



П. А. Землянухин

Преобразование сигналов нелинейными цепями систем передачи информации

учебное пособие



УДК 621.391(075.8)

ББК 32.811я73

3-535

Печатается по решению кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (протокол № 14 от 26 февраля 2020 г.)

Рецензенты:

ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий и процессов управления Южного научного центра РАН,
доктор технических наук *С. Г. Канустян*

доцент, доцент кафедры вычислительной техники института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, кандидат технических наук
А. О. Пьявченко

Землянухин, П. А.

3-535 Преобразование сигналов нелинейными цепями систем передачи информации : учебное пособие / П. А. Землянухин ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – 142 с.

ISBN 978-5-9275-3570-5

В учебном пособии рассмотрены вопросы, связанные с формированием и преобразованием сигналов в нелинейных цепях систем передачи информации, приведены материалы для выполнения студентами индивидуальных заданий.

УДК 621.391(075.8)

ББК 32.811я73

ISBN 978-5-9275-3570-5

© Южный федеральный университет, 2020

© Землянухин П. А., 2020

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2020

1. ПОНЯТИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

1.1. Свойства, параметры и характеристики нелинейных резистивных элементов

Электрические цепи делят на линейные, нелинейные и параметрические цепи [1]. Цепи, у которых оператор преобразования отвечает условиям:

$$L[u_{\text{вх1}}(t) + u_{\text{вх2}}(t)] = L[u_{\text{вх1}}(t)] + L[u_{\text{вх2}}(t)], \quad (1)$$

$$L[ku_{\text{вх}}(t)] = kLu_{\text{вх}}(t), \quad (2)$$

называют *линейными* цепями. Здесь k – произвольное число; $u_{\text{вх}}(t)$, $u_{\text{вх1}}(t)$ и $u_{\text{вх2}}(t)$ – входные воздействия.

Здесь равенство (1) отражает свойство *аддитивности*, которое заключается в том, что реакция электрической цепи на некоторую сумму входных сигналов равна сумме реакций на каждый входной сигнал. Выражение (2) отражает свойство *однородности*.

При невыполнении условий (1) и (2) говорят, что электрическая цепь является *нелинейной*.

Под *параметрической* электрической цепью понимают цепь, где параметры цепи могут изменяться во времени. Параметрические электрические цепи разделяют также на линейные и нелинейные.

Соответственно все элементы, входящие в линейную электрическую цепь, являются линейными. В нелинейных электрических цепях хотя бы один элемент имеет нелинейную характеристику, отражающую зависимость параметра элемента (сопротивление, емкость, индуктивность) от тока и (или) напряжения, приложенных к нелинейному элементу.

В предлагаемом учебном пособии остановимся на рассмотрении особенностей работы нелинейных электрических цепей. Рассмотрим методы анализа, преобразования и формирования сигналов в этих цепях.

В нелинейных цепях могут протекать процессы, которые сильно отличаются от процессов, происходящих в линейных электрических цепях. К процессам, происходящим в нелинейных цепях, относят:

– при подаче на вход нелинейной цепи гармонического сигнала, изменяющегося с фиксированной частотой, отклик на выходе этой цепи может содержать гармоники с частотами, которые отсутствуют во входном воздействии;

– при соответствующем выборе режима работы нелинейного резистивного элемента в цепи, где используется этот элемент, могут возникать незатухающие колебания; эти колебания называют **автоколебаниями**;

– интенсивность отклика нелинейного резистивного элемента (нелинейной электрической цепи), достаточно часто, нелинейно зависит от интенсивности сигнала, воздействующего на нелинейный резистивный элемент (нелинейную электрическую цепь);

– при определенном режиме и некотором сигнале, воздействующем на нелинейную цепь, нелинейная цепь может содержать несколько установившихся режимов; подобные установившиеся режимы называют состояниями равновесия нелинейной цепи.

Использование нелинейных резистивных элементов в различных радиотехнических устройствах позволяет решить множество задач, связанных с формированием и преобразованием сигналов в этих устройствах, что не представляется возможным сделать при использовании только линейных элементов и цепей. Можно назвать ряд преобразований сигналов, которые можно исполнить только за счет использования нелинейных резистивных элементов. К этим преобразованиям сигналов можно отнести: генерирование колебаний, модуляцию и детектирование сигналов, выпрямление и ограничение амплитуды сигналов, умножение и преобразование частоты сигналов и др.

