

На правах рукописи



Полторыхин Кирилл Михайлович

**ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ
ОСНОВНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ
ПЕРЕХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе устройства телевидения»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН).

Научный руководитель: **Семенов Эдуард Валерьевич,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры радиоэлектроники и
систем связи ТУСУР

Официальные оппоненты: **Клеопин Андрей Владимирович,**
кандидат технических наук,
заместитель начальника НИО-1 по научной
работе ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений»;

Разинкин Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры теоретических основ
радиотехники ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБУ «Главный научный метрологический
центр» Министерства обороны Российской
Федерации

Защита состоится «22» декабря 2026 г. в 9 часов 00 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/9vexs6pb>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент



Суровцев Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Для моделирования устройств можно использовать известные уровни проектирования: схемотехнический уровень, 3D-электромагнитный анализ или поведенческий уровень. Для сложных радиотехнических систем, особенно на начальных этапах разработки, можно использовать поведенческий уровень, так как первоначальные технические требования к радиотехнической системе предъявляются именно на нем.

В качестве поведенческих моделей широко известны радиочастотные модели полигармонических искажений (X-параметры). Данные модели могут работать исключительно при гармонических или полигармонических воздействиях, спектр которых узкополосный. Но с усложнением формы сигналов и расширением полосы частот, такие модели перестают быть адекватными, особенно в тракте основной полосы частот (до модулятора и после демодулятора), где спектр сигналов сплошной.

Нелинейно-инерционные модели для описания устройств основной полосы частот известны, но они не стали широко используемыми в инженерной практике из-за сложностей в отыскании системы характеристических функций, количество которых может достигать девяти и более.

Ранее были представлены нелинейные динамические модели в виде нелинейных рекурсивных фильтров, с помощью которых можно достаточно просто смоделировать поведение устройств основной полосы частот. За счет применения интеграторов в обратных связях, такие фильтры позволяют моделировать экспоненциальные и колебательные процессы в ПХ. Для характеристики устройств без выброса на плоской вершине был разработан метод измерения ПХ устройств основной полосы частот на основе нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка. Повышение порядка фильтра позволяет расширить класс объектов измерения, к которому могут относиться и устройства с выбросом на плоской вершине ПХ. В настоящее время характеристические функции нелинейного фильтра второго порядка определяются с помощью вариационного метода. Использование такого метода усложняет расчет погрешностей измерения, поскольку не заданы расчетные формулы для определения характеристических функций по результатам прямых измерений ПХ. Поэтому разработка метода измерения устройств основной полосы частот с осциллирующими переходными характеристиками по принципам косвенных измерений позволит, как и в случае с моделью первого порядка, метрологически правильно и прозрачно оценить погрешность измерения. Это позволит расширить класс описываемых устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине ПХ, которые наиболее часто встречаются в инженерной практике.

Степень разработанности темы. Повышению качества моделирования сверхширокополосных радиоэлектронных устройств посвящено множество исследований и работ. Проблемам качества моделирования с использованием поведенческих моделей уделяется большое внимание в трудах международных конференций IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Annual

Design Automation Conference, журналах IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Circuits and Systems и др.

Вклад в развитие поведенческих моделей в радиочастотной области внесли такие зарубежные авторы как J. Verspecht, D.E. Root, D. Sharrit, J. Wood, A. Cognata. На основе разработанной теории представления моделей в виде X-параметров разработаны методы измерения и приборы. Свой вклад внесла и «кардиффская школа» в лице J. Benedikt, P.J. Tasker, S. Woodington, T. Williams, L. Pattison, A. Patterson, J. Lees, которые расширили применение радиочастотных моделей на основе X-параметров для моделирования радиочастотных СВЧ устройств с эффектом памяти. 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 являются разработчиками фундаментальной теории классического поведенческого моделирования устройств с учетом эффектов памяти. Развитию поведенческих моделей для радиочастотной области и в основной полосе частот в отечественной школе посвящены работы А.А. Ланнэ, С.А. Лабутина, Л.И. Бабака, В.С. Ижуткина, О.А. Адоньева, А.Г. Жаркого, Н.И. Базенкова, Э.В. Семенова, М.А. Назарова. Предложенные поведенческие модели Э.В. Семенова, М.А. Назарова в виде нелинейных рекурсивных фильтров разных порядков позволяют достаточно просто описать работу устройств основной полосы частот при сверхширокополосном воздействии. При этом структура таких фильтров позволяет наглядно представить динамику их работы в виде эквивалентных схем (двухполосников), у которых на вход подается ток, на выходе снимается напряжение.

Для измерения устройств основной полосы частот с осциллирующими ПХ уже необходимо использовать нелинейно-инерционную модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка. Для данной модели помимо ВАХ и КВХ добавляется также вебер-амперная характеристика (ВбАХ). Для модели был разработан вариационный метод измерения характеристических функций, но это не позволяет метрологически корректно оценить погрешность. Ранее разработанный метод измерения характеристических функций на основе нелинейно-инерционной модели первого порядка также не подходит для измерения КВХ, в виду того, что установление точки стробирования на плоской вершине ПХ приводит к взаимной частичной компенсации инерционности емкости индуктивностью. Поэтому необходим метод измерения характеристических функций на основе нелинейно-инерционной модели второго порядка на тех же принципах, что и для первого порядка, но который позволит разделить вклад КВХ и ВбАХ друг в друга.

Целью диссертационной работы является разработка метода измерения нелинейных характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики путем безытерационных (прямых) вычислений по нелинейно-инерционной поведенческой модели второго порядка.

Из вышесказанного были сформулированы следующие **основные задачи исследования**.

1. Исследовать вопросы моделирования устройств и способы измерения их нелинейных характеристических функций для описания работы на поведенческом уровне.

2. Разработать безытерационный способ определения характеристических функций нелинейно-инерционной модели второго порядка по результатам измерения семейства переходных характеристик.

