

621.372.51.049.774:658.512.26:004.92

А.А. Самуилов

Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей LOCUS на базе среды Indesys

Представлена программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей LOCUS, разработанная в среде Indesys. Описываются основные преимущества новой версии программы LOCUS относительно предыдущих версий, приводится обоснование целесообразности использования среды Indesys в качестве платформы для разработки программ синтеза СВЧ-устройств. В новой версии реализованы «визуальные» методики проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах с использованием метода преобразования моделей, а также проектирования КЦ с учетом влияния температуры на пассивные и активные элементы. В качестве примера приведено решение задачи Фано с помощью «визуальной» методики и программы LOCUS.

Ключевые слова: «визуальное» проектирование, LOCUS, Indesys, СВЧ, корректирующая цепь, согласующая цепь.

Корректирующие (КЦ) и согласующие цепи (СЦ) входят в состав различных линейных и нелинейных полупроводниковых устройств (ППУ) ВЧ- и СВЧ-диапазона, таких, как малошумящие и мощные усилители, смесители, умножители частоты, активные фильтры, конверторы иммитанса и др. В настоящее время используется несколько различных подходов к синтезу КЦ и СЦ, в том числе параметрическая оптимизация величин элементов при заданной структуре цепи, применение методов классического синтеза, случайного и систематического поиска структур цепей и др. [1]. Данные методы позволяют проектировать цепи произвольной сложности, однако на практике чаще всего используются цепи с небольшим числом элементов (до четырех–шести). Методика «визуального» проектирования [2, 3] наиболее пригодна для решения задач синтеза цепей с небольшим количеством элементов, так как дает более полный контроль над структурой и параметрами цепи. В отличие от существующих аналитических и численных методов синтеза цепей, базирующихся на достаточно сложных алгоритмах, предлагаемая «визуальная» процедура является интерактивной и не использует сложных вычислений.

В основе «визуальной» методики проектирования КЦ и СЦ положен декомпозиционный метод синтеза [4]. Суть его заключается в следующем: на ряде фиксированных частот рабочего диапазона определяются области допустимых значений (ОДЗ) входного иммитанса КЦ или СЦ, исходя из совокупности требований к характеристикам самой цепи или активного устройства, содержащего КЦ (СЦ). Затем происходит проектирование (синтез) пассивной КЦ или СЦ таким образом, чтобы её импеданс на заданных частотах попадал в соответствующие ОДЗ.

В настоящей работе описана новая версия программы «визуального» проектирования КЦ и СЦ LOCUS, разработанная на базе платформы Indesys [5]. Приведены основные ее преимущества относительно предыдущих версий. В качестве примера представлено решение задачи Фано с помощью «визуальной» методики и программы LOCUS.

1. Модификация архитектуры и интерфейса программы LOCUS. Предыдущая версия программы «визуального» проектирования КЦ и СЦ LOCUS [6] показала хорошую эффективность, однако имела недостатки, связанные с архитектурой и пользовательским интерфейсом.

– Архитектура программы LOCUS была не расширяемой, что затрудняло работу над ее дальнейшей модификацией.

– В программном обеспечении, работа которого основана на постоянном взаимодействии с пользовательским интерфейсом (т.е. в интерактивных программах), важно предоставить пользователю удобный механизм представления и работы с данными, а также механизм гибкой настройки пользовательского интерфейса. Программа LOCUS имела не очень удобный пользовательский интерфейс, при котором пользователю было сложно изучить принципы работы с программой без дополнительной документации, при этом отсутствовала четкая последовательность ввода исходных данных и т.д.

Избавиться от этих недостатков удалось путем разработки новой версии программы LOCUS в среде Indesys (Intelligent Design System). Indesys [5] является программной средой, в которой могут быстро создаваться программы автоматизированного проектирования (моделирования, синтеза) различных типов активных и пассивных СВЧ-устройств, а также средства автоматизации измерений. Для того чтобы использовать среду в качестве основы для решения широкого спектра задач в области проектирования, моделирования и измерений СВЧ-устройств, а также обеспечить возможность расширения и наращивания функциональных возможностей разрабатываемых программ, в ней реализованы два уровня: платформа (ядро системы) Indesys Framework и расширяемые модули.

Платформа *Indesys Framework* обеспечивает общую функциональность для задач проектирования, моделирования и измерений СВЧ-устройств: комплексная матричная арифметика, представление и анализ радиоэлектронных цепей, модули взаимодействия с аппаратными средствами (измерительными приборами) и др.

