

Применение методов многоуровневого моделирования в проектировании радиочастотных устройств радиотехнических систем

В.А. Козлов, М.М. Ивойлова

ФГУП «ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»
603137, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Тропинина, 47

В настоящей работе предложен обобщенный алгоритм иерархического многоуровневого моделирования радиочастотных устройств радиотехнических систем, позволяющий методами моделирования проводить оптимизацию принципа построения радиочастотных устройств и входящих в него СВЧ-компонентов, электрических параметров радиочастотных устройств, технологических процессов изготовления СВЧ-узлов и их элементов.

Ключевые слова: радиотехнические системы, приемные и передающие устройства, многоуровневое моделирование, системный подход.

Введение

Современные тенденции в создании радиотехнических систем (РТС) СВЧ-диапазона направлены, в первую очередь, на совершенствование характеристик радиочастотных устройств (РЧУ), в состав которых, в зависимости от назначения, могут входить приемные устройства (ПУ), передающие устройства (РПДУ) или приемопередающие устройства (ППУ). Разработка подобных РТС проводится в рамках НИОКР по соответствующим техническим заданиям (ТЗ), в которых могут содержаться требования как к электрическим параметрам (рабочие частоты, выходная мощность, длительность сигнала, чувствительность, динамический диапазон и т. д.), так и к физическим параметрам, обусловленным их применением (дальность действия, среда распространения сигналов, виды отражающих поверхностей, скорость движения и высота для бортовых РТС). Наличие последних требований приводит к необходимости определения параметров излучаемых и принимаемых сигналов, используемых в качестве исходных данных при составлении частного ТЗ (ЧТЗ) на разработку РЧУ.

Практическое применение методов комплексного моделирования РЧУ, как правило, ограничено моделированием только входящих в его состав СВЧ-узлов и элементов без учета внешних воздействий и не затрагивает оптимизацию

технологических процессов их изготовления [1]. Не рассматриваются также моделирование прохождения сигналов в среде распространения, отражения от различных поверхностей, а также вопросы оптимизации РЧУ на уровне принципа построения и функциональной схемы с включением сквозного моделирования функционирования устройства в целом.

Целью настоящей работы является создание обобщенного алгоритма иерархического многоуровневого моделирования РЧУ РТС, позволяющего методами моделирования проводить оптимизацию принципа построения РЧУ и входящих в него СВЧ-компонентов, электрических параметров РЧУ, технологических процессов изготовления СВЧ-узлов и их элементов. Предлагаемый алгоритм должен допускать проведение сквозного моделирования функционирования с учетом влияния на РЧУ как внутренних факторов (собственные шумы, нестабильность электрических параметров СВЧ-узлов, разброс конструктивно-технологических и электрофизических параметров их элементов), так и внешних (помех от посторонних радиоэлектронных средств).

Работоспособность предложенного алгоритма моделирования исследована на практическом примере разработки многоканального приемного устройства (МПУ) бортового анализатора спектра сигналов (АС) параллельного типа [2].

