

На правах рукописи



Долинина Анастасия Александровна

**ПОНИЖЕНИЕ ПОРЯДКА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
АНАЛОГОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность: 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2018

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника и системы управления» в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Научный руководитель: **Ланцов Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой вычислительной техники
и систем управления ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых»

Официальные оппоненты: **Сарьян Вильям Карпович**
академик НАН РА, доктор технических наук,
профессор, руководитель научного центра ФГУП
«Научно-исследовательский институт радио», г.
Москва.

Лобачев Глеб Александрович
Кандидат технических наук, «СТЦ –
Специальный технологический центр», г. Санкт-
Петербург.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 12 сентября 2018 года в 14:00 в ауд. 301-3 на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп.3, ВлГУ, РТ и РС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан « 2 » июля 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, РТ и РС, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Развитие радиоэлектронных средств, освоение новых частотных диапазонов и способов извлечения информации приводят к росту сложности радиотехнических систем (РТС), при этом требования к ним и процессам их проектирования повышаются. Вместе с тем, сроки проектирования РТС постоянно увеличиваются с повышением общей сложности систем. Сокращение сроков проектирования РТС является одной из актуальнейших задач.

Проектирование систем требует выполнения моделирования при большом числе изменяемых параметров как самой системы, так и параметров тестовых сигналов. Сократить общие сроки проектирования возможно путем применения современных методов быстрого и точного моделирования.

Одной из самых сложных для проектирования и определяющей основные параметры и характеристики РТС является аналоговая часть, представленная аналоговыми частями радиотехнических устройств (РТУ). Особенностью проектирования аналоговой части является использование математической модели, размерность которой, особенно при учете всех паразитных элементов, достигает сотен тысяч уравнений (переменных состояний). При этом, моделирование даже одного проектного варианта аналоговой части требует больших вычислительных затрат. Таким образом, продолжительность процесса моделирования может оказаться чрезмерной для целей проектирования. В этой связи необходима разработка новых эффективных алгоритмов для моделирования аналоговой части РТУ. Необходимость разработки эффективных алгоритмов моделирования тем более актуальна, так как в процессе проектирования приходится моделировать (выполнять прогон модели) сотни и тысячи раз.

Многообещающими в аспекте эффективности методами моделирования являются методы на основе подходов понижения порядка моделей (методы сокращения размерностей, в зарубежной литературе – Model Order Reduction (MOR)). В настоящее время существуют эффективные подходы, позволяющие получить модели сокращенной размерности линейных РТУ. При этом, понижение порядка математических моделей нелинейной аналоговой части РТУ является существенно более сложной задачей и не имеет в настоящий момент полноценных решений. Современные попытки получения моделей сокращенной размерности зачастую не являются эффективными, так как требуют больших вычислительных затрат. По этим причинам необходимы дальнейшие исследования, направленные на совершенствование существующих и разработку новых методов моделирования аналоговой части РТУ на основе подходов понижения порядка моделей.

Таким образом, развитие методов моделирования на основе подходов понижения порядка моделей представляет актуальную научно-техническую задачу, решение которой позволит повысить качество разработки РТУ и РТС, уменьшить сроки и стоимость их проектирования.

В диссертационной работе предложены новые модифицированные методы и алгоритмы моделирования для нелинейных аналоговых частей РТУ. Предложенные модифицированные методы MOR позволяют существенно снизить размерность уравнений модели при допустимом уровне ошибки, получить регулярный метод построения моделей сокращенной размерности РТУ для последующего их многократного применения при проектировании.

Объект исследования – методы моделирования аналоговой части радиотехнических устройств.

Предмет исследования – применение методов и алгоритмов понижения порядка моделей при моделировании аналоговой части радиотехнических устройств.

Цель работы – разработка эффективных методов понижения порядка уравнений моделей для сокращения сроков проектирования аналоговых радиотехнических устройств. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Анализ состояния в области проектирования и методов моделирования аналоговой части радиотехнических устройств.

2. Разработка модификаций методов, позволяющих повысить эффективность применения методов понижения порядка моделей при проектировании нелинейной аналоговой части радиотехнических устройств.

3. Реализация и исследование методов понижения порядка моделей линейных и нелинейных аналоговых частей радиотехнических устройств.

4. Исследование свойств, разработанных (реализованных) методов на примерах моделирования схем радиотехнических устройств.

