

# Разработка моделей отечественных пассивных электронных компонентов и их интеграция в системы автоматизированного проектирования

И. Белков<sup>1</sup>, Ю. Еремеев<sup>2</sup>, И. Малышев<sup>3</sup>, С. Рыбкин<sup>4</sup>

УДК 004.94 | ВАК 05.13.12

Эффективность разработки устройств и систем в значительной степени определяется наличием моделей электронных компонентов, адаптированных к системам автоматизированного проектирования (САПР). Модели должны отражать полную информацию об электронных компонентах, полученную на основе данных о конструкции изделий и измеренных параметрах, а также опыта эксплуатации и рекомендациях по применению. Наиболее полным набором данных о компонентах обладает разработчик и изготовитель электронных компонентов. В статье рассмотрена методика построения моделей электронных компонентов на примере создания моделей СВЧ чип-индуктивностей и чип-резисторов производства АО «НПО «ЭРКОН» в САПР Delta Design 3.0.

**Р**азработка современной электронной аппаратуры невозможна без применения САПР, позволяющих в кратчайшие сроки провести полный цикл разработки – от электрической схемы до топологии печатной платы, спецификации комплектующих и КД на устройство. Пример такой системы – отечественная САПР Delta Design версии 3.0, в которой объединены все модули в рамках единой среды разработки, в том числе аналоговый (SPICE) и цифровой симуляторы (Verilog/VHDL) [1, 2, 3].

Актуальной задачей является создание полноценных моделей электронных компонентов, соответствующих функционалу современных САПР. В настоящее время используется множество вариантов построения подробных моделей СВЧ-компонентов. Такие модели содержатся в библиотеках, предназначенных для встраивания в программы автоматизированного проектирования. Однако большинство из этих моделей описывает компоненты зарубежного производства. Полноценные модели отечественных пассивных и активных СВЧ-компонентов сегодня отсутствуют.

Следует отметить, что построение условных графических обозначений (УГО), топологических и трехмерных моделей не представляет принципиальных сложностей, хотя и требует знания конструкции компонента и определенных трудозатрат. Сложнее обстоит дело с созданием поведенческих моделей. Изготовитель не всегда имеет возможность представить параметры своих изделий, измеренных в тех условиях, которые требуются разработчику радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Поэтому применение моделей, созданных на основе результатов измерений в определенных условиях (зачастую известных только изготовителю), имеет ограничения у потребителя электронных компонентов.

Для разработки моделей, отражающих реальные параметры СВЧ-компонентов, применяют два подхода:

- создание сложной параметрической модели, учитывающей влияние окружающих объектов в области монтажа компонента (реактивных параметров контактных площадок, диэлектрической подложки и др.);
- создание модели, описывающей собственные параметры компонента (без влияния окружающих объектов).

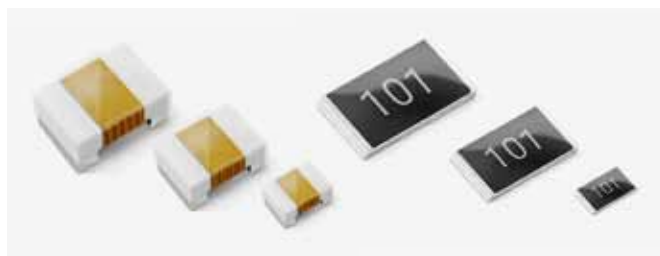
Параметрическая модель является максимально гибкой с точки зрения воспроизведения характеристик компонента при моделировании в различных условиях. Однако она достаточно трудоемка в создании, поскольку требует большого объема измеренных данных, а также сложна при реализации в программном продукте. Такие

<sup>1</sup> АО «НПО «ЭРКОН», заместитель руководителя группы разработок, тел. +7 831 202-24-34 доб. 315, belkov@erkon-nn.ru.

<sup>2</sup> АО «НПО «ЭРКОН», руководитель группы разработок, тел. +7 831 202-24-34 доб. 371, eremeev@erkon-nn.ru.

<sup>3</sup> АО «НПО «ЭРКОН», директор по развитию, тел. +7 831 202-25-53 доб. 271, min@erkon-nn.ru.

<sup>4</sup> Компания «ЭРЕМЕКС», ведущий разработчик, тел. +7 495 232-18-64, rybkin@eremex.ru.