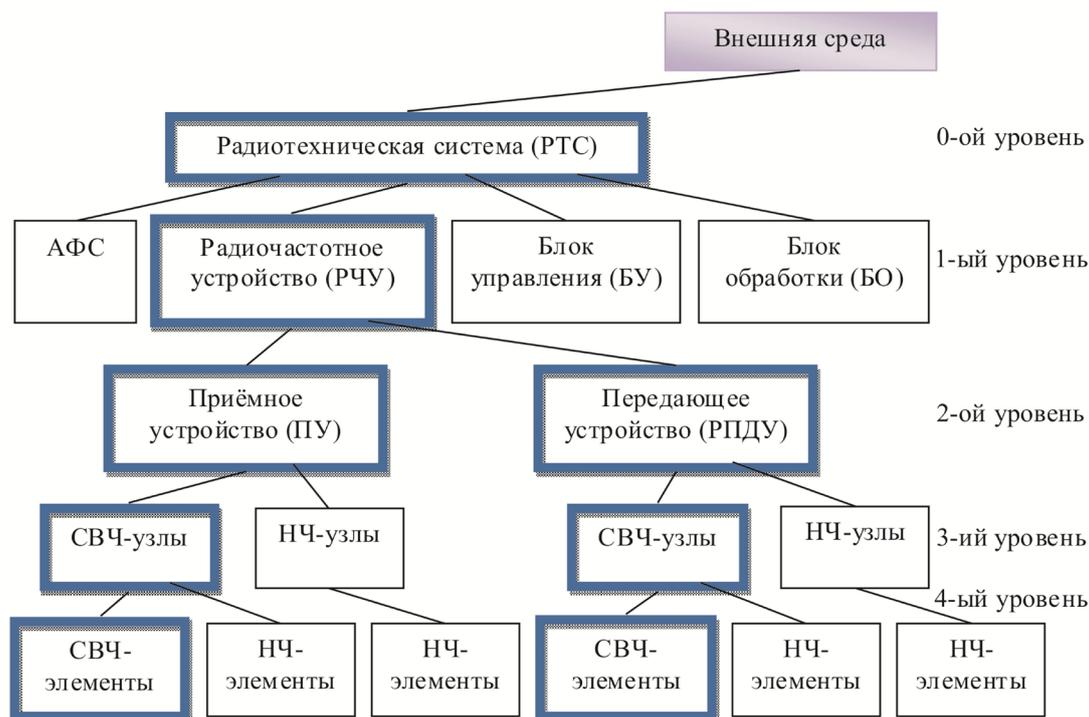


Рис. 1. Иерархия структурно-функционального деления РТС

1. Структурно-функциональное деление РТС

Для выделения объекта настоящего исследования – РЧУ в составе РТС, осуществляется структурно-функциональное деление системы, приведенное на рис. 1. Как видно на данной схеме, по отношению к РТС (0-й уровень) РЧУ, антенно-фидерная система (АФС), блоки управления (БУ) и обработки (БО) являются подсистемами (1-й уровень), причем только РЧУ имеет нижележащие уровни, на которых находятся ПУ и РПДУ (2-ой уровень) с входящими СВЧ- и НЧ-узлами (3-й уровень) и СВЧ- и НЧ- элементами (4-й уровень). Внешняя среда по отношению к РТС является надсистемой, определяющей технические требования к ней в зависимости от назначения и условий применения (условия распространения и отражения сигналов РТС, помеховая обстановка).

В структуре РТС входящие в состав РЧУ СВЧ-устройства занимают наиболее важное место, т. к. именно они определяют основные параметры РТС – частотный и динамический диапазоны, энергетический потенциал и др.

Деление структуры РТС на уровни, приведенные на рис. 1, имеет обобщенный вид и уточняется для каждого типа рассматриваемых РТС в соответствии с ее составом, назначением и конструктивным исполнением. Приведенное струк-

турно-функциональное деление РТС позволяет выделить ее основные СВЧ-устройства, узлы и элементы для оценки необходимости и возможности проведения их разработки с использованием методов моделирования.

2. Обобщенный алгоритм моделирования РЧУ РТС

Процесс иерархического многоуровневого моделирования РЧУ РТС, учитывающий структурно-функциональное деление РТС (рис. 1), может быть представлен с помощью обобщенной структурной схемы, приведенной на рис. 2. Моделирование в рамках настоящего алгоритма осуществляется в соответствии с принципом системного подхода при решении задач анализа и синтеза [1; 3], который отражается наличием обратных связей в схеме на рис. 2, т. е. в процессе моделирования решается не только задача анализа с последовательной декомпозицией объекта моделирования на составные части и оптимизацией их характеристик, но имеет место и обратный процесс уточнения характеристик целостного, синтезированного устройства с учетом практической реализации его компонентов.