Также платформа Indesys Framework содержит набор программных интерфейсов и обеспечивает базовую функциональность для расширяемых модулей, которые относятся ко второму уровню системы Indesys. Платформа Indesys Framework реализует общий для решения различных задач пользовательский интерфейс: главное окно программы, дерево проекта, общие диалоговые формы (задание системы единиц измерения, частот проекта и т.п.), модули отображения характеристик в виде графиков и таблиц, отображения принципиальных электрических схем и др.

С помощью расширяемых модулей системы Indesys реализуются различные специальные методики синтеза, алгоритмы аппроксимации, оптимизации, средства визуализации данных (таблица, прямоугольный график, диаграмма Вольперта–Смита и т.д.), базовые библиотеки моделей элементов и топологических структур для организации логического представления схем и т.д.

Вся расширяемая функциональность реализуется в виде плагинов (plug-in). Плагин представляет собой обычную dll-библиотеку, осуществляющую заранее известный основному приложению интерфейс. Отличительной особенностью плагинов является то, что они способны встраиваться в программную систему без необходимости её перекомпиляции, что достигается благодаря использованию полиморфизма в объектно-ориентированном подходе к программированию. Использование плагинов является общепринятой практикой при создании программных приложений, поддерживающих свое расширение через подключение внешних библиотек, что становится особенно важным при создании любого вида САПР.

При разработке новой версии программы LOCUS был использован ряд модулей среды Indesys: модуль комплексной арифметики, хранения и графического представления ОДЗ и годографа иммитанса цепи на комплексной плоскости, модули логического и геометрического представления электрических цепей, а также механизм их моделирования, модуль интеграции со средой Microwave Office. Использование готовых модулей значительно сократило время разработки программы.

Таким образом, разработанная новая версия программы LOCUS на базе среды Indesys позволила устранить недочеты предыдущих версий:

- Благодаря новой архитектуре и использованию платформы Indesys Framework удалось уменьшить трудоемкость разработки и достигнуть быстрой расширяемости программы.
- Внедрение мастера настройки проекта позволило установить четкую последовательность действий пользователя при вводе исходных данных.
- Сохранение состояния пользовательского интерфейса позволило значительно повысить удобство использования программы за счет того, что пользователь настраивает расположение окон и панелей лишь один раз – при первом запуске программы.
- Модуль графического представления данных предоставил пользователю широкий спектр функциональных возможностей и продуманную систему навигации на плоскости графика.

2. Реализация в программе LOCUS новых функциональных возможностей. Предыдущая версия программы LOCUS [6] имела также следующие недостатки:

- Программа разрешала проектировать КЦ и СЦ только на идеальных пассивных элементах. Однако реальные пассивные элементы (например, изготовленные по монолитной технологии) обладают потерями и паразитными параметрами, которые изменяют характеристики цепей.
- Программа не позволяла решать задачи синтеза КЦ при учете влияния температуры на пассивные элементы цепи, а также на активные элементы в составе ППУ.

Для исключения этих недостатков в программе LOCUS реализованы новые функциональные возможности.

Проектирование КЦ и СЦ на монолитных элементах. Новая версия программы LOCUS позволяет проектировать цепи как на идеальных, так и на монолитных элементах. В последнем случае учитываются потери и паразитные параметры монолитных элементов; кроме того, возможен учет влияния соединительных элементов монолитной цепи (линии передачи, тройники, повороты, заземляющие отверстия) на итоговые характеристики.

В основу проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах положен метод преобразования моделей [6, 7]. Его суть заключается в следующем. Вначале по требованиям к монолитной интегральной схеме (МИС) выбирается исходная цепь на идеальных пассивных элементах (цепь может включать также активные элементы, описываемые S-параметрами или эквивалентными схемами). Далее по идеальной цепи строится монолитная интегральная (МИ) цепь, при этом каждый идеальный пассивный элемент заменяется моделью соответствующего МИ-элемента, учитывающей потери и паразитные явления. По известным электрическим параметрам идеальных элементов осуществляется автоматический расчет геометрических размеров МИ-элементов, эти размеры служат параметрами моделей МИ-элементов. Таким образом, параметры моделей элементов МИ-цепи оказываются связанными с величинами элементов идеальной цепи.

