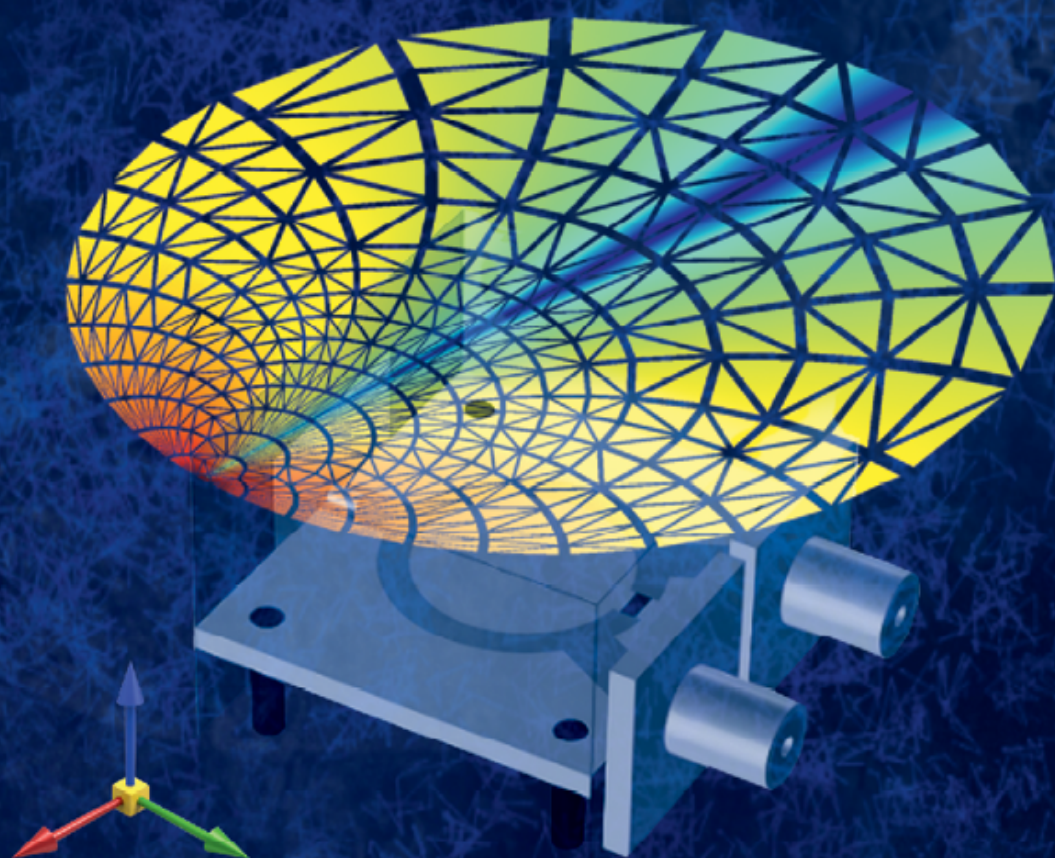


**Д.В. Лучин, А.А. Минаев, А.П. Трофимов
Д.В. Филиппов, В.В. Юдин**

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ САПР ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СВЧ УСТРОЙСТВ И АНТЕНН



Под редакцией В.В. Юдина

**Д.В. Лучин, А.А. Минаев
А.П. Трофимов, Д.В. Филиппов, В.В. Юдин**

Технологии создания САПР для разработки СВЧ устройств и антенн

Под редакцией В.В. Юдина

ООО «Слово»
Самара 2025

УДК 004.9
ББК 32.97
Т38

Т38 Технологии создания САПР для разработки СВЧ устройств и антенн / Д.В. Лучин, А.А. Минаев, А.П. Трофимов, Д.В. Филиппов, В.В. Юдин; Под ред. В.В. Юдина – Самара: ООО «Слово», 2025. – 268 с: ил.