Как видно на схеме алгоритма (рис. 2), на предварительном этапе разработки исходных данных в рамках внешнего проектирования определяются параметры входного сигнала РТС. При разработке модели входного сигнала могут

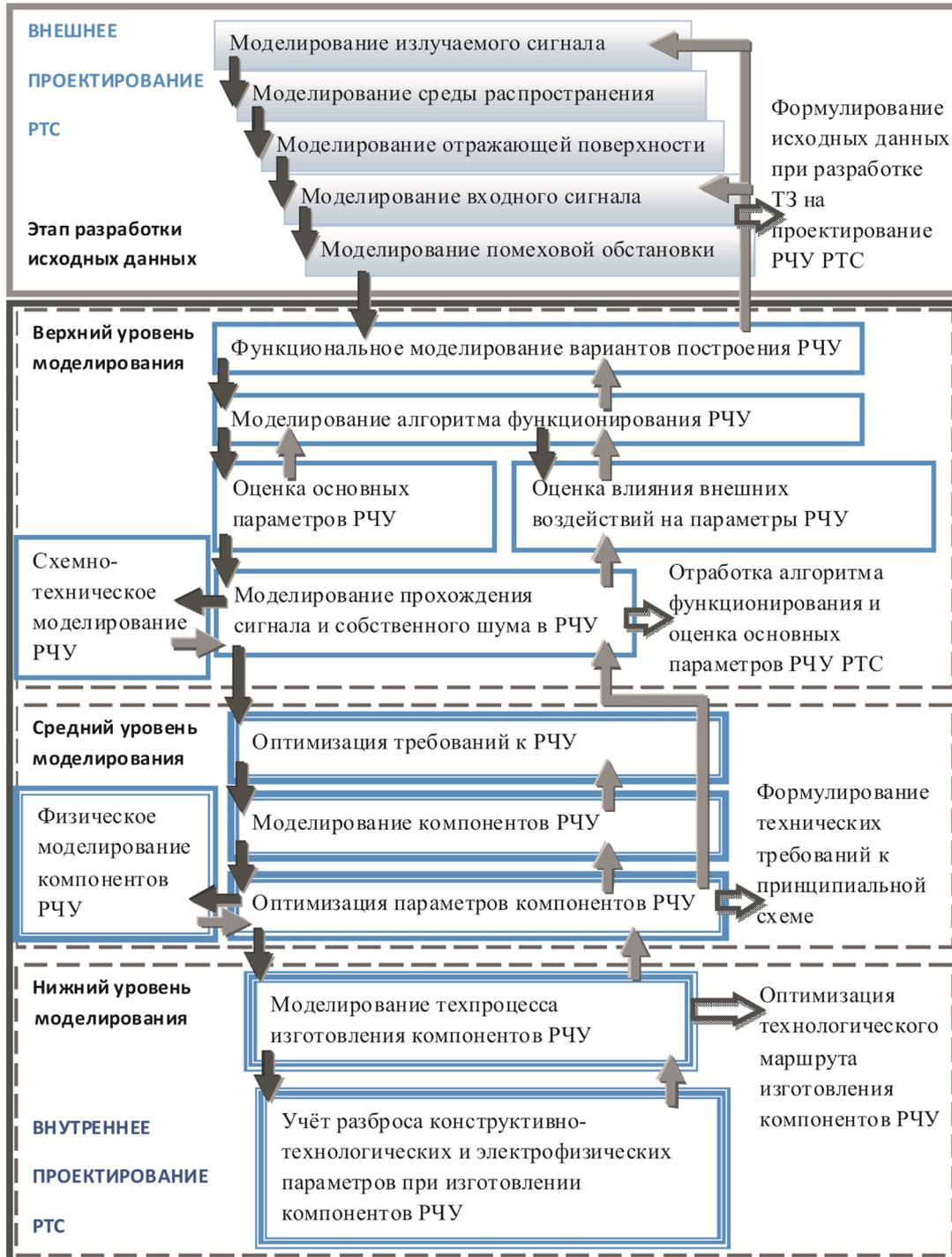


Рис. 2. Обобщенная структурная схема алгоритма моделирования РЧУ РТС

быть использованы модели излучаемого сигнала, среды распространения и предполагаемой отражающей поверхности. Параметры АФС, в соответствии со структурно-функциональным делением РТС, выступают как исходные данные. В ряде случаев актуальным является обратный процесс уточнения модели излучаемого и входного сигналов с учетом практической реализации СВЧ-компонентов ПУ и РПДУ РТС.