На экране компьютера вместе с ОДЗ отображаются одновременно два взаимосвязанных годографа – идеальной цепи и соответствующей ей МИ-цепи. Пользователь, управляя формой годографа идеальной цепи, добивается попадания в ОДЗ точек годографа монолитной цепи. Таким образом, учитывается влияние потерь и паразитных параметров в МИ-элементах.

Для осуществления «визуального» проектирования монолитных СЦ была осуществлена интеграция программы LOCUS и среды Microwave Office (MWO). Это позволило использовать встроенные в MWO модели МИ-элементов и алгоритмы моделирования, а также отображать в режиме реального времени изменение топологии и характеристик монолитной СЦ при варьировании элементов идеальной цепи-прототипа.

Учет влияния температуры на пассивные и активные элементы. Новая версия программы LOCUS реализует предложенную в [8] «визуальную» методику проектирования КЦ с учетом влияния температуры на пассивные и активные элементы. Программа позволяет отображать одновременно N семейств ОДЗ $E_k^{(n)}$ и N годографов КД $Z(j\omega)^{(n)}$ для N заданных значений температуры $T^{(n)}$ ($n = \overline{1, N}$). По расположению ОДЗ пользователь выбирает структуру КД из библиотеки, в этом случае при варьировании элементов КД указанные N годографов будут синхронно изменяться. Далее пользователь путем интерактивного изменения элементов цепи должен добиться попадания всех N годографов $Z(j\omega)^{(n)}$ на частотах ω_k в нужные семейства ОДЗ $E_k^{(n)}$.

3. Пример: проектирование согласующей цепи. В качестве примера рассмотрим решение известной задачи Фано [9]: синтезировать реактивную цепь для согласования трехэлементной RLC -нагрузки (рис. 1) с резистивным сопротивлением генератора в полосе частот $f = 0,5 \dots 5$ ГГц (в задаче Фано для большей наглядности элементы нагрузки денормированы к уровню импеданса $Z_0 = 50$ Ом и частоте $2\pi \cdot 5 \cdot 10^9$ Гц). Значения элементов нагрузки: $L_L = 3,66$ нГн, $C_L = 0,76$ пФ, $R_L = 50$ Ом. В рассматриваемом случае сопротивление генератора R_S может варьироваться для улучшения характеристик цепи.

Цепь характеризуется следующими параметрами: m_{\max} – максимальное значение модуля коэффициента отражения в полосе согласования; $G_{\min} = 1 - m_{\max}^2$ – минимальное значение коэффициента передачи по мощности СЦ в полосе согласования; $\Delta G = (G_{\max} - G_{\min}) / G_{\min}$ – неравномерность частотной характеристики передачи мощности, где G_{\max} – максимальная величина коэффициента передачи в полосе согласования.

Поставим задачу спроектировать СЦ, которая в заданном диапазоне частот обеспечивает величину модуля коэффициента отражения m не более 0,4 (т.е. $m \leq m_{\max} = 0,4$). Это соответствует минимальному уровню передачи по мощности $G_T \geq G_{\min} = 0,84$.

Вид главного окна программы LOCUS показан на рис. 2. На экране размещаются следующие графические и диалоговые окна:

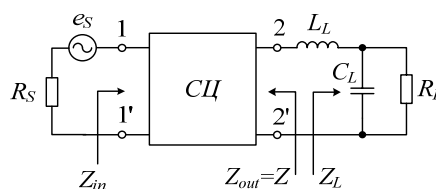


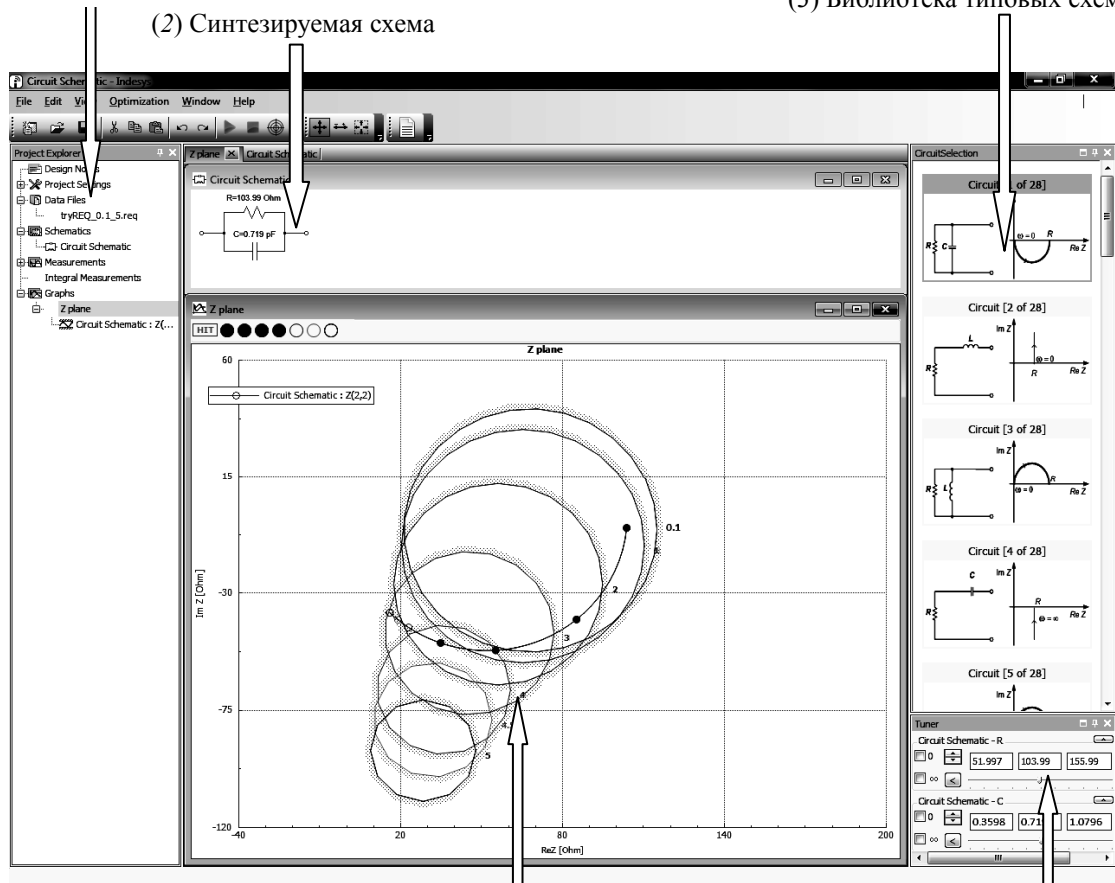
Рис. 1. Задача синтеза реактивной СЦ

- Дерево проекта (1), на котором расположены все необходимые инструменты управления процессом проектирования.
- Окно Circuit Schematic (2) отображает схему проектируемой цепи.
- Окно Circuit Selection (3) для выбора структуры цепи.
- Основное графическое окно (4), в котором отображаются ОДЗ и годограф проектируемой цепи.
- Панель тюнеров Tuner (5) для управления величинами элементов цепи.

(1) Дерево проекта

(2) Синтезируемая схема

(3) Библиотека типовых схем



(4) Комплексная плоскость импеданса, адмитанса или коэффициента отражения цепи

(5) Тюнеры

Рис. 2. Главное окно программы LOCUS

На первом этапе вводятся исходные данные: значения максимального (G_{\max}) и минимального коэффициента (G_{\min}) передачи по мощности СЦ в дБ, а также значения вещественной и мнимой частей сопротивления нагрузки ($\text{Re}Z_L$, $\text{Im}Z_L$) на фиксированных частотах полосы согласования. Ввод данных происходит либо вручную, либо с помощью файлов, предварительно сгенерированных в текстовом редакторе.

После ввода данных программа LOCUS вычисляет ОДЗ на заданной плоскости и отображает их в главном окне (рис. 3).

Следующим шагом является выбор структуры СЦ. Он осуществляется путем сравнения формы годографа цепей на плоскости комплексного сопротивления или проводимости, представленных в библиотеке типовых схем (панель Circuit Selection), с расположением ОДЗ на этой же плоскости. Выбираются схемы, годограф которых предположительно может попасть в соответствующие ОДЗ на заданных частотах.