**Рис. 1.** Внешний вид чип-индуктивности типа КИК (слева) и чип-резистора типа P1-8B (справа)

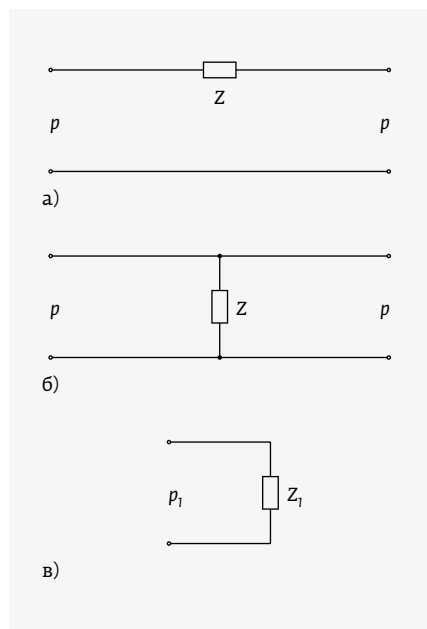
модели востребованы при моделировании S-параметров гибридных СВЧ-изделий со сложной топологической структурой и в широком диапазоне частот.

Модели, описывающие только собственные параметры компонентов, более просты для создания. Их реализация доступна в большинстве современных САПР с использованием SPICE-симулятора. Рассмотрим создание таких моделей на примере СВЧ чип-индуктивностей типа КИК и чип-резисторов типа P1-8B производства АО «НПО «ЭРКОН» (рис. 1).

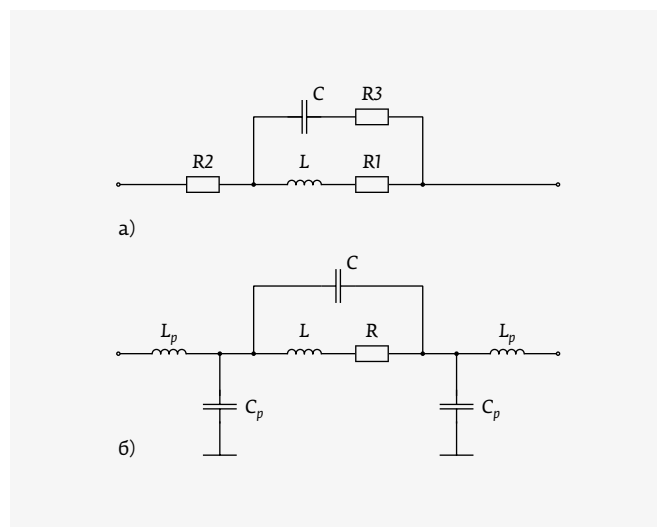
Наиболее удобным путем является реализация модели в виде эквивалентных схем замещения на сосредоточенных параметрах (рис. 2).

Номинальные значения элементов эквивалентной схемы определяют по результатам измерений компонентов соответствующих типонаименований. При этом целесообразно объект измерения (при соответствующем способе установки) представить в виде П-, Т-схем или закороченного на землю двухполюсника (рис. 3, 4).

Ниже приведены соотношения, по которым определяют импеданс  $Z(f)$  для каждого случая [4].



**Рис. 3.** Эквивалентная схема замещения для чип-индуктивности: а - последовательная; б - параллельная; в - в виде двухполюсника (один контакт закорочен на землю)



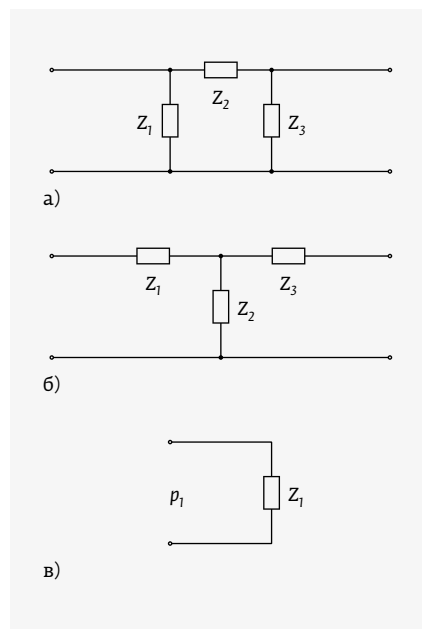
**Рис. 2.** Эквивалентная схема замещения: а - чип-индуктивности; б - чип-резистора