Новые научные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Выполнено экспериментальное сравнение основных методов понижения порядка моделей линейных радиотехнических устройств (метода моментов, метода на основе сингулярного разложения и метода на основе усеченной сбалансированной реализации) для дальнейшего их использования при понижении порядка моделей схем, имеющих нелинейные свойства. Выполнено экспериментальное сравнение кусочно-аппроксимационных подходов понижения порядка моделей нелинейной аналоговой части радиотехнических устройств первого и второго порядка для дальнейшего их использования при понижении порядка моделей схем.

2. Разработан новый алгоритм отбора точек пространства переменных состояния, позволяющий повысить вычислительную

эффективность моделей сокращенной размерности аналоговой части радиотехнических устройств.

3. Разработан новый модифицированный проекционный метод, позволяющий повысить точность моделей сокращенной размерности радиотехнических устройств.

Практическая значимость исследования обоснована следующим:

1. Применение сочетания разработанных модифицированных методов и алгоритмов дает возможность формирования моделей сокращенной размерности радиотехнических устройств, обладающих высокими показателями в аспектах использования вычислительных ресурсов и точности.

2. Создано приложение в среде Matlab, формирующее модели сокращенной размерности линейных и нелинейных, в том числе с большим числом выводов, радиотехнических устройств.

3. Выполнены исследования подходов понижения порядка линейных и нелинейных радиотехнических устройств на тестовых примерах.

4. Выполнено исследование применения методов понижения порядка моделей с применением разработанных алгоритмов и модифицированных методов для нелинейных радиотехнических устройств на тестовых примерах. Для ряда тестов показано ускорение до двух-трех порядков для линейных и нелинейных моделей, при допустимом уровне ошибки.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач были использованы элементы теории матриц, теоретические основы радиотехники, теории линейных стационарных систем, теории управления и теории систем, теории цепей и сигналов, функционального анализа, системного анализа, методов математической статистики, численных методов, математического моделирования, сингулярное разложение, подпространства Крылова, грамианы управляемости и наблюдаемости системы, представление математической модели радиотехнического устройства в пространстве состояний, модель линейной стационарной системы, модель нелинейной системы.

Пояснительная записка оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011. Данная работа относится к научно-исследовательской профессиональной деятельности.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Выполнено исследование и отбор существующих алгоритмов понижения порядка для линейных устройств, позволившего наиболее эффективно реализовать алгоритмы понижения порядка моделей для нелинейных схем.

2. Разработан алгоритм эффективного отбора точек, позволивший учитывать только влияющие на результат точки линеаризации и выполнять

часть расчетов один раз на этапе подготовки модели сокращенной размерности устройства, что позволило сократить вычислительные затраты при моделировании.

3. Разработан новый модифицированный проекционный метод, позволивший достичь большей детализации динамического поведения в локальных участках пространства состояний устройства, что позволило увеличить точность моделирования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что:

1. Для экспериментальных работ результаты измерений получены с использованием лицензионного программного обеспечения (Matlab, Simulink, Simscape).

2. Результаты моделирования, полученные в Matlab для моделей исходных устройств, сверялись с результатами моделирования, полученными в системах Advanced Design System (ADS), National Instruments Applied Wave Research (AWR) Design Environment и Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite.

3. Теория построена на известных и проверяемых данных и согласуется с опубликованными экспериментальными результатами по теме диссертации и смежным отраслям в изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science.

4. Предложенные модифицированные методы и алгоритмы базируются на основе существующих подходов в области понижения порядка моделей.

5. Используются современные методики сбора и обработки информации с использованием средств вычислительной техники.

Апробация результатов. Работа по теме диссертации проводилась в рамках:

- НИР № ГБ-922/14, ГБ-1048/16, ГБ-1087/17 на кафедре Вычислительной техники и систем управления Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых;

- в рамках гранта (№ 8.755.2016/ДААД) DAAD и Министерства образования и науки Российской Федерации на выполнение проекта по теме “Макромоделирование электронных схем на основе методов понижения порядка моделей” в Берлинском техническом университете (Technische Universität Berlin) на факультете Вычислительной техники и микроэлектроники (Computer Engineering and Microelectronics) на кафедре Проектирования цифро-аналоговых схем (Mixed Signal Circuit Design);

- в рамках договора о сотрудничестве European Network on High Performance and Embedded Architecture and Compilation (HiPEAC) по теме: “Fast points selection with piecewise local projections approach for automatic macromodel creation”. Исследование проводилось в Берлинском техническом университете (Technische Universität Berlin) на факультете

