

На правах рукописи



**Назаров Максим Андреевич**

**ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПЕЙ  
НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНО-ИНЕРЦИОННОЙ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПЕРВОГО ПОРЯДКА**

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук»

**Научный руководитель – Семенов Эдуард Валерьевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
Томский университет систем управления  
и радиоэлектроники

**Официальные оппоненты – Разинкин Владимир Павлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Новосибирский государственный  
технический университет;

**Стукач Олег Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Московский институт электроники  
и математики им. А.Н. Тихонова

**Ведущая организация –** ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Солнечногорск, Московская область.

Защита состоится «12» декабря 2023 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/ekfd863s>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования**

В настоящее время видеоимпульсные сигналы и близкие к ним получили широкое применение в различных областях радиотехники. При проектировании устройств, работающих на импульсных сигналах, актуальными задачами являются характеристизация устройств и построение их точных моделей для дальнейшей оптимизации устройств, работающих на видеоимпульсных сигналах.

При разработке радиотехнических систем, работающих на видеоимпульсных сигналах, важно учитывать нелинейные искажения сигналов отдельных устройств, из которых состоит радиотехническая система, а также нелинейные искажения всей радиотехнической системы. Качество работы радиотехнической системы зачастую определяется нелинейными искажениями. Учитывать нелинейные искажения важно на этапе моделирования работы радиотехнической системы.

Для моделирования работы (с учетом нелинейных искажений) радиотехнической системы или устройств, из которых состоит радиотехническая система, могут применяться SPICE-модели или поведенческие модели устройств. Моделирование радиотехнической системы начинается с этапа структурного проектирования, на котором важным фактором является качество моделей устройств, входящих в состав радиотехнической системы, и скорость разработки. На этом этапе проектирования зачастую применяются поведенческие модели устройств поскольку они позволяют увеличить скорость разработки системы по сравнению с физическими моделями без ухудшения точности моделирования.

Поведенческая модель устройства представляет собой модель типа «черного ящика», которая не описывает внутреннюю структуру устройства (не указывает принципиальную схему), а устанавливает связь между сигналами на входе и выходе устройства. Поведенческие модели широко распространены в настоящее время и используются при структурном проектировании радиотехнических систем. Как будет показано далее, применяются они в большинстве случаев для моделирования трактов радиотехнической системы, работающих на гармонических или полигармонических воздействиях, в то время как в радиотехнической системе имеются тракты, работающие на видеоимпульсных сигналах, которые имеют сплошной спектр и являются сверхширокополосными сигналами. Например, для приемо-передающих устройств к таким трактам относятся устройства, находящиеся до модулятора в передатчике и после демодулятора в приемнике. Существуют и сверхширокополосные системы, работающие полностью при воздействии

видеоимпульсных сигналов, например, системы нелинейной видеоимпульсной локации или подповерхностной локации.

Примером характеризации устройства при видеоимпульсных воздействиях являются модель на основе метода расщепления, предложенная С.А. Лабутиним. В данной модели нелинейная система может быть представлена с помощью расщепляющего многополюсника, являющегося инерционной цепью, и нелинейного безынерционного стационарного многополюсника, соединенными каскадно. В методе расщепления структура модели не содержит обратных связей, т.е. соответствующий нелинейный фильтр соответствует трансверсальному фильтру. Чаще всего нерационально использовать такой фильтр, поскольку характеризуемые устройства, имеющие экспоненциальные переходные характеристики, аппроксимируются рекурсивными фильтрами, имеющими меньшее число звеньев.

При видеоимпульсных воздействиях адекватны модели, основанные на ряде Вольтерра – Винера. При практической реализации они приводят к полиномам относительно текущего и предыдущих значений входного сигнала. Из-за отсутствия рекурсивных связей в таких моделях требуется большое количество характеристических функций, что весьма затрудняет их практическое применение.

Ранее Э.В. Семеновым были разработаны модели в виде многопетлевых рекурсивных фильтров с интеграторами в обратных связях, которые полностью характеризуются двумя-пятью нелинейными функциями. Задача характеризации таких моделей существенно упрощается по сравнению с трансверсальными фильтрами (без обратных связей). Однако для моделей второго и третьего порядка часть функций по-прежнему характеризует внутреннюю динамику фильтра, недоступную непосредственному наблюдению. В результате характеристики определяются рекурсивным или итерационным методами, что весьма затрудняет определение погрешности определения этих характеристик.

Модели на основе метода расщепления, Вольтерра – Винера и в виде многопетлевых рекурсивных фильтров с интеграторами в обратных связях позволяют определить экстрагируемые параметры методом подбора, а не измерения, что затрудняет определение погрешности этих параметров.

На основании вышеизложенного, в работе будет предложен метод измерения нелинейных характеристик цепей на основе нелинейно-инерционной поведенческой модели рекурсивного фильтра в виде первого порядка, позволяющей определять экстрагируемые параметры модели путем косвенного измерения с определяемой погрешностью измерения этих параметров. Используя данную поведенческую модель, можно рассчитывать отклик моделируемого устройства или цепи на произвольное входное

воздействие, что позволяет с лучшей точностью моделировать процессы в устройстве или цепи при видеоимпульсном воздействии.

### **Степень разработанности темы**

Проблеме повышения качества моделирования радиоэлектронных устройств, работающих при воздействии сверхширокополосными сигналами, с использованием поведенческих моделей уделяется большое внимание на международных конференциях и симпозиумов, журналах, например, Международный симпозиум по микроволновым технологиям (IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest), ежегодной конференции по автоматизации проектирования (Annual Design Automation Conference), в журнале IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, в журнале IEEE Transactions on Circuits and Systems и других.