Следует отметить, что характеристики реальных радиокомпонентов в той или иной мере нелинейны. Где-то степень нелинейности характеристик невелика. Это позволяет строить упрощенные модели нелинейных цепей. Имеются случаи, когда нелинейностью характеристик резистивных элементов пренебречь нельзя. Тогда при построении моделей элементов используют упрощенные идеализированные элементы, что позволяет показать нелинейные зависимости между токами и напряжениями на внешних зажимах элемента.

При практическом применении нелинейных резистивных элементов существуют случаи, когда наличие нелинейных зависимостей характери-

стик радиоэлементов не влияет на требуемое функционирование электронного устройства. В этом случае нелинейность характеристики нелинейного элемента можно не рассматривать и не учитывать при построении модели электронного устройства. К подобным случаям можно отнести следующее:

– в рабочем диапазоне изменений токов и напряжений относительно внешних зажимов нелинейного элемента характеристика этого элемента практически линейна;

– выполнение нелинейным элементом функций, которые на него возложены, не ориентируется на использование нелинейности характеристики соответствующего элемента.

В электротехнике и теории электрических цепей под идеализированными пассивными элементами электрической цепи понимают: сопротивление, индуктивность и емкость. При этом свойства этих элементов в первую очередь описываются статическими характеристиками этих элементов

$$y = f(x). \quad (3)$$

Здесь (3) y можно рассматривать, как отклик радиоэлемента на воздействие x на него.

Следует отметить, что статическая характеристика сопротивления представляет собой функциональную зависимость между током i , протекающим через этот элемент, и напряжением u , падающим на этом элементе. Подобная функциональная зависимость называется вольтамперной характеристикой (ВАХ) сопротивления.

Относительно индуктивности следует отметить, что статической характеристикой для нее является функциональная зависимость между током i , протекающим через индуктивность, и полным магнитным потоком Φ , формируемым индуктивностью. Подобную функциональную зависимость, называют вебер-амперной характеристикой.

Статическая характеристика емкости отражает функциональную зависимость между зарядом q , накопленным в емкости и напряжением u , падающим на емкости. Эту функциональную зависимость называют **кулон-вольтной характеристикой**.

С учетом выражения (3) статические характеристики радиоэлементов электрической цепи представляются функциональной зависимостью вида

$$p_{ст} = \frac{y}{x}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) $p_{ст}$ называют **статическим параметром** радиоэлемента в данной точке нелинейной характеристики.

Дифференциальный параметр радиоэлемента представляется в виде:

$$p_d = \frac{dy}{dx} = f'(x) = S. \quad (5)$$

Дифференциальный параметр радиоэлемента еще называют **крутизной** (S) нелинейной характеристики радиоэлемента, поскольку рд можно рассматривать, как крутизну статической характеристики в точке характеризуемой $p_{ст}$. Таким образом (5) представляет собой **дифференциальную характеристику** (характеристику крутизны) радиоэлемента.

Учитывая то обстоятельство, что согласно (4) $y = p_{ст}x$, можно описать функциональную связь статического и дифференциального параметров радиоэлемента

$$p_d = x \frac{dp_{ст}}{dx} + p_{ст}. \quad (6)$$

Следует отметить, что характеристики нелинейного радиоэлемента могут иметь различный вид. Это зависит от физической природы радиоэлемента, технологии изготовления и устройства радиоэлемента. Кроме того, для элемента с нелинейной характеристикой показательно то, что значения его параметров (статических и дифференциальных) зависят от того режима работы радиоэлемента, который будет выбран в ходе проектирования устройства. Таким образом можно отметить, что параметры радиоэлемента напрямую зависят от величины воздействия x , оказываемого на радиоэлемент.