Вычислительной техники и микроэлектроники (Computer Engineering and Microelectronics) на кафедре Архитектуры встроенных систем (Embedded Systems Architecture) (договор №Н2020-ICT-2015-687698);

- так же получен грант на продолжение исследований (№8.12723.2018/12.2) DAAD и Министерства образования и науки Российской Федерации на выполнение проекта по теме “Совершенствование подходов макромоделирования, основанных на методах понижения порядка моделей” в Берлинском техническом университете (Technische Universität Berlin) на кафедре Архитектуры встроенных систем (Embedded Systems Architecture);

- полученные результаты исследований в виде методик и программного обеспечения внедрены в учебный процесс кафедры Вычислительной техники и систем управления Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на 16 международных и всероссийских семинарах и конференциях.

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа. Из них две публикации реферируются в базе данных Scopus и занесены в базу данных Web of Science, один доклад опубликован в материалах немецкой конференции, 6 занесено в РИНЦ, 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в сборниках научных трудов, 9 тезисов докладов в трудах Международных конференций и семинаров, 4 всероссийских и 3 внутриуниверситетских конференций. На 2-х внутривузовских конференциях доклад был отмечен дипломом первой степени. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации - 175 страниц, в том числе - 160 страниц основного текста, 14 страниц списка литературы (124 наименований). Диссертация содержит 81 рисунок и 3 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя описание актуальности темы исследования, степень ее разработанности, цели и задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимости работы, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

В первой главе диссертации приводится обзор состояния области проектирования и методов моделирования аналоговой части РТУ, состояния в области методов понижения порядка моделей. Описываются причины, сдерживающие темпы развития разработки радиоэлектронных средств. Одной из основных причин является недостаточная

экономичность и эффективность применяемых при проектировании методов моделирования в условиях существенно возросшей сложности аналоговой части РТУ. Решением отмеченной проблемы может служить разработка эффективных методов моделирования с использованием методов понижения порядка моделей.

В главе описываются основные методы понижения порядка линейных и нелинейных систем. Показано, что для линейных систем существует две основные практики построения моделей меньшего порядка – это использование проекции в пространстве состояний или применением аппроксимации передаточных функций системы. В главе рассмотрены основные методы понижения порядка линейных систем.

Подходы к понижению порядка нелинейных систем основываются на сокращении размерности математической модели применением проецирования и аппроксимации нелинейных свойств исходной системы функциями, имеющими меньшую сложность при расчёте. В главе рассмотрены кусочно-аппроксимационные методы (1) и методы, основанные на рядах Вольтерра (2) для нелинейных моделей радиотехнических устройств.

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \sum_{i=1}^m w_i(z) (\hat{A}_i z_i + \hat{f}(z_i) + \hat{B}_i u), \\ y &= \sum_{i=1}^m w_i(z) (\hat{C}_i z + D_i u), \end{aligned} \quad (1)$$

где: $w_i(z)$ – весовая функция, $x = Uz$, $\hat{A}_i = U^T A_i U$, $\hat{f}(z) = U^T f(Uz_i)$, $\hat{B}_i = U^T B_i$, $\hat{C}_i = C_i U$ – продукты проецирования i -й линеаризованной модели.

$$\hat{C} \frac{dz}{dt} = \hat{G}_1 z + \hat{G}_2 z \otimes z + \hat{G}_3 z \otimes z \otimes z + \hat{B} u \quad (2)$$

$$y = \hat{C} z + Du,$$

где: $x = Uz$, $\hat{C} = CU$, $\hat{B} = U^T B$, $G_1 = U^T G_1 U$, $\hat{G}_2 = U^T G_2 (U \otimes U)$, $\hat{G}_3 = U^T G_3 (U \otimes U \otimes U)$, \hat{G}_2 – матрица Гессе, \hat{G}_3 – матрица частных производных третьего порядка, \otimes – произведение Кронекера.

Показано, что известные реализации понижения порядка нелинейных систем не являются эффективными и получаемые модели сокращенной размерности не приводят к выигрышу по времени, точность результатов при их применении не является достаточной для целей проектирования. В главе ставится задача по совершенствованию существующих и разработке более эффективных методов автоматического получения моделей сокращенной размерности для РТУ.