3. Рассмотреть способы уменьшения систематической погрешности измерения характеристических функций, которая возникает из-за отличия реальных переходных характеристик устройства от их идеализации второго порядка.

4. Оценить разработанный метод характеризации устройств основной полосы частот на нескольких практических примерах.

Научная новизна

1. Установлено, что на фронт переходной характеристики в большей степени влияет емкость в эквивалентной схеме объекта, что позволяет выполнить независимое измерение кулон-вольтовой характеристики устройства.

2. Показано, что реальные переходные характеристики устройств отличаются от модели второго порядка главным образом на начальном участке перехода к крутой части фронта, что можно дополнительно учесть в модели с помощью линейного фильтра Гаусса.

3. Обнаружено, что для обеспечения приемлемой погрешности измерения характеристик устройств при ограничении на допустимую амплитуду входных воздействий необходимо учитывать начальное приближение тока RL-цепи эквивалентной схемы.

Теоретическая значимость

1. Разработанный метод измерения характеристических функций устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики позволяет решить обратную задачу синтеза инверсной модели для коррекции нелинейных искажений в таких устройствах.

2. Рассмотренный метод измерения применим и для характеризации отраженных от устройства сигналов для создания полной модели устройства с осциллирующими переходными характеристиками.

Практическая значимость

1. Предложенный метод безытерационного измерения характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики позволяет создавать измерительные приборы нового класса.

2. Разработанный метод измерения нелинейных характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики позволяет расширить класс используемых поведенческих моделей устройств в САПР для адекватного моделирования радиотехнических систем при сверхширокополосном воздействии.

Методы исследования

Измерения проводятся по нелинейно-инерционной модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка. Для инженерного представ-

ления модели используется метод эквивалентных схем. Для измерения характеристических функций нелинейно-инерционной модели используются общеизвестные законы Кирхгофа, закон Ома, численные математические методы нахождения интегралов и т.д.

Достоверность основных результатов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их совпадением с теоретическими расчетами.

Область исследования диссертационной работы соответствует указанному в паспорте специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»:

п. 14 «Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем»;

п. 15 «Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем»;

Положения, выносимые на защиту

1. Перенос точки стробирования во времени на фронт переходной характеристики с одновременным увеличением амплитуды тестового воздействия позволяет независимо измерить характеристику нелинейной емкости и индуктивности в эквивалентной схеме объекта.

2. Добавление линейного фильтра нижних частот Гаусса на входе нелинейно-инерционной модели второго порядка позволяет уменьшить погрешность измерения характеристических функций устройства более высокого порядка, чем второй, при установлении точки стробирования на фронте переходной характеристики.

3. Нелинейные характеристики, измеренные по нелинейно-инерционной модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка, позволяют обеспечить погрешность моделирования семейства переходных характеристик в динамическом диапазоне работы устройства основной полосы частот не более 3%.

Личный вклад

Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор использовал методики проведения измерений, предложенные научным руководителем Э.В. Семеновым. Автором проведены: анализ состояния научно-технических решений, расчеты и экспериментальные исследования, разработка программного обеспечения для автоматизированного измерения нелинейных характеристик объекта по модели второго порядка. Среда автоматизированного проектирования на уровне структурной схемы Behavioural SimLab, в которой используются нелинейно-инерционные модели в виде нелинейных рекурсивных фильтров, разработана под руководством автора совместно с коллегами по лаборатории нелинейной видеоимпульсной локализации Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук и студентами кафедры радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятия ООО НПК «Тесарт» (2 акта внедрения) и АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП») (1 акт внедрения), а также использовались при выполнении следующих НИР: государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «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», проект № FWRM-2024-0001; проект №2 «Разработка контрольно-измерительной аппаратуры СВЧ-диапазона для анализа параметров материалов, монолитных интегральных схем и устройств на их основе» в рамках программы развития передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева; хозяйственного договора №177055963392230002040/1386-2024 на выполнение работ по проведению математического моделирования для радиочастотных модулей (по заказу АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», НИИПП).

Основные положения диссертационной работы апробировались на: 11 научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули» российского форума «Микроэлектроника 2025»; Всероссийской научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2025»; 81 научно-технической конференции Санкт-Петербургского научно-технического общества радиоэлектронных систем им. А.С. Попова, посвященная Дню радио.

Публикации

По результатам исследований опубликованы 9 работ: 2 статьи из перечня ВАК по специальности, 2 статьи из перечня ВАК по смежной специальности, 1 статья, индексируемая реферативными базами Web of Science и Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 доклада опубликованы в сборниках всероссийских научных конференций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список используемых источников из 84 наименований, приложение из 6 с. Объем диссертации с приложением – 134 с., в т.ч. 88 рис.

ОСНОВНОЕ 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 результатов, публикациях и внедрении.

В первом разделе проведен сравнительный обзор нелинейных поведенческих моделей для описания устройств основной полосы частот. Рассмотрены методы измерения нелинейных характеристик полупроводниковых элементов и устройств, а также приборы на их основе. Это позволило определить цели и задачи для исследования по выбранной тематике.

Во втором разделе показано, что по нелинейно-инерционной модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка не удастся точно измерить кулон-вольтовую характеристику (КВХ) устройств основной полосы частот, если установить точку стробирования на плоской вершине переходной характеристики. Поэтому был предложен метод измерения по нелинейно-инерционной модели второго порядка, заключающийся в переносе точек стробирования характеристических функций в разные моменты времени на ПХ для минимизации взаимозависимости динамических характеристик.

На примере линейной эквивалентной схемы второго порядка (рисунок 1, а), дающей выброс на плоской вершине ПХ (рисунок 2, б) был рассмотрен метод измерения характеристических функций, заключающийся в установлении точек стробирования ампер-вольтовой (АВХ) и вебер-амперной (ВБАХ) характеристик на плоской вершине ПХ, а для измерения КВХ – на фронте ПХ.