Также на данном уровне производится анализ внешних воздействующих факторов, необходи-

мый для дальнейшей оценки их влияния на работоспособность РЧУ, которыми могут являться электромагнитные помехи. На основе данного анализа формулируются основные технические требования к РЧУ.

В рамках внутреннего проектирования РТС моделирование РЧУ и его СВЧ-компонентов проводится на верхнем, среднем и нижнем уровнях иерархии многоуровневого моделирования.

На верхнем уровне проводится анализ возможных вариантов построения РЧУ по критер-

риям достоверности и полноты получаемой информации, простоты реализации, получения минимальных массо-габаритных характеристик и энергопотребления. Для этого анализ алгоритмов функционирования РЧУ проводится с учетом внешних воздействий в виде активных помех со стороны излучающих посторонних радиоэлектронных средств, анализ характеристик которых осуществляется на этапе разработки исходных данных. Разрабатываемые на данном уровне иерархии модели ПУ и РПДУ представляют собой укрупненные структурно-функциональные модели, отражающие характер основных преобразований входного сигнала и позволяющие проводить сквозное моделирование прохождения в РЧУ сигнала и собственного шума. Оценки оптимальных значений основных параметров устройства (временные и спектральные формы проходящих в ПУ и РПДУ сигналов, энергетические параметры РЧУ) осуществляются методами численного моделирования, являющегося неотъемлемой частью настоящего алгоритма. При этом для подтверждения достоверности разработанных моделей могут использоваться схемно-технические модели основных фрагментов РЧУ.

Результатами моделирования на данном уровне являются отработка алгоритма функционирования с учетом внешних воздействий и оценка ожидаемых значений основных параметров ПУ и РПДУ.

На среднем уровне происходит оптимизация требований к РЧУ по критерию осуществления оптимального или близкого к оптимальному приема. Разрабатываются электродинамические и математические модели СВЧ-компонентов ПУ и РПДУ, проводится оптимизация их параметров в соответствии с предъявляемыми требованиями к устройству. При необходимости достоверность разработанных моделей может быть подтверждена посредством физического моделирования. Уточненные модели ПУ и РПДУ, созданные на основе моделей их компонентов, используются для моделирования функционирования устройства на следующем витке обратной связи в рамках системного подхода. Для исследования прохождения в РЧУ сигналов и собственного шума устройства используется статистическое моделирование.

Результатом моделирования на данном уровне является формулирование технических требований к принципиальной схеме РЧУ РТС.

На нижнем уровне происходит моделирование технологических процессов изготовления СВЧ-элементов ПУ и РПДУ в опытном производстве. Для этого, на основе анализа применяемой технологии разрабатываются математические модели используемых инструментов, учитывающие особенности их применения, и поверхностей заготовок СВЧ-элементов (керамических заготовок резонаторов, подложек микроплат, ферритовых деталей вентиля и циркуляторов). Осуществляется учет разбросов электрофизических параметров материалов заготовок керамических и ферритовых деталей, а также конструктивно-технологических допусков СВЧ-микроплат, изготовленных с применением толсто пленочной или тонко пленочной технологий, что позволяет уточнить созданные на предыдущем уровне модели. Практическое применение полученных моделей дает возможность оптимизации технологического процесса изготовления СВЧ-элементов под конкретные требования, предъявляемые к характеристикам СВЧ-устройств РЧУ, что позволяет минимизировать затраты на проектирование и технологическую подготовку производства. Полученные уточненные модели СВЧ-элементов и устройств применяются для моделирования функционирования РЧУ и позволяют с большей точностью определить параметры проходящих в нем сигналов.

