

Разработка и валидация SPICE-моделей мезонинных соединителей для отечественных САПР

ЮРИЙ РУБЦОВ,

генеральный директор –
главный конструктор

АО «ЦКБ «Дейтон»

ЮРИЙ ЕВСТИФЕЕВ,

профессор, старший
научный сотрудник

АО «ЦКБ «Дейтон»

кандидат технических наук,

ВЛАДИМИР ВЕРЧЁНОВ,

старший инженер

АО «ЦКБ «Дейтон»

Развитие современной радиоэлектронной промышленности невозможно без сформированного инструментария автоматизированного проектирования (САПР). Схмотехническое моделирование, исторически оформившееся как научная дисциплина в 1970-х годах, к настоящему времени превратилось в ключевой этап жизненного цикла любого электронного изделия – от кристалла интегральной схемы до сборки многослойной печатной платы и соединительной арматуры. Качество и достоверность результатов моделирования напрямую определяют сроки выхода изделия на рынок, объёмы экспериментальной отработки и в конечном счёте конкурентоспособность всей разрабатываемой аппаратуры.

На протяжении последних 35 лет российская школа схмотехнического моделирования развивалась в условиях доминирования зарубежных САПР: PSpice и OrCAD (Cadence Design Systems), HSPICE (Synopsys), Micro-Cap (Spectrum Software), а также средств электромагнитного анализа ANSYS SIwave и CST STUDIO SUITE. Использование этих инструментов на отечественных предприятиях оборонно-промышленного комплекса и гражданского сектора сопровождалось постепенным ослаблением собственной научно-технологической базы, утратой компетенций по разработке ядра схмотехнического моделирования и формированием критической зависимости от поставщиков программного обеспечения из юрисдикций стран НАТО. Эта зависимость приобрела характер колониальной: российские инженеры оплачивали лицензии иностранным корпорациям, а взамен получали инструмент без доступа к исходному коду, без

гарантий долгосрочной поддержки и под угрозой одностороннего отказа от обслуживания в любой политически мотивированный момент.

После 2022 года такая угроза реализовалась в полной мере: ведущие вендоры САПР – Synopsys, Cadence, ANSYS, Keysight – приостановили или ограничили поставки и техническую поддержку своих продуктов российским заказчикам. Это обусловило ускоренный переход предприятий отрасли на отечественные решения, включая разработки, выполняемые в АО «ЦКБ «Дейтон». Сформировавшаяся ситуация делает необходимым не только техническое освоение отечественных инструментов, но и осмысление стратегических задач развития российской школы схмотехнического моделирования как самостоятельного научно-технического направления.

Цель настоящей статьи – дать систематическое изложение теоретических основ SPICE-моделирования, продемонстрировать практическую реализацию поведенческих моделей электрических соединителей в отечественной САПР SimOne на примере конкретной опытно-конструкторской работы (ОКР) и сформулировать политическую оценку текущей ситуации в области схмотехнических САПР в стране. В качестве иллюстративного материала использованы результаты разработки поведенческих SPICE-моделей мезонинных соединителей с количеством контактов от 2 до 15, выполненной АО «ЦКБ «Дейтон». При приведении результатов используются нормированные (типовые) параметры эквивалентных схем, обеспечивающие воспроизводимость моделирования без раскрытия исходных параметров изделий.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ В ОБЛАСТИ ЭКБ

Технологический суверенитет в области электронной компонентной базы (ЭКБ) и средств её проектирования является одним из ключевых приоритетов государственной политики Российской Федерации, а формирование независимой научно-технологической базы признано стратегической задачей национального масштаба. Применительно к системам схемотехнического моделирования это означает, что российские предприятия не могут далее полагаться на инструменты, разработанные и поддерживаемые компаниями, подпадающими под юрисдикцию государств-членов НАТО.

Как видно из рисунка 1, сложившаяся к 2026 году ситуация в отрасли характеризуется двойственностью. С одной стороны, российская промышленность располагает развитой номенклатурой отечественных САПР: SimOne для схемотехнического моделирования, TopDesign для проектирования печатных плат, «САПР-Альфа» для системного проектирования, средства компании «ЭЛЕКС» для конструирования зда-

ний и сооружений, а также нормативной базой в виде серии ГОСТ Р 1.11.165-2022 «Модели SPICE» и ГОСТ Р 71129-2023 «Требования к конвертированию моделей SPICE». С другой стороны, накопленная за десятилетия зависимость от зарубежных САПР проявляется в дефиците библиотек компонентов под российскую элементную базу и инженерных кадров, владеющих отечественными инструментами. В итоге проектная документация и образовательные программы по-прежнему ориентируются на зарубежные продукты.