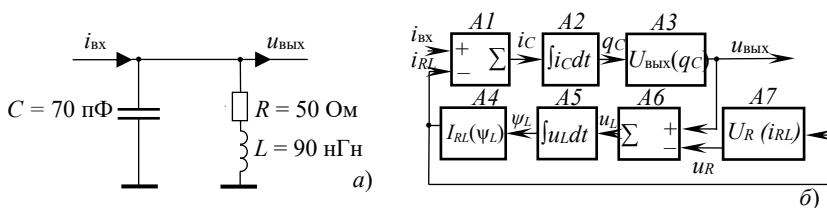


Рисунок 1 – Линейная эквивалентная схема второго порядка (а) и функциональная схема ее расчета (б)

Семейство входных токов и переходных характеристик линейной эквивалентной схемы представлены на рисунке 2.

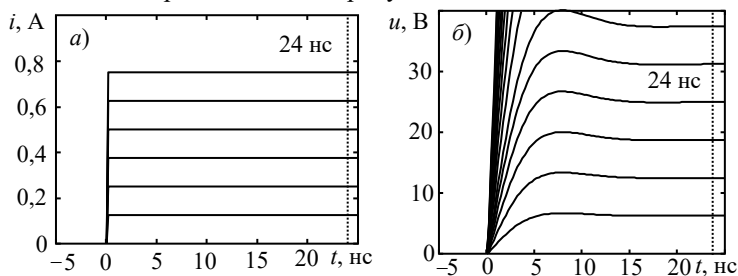


Рисунок 2 – Семейство входных токов (а) и переходных характеристик (б) линейной эквивалентной схемы второго порядка

Однозначно по ПХ, независимо от порядка используемого фильтра, можно измерить АВХ на плоской вершине, так как она не будет зависеть от реактивных элементов. Измеренная АВХ представлена на рисунке 3, на этом же рисунке отложено действительное значение.

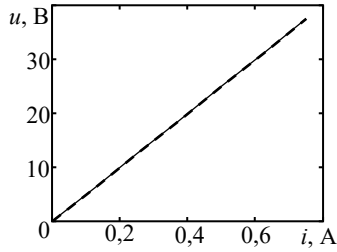


Рисунок 3 – Измеренная АВХ модели второго порядка (сплошная линия) и действительное значение для линейного фильтра второго порядка (штриховая линия)

Перенос точки стробирования КВХ на фронт ПХ обусловлен следующим обстоятельством. На рисунке 4 представлено сравнение токов и зарядов конденсатора для модели первого (представляющей собой RC-цепь) и второго порядка. В ПХ второго порядка напряжение возрастает быстрее, чем в характеристиках первого порядка и до большей величины. Поэтому вычисляемый по АВХ (без учета индуктивности, которая пока неизвестна) ток резистора также возрастает быстрее. В результате ток емкости (рисунок 4, *а*, штриховая кривая) спадает быстрее, чем для ПХ первого порядка (сплошная линия), и у него даже появляется отрицательный лепесток. Интегрируя этот ток, мы получим меньшее значение заряда по окончании переходного процесса (рисунок 4, *б*, штриховая линия), чем для ПХ первого порядка. Это соответствует появлению методической погрешности измерения емкости, поскольку действительное значение емкости в вычислительных экспериментах с ПХ первого и второго порядка остается одинаковым.

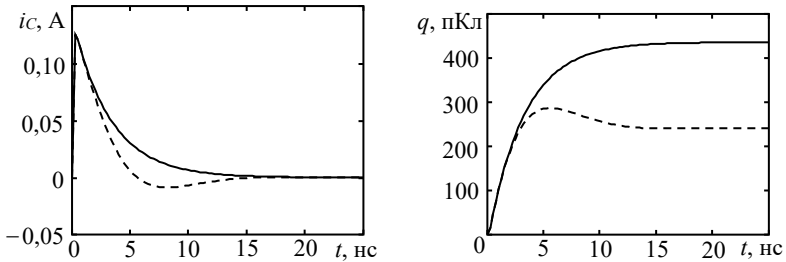


Рисунок 4 – Сравнение токов конденсатора (*а*) и зарядов (*б*) модели первого (сплошная кривая) и второго порядка (штриховая кривая)

При этом на рисунке 4, *б* можно заметить, что на начальном участке фронта ПХ (примерно до 2 нс), вне зависимости от порядка модели, заряды совпадают. Это говорит о том, что в начале фронта ПХ влияние индуктивности минимально, поэтому заряд определяется преимущественно полным входным

током. Это значит, что можно перенести точку стробирования для измерения KBX в начало переходного процесса, чтобы исключить это влияние.

Выбор точки стробирования на фронте приведет к тому, что будет охватываться не весь динамический диапазон выходных напряжений. Для того, чтобы охватить весь динамический диапазон, нужно значительно увеличить амплитуду тестового сигнала. При этом ПХ будут выходить за диапазон измерения, но только в области плоской вершины. На рисунке 5 ограничение диапазона измерений составляет 40 В.

Алгоритмически измерение KBX описывается следующими шагами:

- 1) оператор выбирается точка стробирования KBX на фронте ПХ;
- 2) выбираются амплитуды тестового воздействия так, чтобы напряжение в точке стробирования охватывало весь диапазон измерения KBX (при этом стоит отметить, что выбор точки стробирования почти в самом начале фронта переходной характеристики будет приводить к многократному увеличению амплитуды – до 100 раз и более, что для некоторых устройств может быть критично);
- 3) находится ток конденсатора i_C путем приравнивания току $i_{вх}$ на входе объекта измерения (так как предполагается, что в начале фронта переходной характеристики весь входной ток протекает только через конденсатор, то сопротивление индуктивности принимается бесконечности, то есть ток RL-цепи не протекает вообще);
- 4) ток конденсатора i_C интегрируется во времени для нахождения функции заряда конденсатора от времени q_C , на котором устанавливается точка стробирования KBX.