3. Применение обобщенного алгоритма моделирования РЧУ РТС в разработке МПУ АС параллельного типа

Разработанная на основе обобщенного алгоритма моделирования РЧУ РТС структурная схема алгоритма моделирования одного приемного канала (ПК) МПУ бортового АС, построенного на основе принципа параллельного спектрального анализа, приведена на рис. 3.

На этапе разработки исходных данных, проводимом в рамках внешнего проектирования ПК, на основе математических моделей излучаемого сигнала и среды распространения определялись параметры входного сигнала АС, размещаемого на борту ЛА [4; 5]. Также на данном этапе проводился анализ электромагнитной обстановки в области размещения АС и создавалась математическая модель помеховой обстановки [6]. На основе полученной модели входного сигнала АС, с учетом модели помеховой обстановки в области размещения АС, создавалась математическая модель входного воздействия ПК.

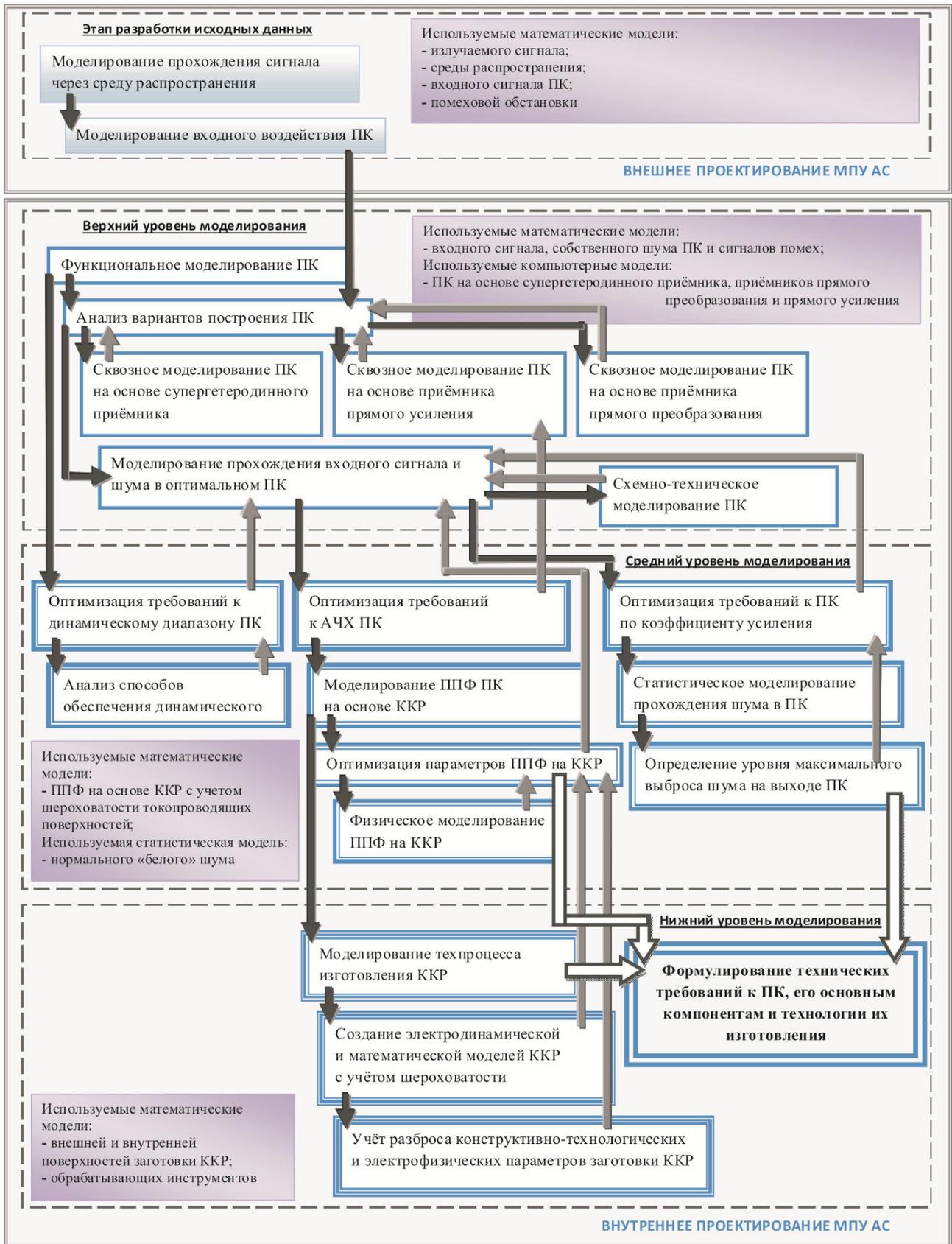


Рис. 3. Структурная схема алгоритма моделирования РК МПУ АС

Все последующее моделирование осуществлялось в рамках внутреннего проектирования ПК АС.

На верхнем уровне определялась оптимальная схема построения ПК. Для этого моделирование ПК осуществлялось в следующей последовательности:

- разрабатывались модели возможных вариантов построения ПК на основе функциональных схем супергетеродинного приемника, приемника прямого преобразования и приемника прямого усиления;

- осуществлялось сквозное моделирование работы ПК с использованием моделей вариантов его построения, входного воздействия и собственного шума;

- осуществлялся выбор оптимальной схемы построения ПК [2] путем сравнительного анализа результатов сквозного моделирования ее возможных вариантов на соответствие заданным требованиям;

- достоверность разработанной модели оптимального ПК АС подтверждалась посредством его схемно-технического моделирования.

На среднем уровне по трем направлениям его горизонтального деления, реализуя принцип дополнительности частных моделей системы [3; 7], проводилась оптимизация требований к ПК по динамическому диапазону, АЧХ ПК и коэффициенту усиления.

Оптимизация требований к динамическому диапазону ПК проводилась методом сравнительного анализа возможных способов его обеспечения [8].