Колониальный характер прежней модели взаимодействия с зарубежными поставщиками САПР выражался в нескольких принципиальных аспектах. Во-первых, закрытый исходный код коммерческих симуляторов не позволял российским специалистам верифицировать корректность численных алгоритмов применительно к специфическим задачам отечественных предприятий – например, при моделировании изделий специального назначения, работающих в расширенном температурном диапазоне или под воздействием ионизирующего излучения.

Рис. 1. Концепция технологического суверенитета в сфере моделирования ЭРА

Во-вторых, лицензионная политика вендоров предусматривала возможность дистанционного отзыва лицензий и блокировки активаций, что в условиях политической конфронтации превращало зарубежную САПР из инструмента разработки в инструмент экономического давления. В-третьих, библиотеки моделей компонентов, поставляемые с зарубежными САПР, ориентированы преимущественно на продукцию западных полупроводниковых корпораций и не учитывают специфику отечественной элементной базы, что приводит к необходимости ручной разработки моделей для каждого российского компонента.

Преодоление этой колониальной зависимости требует комплексных усилий по нескольким направлениям. Первое – завершение формирования национальной линейки САПР, охватывающей все этапы жизненного цикла электронного изделия: системное проектирование, схемотехническое моделирование, проектирование печатных плат, электромагнитный анализ, верификация и подготовка производства. Второе направление – включение отечественных САПР в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных

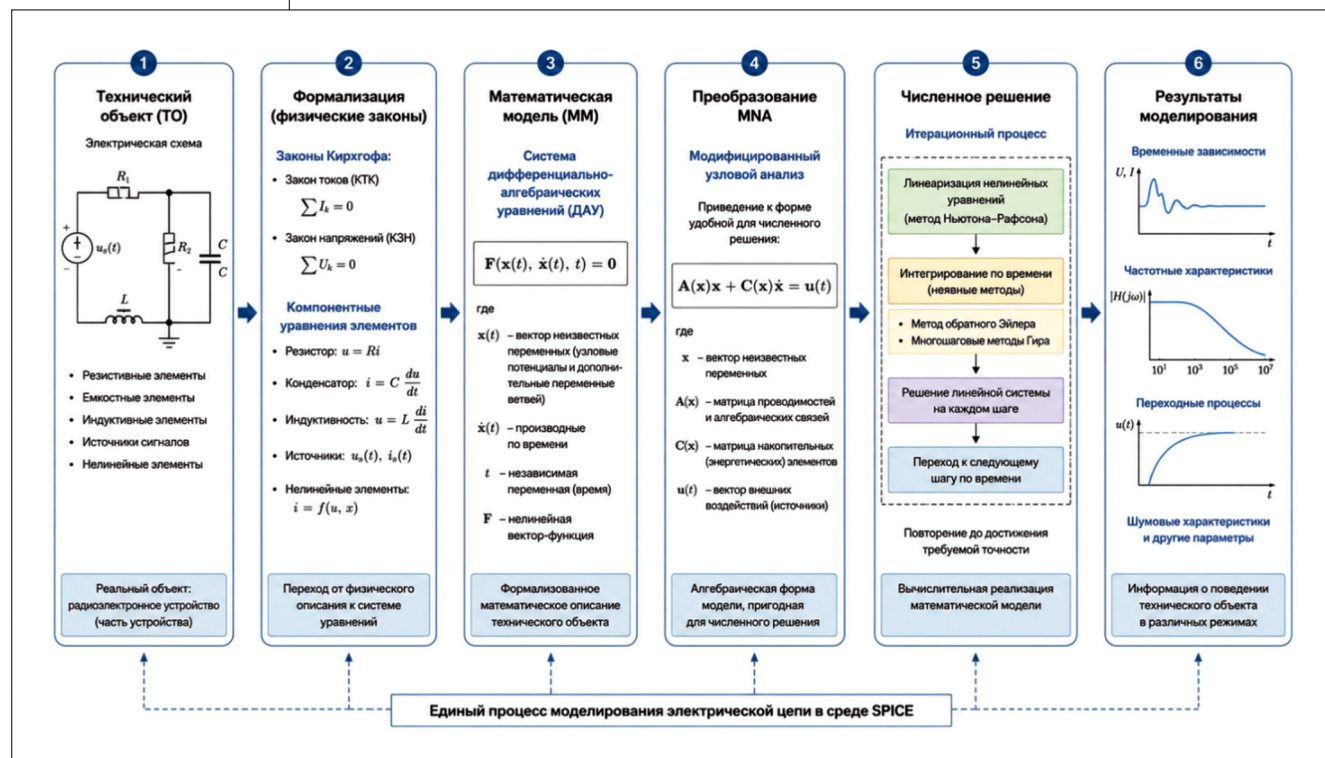
машин и баз данных, ведущийся Министерством цифрового развития РФ, что обеспечивает им правовую защиту и приоритет при государственных закупках. Третье – развитие системы национальных стандартов, регламентирующих форматы моделей, правила их разработки и конвертирования, что позволяет обеспечить совместимость между различными отечественными инструментами и преемственность проектных данных.

