

УДК: 654.19

На правах рукописи

**ЕРЖАН АСЕЛ АНУАРКЫЗЫ**

**Разработка метода компьютерного анализа нелинейных  
радиотехнических цепей на основе активных РС**

6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты  
д.ф.-м.н., профессор  
Куралбаев З.К.,

PhD., Никулин В.В.

Республика Казахстан  
Алматы, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Основные задачи анализа радиоэлектронных схем.....	14
1.2 RC-цепи, причины выбора и преимущества.....	16
1.3 Сигналы – источники возмущения радиотехнической цепи.....	18
1.4 Методы, используемые для анализа электрических цепей.....	20
1.5 Общая постановка задачи анализа RC-цепи.....	21
Выводы по первому разделу.....	23
<b>2 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....</b>	<b>25</b>
2.1 Математические модели для линейных схем.....	25
2.2 Аналитическое решение математической задачи для линейной электрической цепи.....	30
2.3 Решение линейной задачи в рядах Фурье.....	31
2.4 Частные случаи задачи анализа линейной схемы.....	34
2.5 Алгоритм численного решения задачи о переходном процессе в RC-цепи.....	39
Выводы по второму разделу.....	41
<b>3 АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....</b>	<b>42</b>
3.1 Функции, используемые для аппроксимации экспериментальных данных в электронных схемах.....	42
3.2 Метод определения функции аппроксимации по результатам эксперимента.....	47
3.2.1 Использование полинома $m$ -ой степени.....	49
3.2.2 Использование трансцендентных функций.....	52
3.3 Аппроксимация характеристик полевого транзистора.....	56
3.4 Аппроксимация характеристик биполярного транзистора.....	58
3.5 Аппроксимация характеристик нелинейных резистивных элементов	59
3.6 Определение вольтамперных характеристик варистора.....	62
Выводы по третьему разделу.....	67
<b>4 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ.....</b>	<b>68</b>
4.1 Постановка задачи анализа нелинейной электронной схемы.....	69
4.2 Математическая модель нелинейной электронной схемы.....	69
4.3 Метод решения математической задачи.....	73
4.4 Алгоритм решения задачи.....	74
4.5 Частный случай, когда в качестве нелинейного элемента выбран биполярный транзистор.....	76

4.6 Частный случай, когда в качестве аппроксимирующей функции принята функция $y = a \cdot (1 - \exp(x/a))$ .....	77
4.7 Частный случай, когда в качестве аппроксимирующей функции принята $y = a \cdot sh(x/a)$ .....	79
Выводы по четвертому разделу .....	80
<b>5 РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ.....</b>	<b>81</b>
5.1 О чувствительности электронных устройств.....	81
5.2 Постановка задачи об определении чувствительности электронной схемы.....	83
5.3 Постановка и решение линейной задачи.....	83
5.4 Постановка и решение нелинейной задачи.....	86
5.5 Метод и алгоритм численного решения математической задачи.....	88
5.6 Частные случаи анализа чувствительности.....	90
Выводы по пятому разделу .....	94
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>96</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>98</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>103</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РТС – радиотехнические системы  
СПИ – система передачи информации  
ЭВМ – электронно-вычислительная машина  
ЭЦВМ – электронно-цифровые вычислительные машины  
ИС – интегральные схемы  
БИС – большие интегральные схемы  
САПР – система автоматизированного проектирования  
МНК – метод наименьших квадратов  
СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений  
ВАХ – вольтамперная характеристика  
НЭ – нелинейный элемент  
КТ3102Г 9111 – модель биполярного транзистора  
КП305И 0985 – модель полевого транзистора  
ВАР18 – варистор TVR05180/CNR05D180  
ВАР22 – варистор TVR05220/CNR05D220  
R – сопротивление  
C – емкость  
L - индуктивность  
RC - постоянная времени  
T – период  
A - амплитуда  
 $\omega$  - угловая частота  
 $f$  - циклическая частота  
 $i$  - ток  
 $u$  - напряжение  
 $t$  - время

## ВВЕДЕНИЕ

**Общая характеристика работы.** В настоящее время, производство новых видов радиотехнических систем (РТС), систем передачи информации, электронно-вычислительных средств и другой техники, связанной с электроникой, стало одним из приоритетных направлений научных исследований [1-3]. В современных системах передачи информации используются электрические сигналы, физическая величина которых является ток или напряжение. Средства передачи информации [4-9] включают в себя достаточно сложные электрические цепи. Сложность и ответственность разрабатываемых электронных схем потребовали отказаться от старых традиционных методов, когда разработчик использовал свой личный опыт и умение владеть законами физики, электротехники и электроники [10-19]. Расчеты, встречающиеся при проектировании электронных схем, оказались достаточно сложными и появилась необходимость использования современных вычислительных средств [21-31].

