - током в индуктивности , и напряжение . Току  соответствует напряжение на выходе источника *Vi*.

7.2.В.13. Задание вида численного анализа и его параметров полностью аналогично п.[7.2.Б.13](#Зад72Б13).

7.2.В.14. Провести численный анализ переходного процесса и обработку его результатов аналогично п.п.[7.2.Б.14](#Зад72Б14) и [7.2.Б.15](#Зад72Б15).

-Данные измерений занести в [табл.7.7](#Т77).

7.2.В.15. Повторить операции п.[7.2.Б.16](#Зад72Б16), 7.2.Б.17 для результатов численного анализа [табл.7.7](#Т77).

7.2.В.16. Принять значение допустимой погрешности по заданию преподавателя ±∆% в диапазоне (3…5)%.

7.2.В.17. Повторить п.п.[7.2.Б.18](#Зад72Б18) и [7.2.Б.19](#Зад72Б19). Значения  определять по моменту окончательного входа характеристики  в трубку заданной (допустимой) погрешности. Результат измерения занести в [табл.7.7](#Т77).

Таблица 7.7

**Переходные характеристики *RL* - цепи первого порядка **, ****

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , с |  |  |  |  |  | , с |
| , А |  |  |  |  |  |  |
| , В |  |  |  |  |  |

7.2.В.18. Провести численный анализ переходных процессов в исследуемой цепи ([рис.7.15](#Р715)) в режиме изменения параметра резистора *R*1. В качестве изменяемого параметра принять сопротивление резистора. Изменение сопротивления резистора *R1* при неизменном значении индуктивности *L*1 приводит к соответствующему изменению постоянной времени цепи  и, таким образом, к изменению скорости протекания переходного процесса.

- Выбор вида анализа *Parameter Sweep*, настройку его параметров и запуск провести аналогично операциям п.[7.2.Б.20](#Зад72Б20).

- Выбрать в качестве исследуемой переменной напряжение управляемого источника *Vi* (датчика тока). Оно соответствует в масштабе коэффициента передачи *Н*  току , т.е. в данном случае – переменной состояния.

- Оставить (или перевести) в окне *Selected variables for analysis* номер только одного узла (узлового напряжения), соответствующего напряжению источника *Vi*.

7.2.В.19. Результатами анализа являются переходные характеристики  при различных значениях сопротивления резистора *R*1, т.е. при различных значениях постоянной времени τ.

7.2.В.20. Повторить п.[7.2.Б.15](#Зад72Б15). Результаты измерения координат переходных характеристик занести в [табл. 7.8](#Т78).

Таблица 7.8.

**Переходные характеристики *RL* - цепи первого порядка при различных значениях активного сопротивления ()**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , с |  |  |  |  | , с | *R*1, Ом | , с |
| , А |  |  |  |  |  |  |  |
| , А |  |  |  |  |  |  |  |
| , А |  |  |  |  |  |  |  |

7.2.В.21. Повторить п.п.7.2.Б.23 и.7.2.Б.24. Результаты расчета τ и измерений  занести в табл.7.8.

7.2.В.22. . Сохранить изображение окна  *Grapher View*.

- Закрыть окно *Grapher View*.

*- При оформлении отчета необходимо обработать полученные результаты численного анализа* и указать на осциллограммах независимые начальные условия для переменной состояния при соответствующих значениях сопротивления *R*1.

7.2.В.23. Проанализировать характер переходных характеристик, сравнить их с характеристиками *RC* - цепи (см. п.7.2.Б.25) и сделать выводы по результатам сравнения и по влиянию значений параметров цепи на скорость протекания переходного процесса (оценить быстродействие цепи).

7.2.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ *RLC* - ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В данной работе исследования переходных процессов проводятся в режиме численного анализа, результатами которого являются переходные характеристики.

Переходные характеристики позволяют судить о характере процесса и дают необходимую техническую информацию о динамических свойствах цепи.

7.2.Г.1. Сформировать схему для определения переходных характеристик *RLC* - цепи в режиме численного анализа согласно [рис.7.16.](#Р716)

**V2**

**1 V/V**

U

**RV2**

**1k**Ω

**V1**

**1 V**

**L1**

**100mH**

**R1**

**100**Ω

**C1**

**50µF**

**V3**

**1 V/V**

U

**RV3**

**1k**Ω

**V4**

**1 V/V**

U

**RV4**

**1k**Ω

**Рис.7.16.** Схема последовательной *RLC* - цепи для определения переходных характеристик в режиме численного анализа

7.2.Г.2. Модели линейных элементов емкости *C*1, индуктивности *L*1, резистора *R*1, нагрузочных резисторов *RV*2, *RV*3, *RV*4, источника постоянного напряжения *V*1 и заземлений вызываются аналогично п.п.[1.2.В.2](#В2), [1.2.Б.4](#Б4), [1.2.Б.2](#Б2) и [1.2.Б.3](#Б3) соответственно.