ТЕОРИЯ SPICE-МОДЕЛИРОВАНИЯ

С позиций системного анализа и математического моделирования радиоэлектронных средств SPICE представляет собой инструмент численного исследования математической модели технического объекта (ТО) – электрической цепи, рассматриваемой как система взаимосвязанных элементов с распределёнными и сосредоточенными параметрами.

В соответствии с общими положениями теории моделирования технических систем (рисунков 2) технический объект описывается посредством перехода к его математической модели (ММ), представляющей собой формализованное отображение физических процессов в виде си-

Рис. 2. Иерархическая структура перехода от технического объекта к математической и вычислительной модели SPICE



системы дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), отражающих динамику электрических процессов во временной области.

Математическая модель SPICE-уровня формируется в виде:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), t) = 0, \quad (1)$$

где: $\mathbf{x}(t)$ – вектор переменных состояния математической модели технического объекта, включающий узловые потенциалы и дополнительные переменные ветвей, вводимые в рамках расширенной формализации узлового анализа; $\dot{\mathbf{x}}(t)$ – производные переменных состояния по времени; t – независимая переменная (время); $\mathbf{F}$ – нелинейная вектор-функция, задающая совокупность топологических соотношений и компонентных характеристик элементов схемы.

Переход от модели технического объекта (ТО) к математической модели (ММ) осуществляется на основе фундаментальных законов теории электрических цепей – закона токов Кирхгофа и закона напряжений Кирхгофа, а также компонентных соотношений элементов схемы, описывающих резистивные, ёмкостные, индуктивные и нелинейные свойства радиоэлектронных компонентов.

В рамках модифицированного узлового анализа (Modified Nodal Analysis, MNA) исходная математическая модель приводится к эквивалентной форме:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{x} = \mathbf{u}(t), \quad (2)$$

где: $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ – матрица алгебраических связей, определяемая топологией технического объекта и нелинейными параметрами элементов; $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ – матрица накопительных (энергетических) элементов математической модели; $\mathbf{u}(t)$ – вектор внешних воздействий, задающий режим функционирования системы.

Численное решение указанной системы осуществляется в рамках вычислительной реализации математической модели технического объекта с использованием итерационных методов нелинейной аппроксимации. Для линеаризации применяется метод Ньютона – Рафсона, обеспечивающий последовательное уточнение решения, а для интегрирования по времени – неявные устойчивые методы, включая обратный метод Эйлера и многошаговые методы Гира, обеспечивающие устойчивость при анализе жёстких систем.

Результатом решения математической модели является получение функциональных зависимостей переменных состояния во временной области, а также производных характеристик технического объекта, включая частотные, переходные и шумовые параметры, используемые при анализе работоспособности и параметрической устойчивости радиоэлектронных средств.

Таким образом, SPICE-моделирование следует рассматривать как реализацию общей методологии математического моделирования технических объектов, основанной на переходе от физической структуры системы к её математической модели в форме нелинейной системы дифференциально-алгебраических уравнений и последующем численном решении указанной системы методами вычислительной математики.