Эта работа стала еще более сложной после появления интегральных схем и современных электронных устройств, применяемых в электротехнике, радиоэлектронике, автоматике, вычислительной технике и т.п. Любое такое электронное устройство могло содержать многочисленные элементы, характеристики которых разнообразны. Методы, основанные на макетировании схем, оказались не эффективными, так как стало невозможным исследовать интегральные микросхемы, которые традиционно собираются из дискретных элементов [21, с.15; 22, с. 22-30; 23, с. 166]. При этом требования к качеству создаваемых электронных устройств неуклонно повышаются. Это означало, что разработка каждого устройства потребовала обеспечения необходимой точности и она стала трудоемкой работой.

**Актуальность темы.** В связи с этим проектировщики электронных схем стали использовать электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Известно, что они имеют огромные возможности: память, способную хранить большой объем информации, и быстроедействие, большую скорость выполнения различных вычислительных операций над информацией, а также многочисленные другие возможности, облегчающие работу проектировщика [24, с. 6-17]. Поэтому компьютер и его периферийные устройства стали новыми и важными инструментами для проектирования электронных схем.

Применение вычислительной техники и информационных технологий в проектировании электронных схем позволило автоматизацию некоторых этапов работы проектировщика [32-34]. Автоматизация позволила поднимать на качественный уровень работу по проектированию и разработке электронных устройств. повысить производительность работы проектировщика и улучшить качество создаваемых проектов. Наряду с другими отраслями, в этой сфере деятельности человека возникло новое направление - системы автоматизированного проектирования (САПР) [22, с. 31].

Одной из важных проблем в проектировании электронных схем является изучение процессов, происходящих в электронных цепях. Исследования в данном направлении проводятся давно [1-20] и при этом интенсивность исследований не уменьшается.

Достаточно хорошо изучены эти процессы и методы их расчета в установившемся режиме. Однако в работающей радиотехнической системе практически не бывают установившихся режимов. Известно, что установившиеся режимы в цепи достигаются только через определенное время после включения или отключения каких-либо приборов, источника тока или напряжения. От начала процесса до установления некоторого установившегося режима проходит определенный промежуток времени, который называется переходным режимом [14, с. 157-184]. Очевидно, что методы расчетов и исследований, используемые в изучении установившихся процессов в цепях неприменимы для исследования переходных процессов. Переходные процессы во многих электронных схемах являются обычными явлениями. Например, передача или прием информации в электронных устройствах не могут рассматриваться установившимися процессами.

Исследование переходных процессов связано с решением достаточно сложных математических задач. При математическом моделировании переходных процессов, происходящих в электронных схемах, возникают системы дифференциальных уравнений, решение которых связано с определенными трудностями [14, с. 159-161].

Одной из серьезных проблем, встречающихся при изучении электронных схем и их расчетов, является проблема «нелинейности». Проблема «нелинейности» широко известна и она существует во многих отраслях науки, создавая порой такие трудности, которые невозможно преодолеть. Исследование электронных схем не является исключением, здесь также часто возникает такая проблема [35-44].

При исследовании любой электронной схемы, используемой на практике, приходится иметь дело с нелинейными элементами, для количественного описания их свойств необходимо задавать зависимости, называемые вольтамперными характеристиками [35, с. 96-99]. В таких случаях приходится искать различные способы для преодоления этой проблемы. Например, линеаризация нелинейных уравнений, различные методы аппроксимации вольтамперных характеристик (ВАХ), используемых в цепях нелинейных элементов. В настоящее время нелинейные цепи и устройства широко используются на практике. Однако, в отличие от теории линейных цепей, в теории нелинейных цепей имеются определенные трудности. «В настоящее время очень многие вопросы анализа нелинейных цепей остаются нерешенными, и вряд ли вообще возможно разработать единый метод их анализа» [38, с.9].

В связи с вышесказанными, проблема разработки методов компьютерного анализа электронных схем, являющихся составными частями радиотехнических систем, и решения задач, возникающих при их проектировании является

актуальной. Актуальной является также проблема решения математических задач, возникающих при использовании методов математического моделирования переходных процессов, возникающих в цепях, в составе которых имеются нелинейные элементы.