Поведенческие нелинейные модели, позволяющие рассчитывать реакцию устройства на сверхширокополосное воздействие, были предложены в научных работах J. Verspecht, M.V. Bossche, F. Verbeyst, D.E. Root, D. Sharrit, J. Wood, A. Cognata, H. Qi, J. Benedikt, P.J. Tasker, S. Woodington, T. Williams, L. Pattison, A. Patterson, J. Lees, S. Dikmese, L. Anttila, P.P. Campo, M. Valkama, M. Renfors, X. Hu, M. Hong, J. Peng, T. Chen, M.I. Sobhy, J.C. Pedro, S.A. Maas, С.А. Лабутина, Л.И. Бабака, В.С. Ижуткина, О.А. Адоньева, Э.В. Семенова. Э.В. Семенов предложил нелинейные поведенческие модели для расчета отклика устройства на видеоимпульсное воздействие на основе рекурсивных фильтров высоких порядков. Однако, используя эти фильтры, характеристические нелинейные функции исследуемого устройства определяются итерационным методом, а не методом подбора, что не позволяет указывать точность их определения.

**Целью диссертационной работы** является исследование вопросов измерений нелинейных характеристик цепей на основе нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка.

Подытожив вышесказанное, с учетом поставленной цели, перечисляются **основные задачи исследования.**

1. Исследовать вопросы качества измерения семейства переходных характеристик нелинейного объекта.

2. Разработать способ определения нелинейных характеристических функций модели, учитывающих статическую и динамическую нелинейность, по результатам прямых измерений его переходных характеристик.

3. На примере нескольких радиотехнических устройств произвести измерение их нелинейных характеристических функций и сделать соответствующие выводы.

### **Научная новизна**

1. Показано, что поведенческая модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра позволяет селективно определять и контролировать систематическую погрешность измерения, связанную с динамической нелинейностью регистрирующего устройства.

2. Показано, что модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка позволяет отдельно измерять динамическую и статическую нелинейность устройств с определяемой погрешностью.

3. Установлено, что относительная динамическая нелинейность устройства, рассчитанная по модели в виде рекурсивного фильтра первого порядка, совпадает с относительной динамической нелинейностью, рассчитанной по модели в виде рекурсивного фильтра выше первого порядка.

### **Теоретическая значимость**

1. Обстоятельство, что относительные динамические нелинейности устройства, определенные по модели первого и более высокого порядка совпадают, позволяет давать анализ динамической нелинейности устройств различной сложности на общей основе с применением нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка.

2. Выбор точки стробирования в соответствии с основной постоянной времени наблюдаемого переходного процесса позволяет снижать влияние на результаты измерения переходных процессов, не укладывающихся в используемую поведенческую модель.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

1. Автоматизированное измерение нелинейных характеристик импульсных устройств предоставит возможность создавать поведенческие модели устройств, которые позволят на этапе моделирования радиотехнических систем в САПР более точно прогнозировать работу системы при видеоимпульсном тестовом воздействии на входе устройства.

2. Предложенный метод косвенного измерения нелинейных характеристик цепей позволяет измерять помимо статической, динамическую нелинейность устройства. На основе данного метода можно создавать измерительные приборы нового класса.

### **Методы исследования и достоверность**

Методы исследования в диссертационной работе выбирались исходя из постановки решаемых задач и включают: теорию нелинейных преобразователей Синглтона, методику экстракции нелинейных характеристических функций Семенова для нелинейных цепей, методы эквивалентных схем на основе рекурсивного фильтра, методы схемотехнического моделирования с применением систем автоматизированного проектирования, физическое макетирование.

**Достоверность** научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждаются согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается современными средствами измерений и стандартными методиками проведения исследований.

**Область исследования диссертационной работы** соответствует указанным в паспорте профиля «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (2.2.13)»:

п. 14 «Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений»;

п. 15 «Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптоэлектронных устройств».

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Поведенческая модель регистрирующего устройства в виде нелинейного рекурсивного фильтра позволяет определить минимальное значение полосы частот регистрирующего устройства, при которой обеспечивается заданный уровень нелинейных искажений регистрируемых сигналов.

2. Способ характеристики нелинейных цепей на основе нелинейно-инерционного рекурсивного фильтра первого порядка допускает измерение характеристических функций модели с определяемой погрешностью.

3. Полученные нелинейные характеристики трехкаскадного усилителя мощности с измеренными током проводимости с погрешностью не более 0.3 % и емкостным зарядом с погрешностью не более 1.9 % позволяют обеспечить точность моделирования семейства переходных характеристик усилителя с погрешностью не более 3.2 %.

**Личный вклад** автора состоит в разработке способа измерения нелинейных характеристик цепей (вольт-амперной и кулон-вольтовой характеристик) на основе нелинейно-инерционной модели в виде рекурсивного фильтра первого порядка. Автором также проведен анализ состояния научно-технических решений, выполнение расчётов, сборка макетов нелинейных устройств, проведение и анализ экспериментов, и разработка установки для автоматизированного измерения нелинейных характеристик цепей. Совместно с научным руководителем поставлены задачи исследования.

### **Использование результатов исследования**

Результаты исследования использованы при выполнении следующих работ.

1. Конкурс «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК-2014»), проект «Разработка прибора для диагностики качества диэлектрических материалов на сверхкороткоимпульсном сигнале».

2. Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWRM-2021-0015 «Увеличение дальности и проникающей способности нелинейных локаторов для селективного обнаружения электронных приборов и естественных сред с нелинейными свойствами в сложной фоно-целевой обстановке за счет применения сверхкоротких сверхширокополосных зондирующих сигналов».

3. Российского научного фонда, грант № 22-29-00605 «Характеризация нелинейно-инерционных свойств и динамического диапазона систем со сложными и импульсными широкополосными сигналами».

Основные положения диссертационной работы апробировались:

1) на всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2013);

2) 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2014 (Севастополь, 2014);

3) 25-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2015 (Севастополь, 2015);

4) всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2015);

5) международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2015);

6) 26-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2016 (Севастополь, 2016);

7) 32-й международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2022 (Севастополь, 2022);

8) научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули». Российский форум «Микроэлектроника 2022» (Сочи, 2022);

9) международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ (п. Дивноморское, 2023).