ФОРМАТЫ SPICE-МОДЕЛЕЙ И ИХ СОВМЕСТИМОСТЬ

Развитие семейства SPICE привело к появлению нескольких диалектов языка описания электрических схем, среди которых наиболее распространены SPICE3f5, PSpice, HSPICE, LTspice и NGSPICE. Несмотря на общую математическую основу, они отличаются синтаксисом директив, поддерживаемыми моделями компонентов и поведенческими конструкциями, вследствие чего полная совместимость между ними отсутствует. Современные средства схемотехнического моделирования, включая отечественную САПР SimOne, поддерживают несколько распространённых диалектов SPICE, однако модели, использующие специфические расширения конкретного симулятора, могут требовать адаптации или конвертирования.

Помимо диалектов SPICE, в практике проектирования широко применяется стандарт IBIS-ISS 1.0 (IBIS Interconnect SPICE Subcircuit Specification), регламентирующий структуру SPICE-подсхем для описания линий передачи, разъёмов и других межсоединений. Использование стандарта обеспечивает переносимость моделей между различными симуляторами и является одним из базовых требований при разработке библиотек электронных компонентов.

Наибольшие сложности при переносе моделей связаны с использованием поведенческих источников, параметризованных выражений,

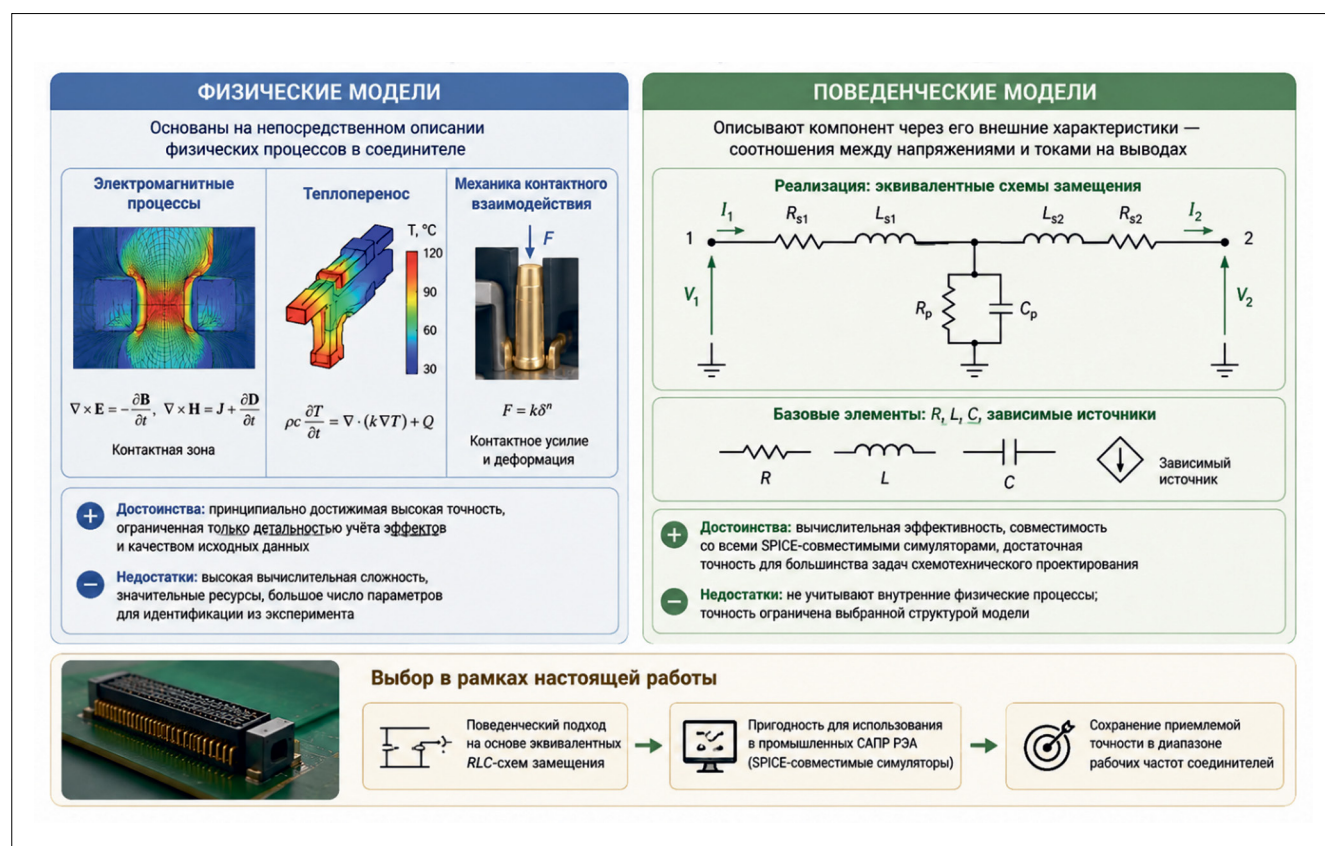


Рис. 3. Классификация моделей
электронных соединителей:
физические и поведенческие

директив .FUNC, .PARAM, .STEP, а также фирменных макромоделей производителей. В то же время модели, содержащие только стандартные элементы RLC и простые подсхемы, как правило, совместимы с большинством SPICE-симуляторов.

Неоднородность диалектов SPICE обусловила разработку национальных нормативных документов, регламентирующих правила описания и преобразования моделей. В Российской Федерации эти требования определяются серией ГОСТ Р 1.11.165 «Модели SPICE» и ГОСТ Р 71129–2023, соблюдение которых обеспечивает переносимость моделей и их применение в различных отечественных САПР.

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ: ФИЗИЧЕСКИЕ И ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ

Применительно к моделированию электронных компонентов, в том числе электрических соединителей, принято различать два класса моделей: физические и поведенческие (рисунок 3). Физические модели строятся на основе непосредственного описания физических процессов в изделии: для соединителя это уравнения электромагнитного поля в контактной зоне.

уравнения теплопереноса, механики контактного взаимодействия. Достоинство физических моделей – принципиально достижимая высокая точность, ограниченная только детальностью учёта эффектов и качеством исходных геометрических и материальных данных. Недостатки – вычислительная сложность, требующая значительных вычислительных ресурсов, и большое число параметров, подлежащих идентификации из экспериментальных данных.

Поведенческие модели, в отличие от физических, описывают компонент через его внешние характеристики – соотношения между напряжениями и токами на выводах – без явного моделирования внутренних физических процессов. Поведенческие модели реализуются эквивалентными схемами замещения из ограниченного набора базовых элементов (R, L, C, зависимые источники), что обеспечивает вычислительную эффективность и совместимость со всеми SPICE-совместимыми симуляторами. Практический опыт показывает, что для большинства задач схемотехнического проектирования радиоэлектронной аппаратуры поведенческие модели обеспечивают приемлемую

точность при существенно меньших вычислительных затратах, чем физические модели.

В рамках настоящей статьи для моделирования мезонинных соединителей выбран поведенческий подход, реализованный через эквивалентные RLC-схемы замещения. Этот выбор обусловлен требованиями технического задания, предусматривающими разработку моделей, пригодных для использования в промышленных САПР РЭА при сохранении приемлемой точности моделирования в диапазоне рабочих частот соединителей.

ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОЕДИНИТЕЛЕЙ: МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ

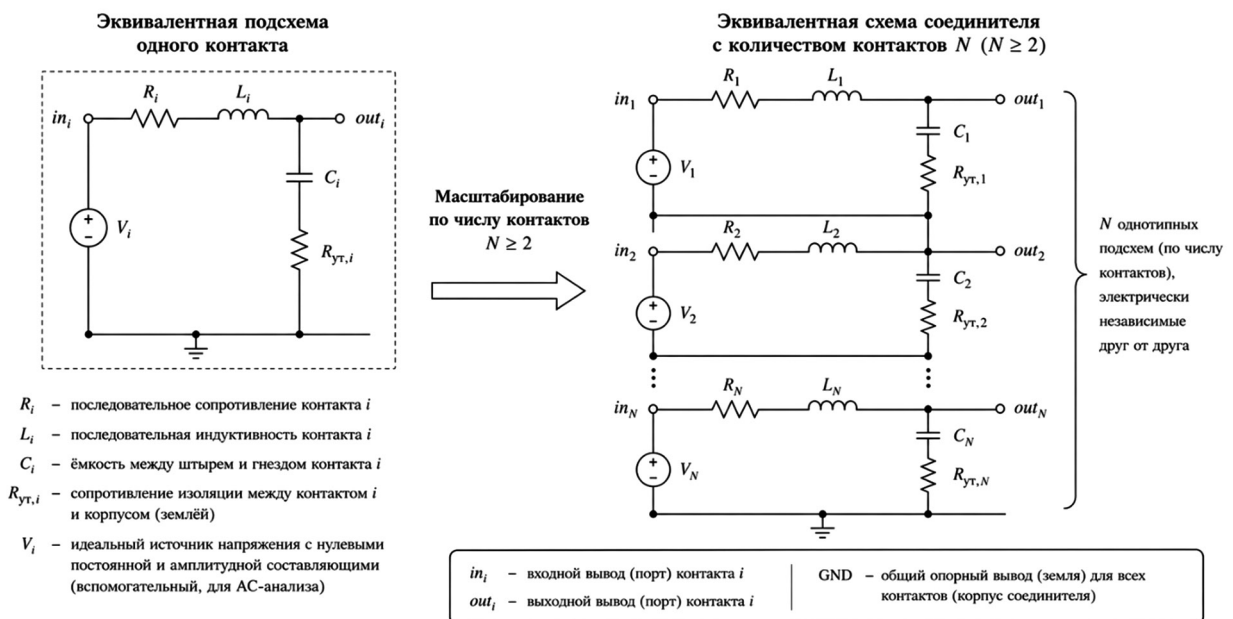
Поведенческая SPICE-модель электрического соединителя строится как совокупность однотипных подсхем, по одной на каждый контакт (рисунок 4). Каждая подсхема представляет собой эквивалентную RLC-цепь, моделирующую прохождение сигнала от входного вывода (in) к выходному (out) через контактную пару «штырь – гнездо». В состав подсхемы входят четыре базовых элемента: последовательное сопротивление R_i , моделирующее активное сопротивление контактного перехода и подводящих

проводников; последовательная индуктивность L_i , отражающая индуктивность штыря и подводящих дорожек; параллельная ёмкость C_i , моделирующая ёмкость между штырём и гнездом; параллельное сопротивление R_2 , отражающее сопротивление изоляции между контактом и корпусом соединителя.

Дополнительно каждая подсхема содержит идеальный источник напряжения V_1 с нулевыми постоянной и амплитудной составляющими, выполняющий вспомогательную функцию при анализе в режиме AC. Численные значения элементов подбираются параметрической оптимизацией таким образом, чтобы расчётные характеристики модели совпадали с данными натурных испытаний, проводимых в соответствии с требованиями технических условий на изделие и положениями ГОСТ 21962-76. При этом значения R , L и C выбираются в типовых для мезонинных соединителей с шагом 1 мм диапазонах, обеспечивая физически корректное поведение модели в рабочей полосе частот.

Активное сопротивление R_1 выбирается в диапазоне, ограниченном сверху нормированным значением переходного сопротивления контактов (с запасом на сопротивление подво-

Рис. 4. Поведенческая SPICE-модель мезонинного соединителя: эквивалентная схема одного контакта и масштабирование по числу контактов N ($N \geq 2$)



дующих проводников), а сопротивление изоляции R_2 – в диапазоне, ограниченном снизу нормированным значением сопротивления изоляции между контактами и корпусом. Индуктивность L_1 и ёмкость C_1 определяют частотные свойства модели и подбираются из условия соответствия расчётных частотных характеристик данным измерений.

Подобная топология эквивалентной схемы является стандартной для поведенческого моделирования электрических соединителей и соответствует рекомендациям стандарта IBIS-ISS 1.0, а также корпоративным стандартам АО «ЦКБ «Дейтон» в области стандартизации SPICE-моделирования, реализованным в среде SimOne.