**Целью настоящей работы** является разработка математических моделей переходных процессов в нелинейных радиотехнических цепях на основе активных РС и алгоритмов решения математических задач для разработки метода компьютерного анализа с использованием современной вычислительной техники.

**Задачи исследования.** Важность исследования переходных процессов, происходящих в электронных схемах, требует ставить следующие задачи, решение которых является целью настоящей диссертационной работы.

1. Исследование переходного процесса в электронной схеме, в которой происходит нарушение или изменение установившегося режима в некоторый начальный момент времени. Для этого использовать метод математического моделирования, сформулировать математическую постановку задачи на основе математической модели и использовать ее решение для анализа рассматриваемой схемы. Рассматривать различные частные случаи.

2. Исследовать аналитическое и численное решения математической задачи, возникающей в результате математического моделирования переходных процессов в линейной электрической цепи. Определить преимущества и недостатки аналитического и численного решений, а также возможности использования их для компьютерного анализа.

3. Провести анализ существующих закономерностей, определяющих вольтамперных характеристик (ВАХ) различных компонентов, используемых в электронных схемах, для выбора и определения функциональных (математических) зависимостей между напряжением и током в нелинейных элементах электрических цепей. Для решения данной задачи использовать экспериментальные данные и существующий математический аппарат для обработки этих данных.

4. Создать математическую модель переходного процесса в выбранной электронной схеме, имеющей в своем составе нелинейные элементы. Сформулировать постановку математической задачи, возникающей в результате математического моделирования данного процесса. Выбрать метод и алгоритм решения полученной математической задачи, удобные для применения компьютерного анализа. Показать адекватность созданной математической модели.

5. Исследовать чувствительность рассматриваемой электронной схемы на малые изменения параметров ее компоненты, используя для этого математическую модель и решение математических задач, описывающих переходный процесс в рассматриваемой цепи.

**Объектом исследования** являются активные РС – цепи, являющиеся составными частями радиотехнических систем.

**Предметом исследования** являются переходные процессы, возникающие в РС – цепях.

**Методы исследования.** Методы исследования, применяемые для компьютерного анализа переходных процессов в радиотехнических цепях, основаны на создании их математических моделей. Это позволяет получить математические уравнения, описывающие эти процессы, и сформулировать математические задачи. Численные методы решения этих задач позволяют использовать компьютерную технику и проводить вычислительные эксперименты или компьютерный анализ изучаемых радиотехнических цепей.

Задачи, связанные с линейными цепями, могут быть решены аналитическими методами. Однако появляется определенная трудность решения математических задач, возникающих в тех случаях, когда напряжение источника является ступенчатой функцией или другой сложной функцией [43, с. 199-226]. В связи с этим для решения задач анализа линейных электронных схем в данной работе используется метод разложения искомых функций в ряды Фурье. Решение, полученное в виде рядов Фурье, имеет определенную проблему во время практического использования при компьютерном анализе. Поэтому в работе предлагается численный метод решения математических задач.

Для решения задач, связанных с аппроксимацией экспериментальных данных по определению вольтамперных характеристик нелинейных элементов электронных схем, используется известный метод наименьших квадратов (МНК) [14, с. 245-250; 79; 80]. При использовании данного метода появились системы линейных алгебраических уравнений или трансцендентные уравнения для определения неизвестных параметров, входящих в аналитическое выражение аппроксимирующих функций. Для решения системы линейных алгебраических уравнений использовался метод Жорлана-Гаусса, который удобен для программирования и проведения компьютерного анализа. Трансцендентные уравнения, которые появились в результате использования трансцендентных функций для аппроксимации экспериментальных данных, были решены методом итераций, также удобным для составления компьютерных программ.

Для решения математических задач, связанных с системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, использованы численные методы (методы Эйлера и Рунге-Кутты). Во всех случаях разработаны алгоритмы решения задач и компьютерные программы на популярном алгоритмическом языке паскаль.

**Научная новизна** включает следующее:

1. Разработка математических моделей переходных процессов, происходящих в радиотехнических цепях на основе РС под воздействием внешних возмущающих факторов (сигналов). Постановка и решение математических задач для компьютерного анализа на основе разработанных моделей.



2. Анализ и исследование различных видов зависимостей токов и напряжений с целью определения вольтамперных характеристик нелинейных элементов, входящих в состав радиотехнических цепей; для чего проведена аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующих функций использованы: экспоненциальная функция, гиперболический синус, полином пятой степени.