Для примера в качестве объекта измерения используем линейный фильтр второго порядка с известными параметрами (рисунок 1, а). Точка стробирования для измерения KBX выбирается в момент времени 1 нс (рисунок 2.13). При этом амплитуда тестового воздействия выбрана так, чтобы ПХ с наибольшей амплитудой имела напряжение в момент времени 1 нс примерно равное верхней границе диапазона измерения (если пронаблюдать эту кривую при напряжениях более 40 В, то ее амплитуда составит около 160 В).

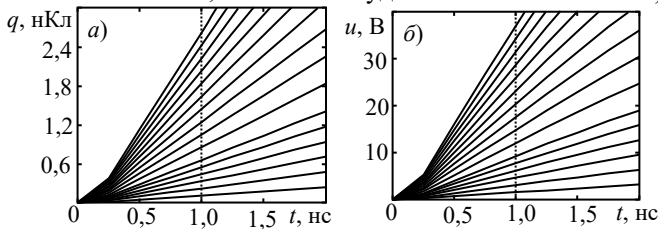


Рисунок 5 – Стробирование семейства зарядов конденсатора (а) и выходных напряжений (б) для нахождения кулон-вольтовой характеристики. Штриховая кривая – выбор точки стробирования зарядов для измерения кулон-вольтовой характеристики

Измеренная KBX представлена на рисунке 6, для сравнения также отложена действительная характеристика, наклон которой обусловлен известным значением емкости конденсатора линейного фильтра 70 пФ.

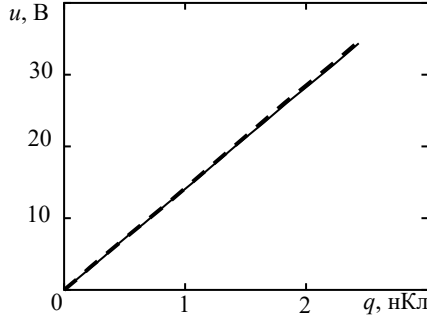


Рисунок 6 – Кулон-вольтовая характеристика (сплошная кривая) и действительная характеристика линейного фильтра второго порядка (штриховая кривая)

Погрешность измеренной по предложенному методу KBX относительно действительного значения линейной кривой на рисунке 6 не превышает 0,87%. Из этого можно сделать вывод, что перенос точки стробирования на фронт ПХ позволяет независимо от ВБАХ измерить KBX с минимальной погрешностью.

Измерение ВБАХ происходит по остаточному принципу, так как АВХ и KBX уже найдены. Измерение основывается на обратном расчетном алгоритме по функциональной схеме нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка (рисунок 1, б):

$$q_c(j) = Q[u_{\text{вых}}(j)], \quad (1)$$

$$i_c(j) = [q_c(j) - q_c(j-1)] / \Delta t, \quad (2)$$

$$i_{RL}(j) = i_{\text{вх}}(j) - i_c(j). \quad (3)$$

$$u_L(j) = u_{\text{вых}}(j) - U_R[i_{RL}(j)], \quad (4)$$

$$\psi_L(j) = \psi_L(j-1) + \Delta t[u_L(j) + u_L(j-1)]/2, \quad (5)$$

где j – номер отсчета, $Q[u_{\text{вых}}(j)]$ – интерполированная KBX, Δt – интервал дискретизации, $U_R[i_{RL}]$ – интерполированная АВХ, i_{RL} – ток RL-цепи, u_L – напряжение на индуктивности, ψ_L – магнитный поток, протекающий через индуктивность.

Рассчитанные по ПХ ток RL-цепи и магнитный поток представлены на рисунке 7. Точка стробирования выбирается на плоской вершине в тот же момент времени, что и для АВХ, то есть 24 нс.

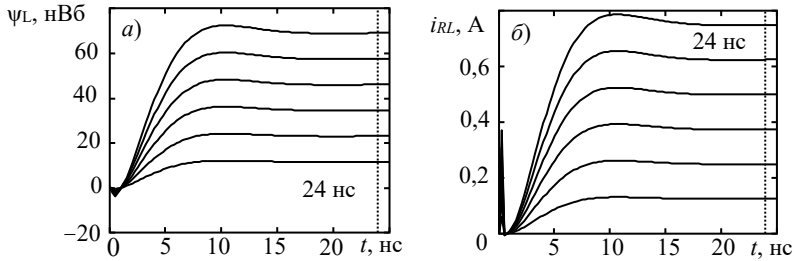


Рисунок 7 – Измеренные семейства магнитных потоков (а) и токов RL-цепи (б). Штриховые кривые – выбор точки стробирования вебер-амперной характеристики

Полученная ВБАХ представлена на рисунке 8. На этом же рисунке отложено действительное значение эквивалентной индуктивности объекта измерения ($L = 90$ нГн).

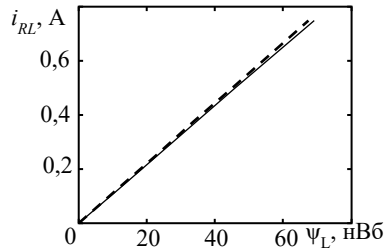


Рисунок 8 – Вебер-амперная характеристика (сплошная кривая) и действительная характеристика линейного фильтра второго порядка (штриховая кривая)

Погрешность измерения ВБАХ на рисунке 8 не превышает 2% относительно действительной характеристики. Получаемая погрешность для поведенческих моделей является удовлетворительной. Из этого можно сделать вывод, что все характеристические функции были измерены верно и с приемлемой погрешностью, а значит предложение о переносе точки стробирования на фронт переходной характеристики для измерения KBX можно использовать для практических измерений.

В третьем разделе рассматриваются два частных случая, которые позволяют уменьшить погрешность определения характеристических функций устройств и адаптировать метод для обработки реальных ПХ устройств.

В первом случае рассматривается влияние RL-цепи эквивалентной схемы нелинейного рекурсивного фильтра на результат измерения KBX. В качестве объекта измерения выбирается цифровой осциллограф National Instruments PXI-5114, измеренные ПХ, которого представлены на рисунке 9.