Для оптимизации требований к АЧХ ПК моделирование осуществлялось в следующей последовательности:

- разрабатывались математические модели основных СВЧ-компонентов, определяющих АЧХ ПК – полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на коаксиальных керамических резонаторах (ККР) [9];

- проводилась оптимизация параметров ППФ по критериям формирования сигналов заданной длительности и формы при прохождении в ПК [2];

- достоверность разработанной модели ППФ на основе ККР подтверждалась посредством его физического моделирования.

Для исключения возможности ложного обнаружения входного сигнала при попадании в заданное приемное «окно» АС одиночных выбросов

собственного шума проводилась оптимизация требований к ПК по коэффициенту усиления. Для этого проводилось статистическое моделирование прохождения шума в ПК, по результатам которого оценивался его максимальный уровень на временном интервале приемного «окна» АС [2].

Полученные результаты оптимизации требований к ПК и его основным СВЧ-компонентам использовались, в соответствии с принципом системного подхода, при моделировании функционирования ПК на верхнем уровне моделирования в следующем цикле алгоритма.

На нижнем уровне рассматривалось влияние технологии изготовления ККР на основные характеристики ППФ ПК. Для этого моделирование проводилось в следующей последовательности:

- разрабатывались математические модели шероховатости токопроводящих поверхностей ККР на основе математических моделей обрабатываемых инструментов и результатов анализа процесса механической обработки керамических заготовок [10];

- создавались электродинамические и математические модели ККР с учетом шероховатости токопроводящих поверхностей [11].

По заданным электрическим параметрам ППФ формулировались требования к образцам ККР по шероховатости поверхностей их заготовок, проводилась оценка ожидаемого разброса параметров ППФ на ККР за счет конструктивно-технологических допусков и отклонения значения диэлектрической проницаемости керамического материала заготовок ККР от номинального значения [9]. При этом оптимизация параметров ППФ и ККР проводилась одновременно на нижнем и среднем уровнях моделирования в одном цикле.