7.2.Г.3. Модели источников напряжения, управляемых напряжением

*V*2, *V*3 , *V*4 вызываются аналогично п.п.[6.2.Г.4](#Зад62Г4) и [6.2.Г.5](#Зад62Г5).

Управляемые источники напряжения *V*2, *V*3 , *V*4 используются в данной работе в качестве датчиков напряжений (см.п.[6.2.Г.3](#Зад62Г3)).

7.2.Г.4. Соединить все элементы между собой согласно схеме [рис.7.16](#Р716) (см.п.[1.2.Б.13](#Б13)).

7.2.Г.5. По заданию преподавателя задать параметры пассивных элементов: *R1-* в диапазоне 100…200 Ом; *L1-* в диапазоне 50 …200 мГн, *C*1*-* в диапазоне 1…50 мкФ (см. п.п.[1.2.Б.15](#Б15), [1.2.В.6](#В6), [1.2.В.7](#В7)).

7.2.Г.6. Задать значения сопротивлений нагрузки управляемых источников *RV*2= *RV*3= *RV*4 = 1кОм (по умолчанию 1 *kOhm*), см. п.[1.2.Б.15](#Б15).

7.2.Г.7. Задать параметры управляемых источников *V*2, *V*3, *V*4 идентичными параметрам в п.[6.2.Г.10](#Зад62Г10). Операции задания параметров аналогичны операциям п.[6.2.Г.10](#Зад62Г10).

Задать параметры источника постоянного напряжения *V*1 в соответствии с определением переходных характеристик: установить напряжение сигнала 1 В (см. п.[1.2.Б.14](#Б14)).

7.2.Г.8. Используя заданные значения параметров *R*1, *L*1, *C*1 определить корни λ1, λ2 характеристического уравнения цепи (см. выражение ([7.43](#Ф743))).

- Рассчитать значения  и  и сравнить их между собой.

- По результатам этого сопоставления определить вид корней и характер ожидаемого переходного процесса.

- Занести значения параметров *R*1, *L*1, *C*1 δ и ω0 в соответствующие графы [табл.7.9](#Т79).

- Определить корни λ1 и λ2 по выражению ([7.45](#Ф745)) и занести их значения в соответствующие графы [табл.7.9.](#Т79)

Таблица 7.9

**Параметры *RLC* - цепи в переходном режиме**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Характер переходного процесса | | | | | | | | | |
| Апериодический: δ > ω0 | | | | | Колебательный: δ < ω0 | | | | |
| *R*1,Ом | *L*1,Гн | *C*1, Ф | δ | ω0,рад/с | *R*1,Ом | *L*1,Гн | *C*1,Ф | δ | ω0, рад/с |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| λ1 |  | | | | λ1 |  | | | |
| λ2 |  | | | | λ2 |  | | | |

7.2.Г.9. Идентифицировать узлы (узловые напряжения) схемы аналогично п.[6.2.Б.15](#Зад62Б15).

7.2.Г.10. Выбрать в качестве реакций для определения переходных характеристик напряжения: на индуктивности- , на емкости- , на резисторе- . Переходная характеристика  будет совпадать по форме с характеристикой .

7.2.Г.11. При численном анализе использовать для выбранных реакций , ,  напряжения их датчиков *V*2, *V*3, *V*4.

7.2.Г.12. Задать вид численного анализа и его параметры аналогично п.[7.2.Б.13](#Зад72Б13).

- На закладке *Analysis Parameters* в разделе  *Parameters* установить в строке *End time* (*TSTOP*) значение верхнего предела интегрирования  в секундах для случая δ < ω0 или  в секундах для случая δ > ω0, где |λ|min - наименьший из модулей |λ1| и |λ2|.

- Остальные операции и значения параметров на закладке *Analysis Parameters* совпадают с операциями и параметрами п.[7.2.Б.13](#Зад72Б13).

- На закладке *Output variables* перевести из окна раздела *Variables in citcuit* в окно раздела *Selected* *variables for analysis*  номера узлов (узловых напряжений), соответствующих напряжениям управляемых источников (датчиков напряжений) *V*2, *V*3, *V*4 согласно п.[7.2.Г.11](#Зад72Г11).

7.2.Г.13. Запустить процесс анализа кнопкой .

7.2.Г.14. Обработку результатов численного анализа провести аналогично п.[7.2.Б.15](#Зад72Б15).

- Данные измерений занести в [табл.7.10](#Т710).

7.2.Г.15. Повторить операции п.[7.2.Б.16](#Зад72Б16) для результатов численного анализа [табл.7.10](#Т710) и указать характер процесса.