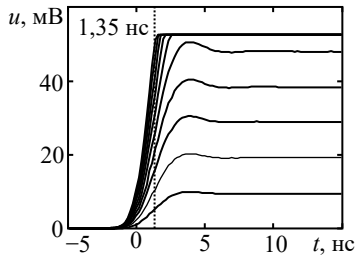


Рисунок 9 – Семейство переходных характеристик осциллографа National Instrument PXI-5114: сплошные кривые – измеренные характеристики, пунктирная кривая – точка стробирования КВХ

В отличие от раздела 2, параметры и характеристики объекта измерения заранее неизвестны. Поэтому вариационным методом были определены референсные значения (режим малого сигнала) емкости $C_0 = q/u$ (28 пФ) и индуктивности $L_0 = \psi/i$ (37 нГн) в эквивалентной схеме, при которых достигается наименьшая невязка с измеренной ПХ.

Основной задачей является оценка того, насколько сильно влияет отклонение L_0 от действительного значения на результат измерения емкости (или заряда) в схеме на рисунке 1.

Рассмотрим три случая: когда сопротивление RL-цепочки бесконечно большое, бесконечно малое и отклоняется от действительного значения на $\pm 50\%$. Удобнее оценивать отклонение от действительных значений емкости, а не заряда. Поэтому на рисунке 10 приведены зависимости расчетного значения емкости от времени (как результат деления кривой заряда на кривую выходного напряжения).

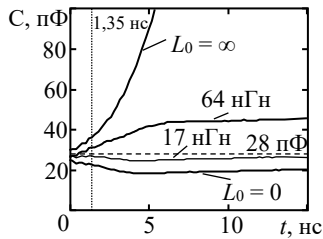


Рисунок 10 – Расчетные значения емкости как функции времени при амплитуде входного тока 0,2 мА и разных предположениях о индуктивности. Штриховая линия – референсная емкость C_0 . Пунктирная линия – точка стробирования на фронте ПХ

Из верхней и нижней кривой на рисунке 10 видно, что при стробировании на плоской вершине ПХ (7 нс и далее) отклонение измеренного значения емкости от действительного составляет $(+361/-34)\%$, что делает измерение некорректным. Из того же рисунка 10 видно, что при перемещении момента стробирования на фронт погрешность измерения существенно уменьшается. В

точке стробирования 1,35 нс для предположений $L_0 = \infty$ и $L_0 = 0$ погрешность получается соответственно (+25/–21) %. При этом уже можно говорить об измерении с определенной погрешностью, однако для ряда задач погрешность слишком велика.

Предложение для дальнейшего уменьшения погрешности измерения KBX состоит в том, чтобы определить начальное приближение для индуктивности в схеме на рисунке 1 по малосигнальной кривой.

При известной референсной индуктивности L_0 ток RL-цепи i_{RL} определяется по системе итерационных формул:

$$u_L(j) = u_{\text{вых}}(j) - U_R[i_{RL}(j-1)] \quad (6)$$

$$\psi_L(j) = \psi_L(j-1) + \Delta t[u_L(j) + u_L(j-1)]/2, \quad (7)$$

$$i_{RL}(j) = \psi_L(j) / L_0. \quad (8)$$

Далее рассчитанный ток RL-цепи подставляется в функциональную схему (рисунок 1, б) для нахождения заряда конденсатора эквивалентной схемы.

Из рисунка 10 (две средние кривые) получаем, что погрешность измерения KBX при таких предположениях об индуктивности составляет (+7/–11) %. Для нелинейности по индуктивности в пределах $\pm 30\%$ получаем погрешность измерения KBX (+4/–6) %, что является типичным для поведенческих моделей.

Теперь построим KBX в целом, выполняя стробирование при подстановке действительного значения индуктивности и при его отклонении $\pm 30\%$ в точке 1,35 нс, что дает охват полного диапазона измеряемых напряжений (рисунок 11). Методическая погрешность измерения KBX, вызванная фактором неопределенности индуктивности в эквивалентной схеме, не превышает +4/–6 %. Полученная погрешность KBX на рисунке 11 с учетом фактора неопределенности является удовлетворительной.

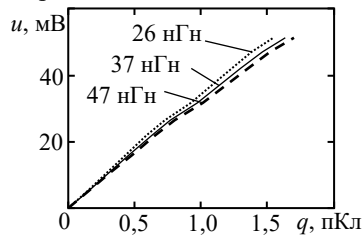


Рисунок 11 – Кулон-вольтовая характеристика осциллографа National Instruments PXI-5114 (средняя кривая) вместе с методической погрешностью измерения (верхняя и нижняя кривые)

Второй частный случай связан с тем, что наибольшая невязка модели второго порядка с измеренными ПХ наблюдается в самом начале переходного процесса. Крутизна ПХ второго порядка весьма быстро достигает максимальных значений, в то время как ПХ более высоких порядков являются сглаженными вместе с их производными.

Такая невязка не имеет большого значения, если стробирование для определения характеристических функций выполняется по окончании переходных процессов в эквивалентной схеме устройства. Однако с переносом точки стробирования на фронт ПХ в соответствии с предложенным методом, погрешность измерения характеристических функций по нелинейно-инерционной модели второго порядка оказывается в сильной зависимости от отмеченной невязки.

На рисунке 12 можно видеть, что фронт и область осцилляций аппроксимируются удовлетворительно уже фильтром второго порядка, однако начальный участок переходного процесса моделируемого устройства (примерно $-2 \dots 0$ нс) явно не соответствует примененной модели (рисунок 12, пунктирная кривая). Это обстоятельство будет вызывать существенную систематическую погрешность измерения KBX.