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 14 работ: 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 доклада, рецензируемых в базе данных Scopus, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, подана заявка на патент на изобретение, 8 докладов в трудах международных и российских конференций с индексацией в наукометрической базе РИНЦ.



### **Внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятия ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов».

### **Структура и объем диссертации**

В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список источников из 80 наименований, приложения на 12 с. Объем диссертации с приложением – 145 с., в т.ч. 71 рисунок.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, представлена научная новизна и практическая значимость результатов, приведены сведения об апробации работы, публикациях и внедрении.

**В первой главе** проведен сравнительный обзор нелинейных поведенческих моделей для описания поведения нелинейных цепей, проблемы экстракции параметров этих моделей, а также обзор методов измерения нелинейных характеристик цепей. В данной главе также выполнен обзор приборов для проведения импульсных измерений каждым методом измерения нелинейных характеристик цепей и вопросы, связанные с калибровкой измерительных систем.

**Во второй главе** сформированы требования к оборудованию для измерения переходных характеристик исследуемого объекта. Известно, что для полной характеристики исследуемого объекта необходимо использовать измеренное семейство откликов (переходных характеристик) на семейство ступенчатых функций. Таким образом, необходимо с высокой точностью зарегистрировать семейство переходных характеристик объекта. Данная глава посвящена вопросам точности измерения переходных характеристик объекта, на которую влияют искажения генератора ступенчатых функций и осциллографа, регистрирующего семейство откликов на ступенчатые функции.

Генератор ступенчатых функций имеет как статическую, так и динамическую нелинейность. Поскольку длительность фронта генератора существенно (на порядок и более) меньше длительности переходной характеристики исследуемого объекта, то динамической нелинейностью генератора можно пренебречь. Статическая нелинейность генератора определяется его амплитудной характеристикой, которую можно измерить с помощью опорного осциллографа или опорного вольтметра при подаче постоянного напряжения с выхода генератора, и в дальнейшем

скорректировать. Таким образом, после коррекции наклона амплитудной характеристики генератора и его постоянного смещения, переходные характеристики исследуемого объекта будут измеряться с меньшим уровнем статических нелинейных искажений генератора.

Осциллограф в свою очередь имеет как статическую, так и динамическую нелинейность. В результате исследований установлено, что динамическая нелинейность осциллографа превышает статическую и для уменьшения влияния динамической нелинейности на результат измерения переходных характеристик объекта следует выбирать осциллограф с полосой, значительно превышающей полосу (хотя бы на порядок) исследуемого объекта. Выполнив это условие, влиянием динамической нелинейностью осциллографа на результат измерения переходных характеристик объекта можно пренебречь.

Статическая нелинейность осциллографа определяется измерением его амплитудной характеристики при помощи опорного вольтметра (с нелинейностью на порядок меньшей нелинейности осциллографа). Определив амплитудную характеристику ( $A_X$ ) осциллографа, можно скорректировать его нелинейность и наклон путем инверсии  $A_X$  осциллографа.

Смещение нуля осциллографа определяется с помощью опорного вольтметра, подачей одновременно на осциллограф и на вольтметр, имеющий погрешность измерения на порядок меньшую чем у исследуемого осциллографа, напряжения с выхода источника питания.

Структурная схема экспериментальной установки (рисунок 1) позволяет измерять переходные характеристики исследуемого объекта (рисунок 2). Она включает в себя генератор National Instruments PXI-5422, осциллограф National Instruments PXI-5114, шасси National Instruments PXI-1033, в которое встраиваются генератор и осциллограф, а также ЭВМ для управления измерительной установкой. Все измерительные приборы, входящие в состав экспериментальной установки взяты в качестве примера. Генератор формирует семейство ступенчатых воздействий с длительностью фронта не более 4,8 нс. С помощью осциллографа регистрируется семейство откликов исследуемого объекта. Осциллограф имеет длительность переходной характеристики не более 3,5 нс.



Рисунок 1 – Структурная схема установки для автоматизированного измерения переходных характеристик объекта

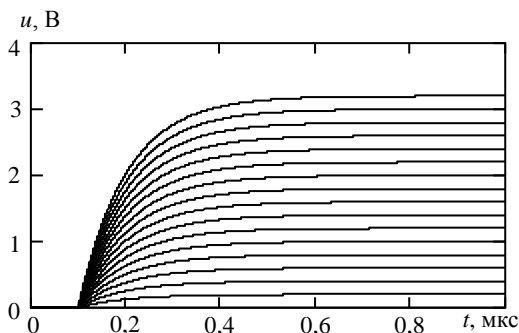


Рисунок 2 – Переходные характеристики параллельной  $RC$ -цепи

**Третья глава** посвящена разработке метода косвенного измерения нелинейных характеристик объекта. Такими характеристиками являются вольт-амперная характеристика (ВАХ), учитывающая статическую нелинейность объекта, и кулон-вольтовой характеристика (КВХ), учитывающая его динамическую нелинейность. ВАХ и КВХ объекта измеряются косвенно по результатам прямых измерений его переходных характеристик и образуют поведенческую модель устройства. При измерении этих характеристик, исследуемый объект заменяется параллельной схемой замещения (рисунок 3). Данная схема состоит из нелинейной проводимости, учитывающей ток проводимости (ток для ВАХ) и нелинейной емкости, учитывающей емкостной ток (заряд в КВХ).

ВАХ объекта измеряется стробированием выходного напряжения (переходной характеристики) и входного тока в одинаковый момент времени на плоской вершине импульса (рисунок 4). Измерение на плоской вершине импульса предполагает тот факт, что процессы заряда-разряда емкости объекта завершились и через объект, по нелинейно-инерционной модели в виде рекурсивного фильтра первого порядка, протекает только ток

проводимости. Такая характеристика учитывает только статическую нелинейность объекта и равноценна его амплитудной характеристике.