Для проектирования КЦ (СЦ) с числом элементов больше двух или трех последовательно или параллельно с исходной цепью включается дополнительный двухполюсник Z_{add} (см. рис. 3). В программе LOCUS он представляет собой последовательное соединение резистора R_{add} , конденсатора C_{add} и индуктивности L_{add} , значения которых известны. Форма годографа цепи с дополнительным

двухполосником может быть легко предсказана по годографу исходной цепи. Например, если дополнительный двухполосник включен последовательно, годограф сопротивления результирующей цепи получается путем смещения точек годографа исходной цепи параллельно оси абсцисс на величину дополнительного активного сопротивления и параллельно оси ординат на величину дополнительного реактивного сопротивления. Аналогично можно определить поведение годографа результирующей цепи на плоскости проводимости при параллельном включении дополнительного двухполосника.

Для дальнейшего расчета была выбрана цепь 10, в которой дополнительный двухполосник Z_{add} включен параллельно основной цепи. Введение дополнительной емкости C_{add} позволит сместить годограф вниз для верхних частот рабочего диапазона. Использование на входе цепи 10 параллельной емкости C_{add} логично также с той точки зрения, что первым элементом согласуемой нагрузки является последовательно включенная индуктивность L_L ; таким образом, вся цепь от генератора $R_S = R$ до активного сопротивления нагрузки R_L будет иметь структуру фильтра нижних частот. Естественно, что не только цепь 10 удовлетворяет нашему выбору. Можно выбрать другую цепь, направление годографа которой соответствует расположению ОДЗ на плоскости Z , это дает возможность получать различные структуры СЦ в процессе синтеза.

После того как определена структура СЦ, необходимо рассчитать параметры ее элементов, т.е. подобрать их значения таким образом, чтобы точки годографа на выбранных частотах полосы согласования попадали внутрь соответствующих ОДЗ.

Переходим к расчету элементов выбранной цепи 10. Начальные значения элементов параллельно включенного дополнительного двухполосника ($L_{add} = \infty$) таковы, что он не оказывает влияние на характеристики цепи. При этом СЦ содержит только два реактивных элемента: L и C . Попробуем сначала решить поставленную задачу согласования с помощью такой двухэлементной СЦ, не подключая дополнительный двухполосник Z_{add} . Цепь содержит всего один управляемый элемент – резистор R , который представляет собой резистивное сопротивление генератора, а реактивные элементы L и C вычисляются автоматически по расположению опорной точки.

Рассмотрение ОДЗ на плоскости импеданса показывает, что наименьший размер имеет допустимая область на верхней граничной частоте полосы согласования $f_U = 5$ ГГц. Поэтому возьмем опорную частоту, равную $f_{ref} = 5$ ГГц, и выберем значение импеданса цепи Z_{ref} (т.е. опорную точку годографа) в пределах ОДЗ для этой частоты. В панели *Tuner* будут отображаться значения L и C , автоматически вычисляемые для заданной начальной величины резистора $R = 50$ Ом и выбранной опорной точки.

Далее, изменяя величину резистора R и положение опорной точки в пределах ОДЗ для частоты 5 ГГц, попробуем добиться попадания других точек годографа в соответствующие ОДЗ. Можно убедиться, что при изменении резистора форма годографа также меняется, но годограф всегда будет проходить через выбранную расчетную точку на опорной частоте 5 ГГц.

В нашем случае видно (рис. 4), что при $R = 50$ Ом и сделанном выборе опорной точки все точки годографа уже попали в нужные ОДЗ, однако величина индуктивности L при этом получилась отрицательная: $L = -2,05229$ нГн. Изменение величины сопротивления R и другой выбор положения опорной точки не позволяют добиться желаемого результата: величина индуктивности все равно остается отрицательной, либо годограф выходит за пределы заданных ОДЗ. Это означает, что получить желаемое значение модуля коэффициента отражения $m \leq 0,4$ (или минимальное значение коэффициента передачи по мощности $G_{min} \geq -0,747$ дБ ($G_{min} \geq 0,84$)) в заданной полосе частот при использовании двухэлементной СЦ невозможно.

Усложним структуру СЦ, введя дополнительную параллельную емкость C_{add} , с этой целью укажем значения элементов дополнительного двухполосника $R_{add} = 0$, $L_{add} = 0$ (рис. 5). Теперь СЦ содержит три реактивных элемента (C_{add} , R и L), элементы R и C_{add} являются управляемыми, а значения L и C рассчитывается автоматически по заданной опорной точке.

Изменяя значения элементов R , C_{add} и положение расчетной точки Z_{ref} , попытаемся вновь добиться попадания точек годографа в соответствующие ОДЗ. Теперь это нам удастся (см. рис. 5), причем величины всех элементов СЦ получились неотрицательными.