По результатам моделирования МПУ АС формулировались технические требования к принципиальной схеме ПК АС, ее основным СВЧ-компонентам и технологии их изготовления.

Заключение

Предложен обобщенный алгоритм моделирования РЧУ РТС, построенный на базе системного подхода, применение которого может быть эффективно при решении широкого класса научных и практических задач – от проверки алгоритмов функционирования РТС в реальных условиях до определения и оптимизации пара-

метров СВЧ-компонентов РЧУ РТС. Особенностью данного алгоритма является расширение области применения методов моделирования: с одной стороны – в область формулирования исходных данных для ЧТЗ при анализе параметров входного воздействия на РТС, с другой стороны – в область разработки и использования технологических процессов при создании компонентов РТС, что существенно повышает возможности разработчиков, конструкторов и технологов.

В качестве примера применения обобщенного алгоритма моделирования рассмотрен частный алгоритм моделирования ПК АС, показавший эффективность своего практического применения при проектировании МПУ АС.

Универсальность созданного алгоритма многоуровневого моделирования обеспечивается возможностью его адаптации для РЧУ РТС различного назначения с любыми видами сигналов. При проведении работ допускается использование не всех выделенных уровней алгоритма моделирования и его структурных элементов, а только необходимых, в зависимости от решаемых задач как в процессе теоретических исследований на предварительных этапах поисковых НИР, так и на этапах прикладных НИР и ОКР при создании образцов приборов.

Список литературы

- Сердюк Г.В., Шелковников Б.Н., Шелковников А.Б. Многоуровневое моделирование приемопередающего тракта // Материалы XXII Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2012. С. 100–109.
- Применение методов моделирования в разработке многоканального анализатора спектра одиночных СШП-сигналов / А.В. Кашин [и др.] // Атомный проект. 2014. № 19. С. 68–70.
- Блауберг И.В. Проблема целостности и системный подход. М.: Эдиториал УРСС, 1997. 450 с.
- Стадник А.М., Ермаков Г.В. Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. Вып. 7. С. 1009–1016.
- Ивойлова М.М. Исследование дисперсионных искажений сигналов с широким спектром при распространении в ионосфере Земли // Сборник докладов VI Всероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». Омск, 2016. С. 195–207.
- Козлов В.А., Кунилов А.Л., Ивойлова М.М. Машинное моделирование электромагнитной совместимости СШП-шумовой РЛС и излучающих СВЧ радиоэлектронных средств // Проектирование и технология электронных средств. 2012. № 4. С. 40–42.
- Алиев Т.И. Исследование сложных систем на основе комбинированного подхода // Имитационное моделирование. Теория и практика – ИММОД-2003: сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ЦНИИТС, 2003. Т. 1. С. 50–55.
- Ивойлова М.М., Кунилов А.Л., Шишкин Д.Р. О возможности расширения динамического диапазона приемных каналов анализатора спектра параллельного типа // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Казань: КНИТУ-КАИ, 2015. С. 110–112.
- Седаков А.Ю., Светлаков Ю.А., Ивойлова М.М. Математическое моделирование в проектировании и технологии фильтров СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах // Антенны. 2016. Вып. 1(221). С. 8–17.
- Математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств / В.А. Козлов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 76–80.
- Ивойлова М.М. Модель коаксиального керамического резонатора с учетом шероховатости токоведущих поверхностей // Труды нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2. С. 29–39.

Application of multilevel modeling methods in the design of radio-frequency devices of radio-engineering systems

V.A. Kozlov, M.M. Ivoylova

In this paper, we propose a generalized algorithm for hierarchical multi-level modeling of radio-frequency devices of radio-engineering systems, which allows modeling methods to optimize the principle of radio-frequency devices constructing and its microwave components, electrical parameters of radio-frequency devices, technological processes of manufacturing microwave nodes and their elements.

Keywords: radio-engineering systems, receiving and transmitting devices, multilevel modeling, system approach.