МОДЕЛЬ 2-КОНТАКТНОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

Модель 2-контактного соединителя представляет собой простейший случай, включающий одну эквивалентную подсхему для единственного сигнального контакта (второй контакт является общим/корпусным и не требует отдельной подсхемы).

```
V1 IN1 0 DC 0 AC 1
R1 IN1 N001 100
L1 N001 OUT1 1n
C1 OUT1 0 1p
R2 OUT1 0 100Meg
.END
```

Демонстрационные номиналы компонентов ($R_1 = 100$ Ом, $L_1 = 1$ нГн, $C_1 = 1$ пФ, $R_2 = 100$ МОм) выбраны как типовые для мезонинных соединителей с шагом 1 мм и не отражают конкретные значения, использованные в реальных моделях в наших исследованиях. Структура модели соответствует стандарту IBIS-ISS 1.0: первый токопроводящий контакт описывается одной RLC-цепью, второй принимается за опорный узел (0) и не включается в подсхему явным образом. Источник V_1 с параметрами DC 0 AC 1 обеспечивает возбуждение модели в режиме малого сигнала (АС-анализ), что позволяет проводить анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик модели.

Анализ эквивалентной схемы показывает, что при низких частотах влияние паразитных индуктивности и ёмкости на передачу сигнала

незначительно. При увеличении частоты начинают проявляться реактивные свойства элементов схемы. Для приведённых значений L_1 и C_1 характеристическая частота, определяемая выражением (3), составляет около 5 ГГц.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

Резистор R_1 ограничивает добротность цепи, а резистор R_2 обеспечивает путь утечки постоянного тока и разряд ёмкости C_1 .

МОДЕЛЬ 15-КОНТАКТНОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

Модель 15-контактного соединителя представляет собой наиболее сложный случай из рассматриваемого типоразмерного ряда. Её структура представляет собой параллельное соединение 15 эквивалентных подсхем с отдельными входами IN1...IN15 и выходами OUT1...OUT15. Каждый контакт моделируется независимой RLC-цепью, что позволяет анализировать как прохождение сигнала через каждый отдельный контакт, так и взаимное влияние контактов через общие опорные цепи (если таковое предусматривается уточнённой моделью). Демонстрационный фрагмент текста модели 15-контактного соединителя включает первые 2 контакта и последний 15-й. Полная модель имеет 15 аналогичных подсхем и имеет следующий вид:

```
* Контакт 1
V1 IN1 0 DC 0 AC 1
R1 IN1 N001 100
L1 N001 OUT1 1n
C1 OUT1 0 1p
R29 OUT1 0 100Meg

* Контакт 2
V2 IN2 0 DC 0 AC 1
R2 IN2 N002 100
L2 N002 OUT2 1n
C2 OUT2 0 1p
R30 OUT2 0 100Meg

* ... контакты 3–14 (структура аналогична) ...

* Контакт 15
V15 IN15 0 DC 0 AC 1
R15 IN15 N015 100
L15 N015 OUT15 1n
C15 OUT15 0 1p
R43 OUT15 0 100Meg
.END
```

Таблица 1. Структура SPICE-моделей соединителей типоразмерного ряда

Число контактов	Число RLC-подсхем	Общее число компонентов	Число узлов схемы
2	1	5	3
3	2	10	5
4	3	15	7
5	4	20	9
6	5	25	11
7	6	30	13
8	7	35	15
9	8	40	17
10	9	45	19
11	10	50	21
12	11	55	23
13	12	60	25
14	13	65	27
15	14	70	29

Масштабирование модели от 2-контактного варианта к 15-контактному сохраняет структуру каждой отдельной подсхемы неизменной. Изменяется лишь количество параллельно включённых подсхем и общее число компонентов: для 15-контактной модели суммарное число SPICE-элементов составляет 75 (по 5 элементов на каждый контакт). Это обеспечивает линейный рост вычислительной сложности модели с числом контактов, что принципиально для практического применения моделей в составе больших схемотехнических проектов.

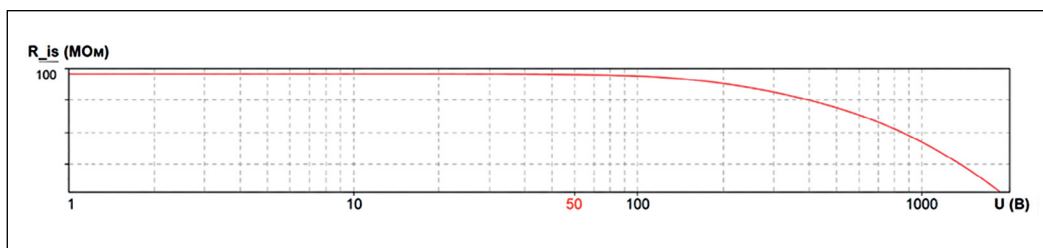
Сводная информация о структуре моделей всего типоразмерного ряда (от 2 до 15 контактов) представлена в таблице 1. Число компонентов модели линейно зависит от числа контактов, что обеспечивает предсказуемость вычислительных затрат и возможность масштабируемого применения моделей.