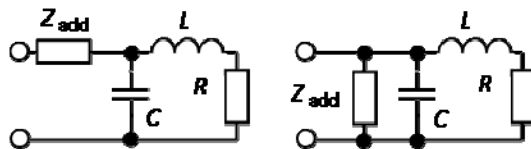


Рис. 3. Включение дополнительного двухполосника

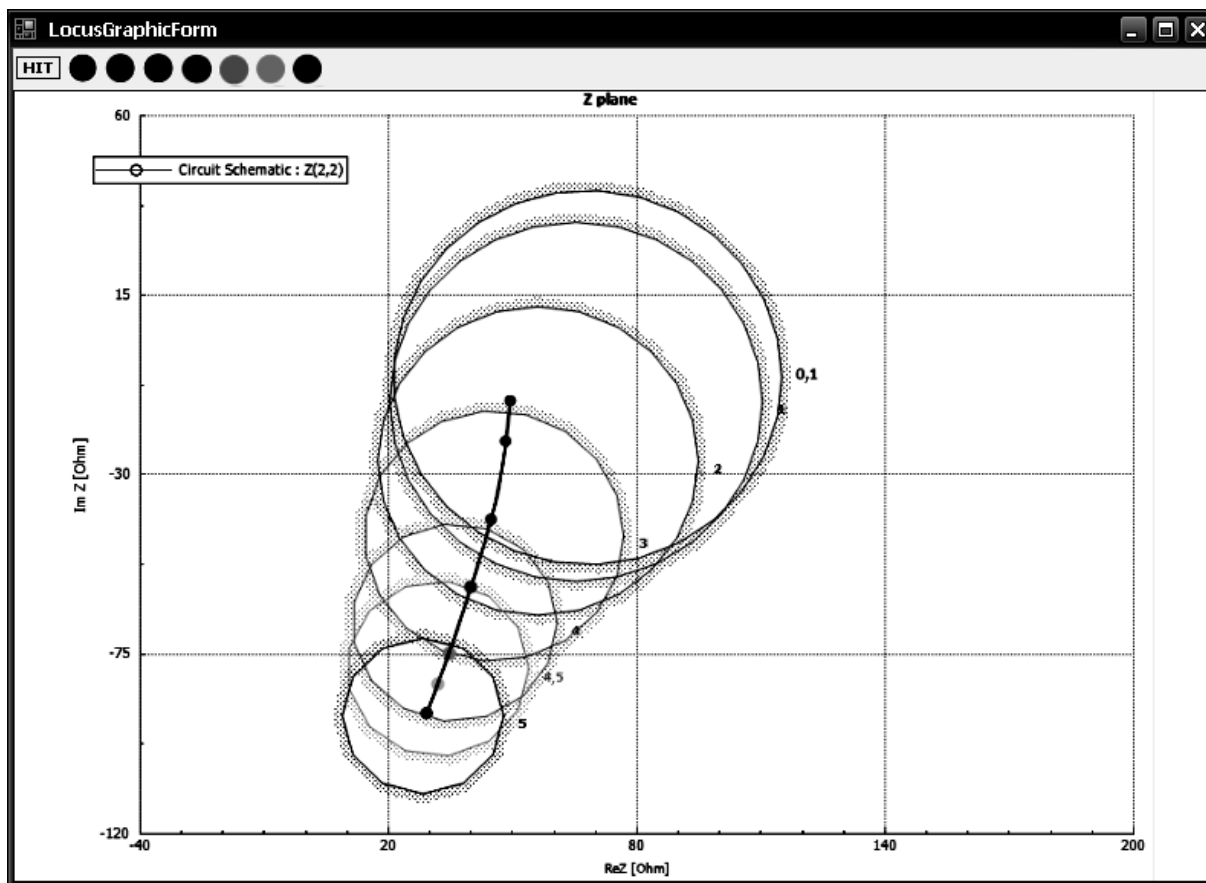
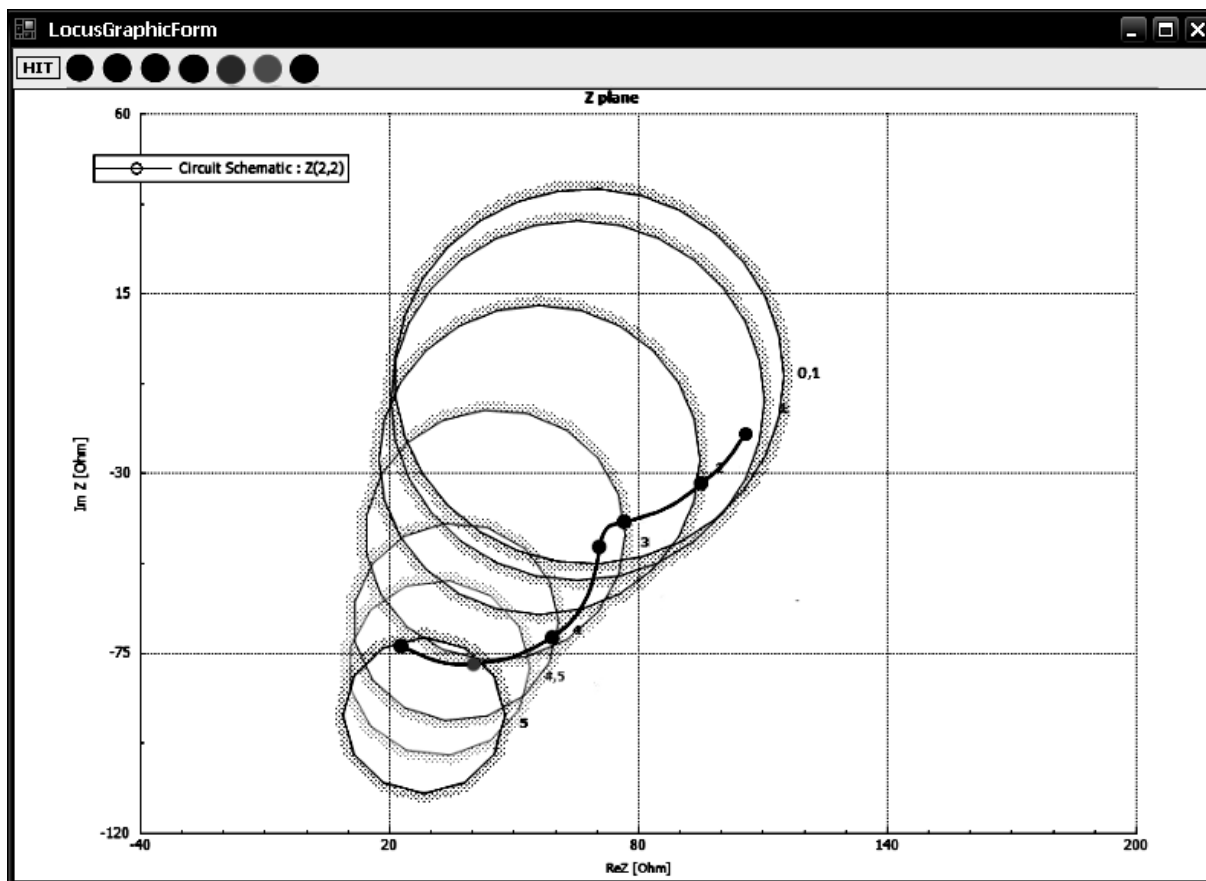
Рис. 4. Вид экрана программы Locus при расчете цепи 10 ($R = 50$ Ом)Рис. 5. Вид экрана программы LOCUS при расчете цепи 10 ($R = 110$ Ом, $C_{add} = 0,65$ пФ)