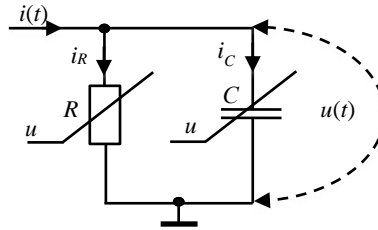


Рисунок 3 – Нелинейно-инерционная схема замещения исследуемого объекта

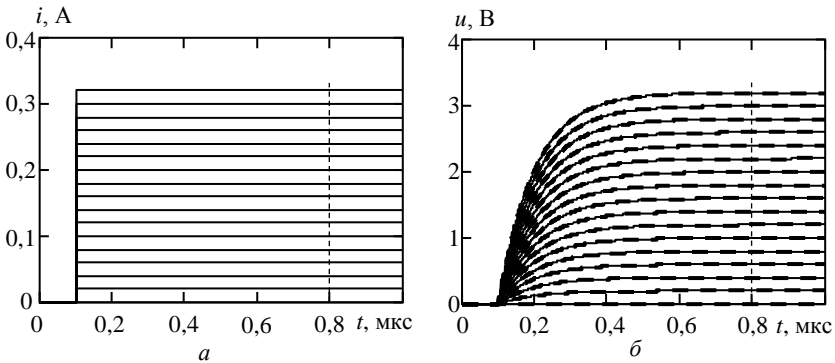


Рисунок 4 – Семейство тестовых токов на входе  $RC$ -цепи ( $a$ ) и семейство откликов по напряжению переходных характеристик  $RC$ -цепи, рассчитанных по выражению (5) (сплошные кривые) ( $\delta$ ) и полученных по результатам моделирования (штриховые кривые) ( $\delta$ ).

Штриховые прямые – момент стробирования ( $\delta$ )

КВХ измеряется стробированием зависимости емкостного заряда от времени, которая получается путем интегрирования емкостного тока по времени. Емкостной ток  $i_c$  (рисунок 5) определяется как разность полного входного тока ( $i(t)$ ) и тока проводимости  $i_r$ , полученного интерполяцией семейства переходных характеристик объекта по измеренной ранее ВАХ. Измеренная таким образом КВХ учитывает динамическую нелинейность исследуемого объекта (нелинейность на фронте импульса, когда процессы заряда-разряда емкости объекта продолжаются).

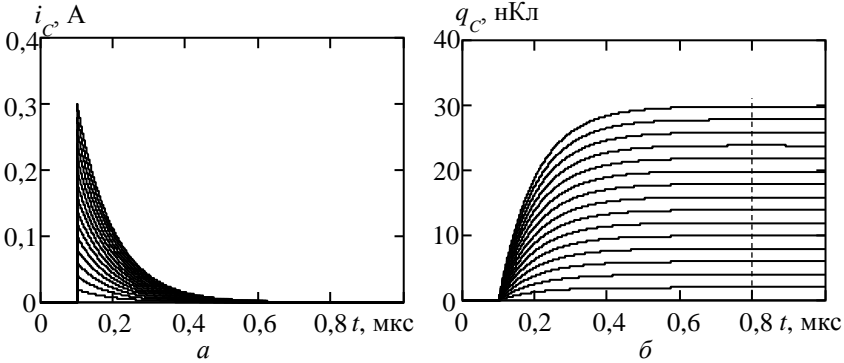


Рисунок 5 – Семейство емкостных токов  $RC$ -цепи (а) и семейство зависимости зарядов от времени  $RC$ -цепи (б). Штриховые кривые – момент стробирования

Используя измеренные косвенно характеристики объекта, по модели (см. рисунок 3) можно, используя известную форму входного тока, вычислить отклик цепи на него. Рассматриваемая модель представляет собой рекурсивный фильтр первого порядка. Выражения для определения отклика объекта на произвольное входное воздействие выглядят следующим образом:

$$i_C(j) = i_{in}(j) - i_R(j-1), \quad (1)$$

$$q_C(j) = q_C(j-1) + \Delta t [i_C(j) + i_C(j-1)]/2, \quad (2)$$

$$u_{out}(j) = U_{out}[q_C(j)], \quad (3)$$

$$i_R(j) = I_R[u_{out}(j)], \quad (4)$$

где  $i_C(j)$  – ток через емкость в точке  $j$ ;  $i_{in}(j)$  – входной ток;  $i_R(j-1)$  – ток через нелинейный резистор;  $q_C(j)$  – заряд;  $\Delta t$  – период дискретизации тока;  $u_{out}(j)$  – отклик;  $U_{out}[q_C(j)]$  – кулон-вольтовая характеристика;  $I_R[u_{out}(j)]$  – вольт-амперная характеристика.

Способ косвенных измерений ВАХ и КВХ объекта был проверен на примере параллельной  $RC$ -цепи с известными параметрами ( $R = 10$  Ом,  $C = 10$  нФ). Форма переходных характеристик такой цепи определяется выражением для заряда цепи конденсатора:

$$u(t) = 1 - \exp(-t/RC), \quad (5)$$

Семейство тестовых токов показано на рисунке 4,а и семейство откликов (переходных характеристик) на эти токи изображено на рисунке 4,б. Семейство полученных емкостного тока от времени и емкостного заряда от времени показано на рисунке 5. Произведя стробирование тока, напряжения и заряда в один и тот же момент времени (0,8 мкс), были косвенно измерены

ВАХ и КВХ параллельной  $RC$ -цепи (рисунок 6). Полученные ВАХ и КВХ линейные, поскольку рассматриваемая цепь линейная.