3. Исследование чувствительности RC- цепей небольшим изменениям параметров ее элементов. Постановка и решение математических задач, возникающих в результате математического моделирования процессов в RC-цепи при изменении параметров ее элементов.

4. Разработка алгоритмов и компьютерных программ решения математических задач, предназначенных для разработки метода компьютерного анализа нелинейных радиотехнических цепей.

**Научно-практическая значимость исследования.** Полученные научные результаты исследования имеют теоретическое и практическое значение в решении задач, возникающих в исследовании и автоматизации проектирования радиотехнических и электронных схем.

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения работы:

1. Разработка математических моделей переходных процессов, происходящих в нелинейных радиотехнических цепей на основе RC под воздействием внешних возмущающих факторов (сигналов). Постановка и решение математических задач для компьютерного анализа переходных процессов в радиотехнических цепях на основе RC под воздействием возмущающих сигналов.

2. Анализ и исследование различных видов зависимостей токов и напряжений с целью определения вольтамперных характеристик нелинейных элементов, входящих в состав радиотехнических цепей; для чего проведена аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующих функций использованы: экспоненциальная функция, гиперболический синус, полином пятой степени.

3. Исследование чувствительности RC- цепей небольшим изменениям параметров ее элементов. Постановка и решение математических задач, возникающих в результате математического моделирования процессов в RC-цепи при изменении параметров ее элементов.

4. Разработка алгоритмов и компьютерных программ решения математических задач, предназначенных для компьютерного анализа нелинейных радиотехнических цепей.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные научные результаты исследования имеют теоретическое и практическое значение для решения задач, возникающих в исследовании и автоматизации проектирования радиотехнических и электронных схем. Ее значимость заключается в следующем:

1. Показана возможность аналитического решения математической задачи, возникающей в результате математического моделирования переходных процессов в линейных радиотехнических РС - цепях в виде рядов Фурье при воздействии различных сложных сигналов.

2. Результаты исследования различных зависимостей токов и напряжений в нелинейных элементах электронных схемах позволили выявить виды функций аппроксимации их вольтамперных характеристик.

3. Предложенные в работе математические модели могут иметь определенную ценность для анализа и исследования переходных процессов в линейных и нелинейных РС- цепей.

4. Алгоритмы и компьютерные программы решения задач, предложенные в данной работе, могут быть использованы для компьютерного анализа нелинейных радиотехнических цепей на основе активных РС.

**Достоверность результатов** определена применением известных математических методов моделирования и методов решения задач, а также сравнением с имеющимися данными других авторов, опубликованных в научных изданиях.

**Личный вклад автора** присутствует во всех звеньях работы, а именно: в проведении литературного обзора по теме диссертации, постановке проблемы, математическом моделировании задач, постановке и проведении экспериментов, разработке алгоритмов и компьютерных программ для решения задач, анализе результатов решения задач, оформлении диссертации. Соавторами публикаций являются научные консультанты.

**Источниками исследования** явились научная и учебная литература по радиотехнике, средствам связи, электрическим цепям, математическому моделированию и компьютерной технологии, а также результаты экспериментов, проведенных для определения вольтамперных характеристик нелинейных элементов РС - цепей.

**Внедрение результатов работы.** Теоретические и экспериментальные результаты работы могут быть использованы для решения задач о переходных процессах в электронных схемах, а также в учебном процессе во время преподавания дисциплины «Математическое и компьютерное моделирование».

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на следующих научных форумах:

- Республиканская научно-теоретическая конференция «Сейфуллинские чтения - 8», Астана, февраль, 2012 г.

- III Международная научно-практическая конференция «Информатизация общества», посвященная 100-летию Л.Н. Гумилева. Астана, 2012 г.

- Международная научно-практическая конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика», Алматы, декабрь, 4-5 декабря 2012 г.

- III Международная научно-практическая конференция «Современные информационные компьютерные технологии mcIT (modern computer Information Tehnologies)». Гродно (Беларусь). 22-25 апреля 2013 г.

- III Международная научно-практическая конференция «ИКТ: Образование, наука, инновации», Алматы, Alatau Sity, май, 2013 г.

- The Fifteenth International Symposium «MATERIALS, METHODS & TECHNOLOGIES», Sunny Beach Resort (Bulgaria). 10-14 June 2013.