Во второй главе определено, что причиной недостаточной эффективности кусочно-аппроксимационных методов являются большие вычислительные затраты при вычислении весовых функций. При этом, весовые функции определяются в соответствии с методом обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting Interpolation, IDW, метод Шепарда (Shepard's method)):

$$w_i(x) = \frac{\exp\left(\frac{-\beta\|x-x_i\|}{\min_k\|x-x_k\|}\right)}{\sum_j \exp\left(\frac{-\beta\|x-x_j\|}{\min_k\|x-x_k\|}\right)}, \quad (3)$$

где: $w_i(x)$ – весовая функция, $\|x - x_i\|$ - расстояние между позицией точки в пространстве переменных состояний устройства и позицией i -й точки линеаризации, $\min_k\|x - x_k\|$ – расстояние между точкой текущего состояния и ближайшей точкой линеаризации. В главе определено, что высокий уровень вычислительных затрат связан с необходимостью многократных вычислений расстояний между точками в пространстве состояний.

При использовании IDW весовые функции в (1) и (2) быстро уменьшаются с увеличением расстояния и наибольшее влияние на вычисляемые значения оказывают соседние с точкой состояния точки линеаризации. Учитывая это, целесообразно пренебречь влиянием точек, которые находятся далеко от точки текущего состояния и отказаться от вычисления весовых функций для них.

Для этого предложен новый алгоритм определения ближайшего окружения точки текущего состояния (под названием алгоритм эффективного отбора точек) на основе использования матрицы дистанций, для снижения вычислительных затрат на основе соотношения:

$$\|x - x_i\| \geq \left\| \|d_{ij} - \|x - x_j\| \right\|, \quad (4)$$

где: j – точка линеаризации (ближайшая на предыдущем шаге интегрирования), d_{ij} – элемент матрицы дистанций.

Применение предложенного алгоритма существенно снижает вычислительные затраты при использовании моделей сокращенной размерности за счет того, что уменьшается количество точек, для которых вычисляются весовые функции, часть вычислительных затрат вынесена на этап подготовки модели и выполняется один раз, при формировании матрицы дистанций. Кроме этого, при анализе во временной области смещение точки текущего состояния от шага к шагу интегрирования существенно меньше дистанций между точками линеаризации, использование точки j с предыдущего шага обеспечивает минимальность набора точек окружения на текущем шаге интегрирования.

В главе показано, что результаты применения кусочно-аппроксимационных методов имеют значительную погрешность. Причиной этого является проецирование динамического диапазона пространства состояний модели устройства и отбрасывание информации по переменным состояниям, влияние которых ничтожно в пределах выбранной нормы. Однако, при этом, может быть потеряна существенная в отдельных участках пространства состояний информация.

Для повышения точности кусочно-аппроксимационных подходов в главе предложен модифицированный проекционный метод. Метод

использует проекционные матрицы $U_l^{J,l \in J}$, построенные на участках траектории (локальные проекции). Общая система уравнений формируется посредством общего проекционного базиса U (глобальной проекции траектории).

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{dt} &= \sum_{l=1}^L w_l(\bar{x}) \left(U^T U_l^{J,l \in J} A_l^{J,l \in J*} (U_l^{J,l \in J})^T U \bar{x} + U^T U_l^{J,l \in J} f_l^{J,l \in J*}(x_l^*) + \right. \\ &\quad \left. + U^T U_l^{J,l \in J} B_l^{J*} u \right), \\ y &= \sum_{l=1}^L w_l(\bar{x}) (C_l U \bar{x} + D_l u). \end{aligned} \quad (5)$$

Применение предложенного метода повышает точность получаемых моделей за счет использования информации о существенных переменных для всего динамического диапазона модели.

В третьей главе описано программное обеспечение, реализующее разработанные методы и алгоритмы. Реализация программного обеспечения (ПО) выполнена в среде Matlab. ПО осуществляет формирование моделей сокращенной размерности, моделирование исходной и полученной моделей, сравнение результатов моделирования для тестовых входных сигналов. ПО реализовано в виде трех независимых программных модулей. Первый предназначен для формирования моделей сокращенной размерности линейных систем на основе метода моментов, сингулярного разложения и усеченной сбалансированной реализации. Второй программный модуль предназначен для формирования моделей на основе кусочно-линейной аппроксимации. Третий модуль формирует модели на основе кусочно-нелинейной аппроксимации с использованием полиномов Вольтерра второй степени. Второй и третий модули используют предложенные в работе алгоритм эффективного отбора точек и модифицированный проекционный метод на основе локальных проекций.

Схемы устройств для формирования моделей сокращенной размерности представляются в системе моделирования Matlab Simulink с использованием компонентов библиотеки физических моделей Simscape. Обеспечена возможность использования произвольных моделей компонентов, описанных на языке представления физических моделей Simscape.