На рис. 1.1, а приведена функциональная зависимость линейного элемента, а на рис. 1.1, в – нелинейного элемента. Можно видеть, что кривая, характеризующая функциональную зависимость нелинейного элемента, имеет сложный вид. При том, что для линейного элемента функциональная зависимость имеет вид прямой линии, расположенной под углом α . В качестве примера на рис. 1.1, б приведена статическая и динамическая характеристики линейного радиоэлемента. На рис. 1.1 можно видеть, что в данном случае $p_{ст}$ и p_d равны между собой.

Рассматривая произвольную точку t характеристики нелинейного радиоэлемента, можно отметить, что статический параметр определяется углом α наклона секущей, которая проведена из начала координат в точку t . В этом случае статическая характеристика элемента равна

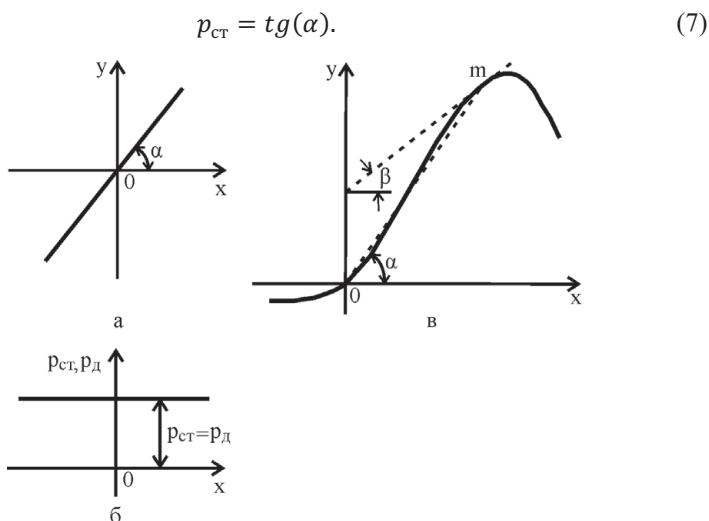


Рис. 1.1. Характеристики и зависимости линейного и нелинейного радиоэлементов

Дифференциальный параметр (крутизна) радиоэлемента, рассматриваемый в той же точке t , что и статический параметр, будет пропорционален тангенсу угла β между касательной к кривой характеристики в точке t и осью абсцисс:

$$p_d = tg(\beta). \quad (8)$$

Применяя выражения (4–8), можно отметить, что при перемещении точки t вдоль кривой характеристики нелинейного элемента будут получены характеристики статического и динамического параметра нелинейного элемента. Вид этих зависимостей может быть достаточно сложным.

Функциональная зависимость $y = f(x)$ для нелинейного радиоэлемента достаточно часто задается в виде графика, который строится с использованием экспериментально полученных данных. Эта функциональная зависимость может быть задана в виде таблицы. Однако для расчета цепи, содержащей данный радиоэлемент, надо располагать некоторым аналитическим выражением, которое с достаточной степенью точности будет отражать функциональную зависимость $y = f(x)$ нелинейной характери-

стики радиоэлемента. Выбор вида функции $f(x)$, которая называется **аппроксимацией** характеристики нелинейного элемента, необходимо производить исходя из следующего:

- выбранное уравнение должно достаточно точно отражать данные, которые получены в ходе эксперимента;
- расчеты, которые будут строиться с применением выбранной аппроксимации, не должны быть слишком объемными и не требовать затрат длительного времени.

Имеются различные радиоэлементы с нелинейными характеристиками. Это могут быть конденсаторы с нелинейной емкостью, катушки индуктивности с нелинейной индуктивностью и резистивные элементы с нелинейным сопротивлением. Наиболее широкое применение находят резистивные элементы, сопротивление которых имеет явно выраженную нелинейную характеристику (нелинейные резисторы, биполярные и полевые транзисторы, полупроводниковые диоды и т. д.). Учитывая это, и будем рассматривать особенности и методы анализа электрических цепей, в которых присутствуют нелинейные резистивные элементы.