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛЕЙ В САПР SIMONE

Валидация разработанных моделей проводилась в отечественной САПР схемотехнического моделирования SimOne. Под валидацией в рамках настоящей работы понимается проверка адекватности математической модели, осуществляемая путём вычислительных экспериментов и сопоставления полученных результатов с данными натурных испытаний и нормированными значениями параметров, заданными в ТЗ и ТУ.

Процедура валидации включала следующие этапы. На первом из них разработанные эквивалентные схемы импортировались в схемотехнический редактор SimOne в виде файлов формата .ssch – собственного формата графического представления схем. На втором этапе выполнялось преобразование графического представления в текстовое описание в формате SPICE (.net) с использованием встро-

Рис. 5. Зависимость сопротивления изоляции от приложенного напряжения для соединителя с числом контактов 2



енного конвертера SimOne. На третьем – проводилось моделирование зависимости сопротивления изоляции от напряжения для всех 14 типоразмеров соединителей (от 2 до 15 контактов) с целью подтверждения соответствия расчётных значений нормированным значениям по ТУ.

В качестве примера на рисунке 5 представлены результаты данного этапа для соединителя с числом контактов 2. График зависимости сопротивления изоляции R_{is} от приложенного напряжения U показывает, что в области малых напряжений параметр стабильно сохраняется на уровне порядка 100 МОм. При увеличении напряжения наблюдается снижение сопротивления изоляции, обусловленное ростом токов утечки через диэлектрические материалы корпуса. Полученная зависимость находится в пределах допустимых значений, регламентируемых нормативной документацией на изделие.

На четвёртом этапе анализировались переходные процессы и частотные характеристики моделей с целью подтверждения физической корректности поведения моделей в рабочем диапазоне частот.

Разработанные модели соответствуют требованиям действующих национальных стандартов в области разработки и применения SPICE-моделей: ГОСТ Р 71129-2023 и серии ГОСТ Р 1.11.165-2022.

Соответствие указанным стандартам обеспечивает совместимость моделей с различными SPICE-совместимыми САПР РЭА, включая SimOne, и возможность их использования в составе проектной документации при разработке электронной аппаратуры отечественного производства.

В заключение приведём основные выводы:

1. Теоретический аппарат SPICE-моделирования, разработанный в 1970-х годах и непрерывно развивающийся по настоящее время, является универсальным и достаточным

средством описания поведения электронных компонентов любого класса, включая электрические соединители.

2. Практическая реализация поведенческих SPICE-моделей мезонинных соединителей с количеством контактов от 2 до 15 продемонстрировала возможность и целесообразность полного цикла разработки моделей в отечественной САПР SimOne. Разработанные модели соответствуют требованиям ТЗ, ТУ, национальных стандартов серии ГОСТ Р 1.11.165 и стандарта IBIS-ISS 1.0, что обеспечивает их переносимость между SPICE-совместимыми САПР РЭА и пригодность для включения в состав проектной документации;
3. Дальнейшее развитие отечественной инфраструктуры схмотехнического моделирования должно сопровождаться созданием собственных программных продуктов и формированием единой системы совместимых библиотек SPICE-моделей, средств их автоматизированной проверки, конвертирования и стандартизации.
4. Разработанные SPICE-модели интегрированы в автоматизированную информационно-поисковую систему (АИПС) «Дейтрон» (<https://deyton.ru/basedemo.php>), обеспечивающую централизованное хранение, структурированный поиск и доступ к информации по ЭКБ. Использование АИПС позволяет автоматизировать процессы разработки РЭА через стандартные SPICE-совместимые интерфейсы, формируя единое информационное пространство и существенно расширяя возможности применения отечественных ЭКБ.
5. Наличие унифицированных моделей электронных компонентов является одним из ключевых факторов обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации в области ЭКБ и средств её проектирования. ◆