Для аккумуляции частных свойств и объединения частных траекторий, полученных на шагах многовариантного расчета, при формировании модели сокращенной размерности также используется предложенный модифицированный проекционный метод на основе локальных проекций.

В четвертой главе приведены результаты применения понижения порядка моделей линейных аналоговых частей радиотехнических устройств, сравнения основных методов понижения порядка линейных моделей, понижения порядка моделей с большим количеством выводов. Сравнение основных методов, использующихся в целях аппроксимации математических моделей схем линейных устройств, произведено на

тестовой схеме, состоящей из микрополосковых линий. В результате сравнения показано, что метод на основе сингулярного разложения наиболее предпочтителен для применения по показателям адекватности и производительности, при условии контроля устойчивости получаемых результатов.

В результате многовариантного анализа тестовой схемы нелинейной RCD линии показана эффективность алгоритма отбора точек при применении в (3). На рисунке 1 приведен график регрессии отношения длительности выполнения шага интегрирования с предложенным алгоритмом ($T_{step(новый)}$) к длительности шага при общепринятом способе определения весовых функций ($T_{step(основной)}$) в зависимости от порядка сокращенной модели и числа точек линеаризации. Эффективность алгоритма тем выше, чем больше порядок сокращенной модели и число точек линеаризации.

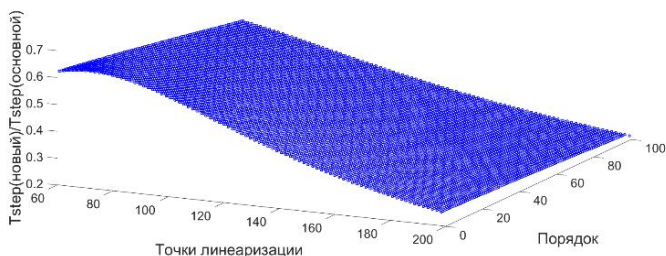


Рисунок 1 – Отношение регрессий базового (основного) алгоритма и предложенного алгоритма

На рисунке 2 представлено отношение регрессий максимального значения относительной ошибки моделирования тестовой RCD цепи с применением локальных проекций (модифицированного проекционного метода - (5)) (Елок.проект) и общей проекции (основного проекционного метода - (1)) (Еобщ.проект) в зависимости от размерности и количества точек линеаризации, полученных при многовариантном расчете.

Рисунки показывают, что применение предложенных методов и алгоритмов существенно уменьшает ошибку моделирования и время моделирования, при соответствующих значениях количества точек линеаризации и порядка модели сокращенной размерности для тестовой схемы.

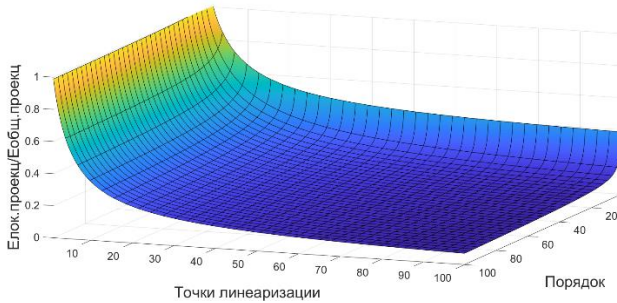


Рисунок 2 - Отношение регрессий максимального значения относительной ошибки моделирования тестовой RCD цепи с применением локальных проекций и общей проекции

Для проверки применимости предложенных методов и алгоритмов выполнено формирование моделей сокращенной размерности ряда компонентов аналоговой части РТУ (смесителя, компаратора на операционном усилителе). Ниже приводится результаты применения модели сокращенной размерности на мосту Ланге. На рисунке 3 приведена схема смесителя в National Instruments Applied Wave Research Design Environment.