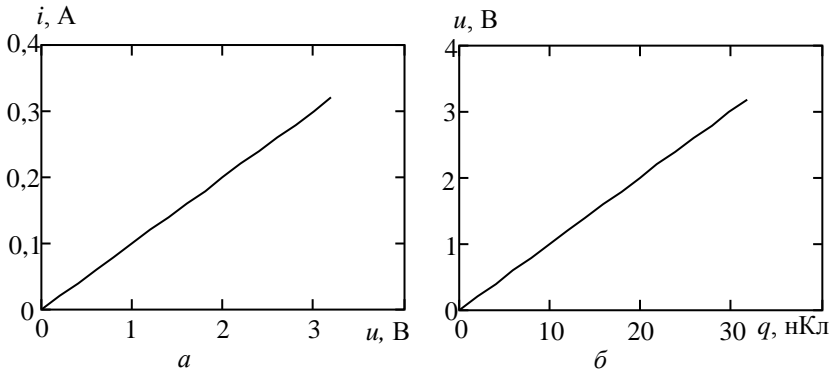


Рисунок 6 – ВАХ (а) и КВХ  $RC$ -цепи (б)

Проверим качество полученной модели. Для этого произведем расчет семейства откликов на семейство входных ступенчатых функций токов, используя выражения (1)–(4) и сравним их с переходными характеристиками, рассчитанными по выражению (5).

На рисунке 4,б (сплошными кривыми) изображены переходные характеристики, рассчитанные по выражению (5) и по модели (пунктирные кривые), используя измеренные ВАХ и КВХ. Относительная невязка кривых, полученных по выражению (5) и по результатам моделирования составляет не более 0,3 %. Такая малая невязка говорит о правильности измерения характеристик модели. Таким образом показана правильность способа косвенного измерения ВАХ и КВХ на примере линейного объекта.

Модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка адекватна поскольку измеренные косвенно ВАХ и КВХ линейной цепи по семейству переходных характеристик цепи ложатся на линейную прямую. К тому же аппроксимированные по модели переходные характеристики данной цепи очень близки с теоретически рассчитанными переходными характеристиками этой цепи.

На основе предложенного способа была разработана установка для автоматизированного измерения нелинейных ВАХ и КВХ объекта. Собственная нелинейность установки, влияющая на результат измерения нелинейных характеристик цепей была оценена с помощью меры нелинейности, представляющей собой линейную Т-образную цепь,

изображенной на рисунке 7 в пунктирной рамке. Измеренные и рассчитанные ВАХ и КВХ цепи изображены на рисунке 8.

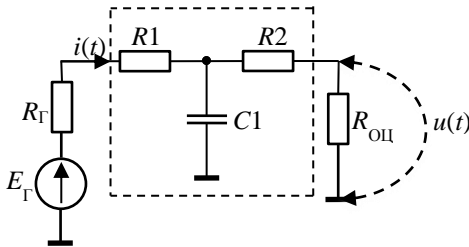


Рисунок 7 – Принципиальная схема эталонной цепи, подключенной к автоматической установке

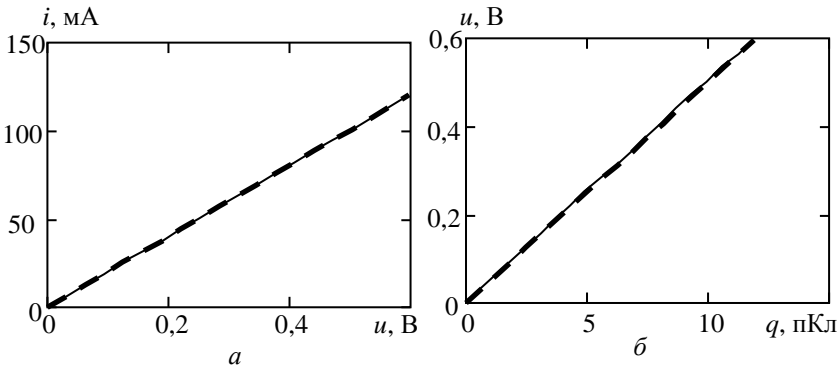


Рисунок 8 – Вольт-амперная характеристика эталона (а): измеренная (сплошная кривая), рассчитанная по модели (пунктирная кривая); кулон-вольтная характеристика эталона (б): измеренная (сплошная кривая), рассчитанная по модели (пунктирная кривая)

Относительная погрешность невязки измеренного тока в ВАХ и полученного в результате моделирования составляет не более 0,5 %, относительная погрешность невязки заряда в КВХ составляет не более 1 %. Таким образом, используя меру нелинейности в виде линейной цепи была проверена разработанная автоматизированная установка.

**В четвертой главе** рассмотрена практическая реализация способа измерения ВАХ и КВХ объекта на примере радиотехнических устройств. В качестве примера выбран трехкаскадный усилитель мощности, принципиальная схема которого изображена на рисунке 9. Семейство входных

токов усилителя показано на рисунке 10,а, а семейство откликов на эти токи на рисунке 10,б. Рассчитанное семейство емкостного тока от времени и емкостного заряда от времени изображено на рисунке 11. Производя стробирование тока, напряжения и заряда в момент времени 0,4 мкс, были косвенно измерены ВАХ и КВХ усилителя, показанные на рисунке 12.

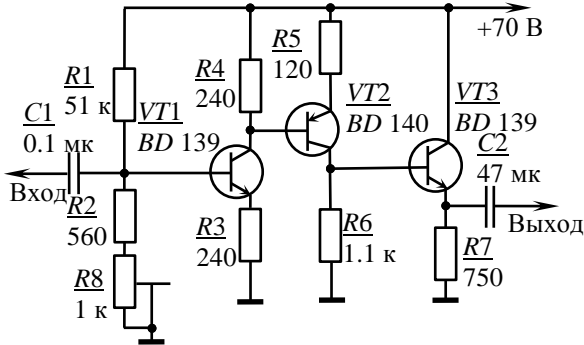


Рисунок 9 – Принципиальная схема трехкаскадного усилителя мощности

Сравнивая ВАХ и КВХ усилителя видно, что нелинейность КВХ начинает проявляться при меньшем уровне входного воздействия по сравнению с нелинейностью ВАХ (40 В для КВХ и 45 В для ВАХ). Таким образом показано, что динамическая нелинейность проявляется при меньших уровнях входных напряжений чем статическая и возникает тогда, когда статическая нелинейность пренебрежимо мала.