В случае двухполюсника:

$$|S| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1-Y}{1+Y} \end{bmatrix}, Y = \frac{1}{Z} = \frac{\rho_2}{z}$$

В случае последовательного включения чип-индуктивности:

$$|S| = \begin{bmatrix} \frac{Z}{2+Z} & \frac{2}{2+Z} \\ \frac{2}{2+Z} & \frac{Z}{2+Z} \end{bmatrix}$$



**Рис. 4.** Эквивалентная схема замещения для резисторов: а - П-схема; б - Т-схема; в - в виде двухполюсника

В случае последовательного включения чип-резистора:

$$Y_1 = Y_3 = y_1 p = y_3 p = \frac{1 - S_{11} - S_{12}}{1 + S_{11} + S_{12}}, Y_2 = y_2 p = \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})^2 - S_{12}^2}$$

В случае параллельного включения чип-индуктивности:

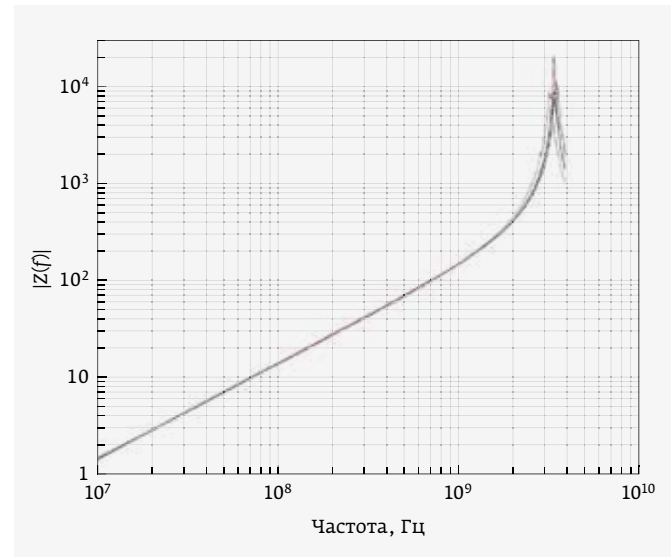
$$|S| = \begin{bmatrix} \frac{-Y}{2+Y} & \frac{2}{2+Y} \\ \frac{2}{2+Y} & \frac{-Y}{2+Y} \end{bmatrix}, Y = \frac{1}{Z}$$

В случае параллельного включения чип-резистора:

$$Z_1 = Z_3 = \frac{z_1}{p} = \frac{z_3}{p} = \frac{1 + S_{11} - S_{12}}{1 - S_{11} + S_{12}}, Z_2 = \frac{z_2}{p} = \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}^2}$$

Импеданс вычисляют на основе результатов измерений для различных способов установки компонента. Измерения усредняют, при необходимости проводят дополнительную обработку и сохраняют в составе моделей. Примеры результатов измерений приведены на рис. 5.

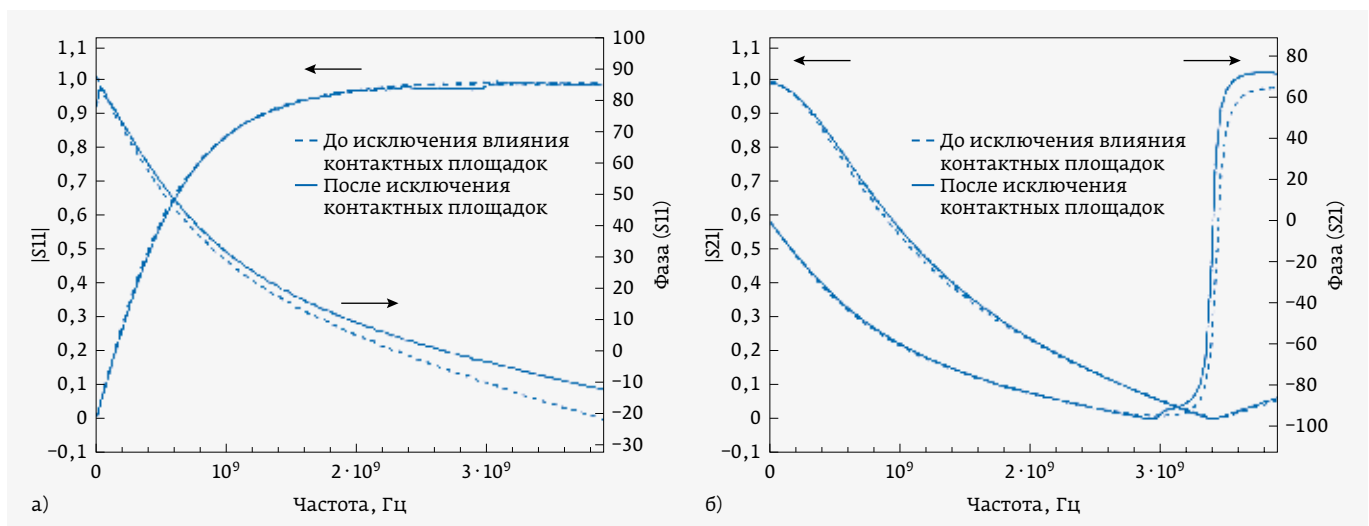
Имея только одно частотно-зависимое комплексное число достаточно просто подобрать значения параметров эквивалентной схемы методом оптимизации. Сходимость целевой характеристики к результатам измерений при настройке параметров эквивалентной схемы будет во многом определяться конфигурацией измерительных плат и способом калибровки, определяющим границу плоскости измерения. Для лучшей сходимости допускается проводить вычитание результатов измерений «пустых» контактных площадок из результатов