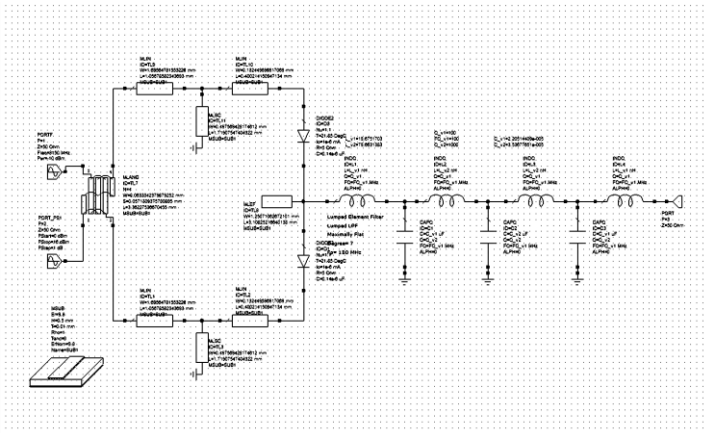


Рисунок 3 – Схема смесителя в National Instruments Applied Wave Research Design Environment

Схема смесителя оптимизирована средствами National Instruments Applied Wave Research Design Environment, перенесена в Matlab Simulink (рисунок 4) и использована для формирования модели сокращенной размерности. Для представления в Simulink моста Ланге и режекторных фильтров использован блок S-parameters библиотеки RF Blockset Simulink

и файлы с рассчитанными в NI AWR Design Environment S-параметрами компонентов в формате Touchstone.

Модели диодов, резисторов, емкостей и индуктивностей использованы из библиотеки физического моделирования Simscape Electronics Simulink.

В связи с тем, что при построении модели сокращенной размерности описанным выше подходом необходимы значения переменных состояния, диодные секции в Simulink были портированы в виде эквивалентных схем, сформированных в формате Berkeley Spice.

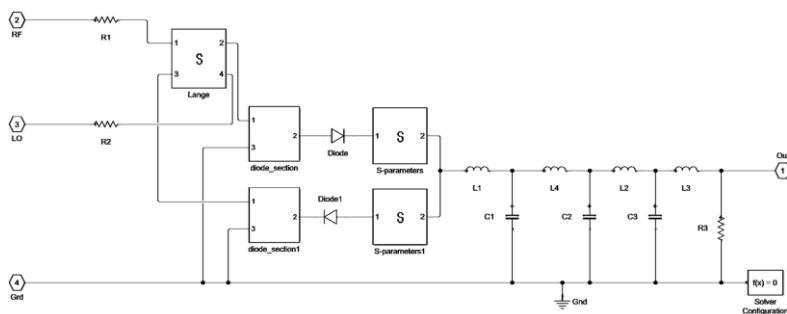


Рисунок 4 - Полная модель смесителя в Simulink

Результат расчета спектра на выходе исходной модели и модели сокращенной размерности приведены на рисунках 5 и 6. Параметры сигналов: частота гетеродина 8.3 ГГц, мощность гетеродина 9дБм, частота входного сигнала 8.15 ГГц, мощность -10 дБм.

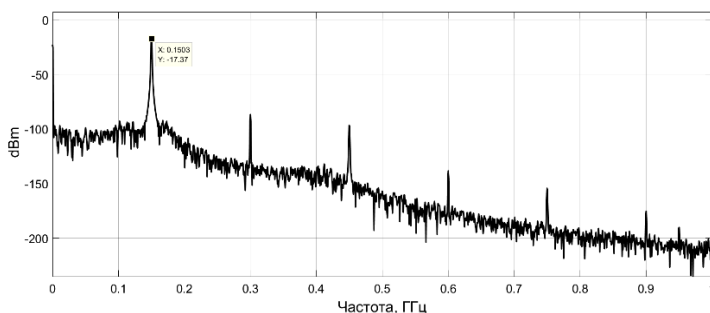


Рисунок 5 – Спектр на выходе смесителя

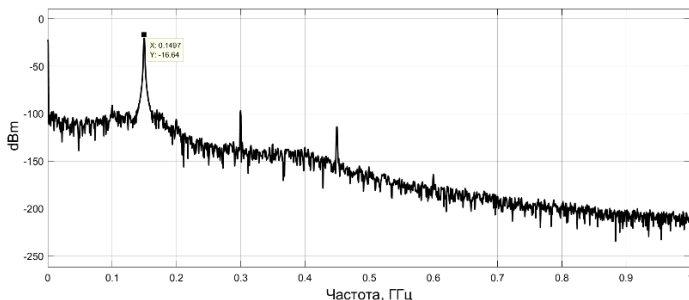


Рисунок 6 - Низкочастотная часть спектра сигнала на выходе модели сокращенной размерности

Отличие рассчитанного значения мощности сигнала разностной частоты на выходе смесителя для модели сокращенной размерности и полной модели не превышает 1дБ.

Эффективность предложенных алгоритмов подтверждается результатами вычислительных экспериментов.