1.2. Нелинейные резистивные элементы

Применительно к нелинейным резистивным элементам оговорим следующее:

- элементы являются безынерционными, что говорит об отсутствии в них реактивных элементов (емкости, индуктивности), способных накапливать энергию электрического и магнитного полей, либо частоты, на которых работают эти элементы существенно ниже граничных, что позволяет не учитывать инерционные свойства элементов;

- нелинейные резистивные элементы в рамках данного учебного пособия будут представляться с помощью упрощенных моделей, которые описывают функциональную связь между мгновенными значениями токов и напряжений на внешних зажимах этих нелинейных резистивных элементов.

Исходя из числа внешних выводов нелинейные резистивные элементы делят:

- на двухполюсные элементы;
- многополюсные элементы.

К двухполюсным нелинейным резистивным элементам относят полупроводниковые диоды, электровакуумные диоды, нелинейные резисторы. К многополюсным нелинейным резистивным элементам относят биполярные и полевые транзисторы, электровакуумные триоды, тетроды, пентоды и др.

В большинстве своем нелинейные резистивные элементы – пассивные элементы. В этих элементах нет каких-либо источников энергии. Об этом говорит и то, что их ВАХ в системе координат (оси напряжения u и тока i) располагаются в первом и третьем квадрантах. Кроме того, ВАХ элемента проходит через начало координат.

Нелинейные двухполюсные резистивные элементы относительно их ВАХ могут быть симметричными и несимметричными. Для симметричных нелинейных резистивных элементов смена местами выводов не вызывает нарушения их работы.

Нелинейные резистивные элементы могут иметь монотонную и немонотонную ВАХ. В случае монотонной ВАХ увеличение величины напряжения на внешних зажимах элемента приводит к росту тока, протекающего через элемент. ВАХ нелинейного резистивного элемента будет немонотонна, если рост значения напряжения на внешних зажимах элемента будет приводить к снижению тока, протекающего через зажимы элемента, даже в ограниченном диапазоне изменений напряжения и тока. Это говорит о том, что ток и напряжение на внешних зажимах нелинейного резистивного элемента с немонотонной ВАХ не имеют между собой взаимно однозначной связи.

Различают нелинейные резистивные элементы с немонотонной ВАХ двух типов. Это элементы, имеющие ВАХ: N -типа и S -типа. Для нелинейных резистивных элементов с ВАХ N -типа в определенном диапазоне изменения токов характерно наличие значения тока (токов), которому будут соответствовать несколько различных по значению напряжений. Применительно к нелинейным резистивным элементам, имеющих ВАХ S -типа, в некотором диапазоне изменения значений напряжения (напряжений) некоторому значению напряжения будут соответствовать несколько различных значений тока.

Нелинейные резистивные элементы с немонотонными ВАХ могут содержать как восходящие, так и нисходящие участки. На восходящих участках производная du/di (di/du) будет положительной. На нисходящих

участках ВАХ эта производная будет иметь отрицательные значения. Наличие нисходящих участков на ВАХ нелинейного резистивного элемента говорит о том, что на этих участках дифференциальное сопротивление этого элемента принимает отрицательное значение. Подобные нелинейные двухполюсные элементы называют **элементами с отрицательным сопротивлением**.

У нелинейных резистивных элементов, имеющих монотонные ВАХ, дифференциальное сопротивление принимает положительные значения.

Применительно к двухполюсным нелинейным резистивным элементам можно отметить, что их ВАХ имеет следующие функциональные зависимости: $u = f(i)$ или $i = f(u)$. В то же время широко распространены нелинейные резистивные элементы, применительно к которым функциональная связь между напряжением и током, рассматриваемых относительно внешних зажимов, может зависеть от других физических величин. Эти физические величины не имеют прямой связи с токами или напряжениями в электрической цепи, где используется некоторый нелинейный резистивный элемент, К числу физических величин, которые могут влиять на ход ВАХ нелинейного резистивного элемента можно отнести следующее: изменение температуры, давления, освещенности, различных излучений и т. д. Эти нелинейные резистивные элементы называют элементами с **неэлектрически управляемыми двухполюсниками**. Эти элементы характеризуются семейством ВАХ. Семейство ВАХ включает несколько кривых, каждая из которых соответствует своей величине физического параметра, воздействующего на нелинейный резистивный элемент [2].