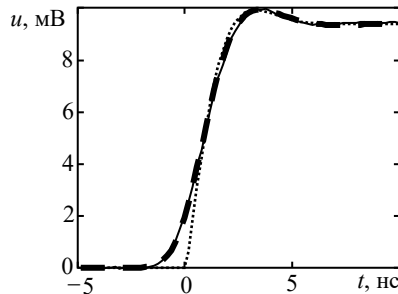


Рисунок 12 – Переходная характеристика осциллографа National Instruments PXI-5114 (сплошная кривая), фильтра второго порядка без фильтра Гаусса (пунктирная кривая) и с ним (штриховая кривая)

Предлагаемый способ моделирования ПХ объекта: сохранить второй порядок нелинейного фильтра, но добавить простой линейный фильтр, сглаживающий «излом» в начале ПХ (рисунок 12, штриховая кривая). Линейный характер этого дополнительного фильтра допустим в связи с тем, что начальный участок ПХ при любом уровне воздействия является малосигнальным. Простой характер перехода к крутому участку ПХ (без дополнительных осцилляций) указывает на то, что следует применить дополняющий фильтр с ПХ совершенно без выбросов. К таким фильтрам относится только фильтр Гаусса.

Передаточная характеристика фильтра Гаусса описывается следующим выражением:

$$H(\omega) = \exp[-(\omega \tau / 2)^2], \quad (9)$$

где τ – постоянная времени фильтра Гаусса.

При расположении фильтра Гаусса на входе нелинейного рекурсивного фильтра ток $i_{\text{вх}}^*(t)$ на входе последнего вычисляется по формуле:

$$i_{\text{BX}}^*(t) = F^{-1}\{F[i_{\text{BX}}(t)] H(\omega)\}, \quad (10)$$

где F – прямое преобразование Фурье и F^{-1} обратное преобразование, соответственно.

На рисунке 13 представлены получаемые КВХ без фильтра Гаусса (а) и с его включением на входе рекурсивного фильтра (б). Отличие КВХ от действительной КВХ емкости величиной 32 пФ (рисунок 13, а, пунктирная кривая) составило 28% без фильтра Гаусса. При включении фильтра Гаусса нелинейность КВХ достаточно мала, поэтому разница с действительной кривой визуально почти незаметна (рисунок 13, б) и составляет 2%. Нелинейность измерения по вариационному методу показала нелинейность 2,2%, которая ассоциируется с динамической нелинейностью. Из этого следует, что получаемое отклонение характеризует не методическую систематическую погрешность измерения, а динамическую нелинейность устройства.

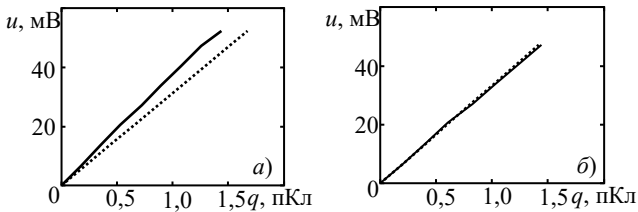


Рисунок 13 – Кулон-вольтные характеристики без фильтра Гаусса на входе модели (а) и с подключенным фильтром Гаусса (б).

Пунктирные кривые изображают характеристики линейной модели

По остаточному принципу находится ВБАХ (рисунок 14). Отличие ВБАХ объекта от ВБАХ линейной индуктивности величиной 35 нГн (рисунок 14, а, пунктирная кривая) без фильтра Гаусса весьма велико и достигает 27%. При включении фильтра Гаусса нелинейность ВБАХ в области больших сигналов достигает 1,7%. Данная величина также сопоставима с величиной нелинейности для этого же объекта, определенной вариационным методом. Это указывает на то, что оставшаяся на рисунке 14, б нелинейность в основном характеризует нелинейность объекта измерения.

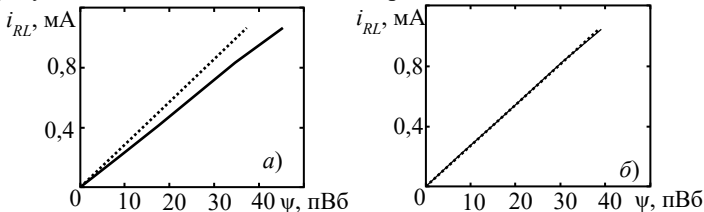


Рисунок 14 – Вебер-амперные характеристики без фильтра Гаусса на входе (а) и с подключенным фильтром Гаусса (б).

Пунктирные кривые изображают характеристики линейной модели

В четвертом разделе рассматриваются практические приложения к измерению и моделированию устройств основной полосы частот.

Для того, чтобы убедиться в адекватности метода измерения, необходимо апробировать его на устройстве с известными параметрами. Для этого можно использовать меру нелинейности (рисунок 15). На рисунке 15 штриховой линией обозначена схема, воспроизводящая осциллирующую переходную характеристику. Измерение параметров такой меры позволит оценить методическую и инструментальную погрешность, особенно важную при использовании оборудования для измерения нелинейных характеристик устройств основной полосы частот.

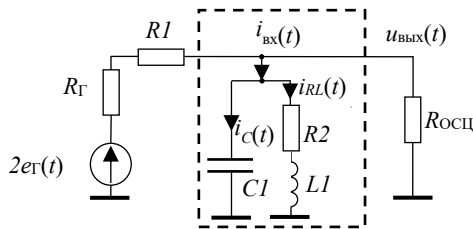


Рисунок 15 – Принципиальная схема меры нелинейности

По результатам измерения меры нелинейности можно сказать, что полученная погрешность измерения статического параметра меры составила 1,5%. Погрешности измерения динамических параметров меры относительно их действительных значений не превысили 0,5%. Отсюда следует, что наибольшее значение имеет систематическая инструментальная погрешность, на фоне которой методическая погрешность не просматривается.

В качестве слабонелинейного устройства рассматривается осциллограф National Instruments PXI-5114. Осциллограф, схож с широко используемыми в настоящее время оцифровщиками для основной полосы частот и имеет следующие характеристики: полоса частот 125 МГц, разрядность 8 бит, время нарастания переходной характеристики не более 3,5 нс. По заявлению производителя, уровень нелинейных искажений составляет не более -58 дБ (0,13%) относительно основной гармоники сигнала.