Таблица 1 представляет результаты применения ряда моделей сокращенной размерности. В таблице: N_p – размерность исходной модели, T_p – время, затраченное на моделирование исходной схемы, N_y – размерность модели сокращенной размерности, T_y – время, затраченное на моделирование модели сокращенной размерности, T_p/T_y – величина ускорения, E – относительная ошибка модели сокращенной размерности.

Таблица 1 – Результаты применения разработанных алгоритмов

Устройство, тест	N_p	T_p, c	N_y	T_y, c	T_p/T_y	E
Сеть распространения тактовых импульсов на микрополосковых линиях	7260	611	580	7	97	1.4
RCD передаточная линия	2000	1416	8	1.2	1180	2.7
Смеситель на микрополосковых линиях, пачка импульсов ЛЧМ	433	2434	33	230	11	2.5

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Выполнен анализ состояния в области проектирования и методов моделирования аналоговой части радиотехнических устройств.

Показано, что возможности моделирования современных радиотехнических устройств являются ограниченными при

проектировании устройств, имеющих большие размерности, а также функционирующих в существенно нелинейных режимах, при воздействии на устройство сложных сигналов.

В настоящее время перспективными методами моделирования являются методы на основе подходов понижения порядка моделей.

Вместе с тем, существующие подходы и реализации понижения порядка моделей аналоговой части нелинейных устройств не являются эффективными и адекватность моделей сокращенной размерности является недостаточной для задач проектирования.

2. Выполнено экспериментальное сравнение основных методов понижения порядка моделей линейных радиотехнических устройств для дальнейшего их использования при аппроксимации нелинейных схем: метода моментов, метода на основе сингулярного разложения и на основе усеченной сбалансированной реализации. Показано, что метод на основе сингулярного разложения более предпочтителен для применения при условии контроля устойчивости получаемых результатов.

3. Выполнено экспериментальное сравнение кусочно-аппроксимационных подходов понижения порядка моделей нелинейных радиотехнических устройств для дальнейшего их использования при понижении порядка моделей схем.

4. Разработан новый алгоритм отбора точек пространства переменных состояния, позволяющий повысить эффективность применения моделей сокращенной размерности схем нелинейных радиотехнических устройств.

Разработан новый модифицированный проекционный метод, позволяющий повысить адекватность моделей сокращенной размерности схем радиотехнических устройств.

Применение сочетания разработанных модифицированных методов и алгоритмов дает возможность формирования нового типа моделей сокращенной размерности, обладающих более высокими показателями в аспектах использования вычислительных ресурсов и адекватности.

Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения в среде Matlab. Программное обеспечение осуществляет формирование моделей сокращенной размерности. Сформированные модели имеют самостоятельное значение, могут распространяться и использоваться в Simulink Matlab в качестве компонентов.

5. Выполнено экспериментальное исследование предложенных методов и алгоритмов на тестовых схемах радиотехнических устройств. Разработанные методы, алгоритмы и программные модули могут использоваться в коммерческих пакетах проектирования при использовании программных интерфейсов (API) этих пакетов для импорта структур и программных процедур моделей сокращенной размерности.

6. Предложенные в работе методы эффективно снижают время, необходимое для моделирования аналоговой части РТУ. На тестовых примерах показано ускорение до двух-трех порядков для линейных и нелинейных моделей, при допустимом уровне ошибки.

Таким образом, предложенные методы позволяют снизить сроки разработки и повысить качество проектирования аналоговой части радиотехнических устройств за счет уменьшения времени, затрачиваемого на моделирование проектных вариантов разрабатываемых объектов.

7. Предложенные методы, алгоритмы и разработанное программное обеспечение могут быть применены для моделирования процессов или устройств, которые можно описать с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений, например, в областях механики, оптики, акустики и других и, таким образом, могут служить средством создания широкого класса моделей радиоэлектронных устройств.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Долинина, А.А. Быстрый алгоритм отбора точек в кусочно-аппроксимационных методах понижения порядка моделей / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // Динамика сложных систем - XXI век. – Радиотехника. - 2017. - №2, Т. 11. – С. 49-55.

2. Долинина, А.А. Метод понижения порядка моделей на основе рядов Вольтерра / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // Динамика сложных систем - XXI век. – Радиотехника. - 2016. - №3. - С. 50-54.

3. Ланцов, В.Н. Алгоритмы макро моделирования сложных нелинейных электронных систем / В.Н. Ланцов, А.А. Долинина, А.В. Панкратов // Динамика сложных систем. – Радиотехника. - 2014. - №6, Т.8. - С. 23-29.