Таблица 7.10

**Переходные характеристики *RLC* - цепи второго порядка** , ,

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Характер процесса: … | | | | | | , c |
| , c |  |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |

7.2.Г.16. Повторить п.п. [7.2.Б.16](#Зад72Б17), [7.2.Б.17](#Зад72Б17), [7.2.Б.18](#Зад72Б18) и [7.2.Б.19](#Зад72Б19) для результатов проведенного анализа.

- Значение  определить по моменту окончательного входа характеристики  в трубку заданной погрешности. Результат измерения занести в [табл.7.10](#Т710).

7.2.Г.17. Изменить значение параметра одного из элементов, принятое в п.[7.2.Г.5](#Зад72Г5), например емкости *C*1, таким образом, чтобы получить другой вид корней характеристического уравнения. Если при ранее заданных параметрах выполнялось условие δ > ω0, то необходимо добиться выполнения условия

δ < ω0 и наоборот.

- Рассчитать значения δ и ω0 и занести новый вариант значений всех параметров цепи в соответствующие графы [табл.7.9](#Т79).

- Определить новые значения корней λ1 и λ2 по выражению ([7.45](#Ф745)) и занести их в [табл.7.9](#Т79).

7.2.Г.18. Задать вид численного анализа аналогично п.[7.2.Б.13](#Зад72Б13).

- Открыть окно задания параметров анализа *Transient Analysis* на закладке *Analysis Parameters*.

- В разделе *Parameters* в строке *End time* (*TSTOP*) установить значение верхнего предела интегрирования  в секундах в соответствии с соотношением между значениями δ и ω0 (см. п.[7.2.Г.12](#Зад72Г12)).

- Остальные параметры анализа на закладках *Analysis Parameters* и *Output variables* оставить теми же, что и в п.[7.2.Г.12](#Зад72Г12).

7.2.Г.19. Запустить процесс анализа кнопкой .

7.2.Г.20. Обработку результатов провести аналогично п.[7.2.Б.15](#Зад72Б15).

- Данные измерений занести в [табл.7.11](#Т711).

- Повторить операции п.п.[7.2.Г.15](#Зад72Г15), [7.2.Г.16](#Зад72Г16) для результатов численного анализа [табл.7.11](#Т711).

Таблица 7.11

**Переходные характеристики *RLC* - цепи второго порядка** , ,

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Характер процесса: … | | | | | | , c |
| c |  |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |
| , B |  |  |  |  |  |

7.2.Г.21. Проанализировать результаты [табл.7.10](#Т710) и [табл.7.11](#Т711). Сделать выводы о влиянии параметров элементов цепи на характер переходных процессов и на скорость протекания процесса. Сделать выводы о связи вида корней характеристического уравнения цепи и характера переходного процесса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие цепи принято относить к линейным динамическим цепям?
2. Какие режимы в цепях называются установившимися?
3. Что такое переходный процесс (режим)?
4. Что является причиной возникновения переходного процесса?
5. В чем заключается понятие коммутаций?
6. В чем отличие реальной коммутации и идеальной?
7. В чем состоит задача анализа переходных процессов в цепи?
8. Какие основные особенности переходных процессов в реальных цепях

(устройствах) известны Вам?

1. Какие основные упрощающие допущения принимаются при анализе

переходных процессов в линейных цепях?

1. В чем состоит общий порядок анализа переходных процессов?
2. Что представляет в общем случае полная математическая модель цепи

для анализа переходных процессов?

1. Какие методы решения уравнений цепи при анализе переходных

процессов Вам известны и в чем их основной смысл?

1. Какие переменные являются переменными состояния при анализе

переходных процессов в технических устройствах?

1. Какие переменные электрической цепи выбираются в качестве

переменных состояния?

1. Что такое независимые начальные условия и на основе чего они

определяются в технических задачах?

1. В чем заключаются законы коммутации и их следствия?
2. Что такое зависимые начальные условия и на основе чего они

определяются?

1. Что такое порядок динамической цепи и чем он определяется?
2. Какой характер имеют временные зависимости реакций в переходных

режимах в цепях первого и второго порядков?

20. Что такое постоянная времени цепи, от чего она зависит и как влияет на скорость протекания переходного процесса?

21. Как определить значение постоянной времени цепи по временной зависимости реакции?

22. Какие способы построения характеристического уравнения цепи Вам известны?

23. Какова взаимосвязь между видом корней характеристического уравнения цепи и характером переходного процесса?

24. Что такое переходные и импульсные переходные характеристики и в чем их практический смысл?

25. Какие варианты экспериментального определения переходных и импульсных переходных характеристик Вам известны?

26. Какие варианты аналитического определения переходных и импульсных переходных характеристик Вам известны и в чем их основной смысл?

27. Каким образом можно определить приближенное значение верхнего предела интегрирования при аналитическом построении переходных характеристик?

28. Что такое расчетное время переходного процесса и как оно определяется?

29. Какие технические параметры и и каким образом можно получить из переходных и импульсных характеристик?