**Рис. 5.** Результаты измерений модуля импеданса чип-индуктивности для различных вариантов включения в измерительную линию

измерений компонента, установленного на этих контактных площадках. Несмотря на близкую сходимость S-параметров результатов измерений с контактными площадками и без них (рис. 6), без указанной процедуры модель может некорректно описывать собственные параметры компонента (рис. 7).

Используя готовую модель компонентов с собственными параметрами и встроенные в САПР модели микроструктурных элементов, несложно определить параметры компонента, установленного на различные типы контактных площадок. Примеры результатов моделирования и реальных измерений приведены на рис. 8.



**Рис. 6.** Пример результатов измерения S-параметров чип-индуктивности КИК 0805 22 нГн

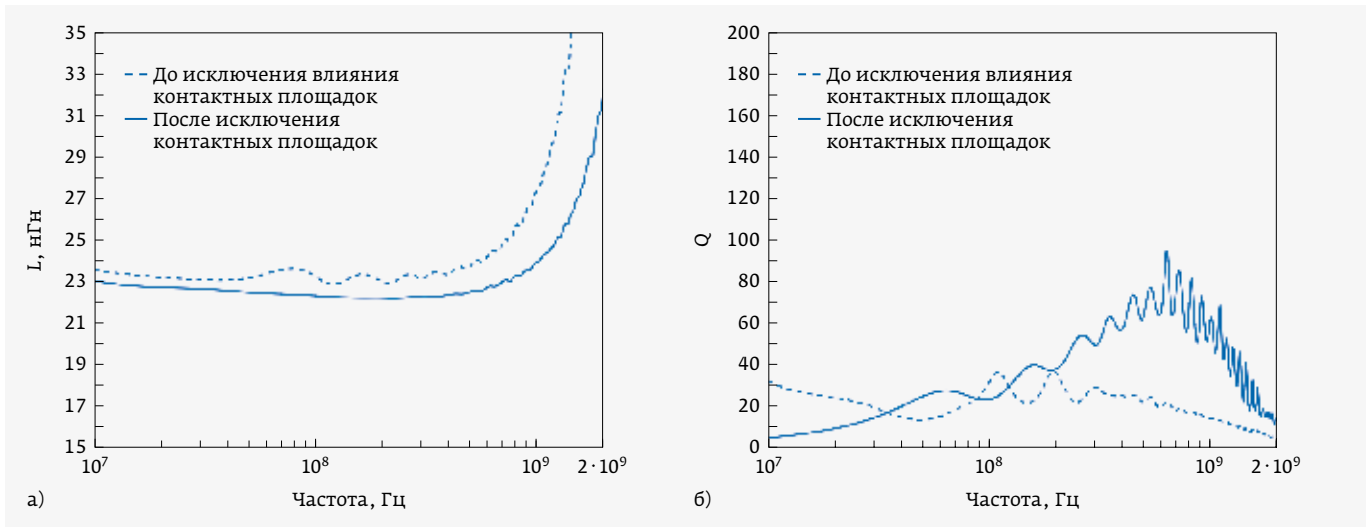


Рис. 7. Пример пересчета чип-индуктивности и добротности из измерений КИК 0805 22 нГн