4. Долинина, А.А. Алгоритм моделирования нелинейных устройств на основе методов понижения порядка моделей и кусочно-линейной аппроксимации / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. - № 3. - С. 65-69.

Статьи, реферируемые в базе данных Scopus и занесенные в базу данных Web of Science

5. Dolinina, A.A. Algorithm of nearest environment determination of the current state in piecewise model order reduction / A.A. Dolinina, V.N. Lantsov, F. Gelfers // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). – Feb 2018. – pp. 204-209.

6. Dolinina, A. Macromodeling of Electronic Circuits Based on Model Order Reduction / A. Dolinina // Proceedings of the 2015 IEEE North West

Russia Section Yang Reserchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, St. Petersburg, Russia. - Feb 2015. - pp. 146-150.

Статьи, материалы немецкой конференции

7. Dolinina, A. Fast algorithm for points selection in trajectory piecewise-model order reduction / A. Dolinina, F. Gerfers, V. Lantsov // Analog Workshop 2017 - Technische Universität Berlin, Germany, Berlin. – March 2-3 2017. - p. 25.

Статьи, материалы международных конференций

8. Dolinina, A. Fast Algorithm for Points Selection in Piecewise-Approximation Methods of Model Order Reduction / A. Dolinina , F. Gerfers, V. Lantsov // Сборник материалов научного семинара стипендиатов программ «Михаил Ломоносов» и «Иммануил Кант» 2016-2017 года. -М. – 2017. - С.78-84.

9. Долинина, А.А. Алгоритм отбора точек в кусочно-аппроксимационных методах понижения порядка моделей электронных схем / А.А. Долинина // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017». – Суздаль. – 2017. - С.45-48.

10. Dolinina, A. Macromodeling of electronic circuits based on model order reduction / A. Dolinina // Orientierungseminar für Stipendiaten im Lomonosovund Kant-Programm, Germany, Bonn. – October 24-26 2016.

11. Долинина, А.А. Методы понижения порядка моделей электронных аналоговых устройств / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // 11-я международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» - ФРЭМЭ'2014, Владимир. - июль 2014. - С. 144-147.

12. Ланцов, В.Н. Макромоделирование нелинейных устройств на основе алгоритмов понижения порядка моделей / В.Н. Ланцов, А.А. Долинина, Г.И. Осипова // X международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» - ПТСПИ'2013 // Владимир. – 2013. - Т.2. - С. 32-33.

13. Ланцов, В.Н. Метод построения макромоделей нелинейных устройств на основе алгоритмов понижения порядка моделей / В.Н. Ланцов, А.А. Долинина, Г.И. Осипова // XIX Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013 // Н-Новгород. - 2013, С. 19-20.

Публикации в других научных изданиях

14. Ланцов, В.Н. Метод рядов Вольтерра для понижения порядка моделей сложных систем / В. Н. Ланцов, А.А. Долинина // Решение. – Пермский национальный исследовательский политехнический университет. - 2016. - Т.1. - С. 301-302.

15. Долинина, А.А. Понижение порядка моделей электронных устройств с использованием сингулярного разложения / А.А. Долинина // 9-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», Рязанский государственный радиотехнический университет. – ноябрь 2014. – 161- 163.

16. Долинина А.А. Понижение порядка моделей электронных устройств с использованием сингулярного разложения / А.А. Долинина // Сборник трудов научно-практической конференции в рамках Дней науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых [Электронный ресурс] // ВлГУ. – 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

17. Долинина, А.А. Методы понижения порядка моделей электронных схем и систем / А.А. Долинина, А.А. Павлов // Сборник трудов научно-практической конференции в рамках Дней науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ВлГУ. – 2013. – С. 280.

18. Долинина, А.А. Методы понижения порядка моделей устройств / А.А. Долинина // 8-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях», Рязанский государственный радиотехнический университет. – 2013. - С. 45-47.

19. Долинина, А.А. Методы понижения порядка моделей устройств / А.А. Долинина // 3-я всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники». – М.: РАРАН. – 2012. - С. 74-76.

20. Долинина, А.А. Методы понижения порядка модели устройств / А.А. Долинина // 5-я Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике – 2012». - М. – 2012. - С. 97.

21. Долинина, А.А. Алгоритмы понижения порядка модели. Сборник трудов научно-практической конференции в рамках Дней науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых [Электронный ресурс] // ВлГУ. – 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Подписано в печать .
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