Для того, чтобы измерить нелинейные характеристики осциллографа, необходим генератор ступенчатых импульсов. Так как время нарастания переходной характеристики осциллографа не более 3,5 нс, то необходимо выбрать генератор с длительностью фронта импульса как минимум в несколько раз меньше. Это необходимо, чтобы уменьшить влияние динамической нелинейности генератора на результат измерения нелинейных характеристик осциллографа. На вход осциллографа подавались ступенчатые импульсы от 10 до 100 мВ, полученные с генератора Siglent SDG-7102A с номинальным временем нарастания 500 пс.

Ранее было показано, что методическая погрешность измерения динамических параметров линейной меры не превышает 0,5%. Измерение

нелинейных динамических характеристик показало величину нелинейности до 2%, что значительно больше возможной методической систематической погрешности измерения. Из этого можно сделать вывод, что по разработанному методу можно регистрировать нелинейность устройств основной полосы частот, которая может находиться на уровне с методической погрешностью измерения.

В качестве устройства основной полосы частот с сильной нелинейностью был выбран широкополосный малошумящий усилитель (МШУ) (рисунок 16).

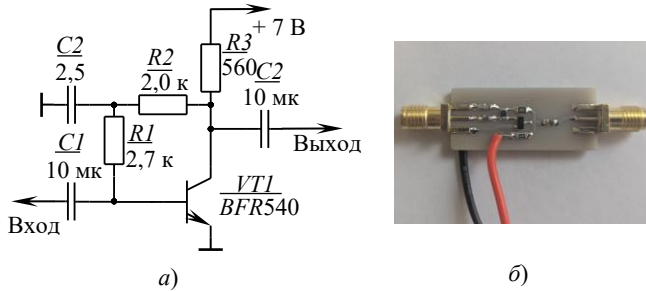


Рисунок 16 – Принципиальная схема малошумящего усилителя (а) и печатный узел малошумящего усилителя (б)

Измеренное семейство переходных характеристик малошумящего усилителя представлено на рисунке 17. На рисунке 17, б можно заметить проявляющуюся нелинейность усилителя, которая заключается в переходе в насыщение и увеличении амплитуды выброса на плоской вершине переходной характеристики с ростом амплитуды тестового сигнала. Также на рисунке 17, б можно увидеть сглаженный переход к крутому участку фронта, поэтому необходим фильтр Гаусса с постоянной времени 3,5 нс.

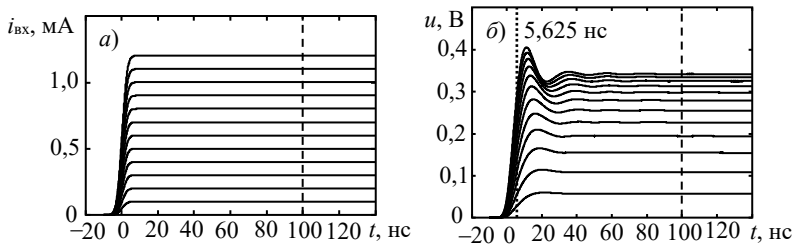


Рисунок 17 – Семейство сигналов на входе нелинейно-инерционной модели (а) и измеренных переходных характеристик (б) малошумящего усилителя. Пунктирная линия – точка стробирования KBX, штриховая линия – точка стробирования ABX

Измеренные характеристические функции усилителя показаны на рисунке 18.

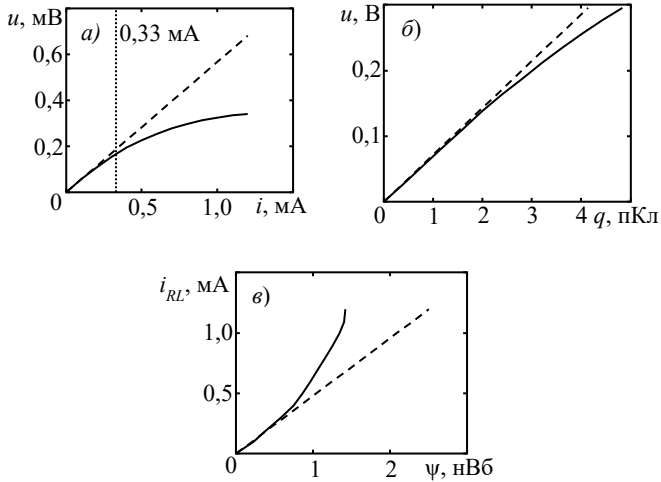


Рисунок 18 – Измеренные характеристические функции МШУ: АВХ (а), КВХ (б) и ВбАХ (в). Пунктирная линия – точка компрессии, штриховые линии – линейризация характеристик

Измеренная АВХ по своему смыслу является амплитудной характеристикой МШУ. Поэтому нелинейность АВХ можно оценить с помощью точки компрессии, которая возникает при входном токе 0,33 мА. Отклонение КВХ составляет 17%, а ВбАХ – 43%. Такое отклонение связано с нелинейностью МШУ.

Измеренные характеристические функции были подставлены в модель (рисунок 1, б) для сравнения измеренных переходных характеристик усилителя с модельными до области насыщения (рисунок 19).

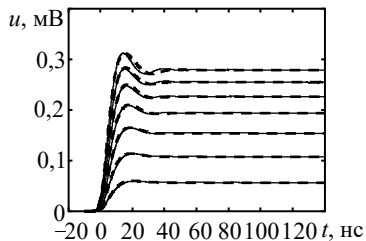


Рисунок 19 – Сравнение измеренных переходных характеристик (сплошные кривые) с модельными, полученными подстановкой измеренных характеристических функций (штриховые кривые) в модель на рисунке 1, б

Погрешность моделирования относительно измеренных переходных характеристик не превышает 3%. С учетом того, что динамическая нелинейность измеренных характеристических функций достаточно велика (до

47%), полученная погрешность моделирования удовлетворительна для поведенческих моделей.