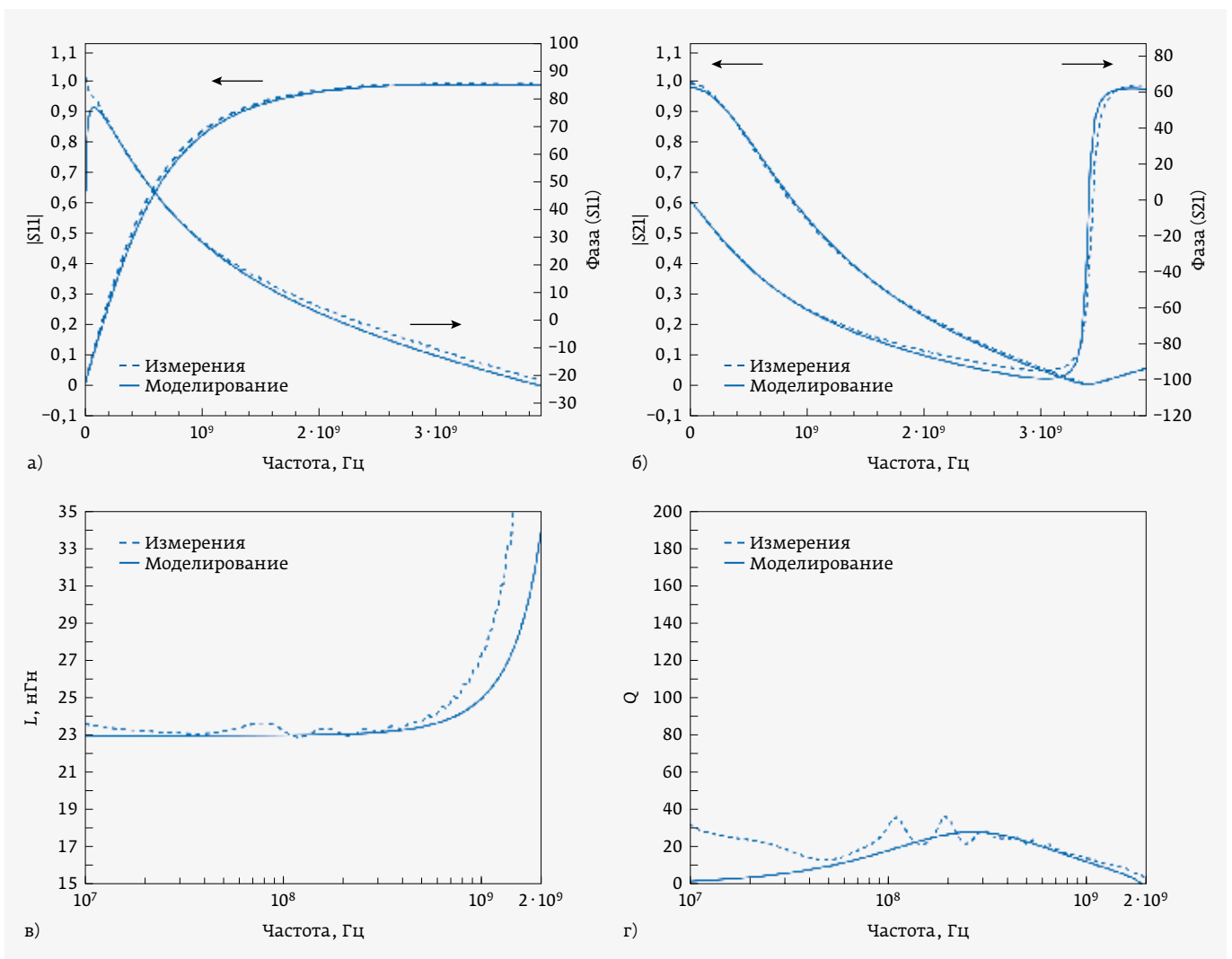


Рис. 8. Примеры характеристик чип-индуктивности КИК 0805 22 нГн, установленной на контактные площадки