На практике широко используются управляемые нелинейные резистивные элементы (**электрически управляемые элементы**). К подобным элементам относят: биполярные и полевые транзисторы, электровакуумные приборы и т. д. Управляемые нелинейные резистивные элементы содержат как минимум три электрода. Два электрода относят к основным. Например, у биполярных транзисторов к основным электродам относят коллектор и эмиттер, у полевых транзисторов – сток и исток. Величина тока, протекающего между основными электродами, определяется величиной тока (напряжения), который прикладывается к управляющему электроду. Например, у биполярного транзистора в роли управляющего электрода выступает база, у полевого транзистора – затвор или подложка.

На рис. 1.2 в качестве примера рассматривается трехэлектродный нелинейный резистивный элемент. В этом элементе 1-й и 2-й электроды являются основными, а 3-й электрод – управляющий. Между 1-м и 2-м электродами протекает ток i . Величина этого тока зависит от уровня управляющего тока $i_{упр}$ или управляющего напряжения $u_{упр}$, прикладываемых к 3-му электроду. В этом случае функциональную связь, которая существует между током (напряжением) основных электродов и током (напряжением), прикладываемым к управляющему электроду можно описать следующими выражениями:

$$i = f(u, i_{упр}) \quad \text{и} \quad i = f(u, u_{упр}).$$

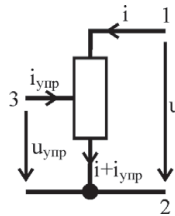


Рис. 1.2. Эквивалентная схема трехэлектродного нелинейного резистивного элемента

На рис. 1.2 можно заметить, что электрическая цепь с трехэлектродным нелинейным резистивным элементом имеет входную (управляющую) и выходную (управляемую) стороны. Кроме того, один из выводов трехполюсного нелинейного резистивного элемента является общим электродом для каждой из сторон.

Нелинейные резистивные элементы, которые могут управляться электрическими сигналами, характеризуются различными семействами ВАХ. На рис. 1.3 в качестве примера приведены входные (рис. 1.3, а) и выходные (рис. 1.3, б) ВАХ биполярного транзистора. На рис. 1.4, а приведены выходные ВАХ, а на рис. 1.4, б – проходная характеристика полевого транзистора. Можно видеть, что входные характеристики представляют зависимость между входным управляющим напряжением – напряжением, прикладываемое между базой и эмиттером транзистора $u_{бэ}$, и входным управляющим током – ток базы $i_б$ транзистора при различных напряжениях $u_{кэ}$, прикладываемых между коллектором и эмиттером транзистора. Выходные характеристики представляют собой функциональную связь между током коллектора $i_к$ (ток стока i_c) транзистора и напряжением, которое прикладывается между коллектором и эмиттером $u_{кэ}$ транзистора при различных

значениях тока базы i_b транзистора. Проходная ВАХ полевого транзистора отражает функциональную связь тока стока i_c транзистора от напряжения, прикладываемого между затвором и истоком $u_{зи}$ транзистора. Для биполярного транзистора проходная ВАХ отражает функциональную связь между током коллектора i_k транзистора и напряжением, которое прикладывается между базой и эмиттером $u_{бэ}$ транзистора (рис. 1.4, б).

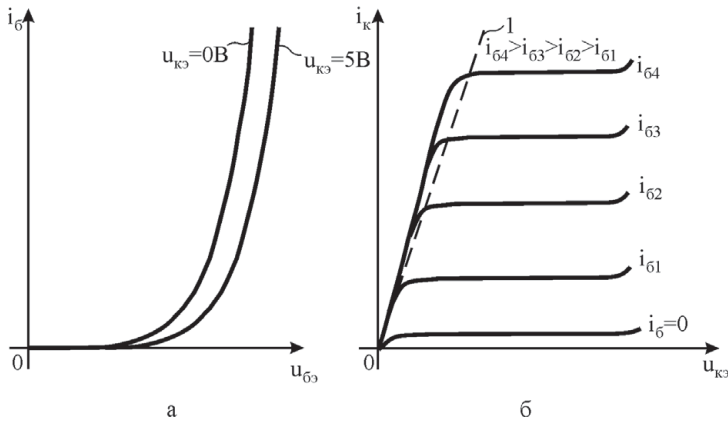


Рис. 1.3. Входные (а) и выходные (б) ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