- На заседании кафедры «Электроэнергетика и автоматизация технологических комплексов» КазНТУ им. К.И. Сатпаева от 28 июня 2013 г. (протокол №16).

- Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию члена-корреспондента АН Казахской ССР, д.ф.-м.н., профессора Т.И. Аманова, Семей, 3-5 октября 2013 г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит список обозначений и сокращений, введение, основная часть из пяти разделов, заключения, приложения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 102 страниц машинописи, включая 35 рисунков, 7 таблиц.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 научных трудах. Из них 6 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в Перечень изданий, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК и 2 статьи в зарубежных журналах. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов (РФ, г. Курск), журнал «MATERIALS, METHODS & TECHNOLOGIES», Sunny Beach Resort (Bulgaria, база данных «EBSCO Publishing»).

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1 Ержан А.А. Использование информационно-коммуникационных технологий как дополнительный инструмент в образовании. //Тезисы Республиканской научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения-8». Том1. – Астана, 2012. - С.180.

2 Куралбаев З., Ержан А.А., Опыт применения средств защит от шума в беспроводных каналах передачи данных. //Труды III-ей Международной научно-практической конференции «Информатизация общества, посвященной 100-летию Л.Н. Гумилева». - Астана, 2012. - С. 355-357.

3 Куралбаев З.К., Ержан А.А. Решение математической задачи анализа линейной электронной цепи // Труды Международной научно-практической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика». Том 1.- Алматы: 2012.- С. 360-363.

4 Kuralbayev Z.K., Yerzhan A.A. Analytical solution of the mathematical of linear electronic circuit analysis // Вестник Каз НТУ им. К.И. Сатпаева. – 2012, № 6(94)- С.88-91.

5 Куралбаев З.К., Ержан А.А. Анализ непрерывного процесса в нелинейной электронной цепи // Вестник ЕНУ им. Л.Н.Гумилева. – 2012, № 6 (91) – С. 183-187.

6 Куралбаев З.К., Ержан А.А. Решение одной задачи о переходном процессе в электрической цепи // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2013, № 1 (287) – С. 27-31.

7 Куралбаев З.К., Ержан А.А. Использование аппроксимирующих функций для описания вольтамперных характеристик нелинейных элементов цепи // Вестник НАН РК – 2013, № 2 – С. 23-30.

8 Ержан А.А. Исследование переходных процессов в электронных цепях методами математического моделирования // Труды III-ей Международной научно-практической конференции «ИКТ: Образование, наука, инновации».- Алматы: 2013.- С. 417-421.

9 Куралбаев З.К., Ержан А.А. Аппроксимация экспериментальных данных для определения ВАХ нелинейных элементов RC-цепи //Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов (РФ). – 2013, №4(82), - С. 237- 243.

10 Zauytbek.K. Kuralbaev, Assel.A. Yerzhan. Numerical analysis of a nonlinear radiotechnical circuit // The Fifteenth International Symposium «MATERIALS, METHODS & TECHNOLOGIES». - Sunny Beach Resort, Bulgaria. Volume 7. Part 3. 2013. 10-14 June, P.13-30

11 Kuralbayev Z.K., Yerzhan A.A. Determining the sensitivity of nonlinear electronic schemes // Вестник КазНТУ им. К.И.Сатпаева. – 2013, № 3 (97).– С. 337-341

12 Ержан А.А. Расчет минимальной мощности передатчика для обеспечения требуемого отношения «сигнал-шум». Современные информационные компьютерные технологии mcIT (modern computer Information Tehnologies) //III Международная научно-практическая конференция. Гродно, Беларусь, 2013. 22-25 апреля. /<http://www.cisco.com/web/RU/news/releases/txt/2013/05/050713a.html>

13 Ержан А.А., Куралбаев З., Никулин В.В. Решение задачи о переходном процессе в цепи, нелинейный элемент которой описывает полином. //Доклад НАН РК – 2013. №4 – С. 49-59

14 Куралбаев З., Ержан А.А. Алгоритм решения задачи компьютерного анализа переходного процесса в электронной RC-цепи. //Материалы международной научно-практической конференции. «Теория функций, функциональный анализ и их приложения». - Семей 2013. - С. 165-168.

15 Assel Anuarkyzy Yerzhan and Zautbek Kuralbayevish Kuralbayev. Electronic Circuit Responsiveness Determination. World Applied Sciences Journal. 26 (8). 2013, P.1011-1018