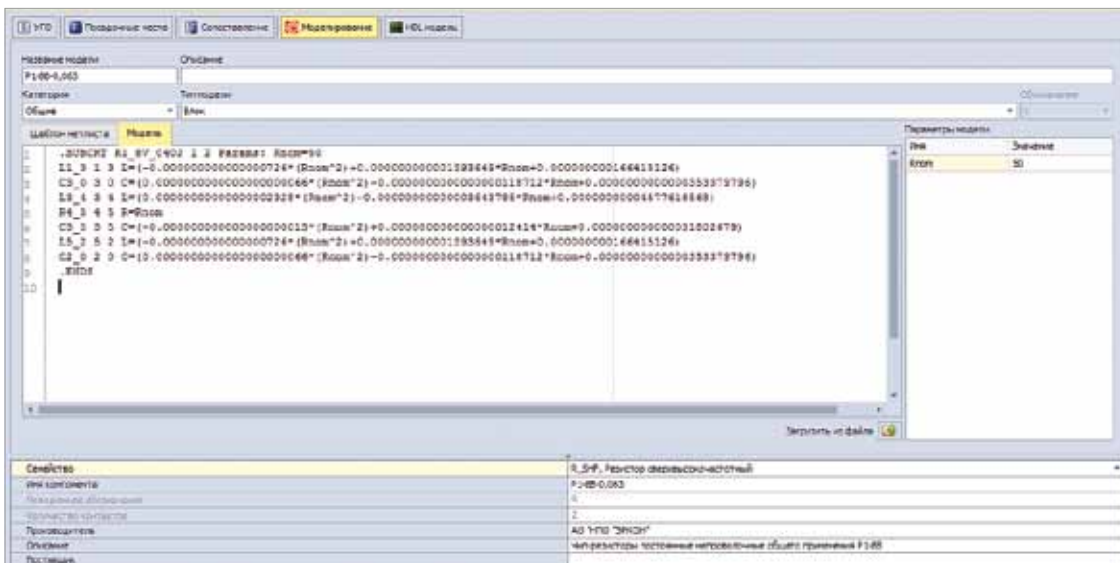


Рис. 9.  
Пример модели  
в SPICE-формате

Интеграция полученных моделей в САПР происходит в SPICE-формате (рис. 9).

АО «НПО «ЭРКОН» и ООО «ЭРЕМЕКС» разработали библиотеку, в которой есть всё необходимое для разработчика РЭА [5]. Для резисторов и чип-индуктивностей

производства АО «НПО «ЭРКОН» это не просто 3D-модель и номинальные значения параметров, а набор связанных характеристик в виде единой библиотеки: УГО, посадочное место (ПМ), SPICE-модель, а также обширный набор свойств, описывающих компонент, так называемых атрибутов (табл. 1, 2).

Рассмотрим пример проектирования полосового фильтра, схема которого с идеализированными моделями компонентов показана на рис. 10. В схеме на рис. 11 идеализированные модели заменены на SPICE-модели: для чип-индуктивностей использовались модели чип-индуктивностей КИК 0805 от АО «НПО «ЭРКОН» [6], а для конденсаторов – модели конденсаторов от компании Murata [7].

Порядок работы с моделями компонентов различается при использовании SPICE-моделей и идеализированных моделей, встроенных в систему проектирования. В САПР Delta Design версии 3.0 для каждой модели создается отдельный компонент. Для моделирования рассматриваемого полосового фильтра необходимо создать четыре новых компонента, как показано на рис. 12.

После замены компонентов с идеализированными моделями на компоненты со SPICE-моделями запустим анализ передаточной характеристики фильтра,