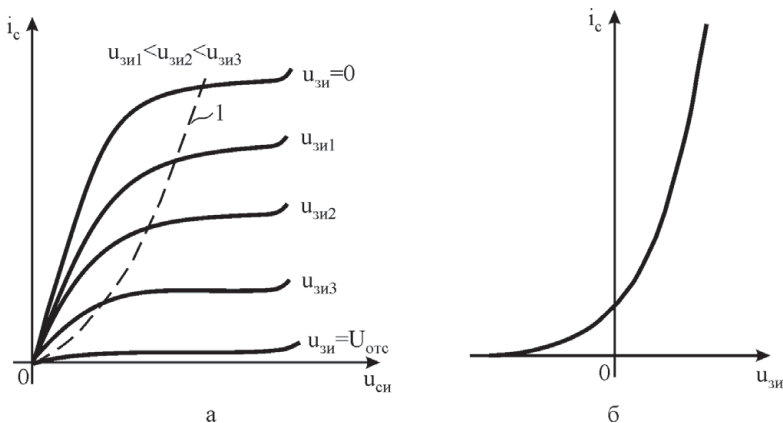


Рис. 1.4. Выходные (а) и проходные (б) ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п-переходом при включении транзистора по схеме с общим истоком

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПОНЯТИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ.....	5
1.1. Свойства, параметры и характеристики нелинейных резистивных элементов.....	5
1.2. Нелинейные резистивные элементы.....	10
2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ И СПЕКТРОВ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.....	16
2.1. Понятие линейной, нелинейной и параметрической систем	16
2.2. Безынерционное преобразование периодических сигналов и спектров.....	17
2.3. Выбор ВАХ нелинейного резистивного элемента применительно к оператору нелинейного преобразования.....	19
2.4. Методы аппроксимации ВАХ нелинейных резистивных элементов.....	21
2.5. Расчет значений коэффициентов применительно к выбранной аппроксимирующей функции.....	22
3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ И СПЕКТРОВ НЕЛИНЕЙНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ...	26
3.1. Метод степенного полинома.....	26
3.2. Метод кусочно-линейной аппроксимации.....	37
3.3. Метод аппроксимации ВАХ нелинейного резистивного элемента экспоненциальной функцией.....	31
3.4. Порядок нахождения отклика нелинейного резистивного элемента относительно сложных входных сигналов.....	32
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РЕЗИСТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	36
4.1. Работа нелинейных резистивных элементов в режиме малого сигнала.....	36
4.2. Работа нелинейных резистивных элементов в режиме большого сигнала.....	38

4.3. Безынерционные нелинейные элементы при воздействии на них узкополосных радиосигналов.....	41
4.4. Резонансное усиление сигналов с использованием нелинейных резистивных элементов.....	46
4.5. Умножение частоты сигналов.....	54
4.6. Амплитудно-модулированные радиосигналы.....	59
4.6.1. Спектр амплитудно-модулированных колебаний.....	64
4.6.2. Модуляторы амплитудно-модулированных колебаний.....	65
4.7. Некогерентное детектирование радиосигналов.....	72
4.7.1. Детектирование амплитудно-модулированных колебаний.....	72
4.7.2. Детектирование частотно- и фазомодулированных сигналов.....	86
4.8. Преобразование частоты сигналов.....	94
5. МАТЕРИАЛЫ К ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ЗАДАНИЯМ.....	99
6. ПОЛОЖЕНИЯ К ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ (РАСЧЕТНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ) ЗАДАНИЙ.....	107
7. ОБЩИЕ РАСЧЕТЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	110
8. ПЕРВОЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: НАХОЖДЕНИЕ ОТКЛИКА НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ЕГО ВАХ ПОЛИНОМОМ.....	120
9. ВТОРОЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: НАХОЖДЕНИЕ ОТКЛИКА НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЕГО ВАХ...	123
10. ТРЕТЬЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: НАХОЖДЕНИЕ ОТКЛИКА НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ЕГО ВАХ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИЕЙ.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138