Схема синтезированной СЦ и частотная характеристика ее коэффициента передачи приведены на рис. 6.

Характеристики цепи следующие: $G_{\min} = 0,838$, $\Delta G = 0,111$, $m = 0,403$. Как видно, они практически удовлетворяют поставленным требованиям.

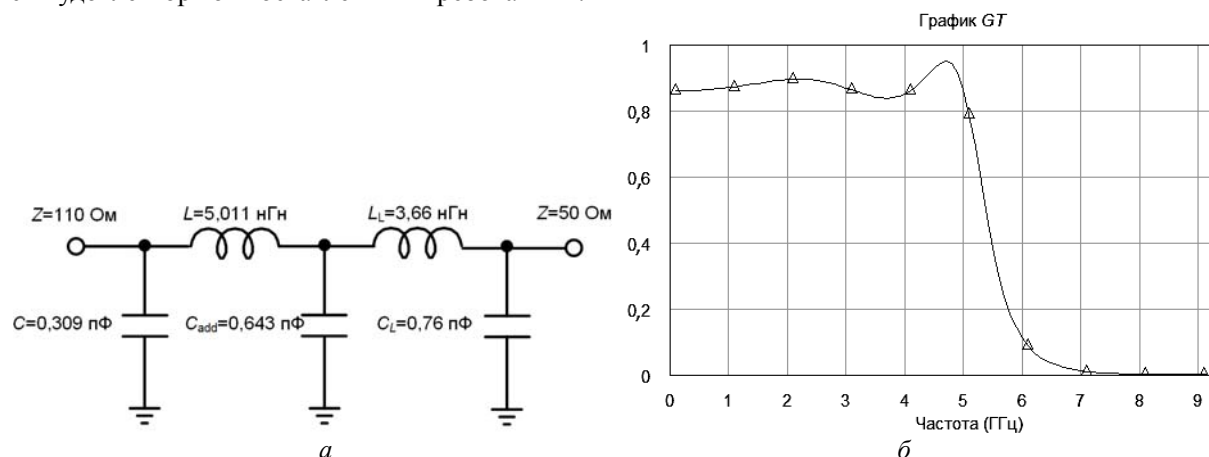


Рис. 1. Схема синтезированной СЦ (а) и частотная характеристика коэффициента передачи (б)

Заключение. Разработка программы LOCUS в среде Indesys позволила избавиться от недостатков предыдущих версий, описанных в данной работе. Новая версия имеет улучшенный настраиваемый пользовательский интерфейс. Более того, в новой версии программы реализованы «визуальные» методики проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах с использованием метода преобразования моделей, а также проектирования КЦ с учетом влияния температуры на пассивные и активные элементы. Быстро реализовать данные методики позволила гибкая архитектура среды Indesys, что подтверждает целесообразность ее использования для разработки как программы LOCUS, так и других программ синтеза.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261, 14.В37.21.0345), «Микроэлектроника» (П669, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136, 14.В37.21.0462) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Черкашин М.В. Автоматизированное проектирование транзисторных СВЧ-усилителей на основе декомпозиционного подхода: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2006. – 320 с.
2. Babak L.I. Interactive «visual» design of matching and compensation networks for microwave active circuits / L.I. Babak, M.V. Cherkashin // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. – Phoenix, AZ. – 2001. – P. 2095–2098.
3. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Ч. 1. Описание процедуры проектирования / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУР, № 6 (14). – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2006. – С. 11.
4. Babak L.I. Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. Vol. 2. Phoenix, AZ. – May 2001. – P. 1167–1170.
5. Разработка интеллектуальной системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств INDESYS / Л.И. Бабак, С.Ю. Дорофеев, М.А. Песков и др. // Доклады ТУСУРа. – Изд-во ТУСУРа, 2010. – №2 (22) – С. 93–96.
6. Бабак Л.И. Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей СВЧ-устройств / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // 15-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005): в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 423–424.
7. Бабак Л.И. Синтез СВЧ монолитных интегральных устройств на основе преобразования моделей пассивных элементов // 18-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь, 8–12 сентября 2008 г.: матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т. 1. – С. 129–130.

8. Добуш И.М. «Визуальная» методика проектирования корректирующих цепей СВЧ-усилителей с учетом температурных зависимостей параметров активного элемента / И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 90–98.

9. Фано Р. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов: пер. с англ.; под ред. Г.И. Слободенюка. – М.: Сов. радио, 1965. – 72 с.

Самуилов Александр Андреевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа

Тел.: 8-923-415-92-62

Эл. почта: samuilovaa@gmail.com

Samuilov A.A.

LOCUS software tool for «visual» design of correcting and matching networks based on Indesys environment

A LOCUS software tool is presented for the «visual» design of correcting and matching networks. It is developed on the basis of Indesys environment. Main advantages of new version of LOCUS compared to previous versions are described, and a feasibility of employing Indesys environment as a platform for the synthesis software development is discussed. In a new version, the «visual» design of MMIC correcting and matching networks based on model transformation method as well as the correcting networks' design with accounting for temperature influence on passive and active elements is implemented. As an example, a solution of Fano's task is demonstrated with using «visual» technique and new LOCUS software.

Keywords: «visual» design, LOCUS, Indesys, microwave, correcting network, matching network.