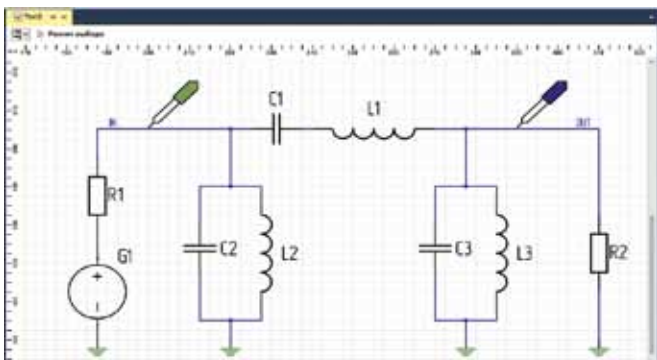


Рис. 10. Схема полосового фильтра  
с идеализированными моделями

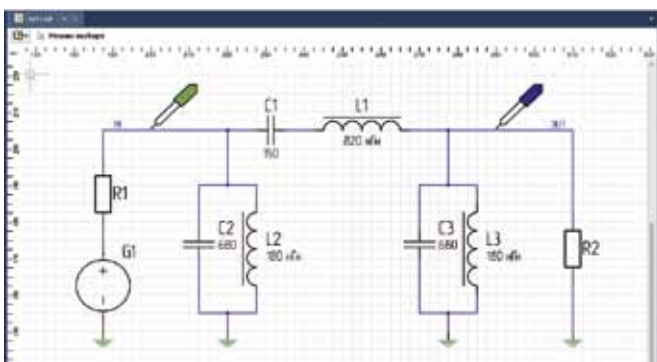


Рис. 11. Схема полосового фильтра со SPICE-моделями  
компонентов



Рис. 12.  
Компоненты,  
созданные для  
моделей схемы  
полосового  
фильтра

**Таблица 1.** Атрибуты для индуктивности в САПР Delta Design

| Наименование атрибута                          | Примечание   |
|--|--|
| ОКПД2  | Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности |
| Категория качества                             | ОТК, ВП  |
| Поверхностный монтаж                           | «Да», «Нет»  |
| Максимальная температура эксплуатации          | Градус Цельсия, °С   |
| Минимальная температура эксплуатации           | Градус Цельсия, °С   |
| Рабочая (номинальная) температура эксплуатации | Градус Цельсия, °С   |
| Примечание                                     | Дополнительная информация  |
| Посадочное место                               | Имя посадочного места, созданного в этой библиотеке                        |
| Радиодеталь                                    | Имя модели «КИК-1005-1 нГн ±5%»  |
| Артикул  | КИК1005-1 нГн ±5% Зл А РКМУ.671340.001ТУ                                   |
| ТУ   | РКМУ.671340.001ТУ  |
| Масса  | Грамм  |
| Допустимый ток                                 | Ампер  |
| Ток насыщения                                  | Ампер  |
| Макс. сопротивление обмотки постоянному току   | Ом   |
| Частота измерения индуктивности                | Герц   |
| Частота измерения добротности                  | Герц   |
| Минимальная добротность                        | Число  |
| Минимальная резонансная частота                | Герц   |
| Точность                                       | %  |
| Номинал  | Генри  |

**Таблица 2.** Атрибуты для резисторов в САПР Delta Design

| Наименование атрибута                          | Примечание   |
|--|--|
| ОКПД2  | Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности |
| Категория качества                             | ОТК, ВП  |
| Поверхностный монтаж                           | «Да», «Нет»  |
| Максимальная температура эксплуатации          | Градус Цельсия, °С   |
| Минимальная температура эксплуатации           | Градус Цельсия, °С   |
| Рабочая (номинальная) температура эксплуатации | Градус Цельсия, °С   |
| Примечание                                     | Дополнительная информация  |
| Посадочное место                               | Имя посадочного места, созданного в этой библиотеке                        |
| Радиодеталь                                    | Имя модели «P1-8В-0,25-50 Ом»  |
| Артикул  | P1-8В-0,25-50 Ом ±5% -А-М ОЖО.467.164 ТУ                                   |
| ТУ   | ОЖО.467.164 ТУ   |
| Масса  | Грамм  |
| Рассеиваемая мощность                          | Ватт   |
| Максимальное напряжение                        | Вольт  |
| Токовый шум, мкВ/В                             | Число  |
| ТКС  | Число  |
| Точность                                       | %  |
| Номинал  | Ом   |
| Максимальная частота диапазона для КСВН        | Частота  |
| КСВН   | Число  |
| Максимальная частота диапазона для КСВН2       | Частота  |
| КСВН2  | Число  |



указав в пункте «Группа 1» выражение  $20 \log(V(OUT)/V(IN))$  (рис. 13).

На рис. 14 представлена смоделированная передаточная характеристика, а на рис. 15 сравниваются результаты моделирования и измерений. Можно отметить высокое совпадение результатов моделирования и измерений. Используемые модели с высокой достоверностью описывают поведение компонентов в широком диапазоне частот.