ISBN 978-5-6053478-7-3

В книге изложены актуальные вопросы, которые так или иначе возникают перед разработчиками в процессе создания САПР электродинамического моделирования, с учетом новейших открытых общемировых достижений. Предложенные подходы и решения опираются на богатый многолетний опыт авторов, приобретенный при выполнении научных исследований и опытно-конструкторских разработок, не только в области разработки прикладного программного обеспечения, но и в значительной степени при создании реальных антенно-фидерных и СВЧ устройств, многие из которых до сих пор являются уникальными.

Для разработчиков инженерного прикладного программного обеспечения и специалистов в области электродинамического моделирования, научных работников, инженеров-программистов, руководителей и менеджеров ИТ-компаний, занимающихся разработкой САПР.

Рецензент А.Л. Бузов

УДК 004.9
ББК 32.97

ISBN 978-5-6053478-7-3

© Лучин Д.В., Минаев А.А.,
Трофимов А.П., Филиппов Д.В.,
Юдин В.В., 2024

Содержание

Предисловие	- 4 -
Глава 1. Обзор и анализ мирового опыта по созданию цифровых платформ моделирования электродинамических объектов	- 8 -
Глава 2. Построение трехмерных геометрических моделей. Профессиональные геометрические ядра.....	- 65 -
Глава 3. Построение параметрических электродинамических моделей	- 92 -
Глава 4. Генерация вычислительных сеток	- 126 -
Глава 5. Методы электродинамического анализа излучающих и неизлучающих структур	- 152 -
Глава 6. Перспективный подход в области разработки САЕ-систем – универсальный API САПР	- 222 -

Предисловие

Исторически первое интегральное уравнение электродинамики – уравнение Поклингтона – было получено и исследовано Генри Поклингтоном (H. Pocklington) еще в 1897 году, т.е. за 7 лет до Русско-японской войны и за 8 лет до первой Русской революции. Это событие можно рассматривать в качестве отправной точки развития электродинамики в направлении, основанном на математическом аппарате интегральных уравнений. Подчеркнем – электродинамики не вычислительной, поскольку в условиях отсутствия вычислительной техники интегральные уравнения представляли почти исключительно теоретический интерес. И еще несколько десятилетий сохранялся такой status quo. То же в полной мере относится и к дифференциальным уравнениям. Конечно, отдельные задачи решались, но, во-первых, задачи эти были весьма простые (например, анализ уединенного линейного вибратора), требующие минимальных вычислительных затрат, а во-вторых, они также представляли теоретический интерес (например, доказательство Поклингтоном синусоидальности тока электрически тонкого линейного вибратора). Так или иначе, ни о каком широком практическом применении речи не шло.

Ситуация коренным образом изменилась, начиная с 60-70-х годов прошлого столетия, когда появились электронные вычислительные машины. Сформировалась и стала интенсивно развиваться вычислительная электродинамика, с точки зрения которой задачи электродинамического анализа суть задачи математической физики, решаемые методами дифференциальных и интегральных уравнений (краевые задачи – задачи с краевыми и/или начальными условиями), методами вариационного исчисления (вариационные задачи) и т.д. С того момента и по сей день данное направление науки продолжает интенсивно развиваться, поскольку главные его проблемы (экономика вычислительных ресурсов и т.п.)

не решаются только за счет развития вычислительной техники. Дело в том, что по мере увеличения вычислительных ресурсов соответствующим образом расширяется и круг решаемых задач, охватывая все более сложные и электрически протяженные (т.е. ресурсоемкие) объекты.

Современный этап развития характеризуется некоторыми качественными изменениями. Мировой опыт показывает, что эффективное решение задач по созданию антенно-фидерных устройств, СВЧ-устройств, радиосистем и т.д. с использованием вычислительной электродинамики предполагает применение комплексного подхода, основанного на разработке и внедрении в процесс проектирования высокоэффективных и достаточно универсальных программно-аппаратных вычислительных средств. Это обеспечивает возможности сквозного проектирования, начиная от разработки вычислительных моделей и заканчивая моделированием функционирования разработанной аппаратуры в конкретной системе.