По мимо приложений к измерению устройств, также рассмотрены практические предложения по разработке программно-аппаратного комплекса, который совмещал бы в себе как прибор нового класса для измерения характеристик устройств основной полосы частот (характериограф), так и систему автоматизированного проектирования (САПР), в которую непосредственно загружаются измеренные характеристические функции устройства для полунатурного моделирования радиотехнических систем. Появление такого программно-аппаратного комплекса, особенно его симуляционной части (САПР), даст возможность инженерам более тесно познакомиться с предлагаемой системой параметров нелинейно-инерционных моделей, более точно моделировать нелинейное поведение радиотехнических систем с применением моделей на основе измерений. По личным убеждениям автора, САПР с интеграцией характериографа позволит разработать аналог программно-аппаратных средств на основе X-параметров для моделирования в основной полосе частот.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам работы можно отметить:

- 1) проведен анализ существующих нелинейных моделей и способов измерения характеристических функций, позволяющих моделировать нелинейное поведение устройств для проектирования радиотехнических систем при различных типах тестовых воздействий;
- 2) разработан метод измерения характеристик устройств основной полосы частот (до модулятора и после демодулятора) с осциллирующими переходными характеристиками, ключевым моментом которого является разнесение точек стробирования при отыскании динамических нелинейных характеристик для независимого их измерения;
- 3) показано, что при реалистичном расположении точек стробирования при ограничении максимальной амплитуды тестовых воздействий для измерения кулон-вольтовой характеристики необходимо также учитывать начальное приближение индуктивности эквивалентной схемы;
- 4) на порядок переходной характеристики в большой степени влияет сглаженный начальный участок фронта, который будет влиять на измерение KBX на фронте переходной характеристики и который можно правильно отобразить, если установить фильтр Гаусса на входе нелинейно-инерционной модели второго порядка;
- 5) с помощью меры нелинейности, которая является устройством с очень малой нелинейностью, выявлено, что основным источником погрешности по разработанному методу является инструментальная погрешность;
- 6) на примере нескольких устройств с разной степенью нелинейности показано, что по измеренным нелинейным характеристикам, переходные характеристики моделируются с удовлетворительной погрешностью не более 3%;

7) для автоматизации измерения характеристических функций было разработано программное обеспечение.

Перспективы дальнейшей разработки темы

- 1) Разработка программно-аппаратного комплекса, совмещающего в себе прибор нового класса для характеристики устройств основной полосы частот и систему автоматизированного проектирования на уровне структурных схем. Такой комплекс имеет мировую новизну и позволит, по аналогии с известными измерителями на основе X-параметров, проводить измерения и моделирование в основной полосе частот;
- 2) разработанный метод измерения осциллирующих переходных характеристик устройств можно использовать не только на проход, но и на отражение, чтобы иметь полноценную модель устройства;
- 3) разработка метода измерения по нелинейным рекурсивным фильтрам для радиочастотных устройств, нелинейность которых уже невозможно описать с помощью традиционных X-параметров;
- 4) инверсную модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка, по аналогии с моделью первого порядка, возможно использовать для коррекции нелинейных искажений устройств.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК по специальности

1. Полторыхин К.М., Семенов Э.В. Измерение нелинейных и динамических характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики // Изв. высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28, № 4. – С. 109–118. – doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-109-118.

2. Полторыхин К.М., Семенов Э.В. Мера нелинейности и оценка погрешности измерения характеристических функций устройств основной полосы частот второго порядка // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2026. Т. 29, №1. – С. 46–52. – doi: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-46-52.

Статьи в журналах из перечня ВАК по смежной специальности

3. Семенов Э.В., Назаров М.А. Полторыхин К.М. О характеристике динамической нелинейности сверхширокополосных устройств. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 1. – doi:10.30898/1684-1719.2025.1.12.

4. Полторыхин К.М., Семенов Э.В. Моделирование нелинейных устройств основной полосы частот с переходными характеристиками высших порядков посредством нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. – URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.11>.

Статьи, индексируемые Scopus и Web of Science:

5. Semyonov E.V., Nazarov M.A., Poltorykhin K.M., Berezin A.A., Fateev A.V. Features and behavioral modeling of ultra-wideband signals nonlinear scattering by small-sized electronic devices // IEEE Transactions on Radar Systems. – 2025. – vol. 3. – P. 843–851. doi: 10.1109/TRS.2025.3575462.

Сборники всероссийских и международных конференций:

6. **Полторыхин К.М.**, Семенов Э.В., Безрукова И.В. Моделирование распространения и нелинейного рассеяния сверхширокополосного сигнала малогабаритным объектом на уровне структурной схемы // Излучение и рассеяние электромагнитных волн : материалы всероссийской научной конференции. Дивноморское, 23–27 июня 2025 г. – 7 с.

7. **Полторыхин К.М.**, Семенов Э.В. Разработка отечественной интегрированной среды автоматизированного проектирования и измерения широкополосных устройств для радиотехнических систем // 11 научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» / форум «Микроэлектроника 2025» : сборник тезисов. Сочи, 21–27 сентября 2025. г. – М.: Техносфера, 2025. – С. 208–209.

8. Безрукова И.В., Семенов Э.В., **Полторыхин К.М.**, Градов И.А. Амплитудная характеристика нелинейного рассеивателя в режиме сверхширокополосного сигнала // 81-я научно техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова. – 2026. URL: https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2026/sbornik-novyj/2_bezrukova_amplitudnaya.pdf

Результаты интеллектуальной деятельности:

9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2026612839 РФ. Программа характеристики устройств основной полосы частот по измеренным переходным характеристикам / **Полторыхин К.М.**, Семенов Э.В.; заявл. 29.12.2025; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 30.01.2026.