\* \* \*

В заключение отметим, что современные системы автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств в значительной степени сокращают процесс разработки, а использование библиотек моделей электронных компонентов АО «НПО «ЭРКОН» позволяет найти оптимальные решения, выявить недостатки схемы и перейти к макетированию или изготовлению опытного образца РЭА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прикота А., Сорокин С. SimOne – отечественный симулятор электронных схем // Современная электроника. 2015. № 9. С. 62–65.
2. ЭРЕМЕКС. Система аналогового моделирования Delta Design SimOne. <https://www.eremex.ru/products/delta-design/simone/>.
3. Мальшев Н. Новые возможности в системе функциональной верификации и моделирования HDL-проектов

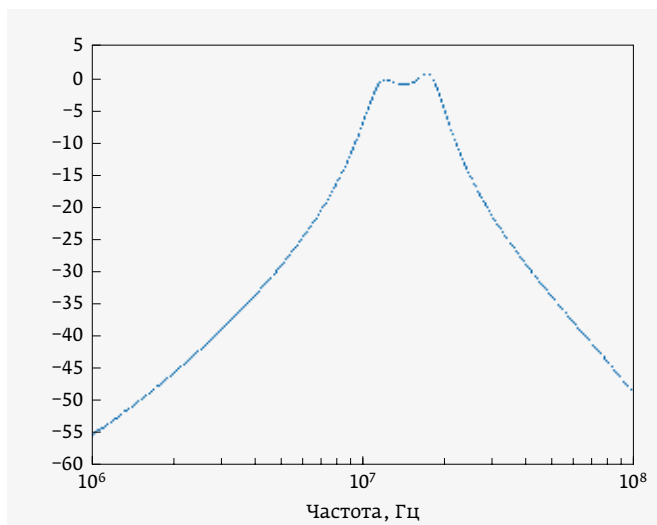


Рис. 14. Смоделированная передаточная характеристика полосового фильтра

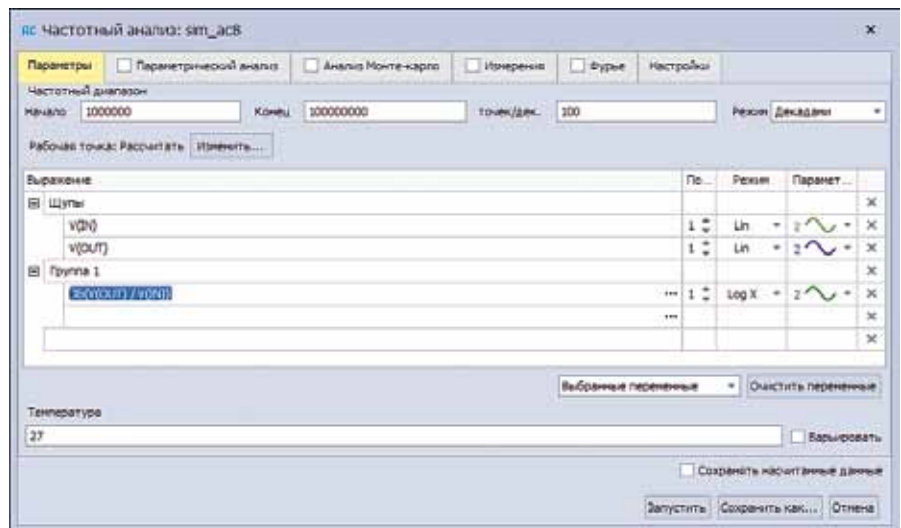


Рис. 13. Настройка параметров для моделирования

Delta Design Simtera // Современная электроника. 2019. № 8. С. 64–66.

4. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. М.: Связь, 1971.
5. ЭРЕМЕКС. Библиотека компонентов Delta ЭКБ. История изменений. <https://www.eremex.ru/knowledge-base/delta-design/articles/delta-ekb-istoriya-izmeneniy/>.
6. ЭРКОН. Чип-индуктивности. <https://www.erkon-nn.ru/catalog/chip-induktivnosti/>.
7. Murata. Ceramic Capacitor. <https://www.murata.com/en-eu/products/capacitor/ceramiccapacitor>.



Рис. 15. Сравнение результатов моделирования и измерения передаточной характеристики полосового фильтра

## 23-я Международная выставка электронных компонентов, модулей и комплектующих

13–15 апреля 2021

Москва, Крокус Экспо

[expoelectronica.ru](http://expoelectronica.ru)

Получите Ваш  
бесплатный билет  
по промокоду **ee21print**



AI IOT