В настоящее время в РФ разработчики антенн и СВЧ-устройств (как планарных, так и объемных) в своей деятельности вынуждены использовать программное обеспечение (ПО) зарубежного происхождения, такое как CST MICROWAVE STUDIO, ПО Altair Feko и др. При этом, наряду с высокой стоимостью данных продуктов, возникает ситуация, когда указанные специалисты и вообще вся данная сфера деятельности в РФ оказываются полностью импортозависимыми. Такая ситуация противоречит взятому курсу на импортозамещение, а с учетом современных геополитических реалий является абсолютно неприемлемой.

Необходимо также отметить, что при использовании продуктов зарубежного происхождения возникают риски утечки информации при работе с этими продуктами и риски их полной блокировки. Это следует рассматривать как критические факторы риска развития отрасли «Связь» и успешности реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Дополнительным фактором актуализации проблемы являются современные тенденции развития в области разработки и

производства СВЧ РЭС, антенн и телекоммуникационного оборудования, предполагающие увеличение рабочих частот до 100 ГГц и выше. Это связано с развитием технологий 5G и 6G, что, в свою очередь, обусловлено настоящей необходимостью в преодолении цифрового неравенства, в предоставлении всеобъемлющего доступа к информационным ресурсам, включая получение государственных услуг в цифровом виде, в особенности в отдаленных малонаселенных регионах РФ, где установка инженерных коммуникаций, проводной и мобильной связи является коммерчески низкорентабельной для операторов связи. Решение данной задачи позволит, во-первых, повысить технологический суверенитет Российской Федерации; во-вторых, внедрить новые возможности оказания услуг операторами связи для населения; в-третьих, повысить конкурентоспособность на мировом рынке связи.

Из сказанного следует, что создание отечественных САПР электродинамического моделирования продолжает оставаться весьма актуальной задачей.

В основу настоящей монографии авторы положили свой многолетний опыт разработки прикладного программного обеспечения электродинамического моделирования для решения различных задач и свое видение того, на основе каких принципов и подходов должны строиться современные САЕ-системы с учетом возможностей вычислительной техники и высокоуровневых языков программирования.

Глава 1 монографии посвящена обзору и анализу мирового опыта по созданию цифровых платформ моделирования электродинамических объектов.

В главе 2 основное внимание уделено вопросам построения трехмерных геометрических моделей и средствам их программной реализации на основе профессиональных геометрических ядер.

Материал главы 3 посвящен рассмотрению вопросов построения параметрических электродинамических моделей. Описаны достоинства и недостатки различных методов предикативной параметризации, таких как жесткая параметризация, метод опосредующих абстрактных переменных, объектно-

ориентированный подход. Даны рекомендации по применению встраиваемых скриптовых языков для разработки составных параметрических моделей базовых объектов.

Глава 4 монографии посвящена вопросам генерации вычислительных сеток применительно к типам решаемых электродинамических задач. Большое внимание в ней уделено проблеме контроля параметров вычислительных сеток.

В главе 5 рассмотрены методы электродинамического анализа излучающих и неизлучающих структур, описаны системы базисных и координатных (весовых) функций, позволяющих априорно учесть ожидаемые (из физических соображений) свойства искомых решений, не упуская из виду математические и вычислительные аспекты.

В последней 6-й главе авторы постарались изложить свою точку зрения на перспективный подход в области разработки САЕ-систем, который базируется на создании и разработке универсального инструмента, позволяющего осуществить разработку в принципе любой САПР (САЕ-системы) в рамках концепции использования единых базовых программных блоков и модулей.

Авторы монографии выражают глубокую признательность «отцам-основателям» Самарской школы вычислительной электродинамики – доктору технических наук, профессору А.Л. Бузову, доктору технических наук, профессору В.П. Кубанову, доктору технических наук, доценту М.А. Бузовой, доктору технических наук, профессору Л.С. Казанскому, доктору технических наук, профессору Ю.М. Сподобаеву и другим ученым и специалистам в данной области за интеллектуальную поддержку при подготовке рукописи, ценные замечания по ее материалам, рецензирование и общую редакцию.