Подав на модель (выражения (1)–(4)) семейство входных токов, показанных на рисунке 10,а, было получено семейство переходных характеристик, показанное на рисунке 10,б штриховыми кривыми. Полученное семейство совпадает с измеренными переходными характеристиками (рисунок 10,б, сплошные кривые). Относительная погрешность невязки между переходными характеристиками, полученными в результате измерения и по модели, составляет не более 3,2 %. Такая относительно малая невязка говорит об удовлетворительном качестве измеренных ВАХ и КВХ усилителя.

В работе была произведена валидация полученной модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка на примере трехкаскадного усилителя. Проверку модели теоретически необходимо проводить на бесконечном семействе произвольных сигналов, что на практике не представляется возможным. Однако, сложный сигнал с определенной



точностью можно представить в виде суперпозиции ступенчатых сигналов. В таком случае, если модель удовлетворительно работает на суперпозиции двух ступенчатых сигналов, то её работа будет также удовлетворительной и для других сигналов.

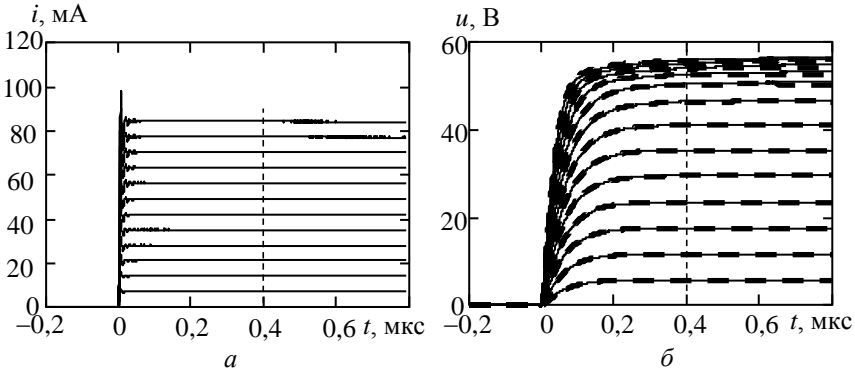


Рисунок 10 – Семейство входных токов трехкаскадного усилителя (*a*), отклики (переходные характеристики) на семейство входных токов (сплошные кривые) (*б*) и переходные характеристики, полученные по результатам моделирования (штриховые кривые) (*б*).

Штриховые прямые – момент стробирования

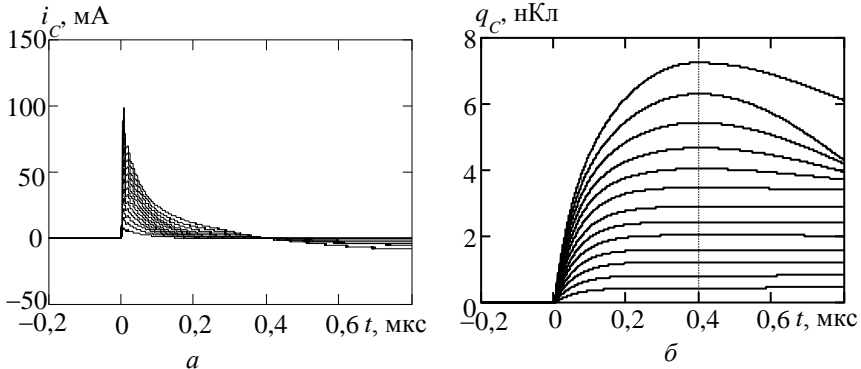


Рисунок 11 – Семейство зависимости емкостных токов от времени для трехкаскадного усилителя (*a*), семейство зависимости емкостных зарядов от времени (сплошные кривые), момент стробирования (штриховая прямая) (*б*)

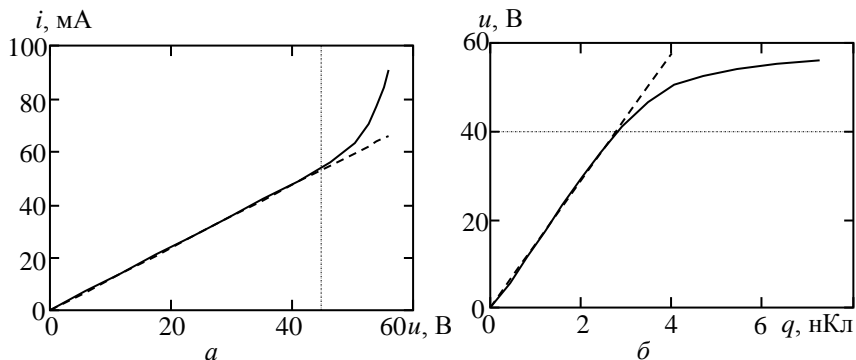


Рисунок 12 – ВАХ усилителя (сплошная кривая), линейризованная ВАХ усилителя (штриховая прямая) и напряжение, начиная с которого проявляется нелинейность ВАХ (штрихпунктирная прямая) (а); КВХ усилителя (сплошная кривая), линейризованная КВХ усилителя (штриховая прямая) и напряжение, начиная с которого проявляется нелинейность КВХ (штрихпунктирная прямая) (б)

Для валидации модели усилителя был выбран тестовый прямоугольный импульс длительностью (120 нс) несколько меньше длительности переходной характеристики усилителя (150 нс), представляющий собой суперпозицию двух ступенчатых сигналов, погрешность моделирования для которых будет теоретически максимальная. Семейство тестовых токов и откликов на это семейство приведено на рисунке 13. Измеренные и полученные из расчетов по модели отклики имеют относительную невязку не превышающую 5%. Относительная невязка определялась как разность измеренной и модельной кривых, нормированная на амплитуду. Данное значение невязки типично для поведенческих моделей и говорит об удовлетворительной погрешности модели.

В работе изучалась возможность применения метода измерения нелинейных характеристик цепей на основе нелинейно-инерционной модели в виде рекурсивного фильтра первого порядка, имеющих выброс в конце фронта импульса на переходной характеристике (переходные характеристики выше первого порядка). Для оценки применимости данной модели первого порядка для цепей, имеющих переходные характеристики выше первого порядка, в работе был выбран малозумящий усилитель, схема которого показана на рисунке 14. Данный усилитель имеет небольшой выброс на плоской вершине переходной характеристики и представляет собой нелинейно-инерционную цепь второго порядка.

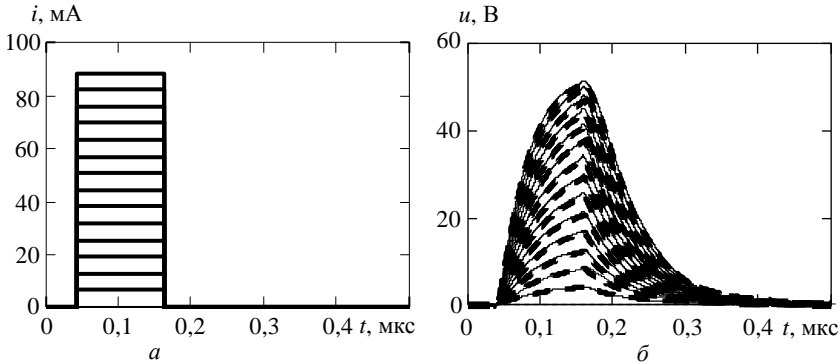


Рисунок 13 – Семейство: цифровых тестовых токов (а), измеренных (сплошные кривые) откликов на входной ток (б) и рассчитанных (штриховые кривые) по модели усилителя (б)

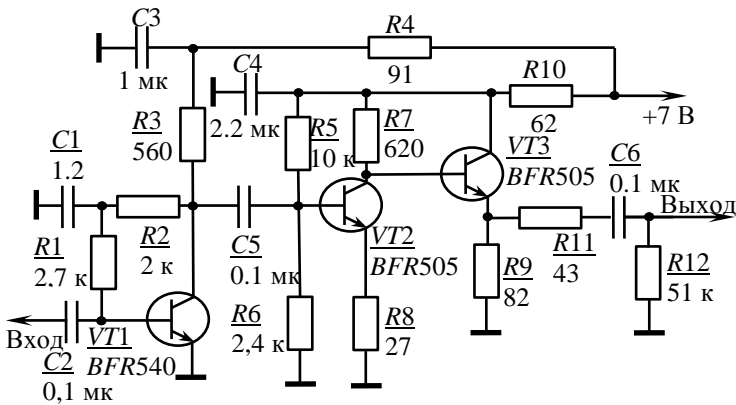


Рисунок 14 – Принципиальная схема малошумящего усилителя мощности

Оценим целесообразность применения нелинейно-инерционной модели первого порядка в виде рекурсивного фильтра для данного усилителя. Для этой цели в работе сравнивается нелинейно-инерционная модель первого и второго порядка в виде рекурсивных фильтров. На рисунке 15 показаны семейство входных токов и семейство переходных характеристик, на основе которых измеряется ВАХ и КВХ (рисунок 16). Из рисунка 16 видно, что ВАХ для двух моделей совпадают, а КВХ различные. Однако, в работе предполагается, что относительная нелинейность КВХ для двух моделей совпадает. Относительная нелинейность КВХ рассчитывается по выражению:

$$\delta q = \frac{q - k \cdot u}{\max(k \cdot u)} 100, \quad (6)$$

где  $q$  – заряд на КВХ;  $k$  – коэффициент наклона линеаризованной КВХ;  $\max(k \cdot u)$  – максимальное значение линеаризованной КВХ.

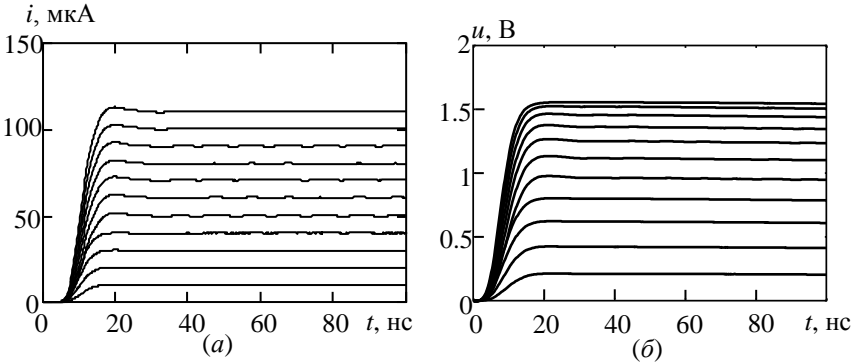


Рисунок 15 – Семейство входных токов малошумящего усилителя (а), семейство переходных характеристик усилителя (б)

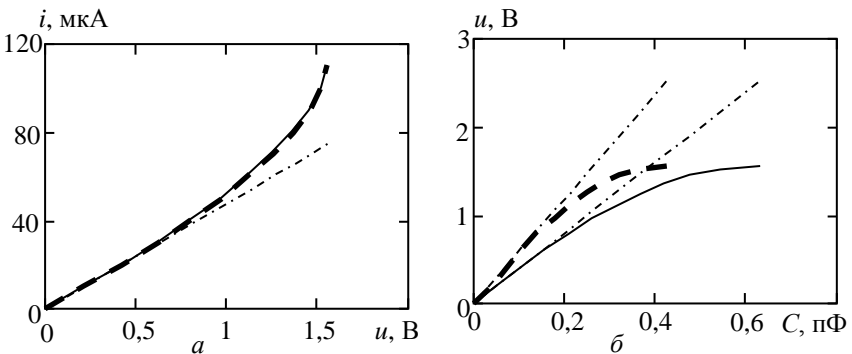


Рисунок 16 – ВАХ усилителя: для модели первого порядка (пунктирная кривая), второго порядка (сплошная кривая) и линеаризованная (штрихпунктирная кривая) (а); КВХ усилителя: для модели первого порядка (пунктирная кривая), второго порядка (сплошная кривая) и линеаризованные (штрихпунктирные кривые)

График относительной нелинейности заряда в зависимости от напряжения приведен на рисунке 17. Из рисунка видно, что предположение верно.

Относительные нелинейности КВХ для моделей первого и второго порядков близки друг к другу (рисунок 17), несмотря на то что в абсолютных величинах КВХ для обоих порядков существенно расходятся. Для моделирования переходных характеристик использовать КВХ, полученную по модели первого порядка нецелесообразно (погрешность около 6,3 %), в то время как погрешность аппроксимации переходных характеристик по модели второго порядка около 1,3 %. Однако, использовать относительную КВХ, измеренную по модели первого порядка можно как характеристику относительной динамической нелинейности устройств, имеющих переходные характеристики выше первого порядка.

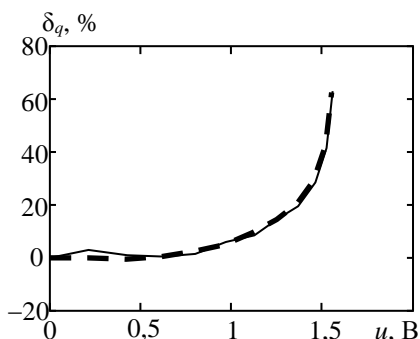


Рисунок 17 – Относительная нелинейность заряда:  
для модели первого порядка (сплошная кривая);  
для модели второго порядка (штриховая кривая)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен анализ существующих нелинейных поведенческих моделей, позволяющих проектировать радиоэлектронные устройства, работающие при воздействии сверхширокополосных сигналов.

2. Предложен способ характеристики нелинейных видеоимпульсных устройств и цепей на основе нелинейно-инерционной модели первого порядка в виде рекурсивного фильтра, позволяющей одновременно учитывать статическую нелинейность объекта (устройства, цепи) и динамическую нелинейность объекта.

3. На основе предложенного способа была разработана установка для автоматизированного измерения нелинейных характеристик цепей.

4. Были выявлены и скорректированы источники погрешности установки, влияющие на результат измерения нелинейных характеристик цепей, такие как погрешность тока проводимости, напряжения и емкостного заряда.

5. Измерены нелинейные характеристики выбранного в качестве примера трехкаскадного усилителя мощности.

6. На примере того же усилителя мощности выполнена валидация модели первого порядка на тестовых токах, поданных на вход усилителя, длительностью меньше длительности переходной характеристики усилителя. Погрешность аппроксимации откликов для такой длительности теоретически максимальная и составляет не более 5 %.

7. На примере малошумящего усилителя, переходные характеристики которого представляют собой цепь второго порядка, показано, что предложенная для него модель первого порядка отражает относительную динамическую нелинейность устройств, имеющих переходную характеристику более высоких порядков. Это означает возможность применять разработанный способ характеризации в качестве универсального способа измерения нелинейности объекта.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК*

1. **Назаров, М. А.** Анализ нелинейно-инерционных свойств устройств оцифровки с использованием их модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 110–114. – doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-110-114.

2. **Назаров, М. А.** Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 123–132.

3. **Назаров, М. А.** Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 3 (29). – С. 38–42.

4. **Назаров, М. А.** Сопоставление квазистатической и неквазистатической видеоимпульсной модели конденсатора при различном уровне тестовых воздействий / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 50–52.

*Материалы конференций*

1. Семенов, Э. В. Универсальная компактная модель нелинейных устройств для видеоимпульсного режима / Э. В. Семенов, **М. А. Назаров** // ЭКБ и микроэлектронные модули. Российский форум «Микроэлектроника»: тез. докл. науч. конф. – 2022. – С. 325–326.

2. **Назаров, М. А.** Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей с применением

трансверсального фильтра / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // 26-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) : материалы конф. – 2016. – С. 1920–1926.

3. **Назаров, М. А.** Анализ искажений короткоимпульсных сигналов минимально фазовыми и фазолинейными фильтрами / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» : материалы докл. – 2015. – № 1-1. – С. 65–69.

4. **Назаров, М. А.** Измерение вольтфарадной характеристики конденсатора при воздействии видеоимпульсным сигналом / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Научная сессия ТУСУР-2015 : материалы Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015. – С. 35–37.

5. **Назаров, М. А.** Исследование сверхкороткоимпульсной модели конденсатора / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Материалы докладов 25-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – 2015. – С. 582, 583.

6. **Назаров, М. А.** Определение чувствительности приемника сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик диэлектрических материалов / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments-2014 : сб. тр. XIII междунар. науч.-практ. конф., 19–20 ноября, Москва. – 2014. – С. 21–23.

7. **Назаров, М. А.** Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного характериографа / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments-2013 : сб. тр. конф., 28–29 ноября, Москва. – 2013. – С. 1–5.

8. **Назаров, М. А.** Оценка систематической погрешности измерения формы импульсного сигнала регистрирующим устройством / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Научная сессия ТУСУР-2013: материалы Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : В-Спектр, 2013. – Ч. 1. – С. 324–326.

*Доклады, индексируемые в Scopus*

1. Modeling and Experimental Study of the Nonlinear Baseband Pulse Radar Prototype / E. V. Semyonov, A. V. Fateev, **M. A. Nazarov**, A. A. Berezin // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10201997.

2. **Nazarov, M. A.** Specificity of Inaccuracy of Indirect Measurements of Capacitance-Voltage Characteristics by Means of Ultra-Short Pulse Method / M. A. Nazarov, E. V. Semyonov // 2014 24<sup>th</sup> Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2014), 7–13 September, Sevastopol, Crimea, Russia. – P. 948, 949. – Doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959708.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин или базы данных*

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612921. Коррекция линейных искажений и фильтрация шумов сигнала, зарегистрированного цифровым осциллографом : № 2017610327 : заявл. 16.01.2017 : опубл. 06.03.2017 / **Назаров М. А.**

*Заявка на патент на изобретение*

Способ расширения динамического диапазона приемника : № 2022135185 : заявл. 30.12.2022 / **Назаров М. А.**, Семенов Э. В. ; Институт сильноточной электроники (ИСЭ СО РАН).